

Л.1. Експеримент як складова частина процесу пізнання. Вакуум та його характеристики.

Вступ. Роль фізичного експерименту для розвитку науки і суспільства. Вакуум, його роль в у науці і техніці. Історія вакуумної техніки. Теоретичні основи вакуумної техніки. Явища переносу.

Людині притаманний інтерес до навколишнього світу. Справді, з різних джерел ми багато чого знаємо. Наприклад, що Земля не плоска, як ми начебто бачимо навкруги, а куляста з радіусом близько 6,5 тис. км. На іншому "кінці" розмірів ніколи не бачені безпосередньо людиною ядра атомів, які, як нам відомо, складаються з протонів і нейтронів, а їх радіус складає мізерну, з побутової точки зору, величину 10^{-13} см. Гравітаційна або кулонівська взаємодії згасають обернено пропорційно квадрату відстаней між тілами або зарядами. В нашій Галактиці приблизно $2 \cdot 10^{11}$ зірок, а температура на поверхні Сонця оцінюється в 6000°C . Ці прості відомості є лише малою частиною тисяч інших, причому абсолютно різних. А всі вони разом утворюють упорядковану, для розуміючих їх, мозаїку, що зветься *фізичною картиною світу*. Але нескінченна різноманітність спостережуваних і принципово дозволених для реалізації природних і штучних ефектів базується на скінченній і досить невеликій кількості основоположних принципів, що зветься *законами*. У цьому й полягає гармонія навколишньої природи. Закон визначає загальні, суттєві, стійкі і повторювані зв'язки між явищами або властивостями об'єктів. Ці закономірні зв'язки існують у самій природі, людина здатна лише їх пізнавати і надалі використовувати у своїй практичній діяльності. Закони природи об'єктивні. Основне завдання фізики і тепер не змінилося – побудувати єдину теорію, яка б в ідеалі містила фундаментальні рівняння, що описують усі відомі факти, і правильно передбачала б нові.

Постає питання: а звідки ми це знаємо і чому так упевнені, що все відбувається саме так, як стверджує фізика? Скажімо, що в ядрі гелію два протони і два нейтрони, що Земля за формою подібна кулі, що рівняння Максвелла описують електромагнітні хвилі і багато чого ще. Кожний відповідь – з *експериментів*, які люди давно почали проводити, відмовившись від простого споглядання явищ і замінивши їх спеціально поставленими, свідомими лабораторними дослідженнями. *Експеримент* з латинської – *дослід, проба*. Вже давно людство дійшло висновку, що пізнання природи можна і треба робити за схемою: *спостережуване явище → можливе пояснення → висновки і передбачення → лабораторний експеримент → повна теорія.*

Фізика – природнича наука. Природу можна пізнавати лише дослідно, а тому фізика – наука експериментальна. Основою будь-якої науки є її теорії. Фізичні теорії ґрунтуються на фундаментальних фізичних експериментах. Здавалося б, усе просто, і ланцюжок послідовних дій зрозумілий і виконуваний. Але так здається лише на перший погляд, і є приклади, коли час від початку до кінця вивчення певної проблеми забирав століття. Найвідоміший – загальний устрій Всесвіту, схему якого деякі мислителі почали пропонувати задовго до нової ери літочислення, відколи стала панівною Птолемеєва, або геоцентрична, система. За нею, центром світу була нерухома планета Земля, а навколо неї "літали" Сонце та інші планети. Але під натиском подальших спостережень виникали серйозні складнощі, коли передбачення про положення небесних тіл на сферичноподібному небосхилі не узгоджувалися зі спостереженнями. Саме це змусило Коперніка у середині XVI ст. відмовитись від геоцентричної моделі і висунути принципово іншу – геліоцентричну. В її становленні вирішальну роль зіграв саме експеримент.

Експеримент - це метод вивчення об'єкта, який пов'язаний з активним і цілеспрямованим втручанням дослідника в природні умови існування предметів і явищ

або створенням штучних умов, необхідних для виявлення його відповідної властивості. Експеримент, зазвичай, проводиться за допомогою відповідних приладів та установок (спеціального обладнання). Він лежить в основі експериментального методу пізнання, за допомогою якого в контрольованих і керованих умовах досліджуються явища об'єктивної дійсності. Експеримент як одна з форм практики є основою фізичних теорій і виконує функцію критерію істинності наукового пізнання. Прикладом сказаного є дослідження за допомогою великого адронного колайдера. Основною метою його будівництва було уточнення або спростування Стандартної моделі - теоретичної конструкції у фізиці, яка описує елементарні частинки і три з чотирьох фундаментальних взаємодій: сильну, слабку і електромагнітну, за винятком гравітаційної. Формування Стандартної моделі було завершено в 1960-1970-х роках, і всі зроблені з тих пір відкриття, на думку вчених, описувалися природними розширеннями цієї теорії. При цьому Стандартна модель пояснювала, яким чином взаємодіють елементарні частинки, але не відповідала на питання, чому саме так, а не інакше. У липні 2012 р. було оголошено про виявлення за допомогою колайдера частки, яка з високою ймовірністю представляла собою бозон Хігса - його існування підтверджувало правильність Стандартної моделі будови речовини від найпростіших фундаментальних частинок до Всесвіту.

За роки розвитку фізики було проведено багато експериментів. З загальних курсів фізики можна уявити їх кількість. Але серед них завжди є *experimentum cricis* (лат.) – *вирішальні, фундаментальні*, постановка яких дала відповіді на глибинні питання свого часу. Залежно від наукової та технічної значущості їх ролі для розвитку науки дані експерименти можна умовно розділити на п'ять груп, три з яких безпосередньо торкаються базової науки, а дві – прикладних областей науки і техніки.

1. *Експерименти, які стали емпіричним базисом у виявленні фізичних законів і становленні наукових теорій.* У механіці, наприклад, такі експерименти проводив Г. Галілей, з молекулярної фізики – Р.Бойль, Е.Маріотт, в електродинаміці – Ш.Кулон, Г.Ом, Х. Ерстед, А.-М. Ампер, у квантовій фізиці – Дж. Томсон, О.Столетов, А.Беккерель, Е.Резерфорд. Відкриття радіоактивності солей урану А.Беккерелем в 1895 р. було початком створення теорії будови атомного ядра. Такі експерименти, проведення яких призводить до створення нових теорій, складають фундамент фізичної теорії, і тому логічно їх назвати *фундаментальними*. Сюди ж можна віднести досліди, що підтвердили вже створені фізичні теорії, що стали експериментальною перевіркою істинності законів. Такі експерименти відіграють суттєву, вирішальну роль в подальшому розвитку науки. Наприклад, досліди А.Майкельсона і Е.Морлі остаточно довели неправомірність уявлень про світовий ефір; досліди Дж.Франка і Г.Герца - підтвердили дискретність атомних рівнів, досліди К.Девіссона і Л.Джермера - довели правомірність гіпотези де Бройля.

2. *Експерименти, які дозволили виявити фізичні явища, що отримали в подальшому широке застосування у науці та техніці, побутовому житті.* Це, наприклад, експерименти Л.Гальвані (електричний струм), Х.Ерстеда (магнітна дія струму), В.Рентгена (рентгенівське випромінювання) та ін.

Численна група історичних дослідів, в результаті яких люди дізнаються про нові фізичні явища, які або не помічали в процесі спостережень (оскільки фізичні явища рідко протікають незалежно одне від одного, а частіше виявляються нерозривно пов'язаними) або не могли спостерігати без спеціально створених для цього умов. Як приклад, відкриття броунівського руху в 1827 р. На перших порах це відкриття не вплинуло на розвиток молекулярно-кінетичної теорії, оскільки, ще довгий час багато вчених не визнавали молекулярно-кінетичної гіпотези. Лише після створення теорії броунівського руху А.Ейнштейном і М.Смолуховським в 1905 р. і проведення дослідів Ж.Перреном в 1908-1911 рр. молекулярно-кінетична теорія була визнана всією науковою громадськістю.

3. *Експерименти, на основі яких були створені нові експериментальні методи:* метод атомних і молекулярних пучків (О.Штерн), метод схрещених полів (Дж.Дж.Томсон), спектроскопічний метод (Р.Бунзен, Г.Кірхгоф), метод

рентгеноструктурного аналізу (В.Рентген, М.Лауе), метод мічених атомів (І. та Ф.Жоліо-Кюрі), голографічний метод (Д.Габор, Ю.Денисюк, Е.Лейт) та ін. Дані методи знайшли застосування не лише у фізиці, але і в хімії, медицині, біології, техніці, сільському господарстві, тощо.

4. *Експерименти, які лягли в основу промислового виробництва, найважливіших напрямків науково-технічного прогресу.* Можна відмітити експерименти з електромагнітної індукції (електроенергетика), вимушене випромінювання (лазерна технологія), поділ важких ядер урану (ядерна енергетика) тощо. Наука не тільки живить вічне прагнення людства до пізнання, але і дає можливість застосовувати наукові знання для задоволення практичних потреб людини. Наука є основою технічного прогресу. Тому наукові експерименти не менш важливі для конструювання нових установок, які використовуються в подальших наукових дослідженнях, для створення нових матеріалів та для розробки способів технічного застосування уже відкритих фізичних явищ. Так створення просвічуючого електронного мікроскопа (нім. інженери М.Кноль та Е.Руска у 1931 р.) стало можливим завдяки завершенню ряду експериментальних досліджень у фізиці, а саме: 1) відкриття Дж.Томсоном у 1897 р. явища відхилення електронного пучка магнітним та електричним полями; 2) визначення заряду та маси електрона Р.Міллікеном у 1913 р.; 3) встановлення залежності маси електрона від його швидкості, що було отримано В.Кауфманом у 1901 р., А.Ейнштейном у 1905 р. та Г.Лоренцом у 1916 р.; 4) відкриття дифракції повільних (К.Девіссон і Л.Джермер) та швидких (Дж.Томсон і А.Рейд) електронів у 1927 р.; 5) створення магнітної лінзи Х.Бушем у 1926 р.

5. *Експерименти, за допомогою яких були розраховані фізичні константи:* швидкість світла у вакуумі, гравітаційна стала, елементарний електричний заряд, число Авогадро, стала Планка тощо, які грають велику роль у фізиці. Вчені прагнуть з більшою точністю визначити значення цих особливих величин. Від їх значення іноді залежить “доля” теоретичних уявлень про важливі і складні явища. Класичним прикладом експериментів з даної групи є визначення значення гравітаційної постійної (Г.Кавендиш).

Однією з ознак експерименту є створення спеціальних умов, які дають можливість вивчати досліджуване явище і відтворювати його кожного разу при повторенні цих умов. Без сумніву розвиток фундаментальної та прикладної фізичної науки неможливий без створення вакуумних умов, тобто таких, при яких із певного об'єму і стінок, що його обмежують, а також із об'єктів всередині видалені гази. Хоча перший насос для отримання розрідження був створений в XVII ст., активне використання вакууму у експериментах почалося з кінця XIX ст., з відкриттям термоемісії електронів і фотоефекту. Народження та розвиток атомної фізики і квантової механіки стимулював фізиків застосовувати вакуумне обладнання на шляху до правильного пізнання, правильних поглядів на світобудову і природу речей.

Пріоритетні напрямки сучасної фізики, а саме експериментальні дослідження фізики елементарних частинок, випаровування і конденсації, поверхневих явищ, теплових процесів, низьких температур, термоядерних реакцій, створення наноструктур здійснюються у вакуумних установках.

Що стосується самої вакуумної техніки, то в даний час вона, виділилася з фізики і стала самостійною дисципліною, яка вивчає фізико-хімічні процеси в газах за низьких тисків, питання отримання, збереження і вимірювання вакууму. Вакуумна техніка визначається як розділ фізичних наук і техніки, що забезпечує теоретичну і експериментальну базу для досліджень, здійснюваних в розрідженому газі або середовищі з низькою ентропією. При такому визначенні вакуумна техніка, як навчальна дисципліна, реально набуває статусу міждисциплінарної.

1. ВИЗНАЧЕННЯ ВАКУУМУ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Вакуум, його роль в у науці і техніці.

Слово “вакуум” у перекладі з латинської означає “пустота”, “порожнеча”. Розрізняють поняття фізичного вакууму і технічного вакууму.

Під *фізичним вакуумом* в сучасній фізиці розуміють повністю позбавлений речовини простір. Це ідеалізована абстракція. Навіть якби вдалося отримати цей стан на практиці, він не був би абсолютною порожнечою. Квантова теорія поля стверджує, що, у згоді з принципом невизначеності, у фізичному вакуумі постійно народжуються і зникають віртуальні частинки: відбуваються так звані нульові коливання полів. У деяких теоріях поля вакуум може володіти нетривіальними топологічними властивостями, а також в теорії можуть існувати різні вакууми, що розрізняються щільністю енергії тощо.

Технічним вакуумом або просто *вакуумом* називають стан газу за тиском нижче атмосферного. Ясно, що таких станів газу може бути багато, тому умовно вакуум поділяють на такі ступені: низький, середній, високий і надвисокий. Проблеми отримання і підтримки технічного вакууму, здійснення вакуумних вимірів, а також питання розроблення, конструювання і застосування вакуумних систем та їх функціональних елементів є предметом вивчення *вакуумної техніки (ВТ)*.

Фізичні дослідження та технологічні процеси проводяться у вакуумних умовах з двох основних наступних причин: 1 - забезпечення руху частинок і молекул, вільного від зіткнень з молекулами або атомами газів або іншими частками; 2 - отримання дуже чистих поверхонь, вільних від адсорбованих газів (знегажена поверхня залишається чистою довше, чим вище вакуум).

Галузі використання вакуумної техніки. У сьогодення важко знайти таку галузь науки і техніки де не застосовувалися б досягнення вакуумної техніки. З кінця минулого сторіччя до наших днів головною сферою застосування ВТ є електронна техніка. В електронно-вакуумних приладах вакуум є конструктивним елементом і обов'язковою умовою функціонування пристроїв на протязі довгого часу. Низький і середній вакуум використовується у освітлювальних приладах і газорозрядних приладах. Високий вакуум — у приймально-підсилюючих та генераторних лампах. Найбільш високі вимоги до вакууму пред'являються при виробництві електронно-променевих трубок та надвисокочастотних приладів. Для роботи напівпровідникових приладів наявність вакууму не потрібна, але в процесі їх виготовлення широко застосовується ВТ. Особливо широко ВТ застосовується при виготовленні мікросхем, де процеси нанесення тонких плівок, іонного травлення, електронної літографії забезпечують отримання елементів електронних схем субмікронного розміру. В останні роки розвиваються методи синтезу наноструктурованих матеріалів, які можуть бути здійснені лише в умовах вакууму.

В енергетиці застосування ВТ, перш за все, пов'язано з проблемою керованого термоядерного синтезу. Усі теперішні проекти таких реакторів передбачають наявність вакуумної камери.

Дуже багато прикладів застосування вакуумної техніки у металургії, а саме у отриманні надчистих матеріалів. Виплавлення металів у вакуумних умовах звільняє їх від газів, які розчинені у них. Завдяки цьому метали набувають високої механічної міцності, пластичності та в'язкості. Плавленням у вакуумі отримують безвуглецеві сорти сталі для електродвигунів, мідь високої електропровідності, магній, кальцій, тантал, платину, титан, цирконій, берилій, рідкісні метали та їх сплави. Спінання у вакуумі порошків тугоплавких металів (вольфрам і молібден) є одним з основних процесів у порошковій металургії. Надчисті речовини виготовляються у вакуумних кристалізаційних установках. Штучні кристали алмазів, рубінів, сапфірів отримують із застосуванням ВТ.

Дифузійне зварювання у вакуумі дозволяє створити нероз'ємні герметичні з'єднання матеріалів із дуже різними температурами плавлення. Таким чином з'єднують кераміку з металом, сталь з алюмінієм та інше. Високоякісне з'єднання матеріалів з однорідними властивостями забезпечує променеве зварювання у вакуумі.

У хімічній промисловості використовують вакуумні сушильні апарати при виготовленні синтетичних волокон, поліамідів, амінопластів, поліетилену, органічних

розчинників. Вакуум-фільтри використовуються при виробництві целюлози, паперу, мастил. У виробництві фарб і мінеральних добрив використовують вакуумні кристалізаційні апарати.

Вакуумні кристалізаційні та дистиляційні установки використовуються для виробництва цукру, синтетичних гормонів, вітамінів, лікувальних сироваток і отримання багатьох цінних продуктів. Консервування харчових продуктів з збереженням їх смакових і поживних властивостей уже давно є сферою застосування ВТ. Отримання анатомічних і бактеріологічних препаратів здійснюється також у вакуумних умовах.

Не так давно з'явився новий термін — вакуумні та вакуумноплазмові технології. Спектр використання - від легкої промисловості (створення різноманітних покриттів), до оптичної (виготовлення дзеркал, фільтрів, лінз).

Природно значна роль належить ВТ у наукових дослідженнях. Без неї стає неможливим розвиток ядерної фізики, фізики плазми, матеріалознавства та інших галузей сучасної науки. З отриманням надвисокого вакууму в камерах імітації стало можливим вивчення різних аспектів поведінки космічних апаратів у земних умовах. Засоби вакуумної техніки в сучасній експериментальній фізиці забезпечують роботу електрофізичних приладів і установок, в яких здійснюється рух пучків заряджених частинок. Лише у надвисокому вакуумі можливі дослідження фізичних властивостей поверхонь твердих тіл, а також дослідження, що вимагають отримання газів високої чистоти. Вирішення багатьох складних проблем науки і техніки вимагає досягнення тиску 10^{-10} Па і нижче, а також вимірювання такого тиску. Для цього необхідні досконалі вимірювальні прилади, високочутливі методи перевірки герметичності і створення достатніх ущільнень в апаратурі для надвисокого вакууму, підготовка і очищення поверхонь відкачуваних об'ємів, яка виключає виділення цими поверхнями забруднювальних газів. Вакуум для фізиків дав майже все, що відомо про елементарні частинки і про поверхню твердого тіла. І дасть, напевно, ще багато потрібного і цікавого.

1.2. Історія вакуумної техніки.

Вона починається з перших спроб людини отримати деяке розрідження газу. У першому віці до н.е. з'явилися перші насоси, які були спроможні створювати невеличкі розрідження (шприц Герона, водяний насос Ктзебія). Але роботи по вивченню властивостей вакууму були заборонені церковною владою. Наприклад, у рішенні Парижського Собору під головуванням абату Темп'є стверджувалося, що «порожнеча може бути створена тільки могутньою владою божою». До середини XVII сторіччя поняття «вакуум» використовувалося лише у філософії та теології. Давньогрецький філософ Демокрит вважав, що одним із «початків світу» є порожнеча. Пізніше Аристотель впроваджує поняття ефіру - невідчутного середовища, але спроможного передавати деякі фізичні впливи. Слід зауважити, що у цей час вакуум широко використовували у водопідійомних та пневматичних пристроях, але мабуть, цього на той час було досить.

Науковий етап у розвитку ВТ розпочав видатний вчений *Галілео Галілей*, який підрахував «силу боязні порожнечі» із факту неможливості підйому води на висоту більшу ніж 10 м незалежно від діаметра труби. У 1643 році учень Галілея *Еванджелісто Торрічеллі* відкрив, що атмосфера створює тиск, який дорівнює тиску стовпа ртуті заввишки лише у 760 мм. Для отримання безповітряного простору Торрічеллі заповнив ртуттю тонку скляну трубку із запаяним кінцем, а потім опустив трубку відкритим кінцем униз в посудину, куди могла вилити ртуть. Як наслідок ртуть у трубці опустилася, а над нею утворився порожній простір. Простір над ртуттю, по уяві Торрічеллі, був «абсолютною порожнечою». Тепер ми знаємо, що цей простір, заповнений паром ртуті, яка має при нормальній температурі тиск $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па. Запропонований Торрічеллі принцип використовується у ртутних барометрах, оскільки рівень ртуті в трубці залишається таким, щоб зрівноважити атмосферний тиск.

Приблизно в цей же час *Отто Геріке* винайшов перший механічний повітряний насос (рис.1.1), та провів знаменитий дослід із Магдебургськими півкулями (1650 р.).

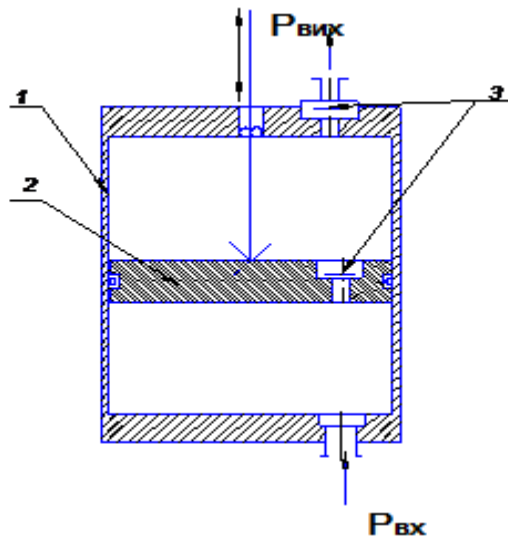


Рис.1.1. Перший (поршневий) вакуумний насос: 1-корпус;2-поршень; 3-тарільчасті клапани.

Також Геріке вперше вияснив, що вакуум не проводить звуку і що горіння у ньому припиняється. Але слід зауважити, що до XIX сторіччя практичне використання вакууму обмежувалося лише пристроями для відкачки води з колодязів. У XIX сторіччі була проведена низка досліджень, які заклали фізичний фундамент ВТ. Це, наприклад, дослід французького хіміка *Жана Батиста Дюма*, який досяг пониження тиску у посудині, заповнюючи її водяною парою, яку потім сконденсував охолодженням. Німецький хімік *Роберт Вільгельм Бунзен*, творець відомого «бунзеновського пальника», здійснив відкачку газу струменем рідини, що швидко витікала. У 1850 р. *Август Теплер* винайшов ртутно-поршневий насос, у 1855 р. *Генріх Гайслер* отримав за допомогою ртутного насоса тиск 0,01 Торр, а у 1865 р. *Германн Шпренгель* створив насос, названий його іменем. Удосконалення конструкції насосів у середині XIX ст. відкрило шлях до створення вакуумних ламп. Але ці та інші досягнення вчених та інженерів були впроваджені лише у наукових дослідженнях, бо ще не існувало галузей виробництва, які б потребували використання ВТ.

У спеціальну дисципліну ВТ почала формуватися наприкінці XIX та на початку XX віків. У цей час винахід першої електричної лампи з вугільним електродом *О.Лодигінім* (1873 р.), відкриття термоелектронної емісії *Т.А. Едісоном* (1883 р.), відкриття *Г.Герцем* фотоелектричного ефекту не тільки збільшили знання у галузі використання розріджених газів, але призвели до стрімкого розвитку вакуумної техніки. На неї з'явилося соціальне замовлення. У 1884 році італієць *А.Малін'яні* вперше застосував у виробництві ламп накалювання зв'язування залишкових газів парою фосфору і тим самим поклав початок застосуванню різноманітних поглиначів, так званих *гетерів*. У 1904 році *Дж.Д'юар* розробив спосіб отримання вакууму шляхом поглинання газів активованим вугіллем, який охолоджувався рідким азотом (на цьому принципі побудовані сорбційні насоси).

Внесок у розвиток вакуумної техніки зробив *І.П.Пулюй*, оскільки вперше з'ясував роль сорбції газів у розряді: він виявив збільшення тиску за рахунок виділення газів електродів при збільшенні струму в розрядній трубці (принцип дегазації елементів вакуумної системи).

Історія розвитку механічних ("масляних") вакуумних насосів багато в чому зобов'язана німецькому інженеру *В.Геде*, який в 1911 році сконструював два типи механічних обертальних насосів (пластинчато-роторний і пластинчато-статорний). Ці пристрої стали великим кроком уперед. Вони дозволили отримувати граничний тиск біля 10^{-2} Па. Далі *В.Геде* розробив молекулярний (1912 р.) та ртутний дифузійний (1913 р.) насоси, які практично без істотних змін використовуються до теперішнього часу.

Паралельно з розробкою вакуумних насосів здійснювалося створення техніки вимірювання низького тиску. Вже у 1874 році *Г.Мак-Леодом* було розроблено компресійний манометр, який суттєво розширював нижню границю вимірювання тиску рідинними манометрами. У 1909 р. *М. Пірані* було створено тепловий, а у 1916 р. *О.Баклі* - іонізаційний манометри.

Успіхам розвитку ВТ сприяли чисельні теоретичні та експериментальні роботи; особливо слід визначити роботи, які проведені на початку ХХ сторіччя *американськими вченими І.Ленгмюром та С. Дешманом, англійцем Н.Кемпбелом і датським фізиком М.Кнудсенем*. За радянських часів розвиток і ВТ зв'язано з ім'ям академіка *С.Векишинського*, який організував у 1928 році у Ленінграді на електровакуумному заводі «Світлана» вакуумну лабораторію, а потім очолив науково-дослідний інститут у Москві.

Великий вклад в розвиток вакуумної техніки внесла група харківських учених під керівництвом *Б.Г.Лазарева та К.Д.Синельникова*. Під керівництвом Лазарева в 1945–1950 рр. було створено перші у світі криогенні насоси. Криогенні насоси почали використовувати спочатку у наукових дослідженнях, а згодом у виробництві. Групою Синельникова в 1936–1941 рр. розроблені перші вітчизняні дифузійні паромасляні насоси.

Для отримання надвисокого вакууму винаходяться насоси, які працюють на інших фізичних принципах: турбомолекулярний (*Беккер*, 1958 р.), магніторозрядний (*Джепсен і Холанд*, 1959 р.). Надалі вдосконалюється техніка вимірювання низького тиску. Для цього почали використовувати аналізатори парціального тиску, за допомогою яких визначали не тільки тиск, а й склад та кількість кожної компоненти залишкового газу. Надвисоковакуумні системи вимагали для забезпечення їх надійного монтажу і експлуатації розробки чутливих методів визначення натікань у вакуумних системах. Були розроблені методи: мас-спектрометричний, галоїдний та ін. Для зниження газовиділення конструкційних матеріалів запропоновано прогрів усієї вакуумної установки.

Отже, до початку ХХ ст. ВТ використовувалася лише у наукових дослідженнях і тому її розвиток був повільним. Прискореними темпами вона почала розвиватися при появі відповідної потреби в промисловості. *Перший етап* розвитку ВТ це виробництво перших масових вакуумних приладів – електричних ламп. *Другий етап*, пов'язаний з початком ери електровакуумних приладів: електронних ламп, електронно-променевих трубок та ін. *Третій етап* обумовлений швидким розвитком мікроелектроніки. Активний розвиток сучасних високотехнологічних галузей сильно впливає на розвиток ВТ в наші дні. У червні 1958 р. у Бельгії відбувся перший Міжнародний конгрес із вакуумної техніки, рішенням якого було створення Міжнародної спільноти з вакуумної фізики і вакуумної техніки. Сьогодні вакуумна техніка постає відокремленою сферою людської діяльності, зі своєю академічною спільнотою, виробництвом, стандартами і ринками збуту вакуумної продукції і технологій, журналами, виставками та конференціями, термінологією тощо.

1.3.Теретичні основи вакуумної техніки.

Стан газу, при якому його тиск нижчий від атмосферного, називається *вакуумом*. Будь-який стан газу характеризують тиском, температурою і об'ємом. Зміна будь-якого з цих параметрів відповідає новому стану газу.

Розріджені гази за своїми властивостями практично не відрізняються від ідеального газу. Ідеальним називається газ, молекули якого вважають матеріальними точками і взаємодією між ними нехтують. Основні постулати, які використовуються у фізиці вакууму:

- газ складається з окремих молекул;
- існує сталий розподіл молекул за швидкостями, тобто одну й ту саму швидкість завжди має однакова кількість молекул;
- при русі молекул газу не існує ніяких переважних напрямків, тобто простір газових молекул ізотропний;
- температура газу є мірою середньої кінетичної енергії його молекул;

– при взаємодії з поверхнею твердого тіла молекула адсорбується.

З механіки відомо, що тиском називають відношення сили, яка діє перпендикулярно до поверхні, до значення площі цієї поверхні:

$$p = \frac{F}{S} . \quad (1.1)$$

Тиск газу на стінки посудини обумовлений ударами молекул. Чим більша кінетична енергія поступального руху кожної молекули, тим більша сила, що виникає під час її удару об стінку. Крім того, чим більша концентрація молекул, тим частіше вони стикаються зі стінкою. Отже, тиск газу з позицій молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) є сумарним імпульсом сили, яка внаслідок теплового руху передається ударами молекул газу за одиницю часу на одиницю поверхні. Такий підхід дав можливість вивести основне рівняння МКТ ідеального газу, що має такий вигляд:

$$p = nkT, \quad (1.2)$$

де n – концентрація молекул; T – абсолютна температура газу; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана. Наслідком його є *закон Дальтона*: тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних (часткових) тисків його компонент:

$$p = \sum_{i=1}^N p_i . \quad (1.3)$$

Одиницею тиску в СІ є Паскаль (Па), що чисельно дорівнює 1 Н/м^2 . На практиці використовують ще й інші одиниці тиску: технічна атмосфера (ат), фізична атмосфера (атм), міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст. або Торр), бар. Вони пов'язані з Паскалем так: $1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$; $1 \text{ атм} = 1,033 \text{ ат} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $1 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ Торр} = 133 \text{ Па}$; $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

Наприклад, під тиском газу в 1 мм рт.ст. розуміється тиск, який створює стовпчик ртуті висотою 1 мм за умови, що густина ртуті дорівнює $\rho = 13595 \text{ кг/м}^3$, а прискорення вільного падіння $g = 9,80 \text{ м/с}^2$, тоді за формулою $p = \rho gh$ отримуємо рівність 1 мм рт. ст. = $133,3 \text{ Н/м}^2$.

За означенням вакууму відповідає тиск нижчий за 10^5 Па . Одержують такий вакуум за допомогою *вакуумних насосів*. При дуже малих тисках, які не можуть бути виміряні приладами, стан газу можна характеризувати кількістю молекул в одиниці об'єму - молекулярною концентрацією газу.

Нормальними умовами вважають тиск 10^5 Па і температуру 273 К . За цих умов 1 моль будь-якого газу займає об'єм $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (або 22,4 л), число молекул в одиниці об'єму становить $2,7 \cdot 10^{25}$ молекул/м³ (*число Лошмідта*). Відзначимо, що у ВТ доводиться мати справу не тільки з газами, але і з парою деяких речовин. Критерієм, за яким можемо судити, чи є речовина газом або парою, є його критична температура. *Критичною температурою* називається температура, вище якої речовина знаходиться тільки в газоподібному стані. Газом називається газоподібна речовина, якщо його температура вище критичної. Парою називається газоподібна речовина, якщо її температура нижче критичної. *Атмосферне повітря* - основна газова суміш, з якої має справу ВТ. Більшість складових повітря за нормальних умов є газами. При зниженні температури, наприклад до 77 К (температура поверхні вакуумних уловлювачів, охолоджуваних азотом), більшість складових повітря стає парою, і лише He, H₂ та Ne залишаються газами.

Газові закони. Якщо підставити в основне рівняння МКТ такі величини: $R = 8,31 \text{ Дж/моль К}$ - універсальна газова стала; m - маса газу; M -молярна маса, отримуємо рівняння Менделєєва- Клапейрона:

$$pV = RT m/M . \quad (1.4)$$

Це рівняння стану ідеального газу і воно є першим наближенням до стану реального газу; воно добре описує реальні процеси, що відбуваються з газом при невеликих концентраціях речовини і досить високих температурах. Наслідком рівняння Менделєєва-Клапейрона є газові закони для ізопроцесів:

1. Ізотермічний процес відбувається при постійній температурі ($T = const$) і незмінній масі ($m = const$). У цьому випадку одержуємо рівняння ізотерми ідеального газу $pV = Const$. Це рівняння виражає закон *Бойля - Маріотта*.
2. Ізобарний процес здійснюється в системі при сталому тиску ($p = const$) і незмінній масі ($m = const$). Рівняння ізобари виражає закон *Гей Люссака*, що має вигляд $V = Const \cdot T$
3. Ізохорний процес відбувається при сталому об'ємі ($V = const$) і незмінній масі ($m = const$). Експериментально було встановлено закон Шарля: $p = Const \cdot T$

Тиск атмосферного повітря суттєво залежить від висоти над рівнем моря. Ця залежність виражається *барометричною формулою*

$$p = p_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}, \quad (1.5)$$

де p - тиск на висоті h ; p_0 - тиск на поверхні Землі; m - маса молекули газу; g - прискорення вільного падіння; k - стала Больцмана; T - температура, яку вважають незмінною. Із (1.5) випливає, що тиск зменшується з висотою тим швидше, чим важчий газ і чим нижча температура. Тиск повітря на рівні моря, яке визначається висотою стовпа ртуті в барометрі, складає в середньому 760 мм рт. ст. Це так званий атмосферний тиск. На висоті 200 км тиск має порядок 10^{-6} Торр, на висоті 600 км – 10^{-9} Торр, а в космічному просторі, далеко від Землі і інших небесних тіл, тиск газів, пари і різних космічних частинок оцінюється в 10^{-14} - 10^{-15} Торр.

Середня довжина вільного пробігу молекул. Для оцінки вакуумних умов потрібно знати середню довжину вільного пробігу молекул. Молекули газу постійно зіштовхуються та безперервно змінюють напрямок свого руху й величину швидкості. Крім зіткнень зі стінками посудини, молекули газу при своєму хаотичному тепловому русі зіштовхуються одна з одною. Тому шлях, що проходить молекула, являє собою просторову ламану лінію, прямолінійні ділянки якої відповідають вільному шляху молекули. Оскільки рух молекул хаотичний, то ці прямолінійні ділянки шляху не однакові. Проте, завдяки наявності певного закону розподілу, можна запровадити поняття про середню довжину вільного пробігу молекул газу (СДВП) – тобто відстань, що проходить молекула між двома послідовними зіткненнями з іншою молекулою (але не з стінками посудини).

Так як молекули реальних газів мають кінцевий розмір, то середня довжина вільного шляху молекули повинна, очевидно, залежати від цих розмірів, а також від концентрації (молекулярної концентрації) газу. З кінетичної теорії СДВП виражається формулою:

$$\lambda_c = \frac{v_{aum}}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n d_m^2 (1 + C/T)}, \quad (1.6)$$

де v_{aum} - середня арифметична швидкість молекул; ν – число зіткнень молекули за одиницю часу; d_m – діаметр молекули; C – постійна величина, яка називається постійною Сезерленда, і дорівнює температурі, при якій (за умови $n = const$) СДВП молекул зменшується вдвічі порівняно зі значенням, що відповідає нескінченно високій температурі. Також при $T = const$ СДВП обернено пропорційна тиску (впливає з (1.2)).

Як видно з (1.6) λ_c обернено пропорційна молекулярній концентрації та ефективному поперечному перерізу молекули πd_m^2 . Множником $(1+C/T)$, отриманим експериментально, враховується зменшення ефективного діаметру молекули при підвищенні температури газу, у зв'язку з чим, середня довжина вільного шляху збільшується з підвищенням температури газу.

Позначивши через λ_{273} СДВП при $0^0 C$ ($273K$) можна отримати значення λ для будь-якої температури, якщо відома довжина вільного шляху для $0^0 C$:

$$\lambda_T = \frac{\lambda_{273}(273 + C)T}{(T + C)273}. \quad (1.7)$$

Значення λ_{273} і C – табличні (табл.1.1):

Табл.1.1.

Газ	λ_{273} (м) при $0^{\circ}C$ та 760 мм <i>рт. ст.</i>	C
азот	$5.99 \cdot 10^{-8}$	102,7
аргон	$6.35 \cdot 10^{-8}$	147,8
водень	$11.23 \cdot 10^{-8}$	82,8
кисень	$6.47 \cdot 10^{-8}$	136
повітря	$6.08 \cdot 10^{-8}$	124

Ступені вакууму. Тепер, коли ми ввели поняття тиску та середньої довжини вільного пробігу можна ввести кількісні характеристики, що описують вакуум. Інтенсивність перебігу фізико-хімічних процесів у вакуумі залежить від співвідношення між числом зіткнень молекул газу зі стінками посудини, що обмежують його, і числом взаємних зіткнень молекул. Тобто явища у газовому середовищі залежать від співвідношення між λ і d , де під d слід розуміти той характерний розмір посудини (об'єму), який відіграє *головну роль* в конкретному випадку, що розглядається.

Частота зіткнень між молекулами (згідно з (1.6)) обернено пропорційна середній довжині вільного пробігу і відповідно тиску. Зменшуючи тиск, можна досягти того моменту, коли λ стане порівняною, а потім і більше ніж характерна відстань d , наприклад, відстань між стінками посудини. Очевидно, що при $\lambda \gg d$ взаємні зіткнення між молекулами є зовсім незначними і тоді молекули по прямій лінії переміщуються від однієї стінки посудини до іншої. Зокрема, для труби безмежної довжини $d = D$, де D – діаметр труби; для двох нескінченних площин $d = 2D$, де D – відстань між площинами, а для сфери $d = 2/3D$, де D – діаметр сфери. В двохелектродній лампі d -це відстань між анодом і катодом.

У вакуумній техніці розрізняють три основні ступені вакууму:

1. $\lambda \ll d$, тобто СДВП молекул значно менше характерного розміру. У цьому випадку має місце низький вакуум. При цьому обмін енергією відбувається виключно між найближчими молекулами. Такі умови проявляються у вигляді в'язкості газу, а відповідні процеси називаються в'язкісними.
2. $\lambda \approx d$, тобто довжина вільного шляху молекули газу порівнянна з характерним розміром. У цьому випадку має місце середній вакуум. У цьому діапазоні тисків зіткнення молекул зі стінками і між собою різновірогідні.
3. $\lambda \gg d$, тобто СДВП молекули перевищує характерний розмір. У цьому випадку має місце високий вакуум. Відстань d молекула долає без зіткнень.

Існує ще і четверта ступінь вакууму – надвисокий вакуум. В області високого та надвисокого вакууму середня довжина вільного шляху молекул багато більше розмірів вакуумного об'єму, і молекули переважно стикаються зі стінками посудини. У цьому випадку кожна молекула виступає індивідуально, а процеси у відповідних газах називається *молекулярними*.

Умови, в яких знаходиться газ визначають за відношенням $K_n = \lambda/d$, яке називається **критерієм Кнудсена**. Це співвідношення отримують із порівняння частоти зіткнення між молекулами газу з частотою зіткнення молекул газу зі стінкою. Якщо позначити через ν_M частоту зіткнень між молекулами газу, то, очевидно, вона дорівнює $\nu_M = v/\lambda$, де v – швидкість молекул, λ – середня довжина вільного шляху. Легко показати, що ν_C – частота зіткнень молекул із стінкою дорівнює $\nu_C = v/d$. Тоді $K_n = \nu_C/\nu_M = \lambda/d$. Відповідно, стан газу при низькому вакуумі буде мати місце, коли $K_n \ll 1$ ($\lambda_c < 47$ мкм), для середнього – $K_n \approx 1$ (47 мкм $< \lambda_c < 50$ мм), для високого – $K_n > 1$ (50 мм $< \lambda_c < 0,5$ км), для надвисокого – $K_n \gg 1$ ($0,5$ км $< \lambda_c \sim 50$ км).

Очевидно, що ступінь вакууму поняття відносне. Одному тиску можуть відповідати різноманітні ступені вакууму (в залежності від співвідношення λ/d). Наприклад, якщо

повітря проникає в посудину, лінійні розміри якої менше $6 \cdot 10^{-8}$ м, то в цій посудині повітря навіть при атмосферному тиску буде поводитися, як при високому вакуумі (такий випадок реалізується коли газ проникає в пори твердого тіла – цеоліти, активоване вугілля, силікагель).

Справедливо і наступне міркування: чим більше геометричні розміри посудини, у якій знаходиться газ, тим при більш низькому тиску настає стан високого вакууму. Можна зазначити приблизні чисельні значення тисків, які відповідають різноманітним ступеням вакууму, які приведено в таблиці 1.2.

Табл.1.2.

ступінь вакууму <i>Па</i> <i>мм рт. ст.</i>	низький $10^5 - 10^2$ > 1	середній 100 - 0,1 $1 \dots 10^{-3}$	високий $0,1 - 10^{-5}$ $10^{-3} \dots 10^{-7}$	надвисокий $< 10^{-5}$ 10^{-7}
---	-----------------------------------	--	---	--

1.4. Явища переносу.

До явищ переносу відносяться такі властивості газів, як дифузія (перенос маси газу), теплопровідність (перенос тепла, тобто перенос енергії теплового руху молекул газу) і в'язкість або внутрішнє тертя (перенос імпульсу або кількості руху молекул газу). Всі ці явища істотно залежать від ступені вакууму, тобто від співвідношення λ / d .

Теплопровідність газів. Закон Фур'є. Якщо в газі створити області з різною температурою, тобто нагріти якусь окрему частину об'єму і більше не підтримувати нагрівання, то з часом у всьому об'ємі температура підвищиться і вирівняється до однієї у будь-якій області. Тепло від області з більшою температурою буде переходити до області з меншою температурою доти, поки температура не вирівняється. Даний процес здійснюється завдяки хаотичному руху молекул газу і є нестационарним. Якщо різниця температур постійно підтримується, то і перенос тепла буде відбуватися постійно, і такий процес називають стаціонарним.

Розглянемо стаціонарний процес переносу тепла в газі, що знаходиться між двома паралельними пластинами з різними температурами і будемо вважати, що тепло переноситься тільки уздовж осі x . Здатність газу переносити теплоту називається теплопровідністю газу. Кількість теплоти, яка переноситься газом за час Δt через поверхню ΔS , тобто потік тепла Q , визначається за законом Фур'є

$$Q = - \chi \frac{dT}{dx} \Delta S \cdot \Delta t, \quad (1.8)$$

де $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури в напрямі, перпендикулярному до поверхні ΔS , χ – коефіцієнт теплопровідності газу ($[\chi] = \text{Вт}/(\text{м К})$). Знак “мінус” показує, що теплота переноситься до області з меншою температурою.

За молекулярно-кінетичною теорією

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \cdot v_{ca} \lambda_c c_V, \quad (1.9)$$

де ρ – густина газу ($\rho = m \cdot n$) а c_V – питома теплопровідність газу при постійному об'ємі, яка зв'язана з молярною теплопровідністю як $C_V = \mu \cdot c_V$.

Оскільки густина газу пропорційна тиску – $\rho \sim p$, а середня довжина вільного пробігу обернено пропорційна тиску – $\lambda_c \sim 1/p$, то можна зробити висновок, що теплопровідність газу не залежить від його тиску. Це дійсно так, але для низького вакууму. При високому вакуумі число взаємних зіткнень молекул значно менше, ніж число зіткнень зі стінкою ємності, де знаходиться газ, тому втрати тепла нагрітого тіла розміщеного в газі, будуть незначним. Потік тепла між нагрітим і холодним тілами буде пропорційним тиску. При високому вакуумі теплопровідність зменшується пропорційно щільності речовини (тобто обернено пропорційно тиску в системі). Таким чином

коефіцієнт теплопровідності вакууму тим ближче до нуля, чим глибше вакуум. Це пов'язано з низькою концентрацією у вакуумі матеріальних часток, здатних переносити тепло. Тим не менш, енергія у вакуумі передається за допомогою випромінювання. Тому, наприклад, для зменшення тепловтрат стінки термоса роблять подвійними, сріблять (така поверхня краще відбиває випромінювання), а повітря між ними відкачують.

Дифузія. Уявимо собі замкнений об'єм, поділений на дві частини непроникною перегородкою. Нехай в обох частинах цього обсягу при одному і тому ж тиску знаходяться два різних газу. Якщо перегородку прибрати, то внаслідок теплового руху молекул обидва газу будуть проникати (дифундувати) один в одній, так що врешті-решт утвориться суміш газів з однаковою концентрацією молекул обох газів у всьому обсязі.

Закон Фіка стверджує, що дифузійний потік маси газу пропорційний градієнту густини і протікає в протилежному напрямі. Коефіцієнт дифузії

$$D = \frac{1}{3} \lambda_c v_{ca} \text{ [м}^2 \text{с}^{-1}\text{]}, \quad (1.10)$$

обернено пропорційний тиску (оскільки $\lambda \sim 1/p$) і прямо пропорційний квадратному кореню з температури газу ($v_{ca} \sim \sqrt{T/\mu}$). Цей коефіцієнт ще називають коефіцієнтом самодифузії, якщо дифузія відбувається в одному і тому ж газі.

Так як шлях, що проходить молекула при тепловому русі, складається з дуже великого числа відрізків між зіткненнями з іншими молекулами, то швидкість дифузії залежить від числа зіткнень між молекулами. Тому в умовах низького вакууму ($\lambda \ll d$) швидкість дифузії залежить від тиску газу і швидкості молекул. Чим вище тиск (або щільність газу) і чим нижче швидкість молекул (або температура газу), тим менше швидкість дифузії.

При високому вакуумі ($\lambda \gg d$) дифузія відбувається практично миттєво. Вона залежить лише від швидкості теплового руху та розмірів посудини, а не від СДВП.

Також важливо, що легший газ швидше дифундує, ніж газ, який важчий, що використовується при конструюванні дифузійних насосів.

В'язкість газів – це явище, яке показує, що в газі є внутрішнє тертя. В'язкість проявляється у вирівнюванні швидкостей руху різних шарів газу.

Сила тертя або імпульс, що переноситься, наприклад уздовж осі x за одиницю часу через одиницю поверхні, перпендикулярної до осі x , пропорційні градієнту швидкості:

$$F = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (1.11)$$

де η - коефіцієнт внутрішнього тертя, або ще його називають коефіцієнтом динамічної в'язкості, і є тангенціальною силою, що діє на одиницю площі в шарі газу, якщо зменшення швидкості в цьому напрямі дорівнює одиниці (тобто градієнт швидкості дорівнює одиниці), v - швидкість переміщення газу. Знак “мінус” показує, що перенесення імпульсу відбувається до області, де менша швидкість газу.

З причини внутрішнього тертя для забезпечення протікання газу через трубопровід необхідна різниця тисків, $p_2 > p_1$, причому, чим більший коефіцієнт внутрішнього тертя, тим більшою має бути ця різниця.

В'язкість газів використовуються для вимірювання тиску в області середнього та високого вакууму. Однак в'язкісні вакуумметри не набули широкого поширення через тривалість реєстрації тиску. Набагато ширше в'язкість газів використовується в техніці отримання вакууму. На цьому принципі працюють струменеві, ежекторні насоси для отримання вакууму.

Режими течії газу. Від ступеню вакууму залежить і режим течії газу по трубопроводу, який з'єднує об'єкт, що відкачується, з вакуумним насосом.

Ступінь вакууму у трубопроводі визначається співвідношенням середньої довжини вільного шляху молекул газу λ до діаметру трубопроводу d . СДВП молекул газу λ

визначається по середньому тиску газу $0,5(p_1 + p_2)$, де p_1 та p_2 – тиски газу на кінцях трубопроводу.

а) *Течія газу в умовах низького вакууму.* При $\lambda \ll d$ поведінка газу визначається взаємними зіткненнями молекул. Поведінка газу, що протікає по трубопроводу, подібна поведінці суцільного стисливого середовища, якому властиві інерція та в'язкість. При відносно високих тисках як поблизу вхідного так і вихідного отворів трубопроводу та при великих швидкостях переміщення газового середовища у останньому виникають завихрення. Такий режим течії газу називається турбулентним.

При відносно великих тисках з обох сторін трубопроводу та великих швидкостях течії газу, яка не достатня для утворення завихрень, течія стає упорядкованою — ламінарною. При такій течії основну роль у формуванні її режиму відіграють сили інерції. Такий режим називається інерційним.

При зниженні тиску та подальшому зменшенні течії газу сили інерції слабшають. В'язкість газу при низькому вакуумі ($\lambda \ll d$) не залежить від тиску газу. Тому, у даному випадку в'язкість починає здійснювати більший вплив на формування режиму течії, який називається інерційно-в'язкісним.

При умові, коли $\lambda \approx d$, але тиск у трубопроводі відносно малий, сили інерції перестають впливати на режим течії. У цьому випадку режим течії загалом визначається в'язкістю газу. Такий режим називається в'язкісним.

б) *Течія газу в умовах високого вакууму.* Коли у трубопроводі досягнуто високий вакуум, такий що $\lambda \gg d$, газ вже не можна розглядати як суцільне середовище. Кожна молекула здійснює свій тепловий рух незалежно від інших та стикається лише зі стінками трубопроводу. Після удару в стінку трубопроводу молекула, пробувши на поверхні останньої невеликий проміжок часу (у випадку адсорбції), відскакує від неї у будь-якому (випадковому) напрямі. У цьому і полягає основна особливість течії газу при високому вакуумі: молекули газу, рухаючись по трубопроводу, не взаємодіють з іншими молекулами, тому вони з однаковою вірогідністю рухаються як в бік насосу так і в бік об'єму, що відкачується.

Режим течії газу, що характеризується незалежним тепловим рухом окремих молекул називається молекулярним.

в) *Течія газу в умовах середнього вакууму.* В умовах середнього вакууму ($\lambda \approx d$), коли тиск продовжує знижуватись, вплив в'язкості газу на його течію слабшає. Збільшується вплив теплового руху окремих молекул. Такий проміжний режим течії зветься молекулярно-в'язкісним (або перехідним).

.2. Вакуумні насоси. Способи одержання попереднього розрідження. Теоретичні основи процесу відкачування. Основні параметри вакуумних насосів. Класифікація вакуумних насосів. Об'ємне відкачування. Об'ємні насоси. Рідинно - кільцеві насоси. Поршневі насоси. Вакуумна олива для обертових насосів.

Основний шлях отримання вакууму - використання вакуумних насосів. Другий - використання пасток, які зазвичай служать для поліпшення вакууму, що створюється вакуумними насосами. *Вакуумним насосом* називають пристрій, що слугує для видалення газових молекул з будь-якого об'єму, тобто для відкачування газу. Деякі спеціальні вакуумні насоси призначені для перекачки газів з одного об'єму до іншого. Оскільки ступені вакууму дуже відрізняються за величиною тиску, то будова і принцип роботи вакуумних насосів для отримання вакууму відповідного ступеня мають суттєві відмінності. Але головні параметри, що характеризують насоси, загальні.

2.1. Теоретичні основи процесу відкачування.

Видалення газу, тобто відкачка здійснюється вакуумними насосами, що приєднуються за допомогою трубопроводів (вакуумпроводів) до приладу і разом з іншим необхідним устаткуванням складають вакуумну систему. Простіша вакуумна система для

отримання вакууму (рис. 2.1) складається не менше, ніж з трьох елементів: вакуумного насоса 1, вакуумпроводу - трубки 2, що з'єднує насос з вакуумною камерою 3 - об'ємом, що потребує відкачки. Вакуумний насос має впускний 4 і випускний 5 патрубков, через який газ видаляється в атмосферу.

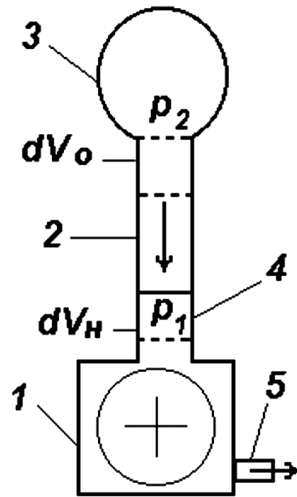


Рис.2.1. Схема найпростішої вакуумної системи.

До вмикання насоса газ у всій вакуумній системі знаходиться під одним тиском. При запуску насоса, робота якого складається з безперервного видалення порцій газу з вакуумної системи через випускний патрубок до атмосфери, газ почне рухатися, безперервно потрапляючи з вакуумної камери до трубопроводу і з нього до насоса через впускний патрубок. У результаті кількість газу в системі буде безперервно зменшуватися. Оскільки об'єм системи і температура газу залишаються незмінними, то відповідно до (1.2) почне знижуватися тиск у вакуумній системі. Для того, щоб газ переміщувався через трубку необхідна рухома різниця тисків на її кінцях ($p_2 - p_1$), яка пов'язана з потоком газу Q провідністю трубопроводу U . Величина провідності залежить від режиму течії газу через трубопровід і його геометричних розмірів. Провідністю елемента вакуумної системи називається відношення кількості газу, що проходить через елемент за одиницю часу, до різниці тисків на його кінцях: $U = \frac{Q}{p_2 - p_1}$ [см³/с].

Для кількісної характеристики ступеня пониження тиску перед трубопроводом, тобто у вакуумній камері, а також після трубопроводу, тобто на впускному патрубку насоса використовують такі параметри, як швидкодія відкачки об'єкта (вакуумної камери) S_o і швидкодія насоса S_n .

Швидкодією насоса S_n називають об'єм газу, що відкачується насосом в одиницю часу при даному впускному тиску,

$$S_n = \left. \frac{dV_n}{dt} \right|_{p_1} \quad (2.1)$$

Швидкодією відкачки об'єкта S_o називають об'єм газу, що потрапляє з вакуумної камери за одиницю часу до вакуумпроводу за тиском p_2 , що є в камері:

$$S_o = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{p_2} \quad (2.2)$$

Якщо виникає необхідність визначення швидкості відкачки газу за тиском p з системи в будь-якому поперечному перерізі вакуумпроводу, то вводять аналогічно величину

$$S = \left. \frac{dV}{dt} \right|_p, \quad (2.3)$$

що показує який об'єм газу, виміряний за тиском p , проходить через поперечний переріз вакуумпроводу за одиницю часу.

Розмірність швидкості відкачки газу за даним тиском визначають в одиницях об'єму за секунду: $см^3/с, м^3/с, л/с$.

Кількість газу, що проходить за одиницю часу через поперечний переріз вакуумпроводу, називають *потокм газу* в даному перерізі. При розрахунках вакуумних систем зручно виражати потік газу в одиницях $[pV/c]$. Якщо в даному місці вакуумної системи тиск дорівнює p , а швидкість відкачки - S , то величина потоку газу в цьому місці:

$$pS = Q. \quad (2.4)$$

Якщо газ на впускному патрубку насоса має тиск p_1 , а швидкодія S_n , то потік газу, що проходить через впускний патрубок буде дорівнювати добутку $p_1 S_n$ і його називають *продуктивністю насоса* за даним впускним тиском.

Як показали дослідження, рушійна різниця тисків $p_2 - p_1$ виникає тому, що трубопровід надає опір потоку газу. По аналогії до закону Ома потік газу через будь-який переріз нерозгалуженого вакуумпроводу є сталим, якщо

$$pS = p_1 S_n = p_2 S_o = U(p_2 - p_1) = Q, \quad (2.5)$$

де U - пропускна здатність трубопроводу \sim аналогія з провідністю провідника. Це рівняння є *умовою сталості газового потоку* при відкачці вакуумної системи. З нього випливають важливі наслідки. Якщо відома величина потоку, то можливо визначити швидкість відкачки в будь-якому місці вакуумної системи за відомим тиском p в цьому місці

$$S = \frac{Q}{p}; \quad (2.6)$$

якщо відомий тиск на впускному патрубку насоса, то швидкість його дії за даним тиском

$$\text{дорівнюватиме} \quad S_n = \frac{Q}{p_1}; \quad (2.7)$$

якщо відомий тиск в камері відкачки, то швидкість відкачки об'єкта за даним тиском

$$\text{дорівнюватиме} \quad S_o = \frac{Q}{p_2}. \quad (2.8)$$

Наслідки з формули (2.8): якщо насос приєднується до об'єкта відкачки за допомогою вакуумпроводу, то швидкість відкачки об'єкта завжди менша швидкодії насоса ($S_n > S_o$), оскільки вакуумпровід здійснює опір відкачці ($p_1 < p_2$). Коли насос приєднаний безпосередньо до об'єму, тобто $p_1 = p_2$, то $S_o = S_n$. Тоді швидкість відкачки об'єкта ще називають *ефективною швидкодією насосу* $S_{n,ef} = S_o$.

Швидкість відкачки об'єкта, провідність вакуумпроводу і швидкодія насоса змінюються відповідно до зміни тиску при відкачці вакуумної системи. Знайдемо залежність між цими величинами. Для цього визначимо з умови сталості потоку (2.5) швидкодію насоса і швидкість відкачки об'єкта через провідність вакуумпроводу і відповідні тиски:

$$S_n = U \frac{P_2 - P_1}{P_1};$$

$$S_o = U \frac{P_2 - P_1}{P_2},$$

а потім виключимо з цих рівнянь величини тиску і отримаємо, що

$$\frac{1}{S_o} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U}, \quad (2.9)$$

тобто
$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}, \text{ або } S_o = \frac{S_n U}{S_n + U}. \quad (2.10)$$

Отримане рівняння (2.10) називають *головним рівнянням вакуумної техніки* і воно зв'язує швидкість відкачки об'єкта з швидкодією насоса і провідністю вакуумпроводу, що з'єднує насос з об'єктом відкачки.

З рівняння (2.10) випливають такі наслідки:

якщо провідність вакуумпроводу дуже велика, тобто $U \rightarrow \infty$, то $S_o \rightarrow S_n$;

якщо провідність вакуумпроводу дуже мала, тобто $U \rightarrow 0$, то $S_o \rightarrow 0$

і якщо $S_n = U$, то $S_o = 0,5S_n$.

Для характеристики ефективності використання вакуумного насоса у ВТ вводять величину K , яка називається коефіцієнтом використання насоса:

$$K = \frac{S_o}{S_n}. \quad (2.11)$$

2.2. Головні параметри вакуумних насосів.

Для ефективної і правильної експлуатації насосів необхідно знати їх головні параметри. До них відносяться: *початковий тиск, швидкодія насоса, найбільший випускний тиск, граничний тиск, робочий тиск, продуктивність насоса.*

Початковим тиском насоса називають максимальний тиск на вхідному патрубку, при якому насос починає нормально працювати. Не всі насоси можуть починати роботу з атмосферного тиску; для деяких потрібне попереднє розрідження – "форвакуум". Початковий тиск ще називають *тиском запуску насоса* P_{zap} . Для більшості насосів він збігається з *найбільшим випускним тиском* P_v , - максимальним тиском випускного патрубка, при якому ще забезпечується нормальна робота насоса (паспортна швидкість відкачки). Якщо цей тиск перевищено, насоси припиняють роботу або можуть прийти в непридатність через окислення робочих деталей. Для відкачки об'єму треба видалити з нього молекули газу в оточуючу атмосферу, тобто перебороти протидію зовнішнього тиску. Деякі насоси можуть видаляти газ безпосередньо в атмосферу і їх називають *форвакуумними*, а інші не можуть створити протидію атмосферному тиску і їм для нормальної роботи створюють протитиск, що значно менший від атмосферного. Зазвичай такі насоси створюють високий вакуум, але не можуть працювати самостійно, тому їх приєднують послідовно з форвакуумним. Усі прилади, в яких найбільший випускний тиск нижчий за атмосферний, повинні мати на виході форвакуумний насос, наприклад, насос об'ємної дії.

Параметри насосу показані на основній його характеристиці - залежності швидкодії від вхідного тиску (рис.2.2).

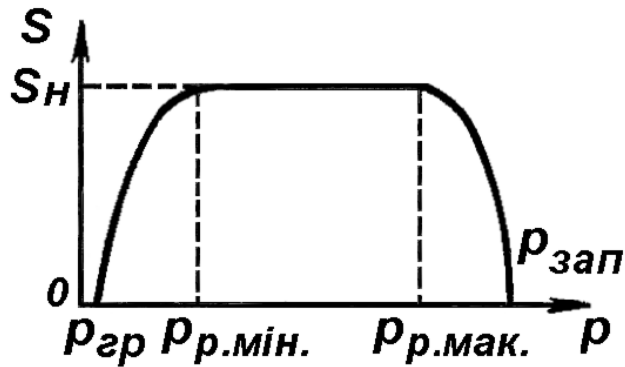


Рис.2.2. Залежність швидкодії вакуумного насоса від тиску.

Граничним тиском $P_{гр}$ називають *найменший тиск*, який може створити насос за тривалої роботи. Неможливість безмежного пониження тиску обумовлена тим, що кожний реальний насос створює хоча б невелике натікання газів і пари на вхід (*обернений потік*). З пониженням тиску потік, що відкачується зменшується, а обернений потік практично сталий. Тому настає момент коли ці потоки стають рівними і тиск на вході насоса перестав знижуватися. Це і є граничний або залишковий тиск, тобто мінімальний тиск, створюваний насосом на входному патрубку при тривалій (більше 10 годин) роботі «на себе», (при закритому впускному патрубку, коли швидкість відкачування дорівнює нулю). Отже, при $P \rightarrow P_{гр}$ маємо $S_H \rightarrow 0$.

Робочий тиск насоса поділяють на найменший і найбільший. *Найменший робочий тиск $P_{р.мін}$* - це мінімальний тиск, за яким насос зберігає номінальну швидкодію при тривалій роботі. Зазвичай, найменший робочий тиск приблизно на порядок більше граничного. Використання насоса для роботи при тисках між граничним та найменшим робочим економічно не вигідне через погіршення його питомих характеристик. *Найбільший робочий тиск $P_{р.мак}$* - це максимальний тиск, за яким насос зберігає номінальну (паспортну) швидкодію при тривалій роботі. Він менший за тиск запуску і з економічних міркувань використання насоса найбільш вигідне при роботі в межах робочого тиску. Діапазон $P_{р.мін} - P_{р.мак}$ - це *оптимальний діапазон робочих тисків насоса*.

Швидкодію насоса, як вже зазначалось, визначають завжди за відповідним тиском. Для значної частини насосів швидкодія дуже залежить від тиску газу, що відкачується. Але існують насоси, швидкодія яких незначно змінюється в широких межах тиску. Для них справедлива *формула Геде*, за допомогою якої можна розраховувати швидкодію насоса за умови, що S_H майже не змінюється в інтервалі $(p_{от0}) - (p_1 t_1)$:

$$S_H = \frac{V}{t_1 - t_0} \ln \frac{P_0}{P_1}. \quad (2.12)$$

Оскільки реальні насоси мають граничний тиск, що конструктивно обумовлений шкідливим простором і негерметичностями, то відлік тиску слід вести не від нуля, а від величини граничного тиску (рис.2.2). Тоді, після внесення поправки, формула (2.12) буде більш точнішою:

$$S_H = \frac{V}{t_1 - t_0} \ln \frac{P_0 - P_{гр}}{P_1 - P_{гр}}. \quad (2.13)$$

Обсяг газу, що видаляється, береться при тискові на вході біля впускного патрубку в розглянутий момент часу. Тиск в процесі відкачки поступово зменшується, то кількість газу, що відкачується насосом, прямо пропорційна $S_H P_{гр}$ безупинно зменшується.

Якщо перейдемо до експоненціальної функції, то отримаємо закон зменшення тиску в камері відкачки, що має об'єм V , за умови, що швидкодія залишається сталою, а початковий тиск дорівнює p_0 :

$$P = (P_0 - P_{гр}) e^{-(S/V)t} + P_{гр}. \quad (2.14)$$

На рис.2.3 показана крива відкачки.

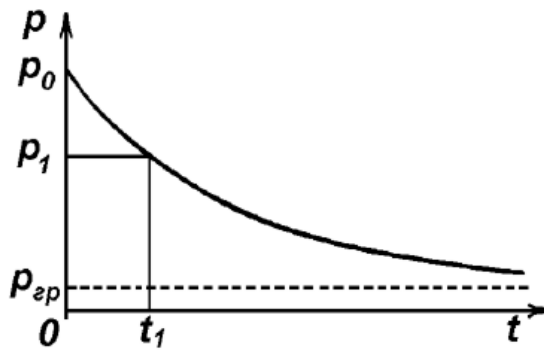


Рис.2.3. Зміна тиску від часу відкачки.

З рис.2.3 видно, що як би тривало не працював цей теоретичний насос, тиск на впускному патрубку його не зменшується до нуля, а наближається асимптотично до граничного.

Існують два методи експериментального визначення швидкодії насоса: метод постійного об'єму і метод постійного тиску.

Метод постійного об'єму полягає в тому, що до насоса безпосередньо приєднують вакуумну камеру (рис. 2.4а), об'єм якої V , і проводять відкачку при безперервному вимірюванні тиску манометром M для того, щоб побудувати криву відкачки, тобто залежність $p = f(t)$ (рис. 2.3).

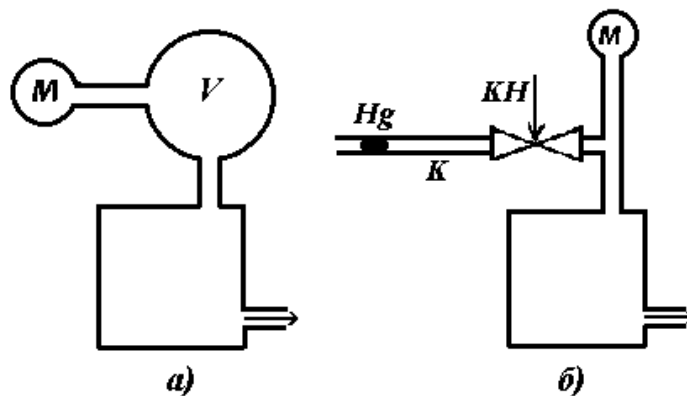


Рис.2.4. Методи визначення швидкодії насоса.

Метод постійного тиску полягає в тому, що до впускного патрубка насоса приєднують манометр M , а до нього через мікрометричний кран довгий скляний капіляр K , з відомим діаметром d . При працюючому насосі поступово регулюють мікрометричним краном (натікачем KH) газовий потік з атмосфери так, щоб встановився і залишався незмінним робочий тиск p , що покаже манометр M (рис. 2.4б). Як тільки такий режим роботи стабілізується, у капіляр вводять краплю ртуті, яка буде показчиком її положення, і вимірюють проміжок часу t , за який крапля переміститься на певну довжину.

2.3. Класифікація вакуумних насосів.

В основу отримання вакууму покладені два принципи: перший (механічний) – видалення газу з відкачуваної посудини за межі вакуумної системи, другий (фізико-хімічний) – зв'язування газу у вакуумній системі. Перший принцип реалізований у насосах із газовим переміщенням. Переміщення маси газу можна проводити періодично, окремими порціями і безперервно. Для видалення порції газу необхідно ізолювати в робочій камері насоса певний об'єм газу, перемістити його від вхідного патрубка насоса

до вихідного, стиснути в процесі переміщення до тиску, більшого, ніж тиск у вихідному перерізі насоса, і виштовхнути газ за межі насоса. Вакуумні насоси, що відкачують газ окремими порціями в результаті періодичної зміни об'єму і положення робочої камери, називаються *об'ємними вакуумними насосами*. Об'ємними є лише механічні насоси, тобто такі, відкачування яких обумовлене переміщенням газу унаслідок механічного руху робочих частин насоса.

Для безперервного видалення нейтральних молекул газу необхідно мати тіло, яке постійно захоплювало б і переміщало газ. Таким тілом може бути безперервно рухома тверда поверхня чи струмінь рідини, пари або газу. При зіткненні з рухомою твердою поверхнею і в результаті внутрішнього тертя молекули газу набувають переважного напрямку руху. Механічні насоси, відкачування яких базується на захопленні газу, що видаляється, безперервно рухомими твердими поверхнями, отримали назву *молекулярних*, оскільки рухомі деталі насоса впливають на окремі молекули.

Вакуумні насоси, в яких реалізується другий принцип, отримали назву *сорбційних* насосів. Газ у сорбційних насосах може зв'язуватися гетером (*гетер* — речовина, застосовувана для хемосорбції газів у вакуумних системах), а також сорбуватися (поглинатися) і конденсуватися на охолодженій поверхні. За Я.Грошковським є дві основні групи насосів: проточні і сорбційні. Перші видаляють газ з відкачуваного простору назовні, а другі - не видаляють газ із простору, який звільняється, але зв'язують його якимось чином усередині насосу. Проточні насоси мають вхід і вихід, а сорбційні по суті тільки вхід.

За класифікацією, що ґрунтується на використанні фізичних законів, покладених в основу роботи вакуумних насосів, їх поділяють на групи:

- насоси, робота яких ґрунтується на використанні закону Бойля–Маріотта (механічні насоси для об'ємного відкачування газів);
- насоси, робота яких базується на використанні явища внутрішнього тертя (деякі види струминних насосів);
- насоси, в яких використовується молекулярна течія газу - молекулярні (механічні та деякі види струминних насосів);
- насоси, принцип дії яких базується на явищі іонізації газів (іонні);
- насоси, робота яких базується на принципі фізико-хімічного зв'язування газів (іонно-сорбційні, магніторозрядні, сорбційні, конденсаційні (кріогенні) насоси).

Залежно від ступеня отримання граничного вакууму насоси можна поділити на:

- форвакуумні насоси ($10^5 - 1$ Па);
- насоси середнього вакууму ($1 - 10^{-2}$ Па);
- високовакуумні насоси ($10^{-2} - 10^{-5}$ Па);
- надвисоковакуумні насоси ($P < 10^{-5}$ Па).

2.4.Об'ємне відкачування. Об'ємні насоси.

Насоси, що працюють у діапазоні $760 - 1$ Торр ($10^5 - 1$ Па) називають низько вакуумними або форвакуумними. До них належать об'ємні та деякі типи адсорбційних насосів. У процесі об'ємної відкачки виконуються наступні основні операції: 1) всмоктування газу за рахунок розширення робочої камери насоса; 2) зменшення обсягу робочої камери і стиснення в ній газу; 3) видалення стисненого газу з робочої камери в атмосферу або насос попереднього розрідження. Залежно від вибору конструктивної схеми об'ємні насоси діляться на поршневі, рідинно-кільцеві і ротаційні (обертальні).

Ротаційні насоси характеризується наявністю в їх конструкції пластин, які в одному типі насосів обертаються разом із ротором (пластинчато-роторні та багатопластинчасті насоси), а в іншому типі розміщені в статорі (пластинчато-статорні насоси). До них також відносять золотникові (плунжерні) насоси.

2.4.1.Пластинчато-роторний насос (рис. 2.5) містить циліндричний корпус 7 з впускним 4 і випускним 3 патрубками і ексцентрично розташований ротор 6, в пазах якого

встановлені пластини 5. Під дією відцентрової сили пластини притискаються до корпусу, забезпечуючи зміну обсягу робочої камери.

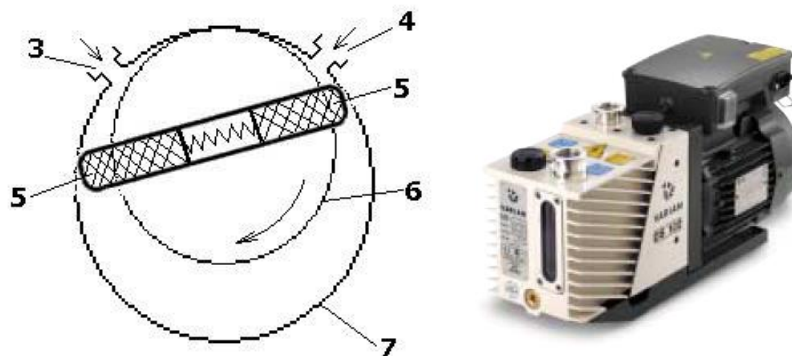


Рис.2.5. Схема пластинчато-роторного насоса.

Випускний патрубок 3 має клапан (кульку, притиснуту до поверхні отвору сталеву пружиною). Він знаходиться під рівнем олії, щоб в насос не потрапляло атмосферне повітря.

Марки насосів цього типу: НВР5D~ 5 л/сек, НВР1D~ 1 л/сек, НВР16D~ 16 л/сек, DS-102 фірми Varian ~14 л/сек, швидкість обертання ротора 1200 об/хв.

Для зменшення тертя, яке виникає між щільно притиснутими рухливими деталями, а також для ущільнення зазорів, з метою запобігання перетікання газу, в насос вводять певну кількість вакуумної оливи. А для охолодження при роботі його корпус занурюють і закріплюють в бак з вакуумною оливою. З цієї причини у відкачуваних об'ємах буде присутня насичена пара вакуумної оливи, яка впливатиме, таким чином, на граничний тиск. Слід зауважити, що на граничний тиск буде впливати ще об'єм шкідливого простору (*B* на рис.2.6), який є як біля впускного отвору, так і біля впускного, де тиск різниться за величиною. Різниця тисків може викликати витік газу через місце дотикання ротора до статора за твірною і також може привести до порушення герметичності ущільнення, якщо насос зупинити. Щоб зменшити об'єм шкідливого простору, його заповнюють невеликою кількістю вакуумної оливи, яка на впускному отворі клапана знижує середній тиск у випускній порожнині і зменшує загрозу проходження газу через спільну твірну.

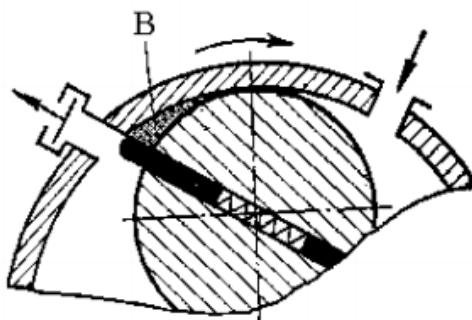


Рис.2.6.Шкідливий простір.

Граничний вакуум пластинчато-роторних насосів $P_{гр}=10-1$ Па (одноступеневі насоси) та $P_{гр}=10^{-1}$ Па (двоступеневі насоси). Насоси малих розмірів мають швидкодію 0,6 л/с. Великі насоси за таким же тиском мають швидкодію до 600 л/с. Ефективним способом зменшення граничного тиску є здвоювання насосів. На рис.2.7 показано схему роботи двоступеневого пластинчато-роторного насоса. Два ступені з'єднано послідовно і виготовляються в одному блоці.

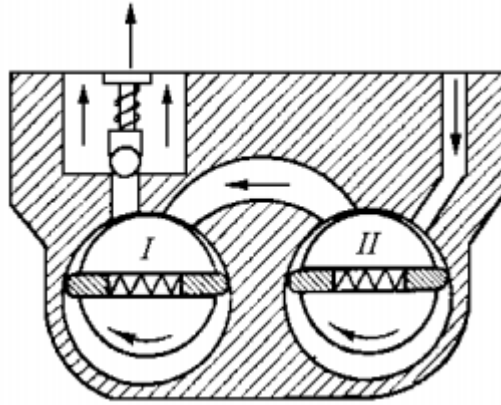


Рис.2.7. Двоступеневий пластинчато-роторний насос.

Недоліки пластинчато-роторних насосів: граничний вакуум залежить від тиску насиченої пари вакуумної оливи, а також від конструктивних особливостей насоса (ступеня тиску пружини випускного клапану, об'єму шкідливого простору та ін.).

2.4.2. Пластинчато-статорні насоси. З метою зменшення шкідливого простору і областей тертя (там, де може виникати негерметичність) були розроблені насоси, що мають рухома пластину, розміщену в циліндричному статорі. Це *пластинчато-статорні насоси*. Такий насос складається з наступних основних елементів (рис.2.8): корпуса 1, ексцентричного ротора 2, випускного патрубку 3, пластини 5, пружини 4, вхідного патрубку 6. При обертанні за годинниковою стрілкою за перший оберт ротора газ всмоктується з відкачуваного об'єкта, а за другий відбувається стиснення і вихлоп газу. Пластина під дією пружини герметично розділяє області всмоктування і стиснення відкачуваного газу. Конструкція даного насоса відрізняється від конструкції попереднього тим, що пластина 5 закріплена на статорі. Зміна обсягу відбувається за рахунок ексцентрично розташованого ротора. Герметичність досягається за рахунок пластини, контакт якої з ротором забезпечується жорсткістю пружини.

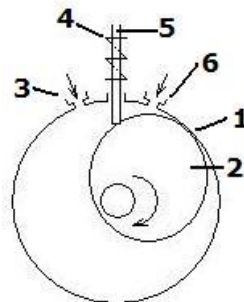


Рис.2.8. Пластинчато-статорний насос.

Граничний вакуум одноступеневого пластинчато-статорного насоса $P_{zp}=10^{-1}$ Па, двоступеневого може досягати величини $P_{zp}=10^{-2}$ Па.

Марки насосів цього типу: ВН461~ 0,86 л/сек; 540 об/хв., РВН20~ 3,3 л/сек; 400 об/хв.

2.4.3. Золотниковий насос. В обхід патентів Геде американський інженер Кенней запатентував золотниковий насос, застосувавши замість пластини золотник, що охоплює ротор. Схема сучасного золотникового насоса наведена на рис.2.9. Він складається з корпусу 1, ексцентрично встановленого ротора 2, золотника 6, випускного патрубку і зворотного клапана 3, шарніра 7 і вхідного патрубку 4. Газ з відкачуваного обсягу через вхідний патрубок і отвори 5 в золотнику надходить в камеру всмоктування А, збільшується при обертанні ротора за годинниковою стрілкою. В цей же час обсяг камери В зменшується, і газ, що в ній знаходиться, стискається і виштовхується через вихлопний

патрубок. Як і пластинчато-статорні золотникові насоси працюють в масляній ванні. Характеристики їх приблизно однакові, але останні мають великі швидкості відкачки, завдяки попередньому розрідженню в камері впуску. Швидкість дії золотникових насосів – до 100 л/с. Граничні тиски одноступінчатих насосів досягають 10 Па, двоступеневих 0,1 Па. Тиск запуску і випускний тиск насосів зазвичай рівні атмосферному.

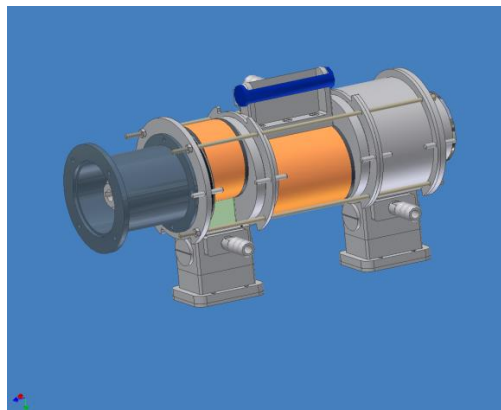
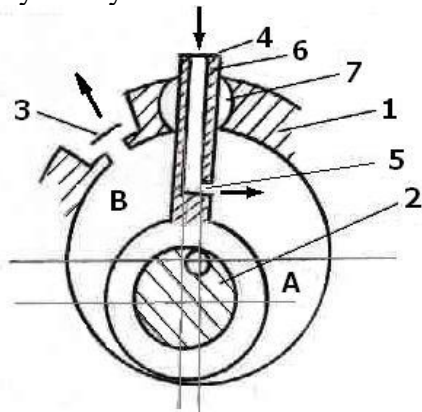


Рис.2.9.Схема і зовнішній вигляд золотникового (плунжерного) насоса.

Деякі найпоширеніші марки: АВ320 -20 л/сек, АВ3300- 300 л/сек, АВ3500- 500 л/сек.

2.4.4. Обертові газобаластні насоси. Звичайні обертові масляні насоси створюють вакуум на основі закону Бойля-Маріотта і для ефективної відкачки об'ємів, в яких знаходиться або виділяється значна кількість водяної пари вони непридатні. Пара при стисканні конденсується у воду, яка змішується з маслом, створюючи емульсію. У результаті тиск газу, що створюється в випускному об'ємі, буде недостатнім для відкривання випускного клапана і насос буде працювати вхолосту. Водяні крапельки разом з маслом, що зменшують тертя рухомих частин, будуть проникати з випускного простору до впускного з низьким тиском, де швидко випарюються і водяна пара знову потрапляє до вакуумної системи. Для відкачки водяної пари з вакуумних систем були створені *газобаластні насоси*.

Дія газобаластних насосів оснований на введенні через спеціальний отвір у статорі відповідної кількості атмосферного повітря (баластного газу) до робочого простору працюючого насоса, коли він буде ізолюваним від впускного і випускного отворів. У результаті суміш пари і повітря матиме атмосферний тиск і клапан на випускному отворі відкриється раніше, ніж розпочнеться конденсація водяної пари, тому вона практично вся вийде через випускний отвір. І тоді масло, що циркулює в робочому просторі насоса, не буде забруднюватися.

2.4.5. Об'ємні безмасляні насоси. Сучасні механічні об'ємні насоси здійснюють безмасляне відкачування і працюють за рахунок періодичної зміни обсягу робочої камери насоса. На рис. 2.10а наведена схема мембранного насоса. Мембрана з еластомеру 1 переміщається вгору і вниз за допомогою поршня 4. При русі мембрани вниз, камера всмоктування розширюється, внаслідок чого газ потрапляє всередину камери через впускний клапан. При русі вгору мембрана викидає газ через випускний клапан за межі головки насоса 2. Камера насоса герметично ізолювана від привідного механізму за допомогою мембрани. Таким чином, мембранний насос переміщує, відкачує і стискає середовище, що перекачується, без використання масла. Мембранні безмасляні вакуумні насоси практичні і багатофункціональні. До їх основних переваг можна віднести повну відсутність масла, довгий термін служби, мал шумну роботу, малі габарити, простоту у використанні.

Для роботи з великою швидкістю відкачки при малих ступенях стиснення застосовують ротаційні вакуумні насоси із спеціальними профілями. У цьому типі насосів зміна об'єму камери досягається завдяки обертальному руху роторів певної форми.

Роботу цього типу насосів показано на рис.2.10б на принципі роботи двоохроторного насоса (*насоса Рутса*). Насоси Рутса широко використовуються для відкачування великих об'ємів газів в області низького та середнього вакууму. Частота обертання роторів становить 1500-4000 об/хв., або $n = 25-70 \text{ с}^{-1}$. Насоси не потребують змащення, оскільки в них відсутні поверхні тертя. Між роторами (1) і корпусом (2) існує невеликий повітряний зазор. Цим зумовлений недолік: відбувається натікання газу через зазор із випускної зони *B* в зону відкачування *A*. Кількість газу, що натікає, тим більша, чим вищий тиск на виході порівняно із відкачуванним, тобто чим більше стискається газ. Тому для зниження зовнішнього тиску, а відповідно і зменшення натікання газу з випускної зони *B* в зону відкачування *A*, на виході з цього насоса розміщують насос для попереднього відкачування.

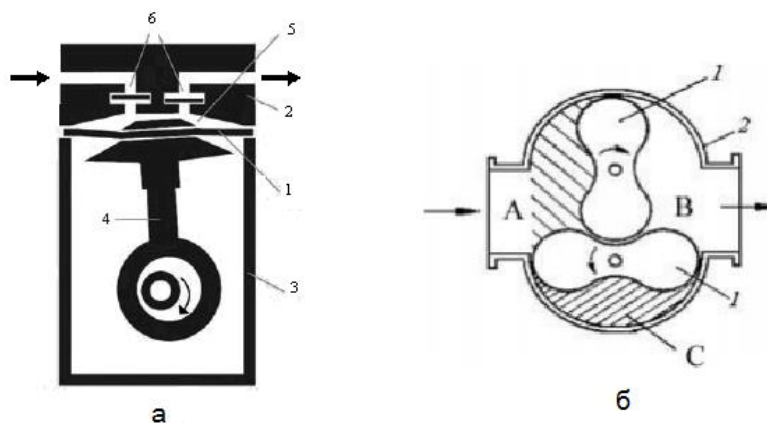


Рис.2.10. Схеми безмасляних механічних насосів : (а) - мембранного, де 1 - мембрана; 2 - головка насоса; 3 - камера насоса; 4 - поршень; 5 - камера всмоктування; 6 - впускний і випускний клапани; (б) - двоохроторного насоса Рутса, де 1 - ротор; 2 - корпус.

За один оберт ротора видаляється об'єм газу, що дорівнює подвоєному об'єму камери *C*, утвореному впадиною між ротором і корпусом. Сучасні двоохроторні насоси Рутса характеризуються високою швидкістю $S_n = 5-5000 \text{ л/с}$ в області середнього вакууму, яка зберігає постійне значення в діапазоні тисків від 10^2 до 10^{-1} Па. Швидкість цих насосів значно перевищує швидкість відкачки пластинчатих і золотникових насосів. Граничний вакуум може досягати 10^{-3} Па.

2.5.Рідинно - кільцеві насоси.

Спочатку цей тип насосів використовувався для відкачування повітря і газів з шахт. Зараз використовуються як вакуумні механічні насоси. Особливістю їх є статор, сформований з рідини. Схема типового рідинно-кільцевого насоса показана на рис.2.11. Робоча рідина обертається в корпусі насоса за допомогою крильчатого ротора (імпелера) і утворює статор, що герметично ущільнює лопатки ротора. Утворена між статором і ротором серповидна порожнина (розділена на частини лопатками) використовується для переміщення відкачуваного газу. Переваги насоса: безмасляний вакуум, велика (до $100 \text{ м}^3/\text{с}$) швидкість відкачування. Недолік: можливість отримання тільки низького вакууму, обмеженого тиском насиченої пари води ($\sim 2.5 \cdot 10^3 \text{ Па}$) або іншої робочої рідини (метанол, етанол).

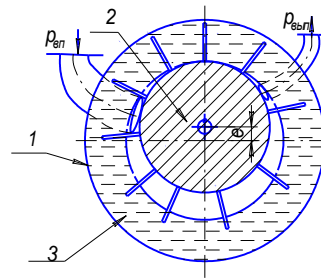


Рис.2.11. Рідинно-кільцевий насос: 1-статор; 2-ротор; 3-вода, яка утримується відцентровою силою.

2.6. Поршневі насоси.

У цих насосах відкачування здійснюється за рахунок періодичної зміни робочого об'єму камери циліндричного типу. Циліндри можуть бути простої або подвійної дії із водяним або повітряним охолодженням. Швидкість руху поршня не перевищує 1 м/с. Принцип роботи поршневого насоса ілюструється рис.2.12.

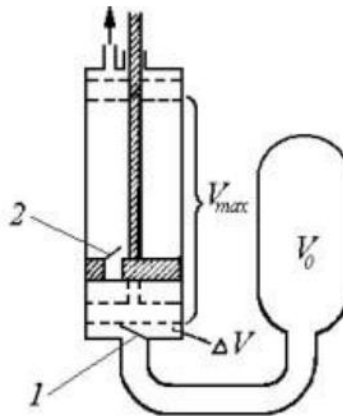


Рис.2.12. Принцип роботи поршневого насоса:
1 – вхідний клапан; 2 – вихідний клапан.

Під час руху поршня вгору вхідний клапан 1 відкривається, і відкачуваний об'єм камери V_0 з'єднується з робочим об'ємом насоса, який збільшується від ΔV до V_{max} . Відповідно до закону Бойля – Маріотта початковий тиск P_0 знизиться до величини P_1 . Під час руху поршня вниз відбувається стиснення газу, що приводить до закривання вхідного клапана 1 та відкривання клапана 2, через який газ виходить в атмосферу. Теоретично при досить великій кількості циклів відкачування граничний тиск $P_{сп}$ поршневого насоса повинен прямувати до нуля. Однак навіть у випадку ідеального ущільнення поверхні між поршнем і стінкою насоса слід мати на увазі кінцеве значення пружності пари ущільнювального мастила та наявність паразитного простору ΔV , з якого газ у нижньому положенні поршня не видаляється. У цьому випадку тиск у шкідливому просторі буде дорівнювати атмосферному.

Граничний тиск поршневих насосів $P_{сп}$ коливається в інтервалі 10^2 – 10 Па. Швидкість дії сучасних поршневих насосів становить від 10 до 4000 л/с. Вони починають свою роботу з атмосферного тиску.

Недоліки таких насосів: нерівномірність процесу відкачування газів; значні втрати на тертя ~ 200 Вт/(на л/с швидкості дії); велика питома маса від 10 до 20 кг/(на л/с швидкодії).

Процес розвитку ВТ привів до повернення поршневих насосів на новому щаблі. В 80-х рр. XX ст. фахівцями ВАТ "Вакууммаш" в Казані і ISLAND SCIENTIFIC LTD Vacuum Equipment був створений безмасляний вакуумний механічний насос на основі полімерів

(рис.2.13). Спочатку він використовувався для генерації атмосфери в робочих приміщеннях орбітальних станцій. Зараз використовується як перспективний безмасляний вакуумний механічний насос з $P_{гр}=3$ Па.

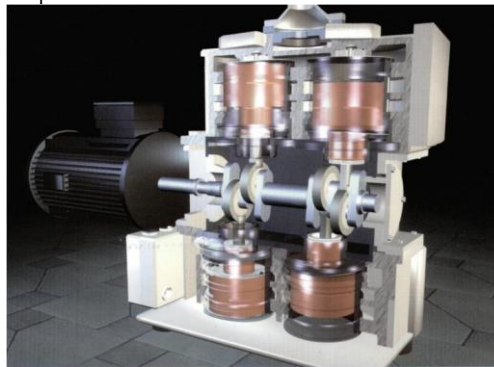


Рис.2.13. Вигляд сучасного поршневого насоса.

2.7. Вакуумна олива для обертових насосів.

Вакуумну оливу обертових насосів використовують для охолодження працюючого насоса, а також для зменшення тертя і підтримання відповідної герметичності між об'ємами з різними тисками. За цієї причини вона має задовольняти дві протилежні вимоги: 1) мати якомога менший тиск насиченої пари, 2) мати відповідну в'язкість.

Щоб у вакуумної оливи був низький тиск насиченої пари, в ній не повинно бути легких фракцій. В'язкість оливи впливає як на роботу насоса, так і на граничний тиск. Якщо вона буде дуже великою, то і герметичність буде надійною, але рух ротора буде утруднений і олива буде перегріватись. Якщо в'язкість буде дуже малою, то вакуумне ущільнення буде ненадійним.

Відомо, що в'язкість вакуумної оливи залежить від температури нагрівання, тому це потрібно враховувати при роботі насосів у літні чи зимові часи. Крім цього, від в'язкості ще залежить властивість вакуумних олив осмолюватись і накопичуватись на стінках вакуумних об'ємів насоса, що утруднює їх роботу, навіть призводить до повної зупинки. На швидкість осмолення впливають відкачувані гази такі як: хлор, фтор або пара кислот, до складу яких входять ці елементи. Оскільки вакуумна олива ще потрібна для охолодження нагрітих частин насоса, то її має бути не менше відповідної кількості для даного насоса. За місцевого перегріву пара оливи може спалахнути. Чим нижчий тиск насиченої пари оливи, тим вищою буде температура спалаху. Для вакуумних олив обертових насосів температура спалаху має бути вищою за 200°C . Тому для заливки обертових насосів найчастіше застосовують спеціальну вакуумну оливу ВМ-4 з тиском насиченої пари $\sim 10^{-3}$ Па, що цілком задовільно для обертових насосів. Також використовуються марки: ВМ-1 ($p_{нас} \sim 3 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$ Па), ВМ-3 ($p_{нас} \sim 10^{-1}$ Па), ВМ-5 ($p_{нас} \sim 10^{-4}$ Па), ВМ-7 ($p_{нас} \sim 10^{-4}$ Па). З часом роботи насоса олива не тільки забруднюється парою рідин, які можуть бути у відкачуваному об'ємі, а й змінює свій склад з причин місцевих перегрівів і в ній з'являються легколетючі фракції (виникає крекінг). Тому необхідно у відповідні терміни повністю замінювати відпрацьовану оливу.

Мінеральні вакуумні масла являють собою складні суміші парафінових, ароматичних і ненасичених вуглеводнів. При розробці нових сортів і марок олив одним з основних є вимога до їх теплофізичних і фізико-хімічних властивостей. Виявлення закономірностей зміни цих властивостей від складу та умов експлуатації є основним завданням при дослідженні реальних сумішей вакуумних робочих олив.

В обертових насосах вакуумну оливу заливають у бак, в якому розміщено насос, в кількості, щоб його випускний клапан був занурений в ній і олива, хоча й в невеликій кількості була б присутня в робочому об'ємі насоса.

Перед вмиканням електродвигуна необхідно спочатку подати водяне охолодження (якщо воно передбачене), а потім рукою повернути 2-3 рази ротор насоса за напрямом

червоної стрілки. Якщо попереднє провертання не проводити, то вакуумна олива, що проникла в робочі об'єми насоса за час його зупинки, може завадити електродвигуну привести в обертання ротор насоса або навіть викликати його поломку.

Вакуумна олива викидається з випускного патрубку у вигляді бризок (крапель) і як оливний туман.

Л.3. МОЛЕКУЛЯРНІ НАСОСИ

Принцип молекулярної відкачки. Молекулярний обертовий насос. Турбомолекулярні насоси. Струмінні насоси. Іонні насоси.

3.1. Принцип молекулярної відкачки.

Робота обертових насосів для отримання попереднього(низького) вакууму базується на використанні закону Бойля–Маріотта. Граничний тиск таких насосів не менший 10^{-2} Па. Причина цього є наявність шкідливого простору та ущільнень між пластинами насосів. Якщо ж необхідно отримати вакуум з меншим тиском, то використовують вакуумні насоси, робота яких ґрунтується на інших фізичних явищах, таких як внутрішнє тертя (в'язкість) або дифузія газів (п.1.4). У відповідності з МКТ ці явища обумовлені передачею імпульсу від молекул, що знаходяться в більш рухливому шарі струменя, молекулам шару, який рухається повільніше, а тепловий рух призводить до змішування молекул сусідніх шарів. Насоси, принцип відкачки яких ґрунтується на вказаних явищах, називаються *молекулярними*.

Молекулярний насос винайдений в 1911 р. інженером Геде для поліпшення вакууму, який створювався механічним масляним насосом, шляхом захоплення молекул газу після зіткнення з рухомим об'єктом. Головна ідея молекулярного насоса не змінилась - надання всім молекулам відкачуваного газу, які рухаються в довільних напрямках, додаткової складової швидкості в напрямку до випускного патрубка.

Молекулярні вакуумні насоси являють собою різновид швидкісних вакуумних насосів. Вони працюють в області молекулярного режиму течії газу, забезпечуючи значні відношення тисків (до $10^6 \dots 10^7$) при відносно невеликій швидкодії 0,1- 100 л/с. За конструктивним виконанням розрізняють *механічні* й *струмінні* молекулярні насоси.

В механічних молекулярних насосах окремі молекули газу направляються до випускного отвору в результаті отримання імпульсу від поверхні, що швидко обертається. Молекули газу, що рухаються хаотично, при зіткненні з поверхнею твердого тіла на деякий час утримуються на ній за дії міжмолекулярних сил, після чого випарюються з неї у випадковому напрямі незалежно від кута, під яким виникло зіткнення. Якщо поверхня буде рухатися, то молекули газу, що випаровуються з неї після зіткнень, завжди матимуть складову швидкості, яка дорівнює як за величиною, так і за напрямком, швидкості руху поверхні. Видалення газу з вакуумної системи за допомогою рухомих поверхонь є *молекулярною відкачкою*.

Існують дві схеми молекулярної відкачки. Перша - відкачка через канал, одна зі стінок якого здійснює відносне переміщення зі швидкістю v_p паралельно осі каналу. Молекули газу в каналі, які зазнають зіткнень з рухомою поверхнею, отримують приріст кількості руху. При цьому створюється перепад тисків. Максимальна швидкість дії пропорційна швидкості стінки v_p . Друга - використовує для видалення газів залежність провідності похилого каналу, що рухається перпендикулярно газовому потоку зі швидкістю v_p від напрямку течії газу. Відповідно до схем відкачки можна поділити насоси на молекулярні обертові та турбомолекулярні вакуумні насоси.

3.2. Молекулярний обертовий насос.

Конструктивно молекулярні обертові насоси розділені на три групи: циліндричного типу з кільцевими каналами на роторі (насос Геде), циліндричного типу зі спіральним каналом уздовж поверхні статора (насос Гельвека), дискового типу зі спіральним каналом від зовнішнього діаметра до центру диска (насос Зігбана).

Канали утворюються між поверхнями нерухомого корпусу і паза, виточеного в роторі, або ротора і паза, виточеного в корпусі. У першому випадку з газом взаємодіє відносно велика рушійна поверхня, ніж у другому.

Будову і принцип дії молекулярного насоса ілюструє рис.3.1. Усередині циліндричної порожнини статора 1 знаходиться ротор 2. Статор має таку конфігурацію, що на ділянці поверхні 3-4 зазор між ним і ротором дуже малий і створює порівняно великий опір потоку, через що рух газу буде переважно до випускного патрубка. На іншій ж ділянці 3-5-4 довжиною l між ротором і статором утворюється камера шириною h , де і відбувається процес відкачування. Молекули газу, що потрапляють у вхідний отвір насоса і вдаряються об поверхню ротора, залишаються на ній деякий час, а потім відриваються зі швидкістю, що залежить від температури ротора. Ротор обертається з великою з частотою, при якій його лінійна швидкість близька до теплової швидкості молекул, молекули газу набувають тангенціальну складову швидкості в напрямку руху ротора і рухаються вслід за ним від входу до виходу насоса.

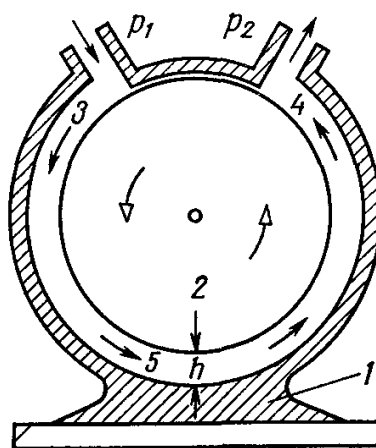


Рис.3.1.Молекулярний насос Геде.

Молекули, що володіють швидкостями, дотичними до поверхні, після багатьох відбивань від стінок камери наближаються до виходу з насоса, де газ накопичується і його концентрація зростає, внаслідок чого газ витікає в форвакуум, створений біля виходу насоса. Зазор 3-4, що має великий опір, ускладнює перетікання газу з боку виходу до входу (обмежує зворотний потік). Проте такий потік існує і в насосній камері в напрямку 4 – 5 - 3, так що ефективний потік, що відкачується, являє собою основний потік за вирахуванням двох зворотних потоків (у напрямках 4-5-3 і 4-3).

Для збільшення довжини l роблять статори з каналами. Спіральний паз 1 на поверхні статора 2 і циліндрична поверхня ротора 3 утворюють робочий канал, що демонструє рис.3.2. Реально конструкція молекулярного насоса складається з декількох пластин ротора і статора.

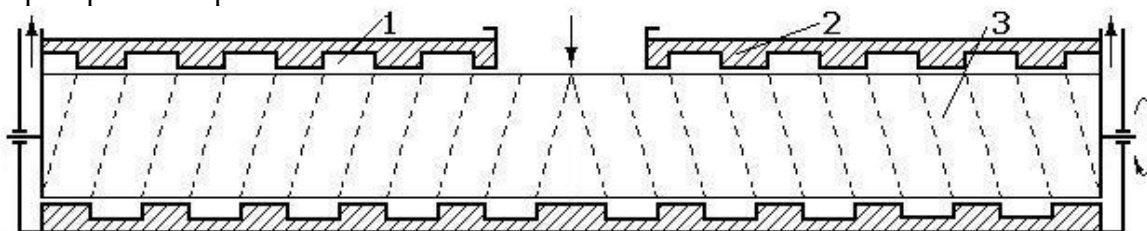


Рис.3.2.Робочий канал молекулярних насосів.

Молекулярні насоси працюють при форвакуумі порядку 1 Па. Такий форвакуум необхідний для забезпечення досить великої довжини вільного пробігу, щоб відкачуваний газ знаходився при молекулярному режимі течії. Молекулярні насоси мають частоти обертання роторів у десятки тисяч об/хв. Діаметри роторів мають порядок декількох десятків см, а зазори становлять декілька сотих мм, що створює серйозні конструктивні труднощі. Швидкість відкачування сучасних молекулярних насосів досягає декількох десятків літрів за секунду. Вони забезпечують $P_{zp} \sim 10^{-4}$ Па.

Основною перевагою механічних молекулярних насосів є отримання високого вакууму в робочій камері без використання робочих рідин (олив).

Недоліки механічних молекулярних насосів:

- у більшості конструкцій зазори не повинні перевищувати декілька сотих міліметра; така точність значно збільшує вартість насоса;
- насоси дуже чутливі до забруднень і від потрапляння в них металевих або скляних частинок втрачають функціональні можливості;
- мають селективність у роботі; найкраще відкачуються молекули із великою масою, тому що швидкодія молекулярного насоса змінюється пропорційно квадратному кореню з молекулярної маси. Цю властивість можна використовувати для розділення ізотопів (збагачення елементів).

3.3. Турбомолекулярні насоси.

Основний недолік попередніх насосів, а саме малий зазор між ротором і статором, значною мірою усунуто в турбомолекулярних насосах. В них потік відкачуваного газу і зворотний потік рухаються у взаємно перпендикулярних напрямках. Конструктивно такий насос нагадує турбіну. Турбомолекулярний насос (рис.3.3а) складається з циліндричної камери, в якій нерухомо закріплені елементи статора у вигляді тонких дисків 1, що мають товщину в декілька міліметрів. Ряд таких же дисків 2 паралельно розміщено на валі ротора, причому як між кожними паралельними поверхнями роторних і статорних дисків, так і в радіальному напрямі між статором і ротором існує зазор в 1 мм.

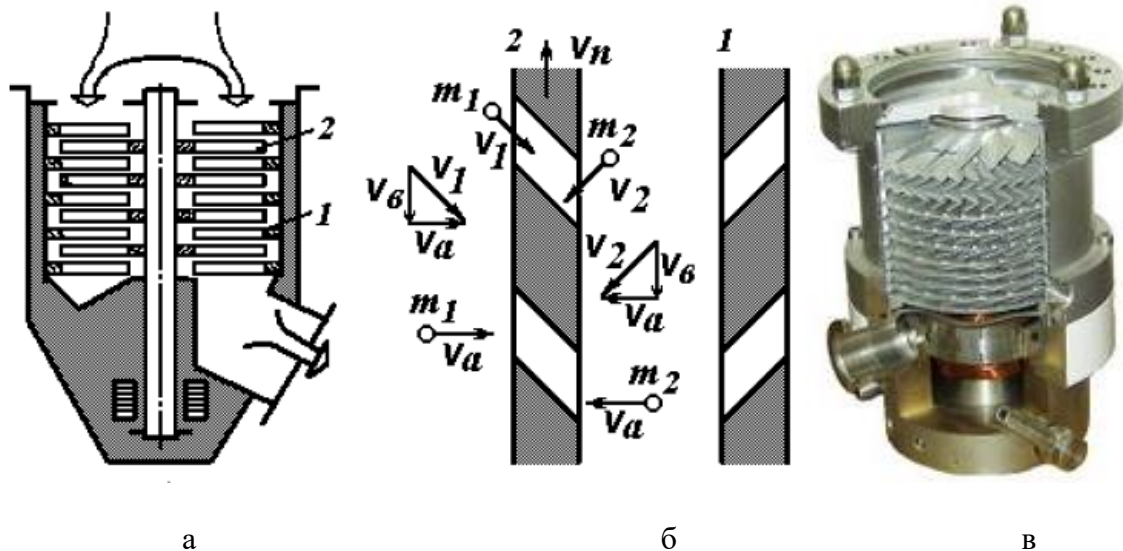


Рис.3.3. Турбомолекулярний насос: а-схематичний розріз; б - утворення каналів; в- загальний вигляд.

Такий достатньо широкий зазор дозволяє надати значно більшу швидкість обертання ротора турбомолекулярного насоса, ніж обертового молекулярного без заїдання. Усі диски мають направлені під кутом радіальні прорізи, розміщені таким чином, що прорізи статорних дисків являють немовби дзеркальне відображення роторних (рис.3.3б), завдяки чому між косими поверхнями прорізів одного диска і поверхнею сусіднього диска створюються клиноподібні канали. Таких каналів зроблено до 40, а в кожній системі розміщено до 19 пар статорних і роторних дисків.

Молекулярна відкачка відбувається в результаті залежності провідності похилого каналу, що рухається зі швидкістю v_n перпендикулярно до газового потоку, від напрямку течії газу. У результаті теплового руху молекули газу з середньоарифметичною швидкістю v_a будуть бомбардувати з обох боків пластини з похилими каналами (рис.3.3б). Можна вважати, що за обертання ротора рух каналу роторної пластини зі швидкістю v_n відносно умовно нерухомої молекули – це такий же рух молекули (наприклад m_1) зі швидкістю $v_s = v_n$ відносно умовно зупиненого каналу. Після векторного додавання складових швидкостей молекули m_1 отримаємо, що напрям її руху зміниться і вона з результуючою швидкістю v_1 буде рухатися паралельно осі каналу. У сукупності з іншими подібними молекулами створиться газовий потік, тобто примусове перетікання газу через рухомий канал на інший бік пластини 2. Таке перетікання газу створить підвищений тиск на одному боці нерухомої статорної пластини 1, тоді як перетікання газу через канали наступної роторної пластини створить понижений тиск на другому боці нерухомої пластини 1. Різниця тисків викличе потік газу через канали нерухомих стартерних пластин 1 у напрямі до випускного отвору насоса. Одночасно потік молекул через канали рухомої пластини 2 у зворотному напрямі, наприклад, молекул, подібних до m_2 , буде направлений перпендикулярно до подовжньої осі рухомого каналу, тобто перетікання газу на інший бік пластини 2 буде утруднено. Отже, за роботи насоса виникає молекулярна відкачка газу від випускного отвору до випускного через похилі канали – отвори в пластині турбіни.

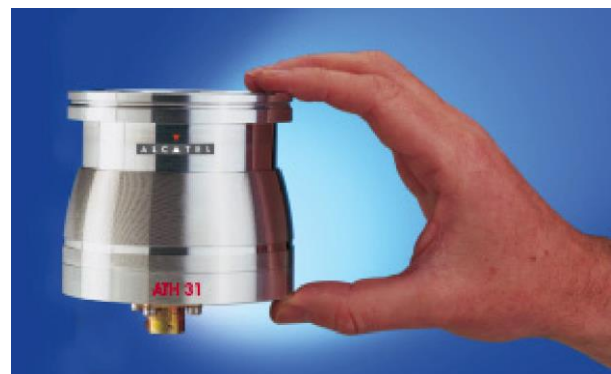
Турбомолекулярні насоси здатні створити граничний тиск до 10^{-8} Па і забезпечити стабільну швидкість відкачування 100-1000 л/с ($0,1-1 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$) в діапазоні впускних тисків $10^1 - 5 \cdot 10^{-6}$ Па. Ці насоси добре пристосовані до відкачування великих потоків газів, у тому числі агресивних, що робить їх незамінними в багатьох галузях. Найбільший випускний тиск 10 Па. Краще вони відкачують тяжкі гази, а гелій і водень гірше. До переваг можна віднести широкий діапазон робочих тисків, висока швидкодія, швидкий запуск насоса. Найбільш поширені марки: ТМН-100,200, 300, 500. Останнім часом створені насоси зі швидкостями відкачування до 10000 л/с при частоті обертання 10000 об / хв., що забезпечують граничний вакуум $< 5 \cdot 10^{-9}$ Па.

Недоліки - високошвидкісний ротор з швидкозношуваними підшипниками складної конструкції. Для одержання високого граничного вакууму потребують високий ступінь розрідження газу з боку форвакууму.

Сучасна мікро і наноелектроніка стимулювала створення мініатюрних турбомолекулярних насосів (рис.3.4), здатних при невисокій швидкості відкачування створювати надвисокий вакуум.



а



б

Рис.3.4. Вид сучасних надмініатюрних турбомолекулярних насосів:
 а-Varian Turbo-V 70 (діаметр 95мм, висота 134мм, $S_H=68$ л/с, $P_{гр}=10^{-9}$ Па);
 б-Alcatel ATH 31(діаметр 97мм, висота 113мм, $S_H=30$ л/с, $P_{гр}=10^{-9}$ Па).

3.4. Струминні насоси.

3.4.1. Типи струминних насосів. В струминних насосах частинки газу набувають швидкість від струменя рідкого або газоподібного робочого тіла. Залежно від фазового стану робочого тіла розрізняють: 1) рідинні насоси, в яких робочим тілом є струмінь рідини (зазвичай вода); 2) газові насоси, в яких робочим тілом є струмінь газу (зазвичай повітря); 3) пароструминні насоси, в яких робочим тілом є струмінь водяних, ртутних або масляних парів. В свою чергу пароструминні насоси за режимом течії газу, що відкачується, та режимом течії струменю пари поділяють на *ежекторні та дифузійні*. До насосів, в яких використовують в'язкість газу, відносяться *пароструминні ежекторні насоси* (робочий тиск 10^5-1 Па). До насосів, в яких використовують молекулярну течію газу, відносять *пароструминні дифузійні насоси* (робочий тиск 10^{-2} і нижче). Дифузійні насоси мають підвид - *бустерні насоси*, які слугують для відкачки великої кількості газу. В цих насосах збільшена потужність нагрівача, застосовуються термостійкі робочі рідини, що дозволяє збільшити випускний тиск і зсунути характеристику $S=f(P)$ в бік більш високих значень P .

Відкачувальна дія пароструминних насосів виникає завдяки дії молекул струменя пари робочої рідини на молекули газу, що надходять до насоса з вакуумної системи через випускний отвір і далі виштовхуються до випускного отвору. Головними елементами таких насосів є: 1) сопло; 2) робоча рідина; 3) нагрівач; 4) охолоджувач.

Слід мати на увазі, що пароструминні насоси не можуть працювати самостійно, а завжди входять до вакуумної системи з насосом попереднього вакууму. В якості насосів попереднього вакууму використовують зазвичай обертові насоси, які впускним патрубком приєднують до випускного патрубка пароструминного насоса так, щоб його випускний тиск хоча й незначно, але перевищував випускний тиск обертового насоса.

Корпуси пароструминних насосів виготовляють зі скла (робоча рідина – ртуть) і металу. До достоїнств скляних насосів відносять простоту виготовлення і надійну герметичність; до недоліків - слабку стійкість скла до механічних і термічних дій.

3.4.2. Дифузійні вакуумні насоси. Принцип дії дифузійного пароструминного насоса показана на рис.3.5. Робоча рідина, що заливається в корпус насоса, нагрівається на кип'ятильнику (випарнику) 1, надходить через паропровід в сопло 2 і виходить з нього у вигляді струменя з надзвуковою швидкістю. Молекули відкачуваного газу через вхідний патрубок 3 захоплюються в кільцевий затвор між соплом і корпусом і переносяться цим струменем до випускного патрубка 5. Суміш робочого пара з газом надходить на охолоджувану стінку холодильника 4, при цьому пара конденсується на ній, а молекули відкачуваного газу продовжують свій рух у бік випускного патрубка 5, звідки видаляються форвакуумним насосом. Конденсат робочої рідини із стінок холодильника стікає вниз в кип'ятильник 1 і знову включається в робочий цикл насоса: робоча рідина у кип'ятильнику знову випаровується (у першу чергу легкі фракції масла), піднімається паропроводом, через сопло знову утворює струмінь пари і т. д.. Так здійснюючи безперервний кругообіг.

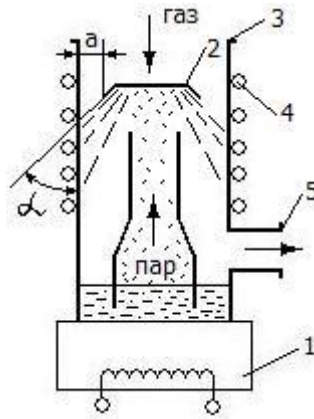


Рис.3.5.Схема роботи пароструминного насоса.

Струмінь пари розділяє області низького вхідного тиску $P_{вх}$ (високий вакуум над струменем) і вищого вихідного тиску $P_{вих}$ (низький-під струменем). Тому одночасно з дифузійною газу зверху, в струмінь відбувається шкідлива дифузія газу знизу. Газ, що дифундував у струмінь знизу, з області вищого вихідного тиску, не виноситься вгору, а захоплюється струменем вниз і при конденсації пари виділяється назад в область $P_{вих}$. Тому важливим є малий кут нахилу α струменя до стінки.

Основною характеристикою пароструминних насосів є залежність швидкодії від тиску на вході в насос (рис. 3.6 а). У середній області робочого тиску швидкість відкачки постійна і максимальна S_{max} . Швидкодія дифузійного насоса не залежить від тиску газу в робочому діапазоні – це головна перевага. При наближенні робочого тиску до $P_{гр}$ вона наближається до нуля через наявність зворотного потоку газів і пари з насоса у відкачуваній об'єм. При збільшенні робочого тиску за верхню межу молекулярного режиму течії швидкодія зменшується у зв'язку із зниженням швидкості дифузії молекул газу в струмінь пари і при максимальному вхідному тиску $P_{в}$ наближається до нуля. Отже, зменшення швидкодії при високому тиску пов'язано з відривом струменя від стінок насоса, що супроводжується перетіканням газу від випускного патрубка до камери.

Граничний тиск насоса $P_{гр}$ при низькому тиску на вихідному патрубку $P_{в}$ (рис. 3.6б) слабо залежить від зміни останнього.

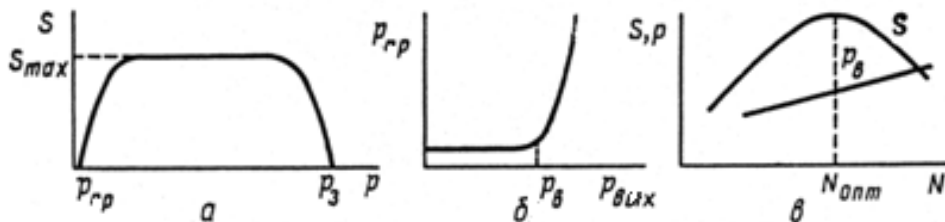


Рис.3.6 Характеристики пароструминних насосів

При збільшенні потужності N нагрівача насоса за рахунок збільшення швидкості парового струменя темп дії спочатку зростає (рис. 3.6 в), досягає максимального значення при $N_{опт}$, а потім зменшується через збільшення щільності парового струменя. Максимальний випускний тиск насоса $P_{в}$ при збільшенні потужності підігріву безперервно зростає. Залежність характеристик насоса від параметрів дифузійного сопла: зазору a і кута нахилу α показано на рис. 3.7. При перевищенні зазором " a " свого оптимального значення a_0 зменшується швидкість струменя у стінок, що веде до збільшення зворотного потоку відкачуваного газу. Існує і оптимальна величина кута α .

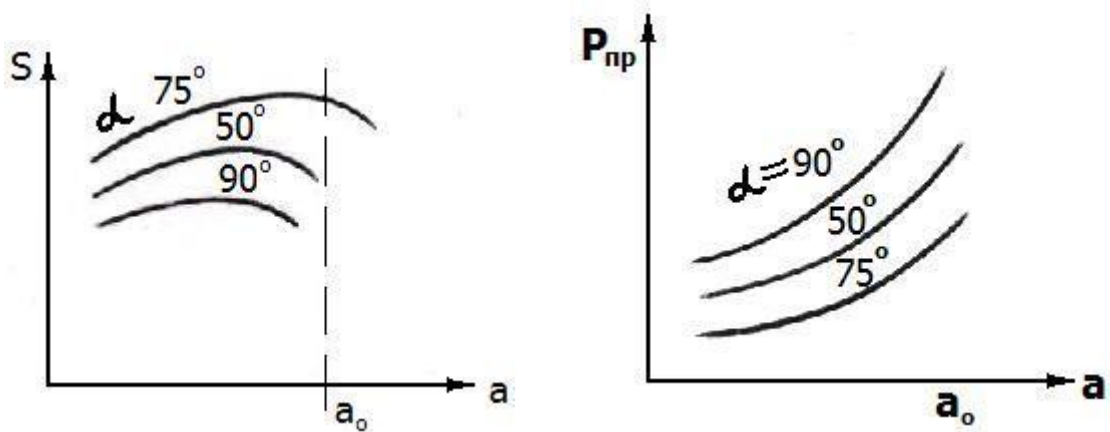


Рис.3.7. Залежність характеристик насоса від параметрів дифузійного сопла.

3.4.3. Ежектор. Ежекторні насоси. Принцип захоплення молекул відкачуваного газу струменем залежить від форми сопла і камери, а також від області робочих тисків. Сопла в сучасних насосах бувають двох типів: ежекторні і дифузійні. *Ежектор* – це пристрій, що створює потік газу з підвищеним тиском завдяки дії струменя робочої рідини (пари), що виходить з *надзвуковою швидкістю* з сопла. Надзвуковий рух струменя створює турбулентності, де відбувається змішування молекул струменя і газу, який відкачують. Схема роботи пароструминних сопел: а) ежекторного; б) дифузійного показано на рис.3.8: 1 - сопло; 2 - "межа" струмені пари; 3 - теплоізольована зона змішування (перенесення); 4 - частина робочої камери, що охолоджується (конденсатор).

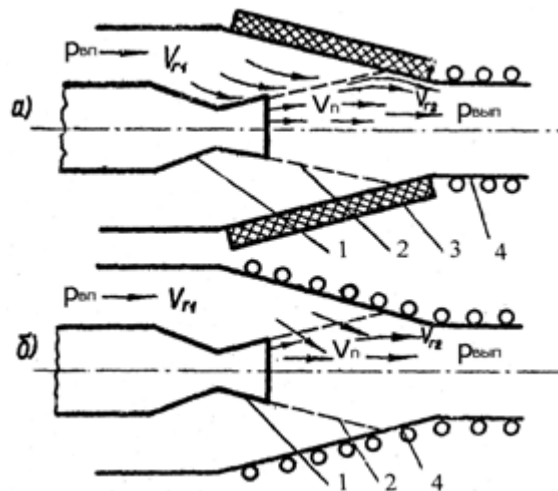


Рис.3.8. Пароструминні сопла.

Дія ежекторного сопла (рис.3.8 а) полягає в тому, що струмінь пари при виході з сопла з великою швидкістю, захоплює за собою частинки газу по межі зіткнення за рахунок в'язкості. Це явище має місце при впускних тисках 1Па. При зниженні тиску відкачуваних газів механізм дії сопла змінюється. У зв'язку зі збільшенням СДВП молекул газу може відбуватися дифузія частинок газу на значну глибину в струмінь пари (рис.3.8 б). При цьому струмінь повинен бути менш щільним, ніж у першому випадку. Дифузія газу відбувається під дією різниці його парціальних тисків у просторі біля струменя і в самому струмені. Це явище має місце при тисках нижче 0,1Па. У сучасних насосах частіше застосовується зонтичні (звернені) конструкції дифузійних сопел, як це показано на рис. 3.4. Ефективність дії дифузійного сопла визначається швидкістю руху струменя пари, його спрямованістю щодо охолодженої стінки, площею мінімального перетину кільцевого зазору між стінкою насоса і соплом, а також повнотою конденсації пари на охолодженій стінці.

Отже, механізм захоплення газу в ежекторних (10^5 – 10 Па), бустерних (10 – 10^{-2} Па) і дифузійних (10^{-2} – 10^{-5} Па) насосах різний. Чим вищий тиск газу на вході насоса, тим

більшою повинна бути щільність пари у струмені. При великих швидкостях пари захоплення газу відбувається в результаті турбулентно-в'язкісного перемішування вихорів пари із частинками газу (ежекторні насоси). Із зниженням тиску і зменшенням витрати пари зростає роль в'язкісного захоплення в ламінарний струмінь (бустерні насоси). При дуже низькому тиску, коли вільний пробіг молекул газу порядку діаметра насоса, працює тільки дифузійний механізм проникнення молекул газу в струмінь пари; щільність струменя повинна бути низькою, а швидкість струменя – високою для ефективної передачі імпульсу молекулам газу (дифузійні насоси). При випадковому зіткненні молекул газу із струменем молекули можуть як відбитися, так і дифундувати у струмінь через різницю вхідного тиску і парціального тиску газу в струмені. Елементи струменя пари насичуються газом поступово у міру руху від сопла до стінки.

Конструктивно ежекторні насоси подібні до дифузійних. Але струмінь пари не повинен конденсуватися на стінці насоса відразу після її торкання, тобто стінка насоса навколо ежекторного сопла не охолоджується. Ежекторні насоси використовують не дифузійне, а в'язкісне захоплення молекул газу струменем пари. Насоси з ежектором мають велику швидкодію (50 – 100 л/с) в межах тиску 10 - 1 Па, тобто в області, де обертові пластинчаті насоси мають граничний тиск. У зв'язку з цим ежекторні насоси не призначені до безпосереднього приєднання до камери відкачування. Їх розміщують між високовакуумним і насосом попереднього вакууму, а для отримання ще меншого тиску роблять багатоступінчатими, тоді граничний тиск знижується до 10^{-1} - 10^{-2} Па. До недоліків слід віднести залежність швидкодії насоса від тиску газу.

3.4.4. Багатоступеневі пароструминні насоси. Тільки 25-30% молекул, що вдаряються у струмінь проникають в нього і можуть бути відкачані. Зворотній тиск в зоні роботи розглянутого вище сопла має бути мінімальним, щоб зменшити зворотний потік газу. У одноступеневому дифузійному насосі не вдається забезпечити малий зворотний тиск, тому зазвичай використовуються багатоступеневі насоси, де зворотний тиск зростає від ступеня до ступеня. В залежності від призначення пароструминних насосів в них застосовуються дифузійні або ежекторні сопла, нерідко одночасно і ті й інші. На рис. 3.9а показано насос НС-86 у зібраному та розібраному виглядах: I — ежекторний ступінь; II, III — дифузійні ступені. На рис. 3.9 б показано зовнішній вигляд насоса HS-2 (Varian Co). З рис.3.9 а видно, що нижня частина насоса (ежекторне сопло) не охолоджується.



а

б

Рис. 3.9. Багатоступеневі паро струменеві насоси.

Схема насоса з трьома дифузійними соплами показана на рис.3.10. Пара робочої рідини з випарника 4 надходить з концентрично розташованих паропроводів до робочих сопел насоса. Вхідне (верхнє) сопло, на яке надходить пара з центрального паропроводу 7, практично визначає величину граничного тиску і максимальну швидкість відкачування. Зазор між вхідним соплом 1 і корпусом 9 робиться максимальним. Наступні ступені насоса мають менший зазор між соплом і корпусом, що забезпечує необхідний коефіцієнт стискання відкачуваного газу. Конструкція останньої ступені (вихідне сопло) 3 визначає величину найбільшого випускного тиску, який для більшості пароструминних насосів не перевищує 26 Па. Конденсат, що стікає по охолодженим стінкам корпусу 9, потрапляє у випарник (нагрівач), виконаний у вигляді лабіринту.

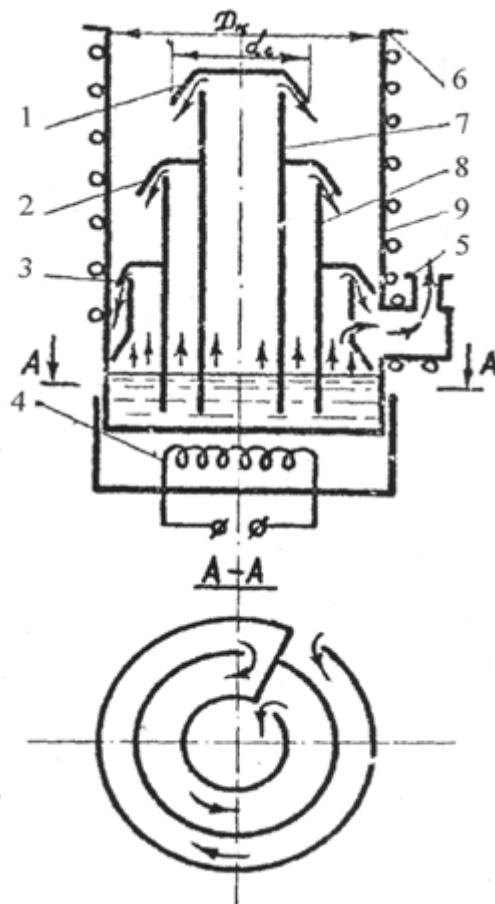


Рис.3.10. Схема пароструминного насоса Н-5:1 - високовакуумне сопло; 2 - середнє сопло; 3 - низьковакуумне сопло; 4 - нагрівач; 5 - випускний патрубок; 6 - впускний патрубок; 7 - корпус; 8 - паропровід важкої фракції; 9 - паропровід легкої фракції.

У міру проходження до центру внутрішнього паропроводу масло втрачає найбільш легколетучі фракції, що володіють великим тиском насичених парів. Верхнє сопло 1 буде працювати на фракціях масла, що мають найменший тиск насиченої пари, середнє сопло 2 - на середніх фракціях, нижнє сопло 3 - на легких, що мають найменшу температуру кипіння. Таким чином будова насоса така, що при нагріванні виникає *розгонка оливи*, тобто відокремлення та використання пари легких фракцій оливи. Для поліпшення граничного вакууму нижня частина насоса не охолоджується - відбувається додаткове знегажування масла. Фракціонування оливи, яка стікає в кип'ятильник з периферії по стінках корпусу, здійснюється за допомогою лабіринтових кілець, які подовжують шлях масла до надходження в центральну зону кип'ятильника, а звідти в високовакуумні ступені насоса. Отже, легкі фракції масла випаровуються раніше, ніж дійдуть до центру і, потрапивши в 2-й або 3-й ступінь, видаляються в ежекторне сопло. Такий насос може працювати з менш стійкою оливою і забезпечувати низький граничний тиск ($3 \cdot 10^{-4}$ Па).

Насос Н-5 має всі три дифузійних сопла і володіє наступними технічними даними. Швидкість дії при тисках від $2,7 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-5} Па становить 500 л/с, при цьому граничний вакуум, створюваний насосом на маслі ВМ-І, дорівнює $4 \cdot 10^{-4}$ Па. Найбільший випускний тиск становить 26 Па.

Насос ЦВЛ-100 призначений дня відкачування повітря та інших газів, які не впливають на матеріали конструкції. Він має два дифузійних сопла і ежекторне сопло, необхідне для збільшення максимального тиску. Швидкодія насоса при відкачці повітря в інтервалі тиску від 10^{-3} до $2,6 \cdot 10^{-4}$ Па становить 100 л /с. Граничний вакуум $4 \cdot 10^{-4}$ Па. Найбільший випускний тиск 13 Па.

Як ми вже побачили для нормальної роботи пароструминного насоса стінки його корпусу необхідно охолоджувати. Найчастіше застосовують два способи охолодження: за допомогою водяної сорочки корпусу і за допомогою змійовика з мідної трубки, напаяних

на корпус (рис.3.9). Система охолодження конструюється так, щоб підтримати в робочому стані температуру стінок істотно менше температури конденсації робочої рідини. Для масляних насосів ця температура не повинна перевищувати 28-30°C. При збільшенні температури стінок в результаті недостатнього охолодження насоса відбувається перегрів масла, збільшується швидкість його розкладання (*крекінг*), зростає швидкість дифузії масляних парів в відкачується обсяг, погіршується граничний вакуум.

3.4.5. Робочі рідини для пароструминних насосів. Технічні характеристики пароструминних насосів залежать в першу чергу від їх робочої рідини. До робочих рідин пароструминних насосів висуваються такі вимоги:

- мінімальна пружність пари при кімнатній температурі і максимальна – при робочій температурі в кип'ятильнику;
- стійкість до розкладання при нагріванні;
- мінімальна здатність розчиняти газів;
- хімічна стійкість щодо відкачуваних газів і щодо матеріалів насоса;
- мала теплота пароутворення.

Мінімальна пружність пари при кімнатній температурі потрібна для отримання найменшого граничного тиску насоса. Максимальний тиск пари при робочій температурі кип'ятильника збільшує випускний тиск насоса і зменшує необхідну потужність підігрівача. Стійкість до розкладання робочої рідини при нагріванні впливає на тривалість служби робочої рідини і максимальний випускний тиск. Розчинність газів у робочій рідині приводить до збільшення зворотного потоку газів через сопло разом із паровим струменем. Хімічна стійкість визначає термін служби робочої рідини і накладає обмеження на вибір конструкційних матеріалів насосів. При малій теплоті пароутворення потрібна менша потужність підігрівача насоса.

В якості робочих рідин пароструминних насосів застосовуються *ртуть, мінеральні масла, складні ефіри органічних спиртів і кислот, кремнійорганічні сполуки*. Ртуть (Р-1, Р-2) як робоча рідина пароструминних насосів має такі переваги: не окислюється повітрям, однорідна за складом і не розкладається при робочих температурах насоса, розчиняє малу кількість газів і має високу пружність пари при робочій температурі в кип'ятильнику. Недоліки ртуті: токсичність, хімічна активність щодо кольорових металів, висока пружність пари при кімнатній температурі (10^{-1} Па). Окрім цього, щоб пара ртуті не потрапляла до вакуумної системи, необхідно додатково використовувати виморожуючі пастки, які відокремлюють насос від камери.

Довготривалі пошуки заміни ртуті привели до розробки спеціальної вакуумної оливи. На відміну від ртуті вони не однорідні, а є сумішшю великої кількості фракцій, які мають як різні температури кипіння, тиск насиченої пари, тощо. У зв'язку з цим ці оливи за нагрівання розкладаються на легкі та важкі фракції. Утворення легких фракцій збільшує пружність пари і якщо їх не видаляти, то до зростає граничний тиск. Для їх видалення слугують пастки.

Мінеральні масла для пароструминних насосів (ВМ-1, ВМ-5) отримують шляхом вакуумної дистиляції продуктів переробки нафти. Вони характеризуються низькою пружністю пари при кімнатній температурі (10^{-6} Па), задовільною термостійкістю, але мають невисоку термоокислювальну стійкість і утворюють смолянисті нальоти на внутрішніх деталях насоса.

Ефіри є продуктами синтезу фталевої й себацинової кислот із спиртами:октоїлі ОФ і ОС. Поліфенілові ефіри (ПФЕ), що складаються з бензольних радикалів, мають дуже низький тиск пари при кімнатній температурі (10^{-9} Па) і високу окислювальну стійкість.

Кремнійорганічні рідини для пароструминних насосів (ВКЖ-94, ПФМС-2) – це полісилоксанові полімерні сполуки, що складаються з функціональних груп $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$. Вони мають високу термоокислювальну стійкість і достатньо низьку пружність пари при кімнатних температурах (10^{-5} Па).

Зауваження до роботи з пароструминними насосами.

Пароструминні насоси широко використовують для отримання високого вакууму, тому за вибору того чи іншого насоса слід враховувати наступні практичні зауваження.

Парортутні насоси треба використовувати лише:

- а) для відкачки приладів, в яких використовують ртутну пару, наприклад таких, як люмінесцентні лампи, ртутні випрямлячі змінного струму і т.п.;
- б) для відкачки пари, що хімічно діє на органічні рідини;
- в) для відкачки приладів з емітерами, які мають високу емісійну стабільність, тобто фото- або вторинно-емітуючі поверхні;
- г) для відкачування приладів, що призначені для аналізу газів, тобто коли виникає загроза, що пари органічних речовин або продукти їх розкладу можуть затемнити результати аналізу.

Парооливні насоси можна використовувати:

- а) для відкачування вакуумних систем, що призначені для нанесення тонких покриттів;
- б) для відкачки приладів, присутність пари олив з низьким тиском в яких не викликає загрози його роботі, наприклад електронно-променевих трубок, електронних ламп і т.п.;
- в) для вакуумних печей, в яких проводять знегаження, плавлення або спікання.

Найчастіше у насосах використовують дешеві мінеральні масла. Кремнійорганічні рідини застосовуються в системах із частим напуском атмосферного повітря. Ефіри, вартість яких ще велика, застосовуються для систем, де потрібно отримання надвисокого вакууму. Ртуть через токсичність застосовується в пароструминних насосах лише для відкачування ртутних систем, наприклад ртутних випрямлячів.

3.5. Іонні насоси.

Розробка іонних насосів була викликана бажанням отримувати високий вакуум, в якому була б відсутня пара робочої, що завжди присутня за використанням парооливних насосів. Якщо молекули газу, що за визначенням є електрично-нейтральними найменшими частинками речовини, перетворити в додатні іони за допомогою, наприклад, ударної іонізації, то під впливом прикладеного зовнішнього електричного поля їх можна спрямувати до випускного патрубку, де вони створять збільшену ніж на випускному патрубку концентрацію. Якщо на випускному патрубку такого насоса створити необхідний попередній вакуум механічним або пароструминним насосом, то отримаємо іонну відкачку.

Отже, направлений рух попередньо заряджених молекул газу під дією електричного поля є основою роботи іонних насосів. Для передачі молекулам імпульсу в напрямку насоса попереднього розрідження використовується вплив постійного електричного поля. Нейтральні молекули іонізуються α -, β -, і γ -випромінюванням. Найбільш ефективно електронне бомбардування. Газ, що надходить в насос, рис. 3.11, іонізується в просторі іонізації 1, а потім за допомогою прискорювальних електродів 2, до яких прикладена різниця потенціалів U (В), направляється до вихідного патрубку насоса. Тут іони нейтралізуються і відкачуються насосом попереднього вакууму.

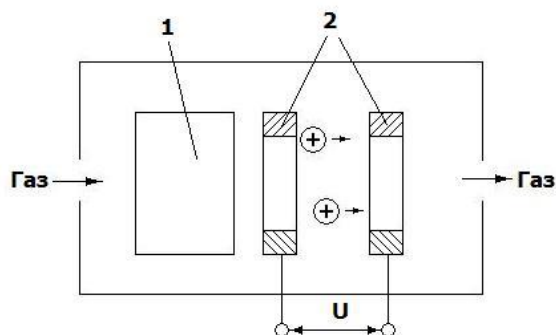


Рис.3.11. Схема іонного насоса.

Швидкодія металевих іонних насосів може досягати 7000 л/с, а створений вакуум має тиск $(0,8 - 6)10^{-4}$ Па - при умові, що насосом попереднього розрідження підтримується тиск $(3 - 5)10^{-2}$ Па. Через труднощі іонізації газів при низькому тиску насоси отримали мале поширення. Також нагрівання катода викликає випаровування вольфраму і катод швидко руйнується. Тому більш широке практичне застосування отримали іонно-сорбційні насоси, про які мова піде далі.

Л.4. Фізико-хімічні способи отримання вакууму. Насоси для високого і надвисокого вакууму.

Сорбція і її види. Фізична адсорбція і її головні закономірності. Хімічна адсорбція. Абсорбція газів металами. Закони десорбції. Знегажування і газопоглиначі. Сорбційні вакуумні насоси. Кріогенні насоси.

Розвиток вакуумної техніки й підвищення точності вимірювання тиску в області високого і надвисокого вакууму неможливі без вивчення фізичних процесів і явищ на межі газ–тверде тіло. Тому особлива увага приділяється фізичним явищам при низьких тисках. Фізико-хімічні методи отримання вакууму дозволяють для роботи в певному діапазоні тисків створювати насоси з кращими, ніж у механічних, техніко-економічними показниками. Суттєва перевага фізико-хімічних насосів перед механічними полягає в можливості усунення забруднення камери, що відкачується, парами робочих рідин, які присутні в багатьох механічних насосах для змащення і герметизації.

4.1. Сорбція і її види.

Сорбцією називають процес поглинання газів або пари твердими тілами чи рідиною. З досвіду відомо, що тверді тіла поглинають значну кількість газу. Сорбційні явища суттєво впливають на технологічні операції особливо у вакуумі. Їх розділяють на три такі види, як *фізична адсорбція, хемосорбція або хімічна адсорбція і абсорбція газів металами*. У зв'язку з цим речовину, яка поглинає газ, називають *сорбентом, адсорбентом* або *абсорбентом*, а речовину, яка поглинається - *сорбітом, адсорбітом* або *абсорбітом*.

4.2. Фізична адсорбція і її головні закономірності.

Фізичною адсорбцією називають явище поглинання газу у вигляді дуже тонкої плівки, яка створюється на поверхні твердого тіла. Фізична адсорбція проявляється в такому досліді. Візьмемо листок слюди і розщепимо його на дві частини. Якщо одразу складемо знову частини, то вони з'єднаються в одне ціле. Але з'єднання не виникне, якщо частини залишити в повітрі на декілька хвилин, через утворення на їх поверхні адсорбованих шарів азоту і кисню.

Фізична адсорбція газу твердим тілом відбувається внаслідок взаємодії між молекулами (атомами) газу та активними адсорбційними центрами, які створюються поверхневим полем твердого тіла. Сили цієї взаємодії можна ототожнювати із силами Ван-дер-Ваальса, природа яких зводиться до взаємодії між молекулярними диполями. Фізична адсорбція це утримання молекул газу електричним полем поверхні. При фізичній адсорбції маса поглинутого газу пропорційна площі поверхні тіла, а не його об'єму. Вважається, що адсорбовані плівки газу є головним чином мономолекулярними. Пористі тіла мають дійсну площу поверхні значно більшу, ніж ту, що здається. З цієї причини високу адсорбційну властивість мають порошкоподібні або подрібнені речовини. Адсорбція є явищем екзотермічним з наявністю газової фази, а тому *зростає з підвищенням тиску або зниженням температури*. При нагріванні тіла з одночасним зниженням тиску поглинутий газ легко видаляється.

Адсорбція є зворотним явищем, якщо створені відповідні умови. Адсорбовані молекули безперервно залишають поверхню тіла, але також безперервно інші молекули

газу знову адсорбуються. Виникає динамічна рівновага, за якою відповідна кількість молекул завжди залишається адсорбованою на поверхні тіла. Таким чином, за відповідних умов адсорбовані молекули можуть виділитися тілом. Таке зворотне виділення речовиною адсорбованого газу називають *десорбцією або газовіддачею*. Звідси випливає практичний висновок: щоб рівноважний стан відповідав найбільшій можливій кількості адсорбованого газу, необхідно знижувати температуру адсорбенту, і навпаки, для видалення адсорбованого шару - підвищувати.

Між молекулами речовини і молекулами газу при адсорбції існує спорідненість. Для відповідного тіла адсорбція залежить від природи газу, *причому він не змінюється хімічно*. Фізична адсорбція з часом досягає насичення. Після покриття всієї поверхні тіла плівкою адсорбованого газу адсорбція припиняється. У зв'язку з цим перед використанням адсорбенти потребують активації, тобто очищення.

4.3. Хімічна адсорбція.

При поглинанні газу поверхнею тіла іноді між ними виникає взаємодія у вигляді хімічної реакції, тобто діють сили хімічного зв'язку, які відрізняються від сил Ван-дер-Ваальса і часто перевищують їх. У цьому разі молекула при адсорбції віддає або отримує від поверхні електрон, розщеплюється на атоми або радикали, які зв'язуються із поверхнею окремо. Явище поглинання газів поверхнею тіл в результаті хімічного реагування між молекулами тіла і молекулами газу називають *хімічною адсорбцією*. Оскільки кількість тепла, що виділяється при цьому, пропорційна тепловій дії хімічної реакції, то таку адсорбцію ще називають *"хемосорбцією"*.

Між фізичною і хімічною адсорбцією існує велика відмінність. Хемосорбція при недостатньо високих температурах зовсім не виникає і, навпаки, швидко зростає при збільшенні температури, тоді як фізична адсорбція значно ефективно діє при низьких температурах. Хемосорбція, як правило, *не зворотній процес* і для видалення поглинутих газів потребує нагрівання до більш високих температур. Хімічний склад десорбованого (виділеного) газу може відрізнитися від адсорбованого. У результаті хімічної адсорбції можуть виникнути суттєві зміни властивостей поверхні тіла. Наприклад, кисень, що адсорбується на вольфрамі, в результаті хемосорбції знижує емісію електронів у сотні разів і для його видалення необхідно нагріти вольфрам до 1700°C.

Адсорбція і десорбція відбуваються одночасно через те, що при практичній роботі доводиться, як правило, мати справу із сумішшю різних газів та матеріалами, які мають різні сорбційні властивості. Причому адсорбція – це перший і необхідний крок до проникнення газу всередину твердого тіла.

4.4. Абсорбція газів металами.

При поглинанні газів металом молекули газу можуть проникати всередину між його атомами, тобто виникає твердий розчин. Розчинність газів металом називають *абсорбцією*. При абсорбції виникає поглинання газу повним об'ємом металу. Отже, *абсорбція – це об'ємне поглинання газів*.

Кількість абсорбованого газу зростає пропорційно об'єму тіла, залежить від природи металу і збільшується при зростанні його пористості. Подібно до фізичної адсорбції абсорбція газів металами з часом досягає насичення. За відповідних умов метал може поглинати гази в кількості за об'ємом, що в сотні разів перевищує його власний. Метали можна назвати губкою для газів. Наприклад, паладій за нормальних умов (20°C і 760 Торр) поглинає до 900 об'ємів водню, цирконій - 1500, а титан - до 1800. Останні два метали використовують в якості *газопоглиначів* і за необхідності розміщують у середині електровакуумних приладів. Але такі метали, як золото, цинк і кадмій не абсорбують водень. У той же час кисень поглинається більшою частиною металів з виникненням окислів. З міддю кисень утворює суцільні зерна окислу, які за прожарення міді в атмосфері водню або у вакуумі відновлюються, що призводить до виникнення пористості й крихкості металу. Ось чому для електровакуумної промисловості дуже важливе використання безкисневої міді з високою провідністю, яку отримують плавкою у вакуумі.

Абсорбція газів металами потребує значно більше часу, ніж фізична адсорбція. Досягнення насичення при абсорбції виникає за час від декількох хвилин і годин при нагріванні або навіть до декількох днів у холодному стані, тоді як при адсорбції достатньо хвилини. Така різниця пояснюється тим, що адсорбція відбувається на поверхні тіла, тоді як абсорбція газів металами відбувається шляхом їх дифузії між атомами в середину металу.

Об'єм газу, що абсорбується за нормальних умов при досягненні насичення грамом або кілограмом металу, називають *розчинністю*. При абсорбції газів металами можуть виникати два види поглинання: *поглинання з утворенням твердого розчину і поглинання з утворенням нової хімічної сполуки*. При утворенні твердого розчину молекули газу проникають у кристалічну ґратку твердого тіла та залежно від того, дисоціюють вони на атоми чи ні, розчинність газу пропорційна або квадратному кореню з тиску, або прямо пропорційна. В неметалах молекули газу при розчиненні не дисоціюють на атоми і розчинність при сталій температурі пропорційна тиску. Розчинність може підвищуватися або знижуватися зі збільшенням температури. При достатньо великій амплітуді теплових коливань молекули розчиненого газу зриваються із зайнятих місць і дифундують на нові (в основному у бік своєї меншої концентрації). Взагалі однозначної залежності розчинності газів від температури для різних металів немає. Наприклад, розчинність водню із підвищенням T в металах групи *A* (Ni, Fe, Al, Ag, Mo, W, Pt) зростає, а металах групи *B* (Ti, V, Zr, Hf, Th, Ta) – падає. Матеріали групи *A* застосовуються в якості конструкційних у вакуумній техніці, групи *B* – це активні адсорбенти.

Буває, що залишковий газ вступає у хімічну реакцію з твердим тілом. Реакція закінчується коли настає рівновага між кількістю газу, який вступив у реакцію, і кількістю газу, який виділяється зворотно через дисоціацію хімічної сполуки, яку утворив газ з твердим тілом. Нова хімічна сполука входить в склад твердого тіла, розчиняючись у ньому, або ж у вигляді плівки на поверхні (окисли).

4.5. Закони газовиділення металами.

Дослідним шляхом встановлені такі закономірності газовиділення:

- 1) десорбція зростає з пониженням тиску, але навіть при дуже низькому тиску в металі ще залишається помітна кількість розчиненого газу;
- 2) десорбція зростає з підвищенням температури тіла, якщо одночасно з нагріванням здійснюють зниження тиску. Дійсно, підвищення температури збільшує тепловий рух атомів металу і молекул розчиненого газу, що полегшує їх відрив і буде наближати розподіл молекул до рівноваги з тиском газу в оточуючому вакуумному середовищі;
- 3) на десорбцію впливає природа металу і газу (спорідненість їх молекул). Мала молекулярна маса водню сприяє легкості його дифузії і видалення з металу. У зв'язку з цим метали перед уведенням в електровакуумний прилад спочатку прожарюють в атмосфері водню при 900°C протягом 15-20 хв. Водень відновлює окисли, витісняє інші абсорбовані гази, які важко видаляються. Далі водень займає їх місця в металі, а потім легко видаляється у процесі відкачки.

4.6. Знегажування і газопоглиначі.

Створення вакууму в будь-якому скляному електровакуумному приладі має починатися із знегажування – операції вивільнення скла від газів. Чим більше у склі лугів, тим більше в ньому міститься двоокису вуглецю і води. Пара останньої негативно впливає на розжарені вольфрамові деталі. Знегажування є кращим, коли буде вища температура нагрівання. Але скло стає м'яким вже при порівняно низькій температурі. Тому *I. Ленгмюр* запропонував прогрівання виконувати в певній послідовності. Спочатку знегажування скла виконують при температурі, що на 50°C менша від температури м'якості скла, щоб краще видалялися гази з глибинних шарів скла. Потім продовжують процес при температурі на 100°C менше від першої, щоб більш ретельно гази видалялися з поверхні. Оскільки перша температура наближена до температури, коли скло стає м'яким,

то до другої температури наближаються повільно, щоб швидке охолодження не викликало виникнення напружень, а потім і тріщин.

Велика кількість газів міститься в металах, куди вони потрапляють в результаті поглинання при виплавленні, розливі й обробці металів. В електровакуумній техніці широко використовують такі метали, як мідь, вольфрам, нікель, залізо, титан та ін. Найбільш ці метали поглинають водень, азот, окис і двоокис вуглецю, кисень (у складі окислів), а в міді присутній ще сірчаний газ. Кількість газів, яку містять метали, розраховують відповідно до 100 грамів металу і наводять в см^3 . Ця величина для молібдену і вольфраму не перевищує $0,5 - 1 \text{ см}^3 / 0,1 \text{ кг}$; для нікелю - $10 \text{ см}^3 / 0,1 \text{ кг}$, а для гірших зразків заліза вона може досягати декількох сотень см^3 на 100 грамів металу. Знегажування металів здійснюють нагріванням у вакуумі або в атмосфері водню. З підвищенням температури швидкість виділення газів різко зростає. Чим краще газ розчиняється в металі при поглинанні, тим швидше він може бути видалений при десорбції. Швидкість газовиділення залежить від гранично допустимої температури знегажування відповідного металу. Оскільки видалити з металу всі поглинуті гази неможливо, то знегажування вважають задовільним, якщо в металевих деталях електровакуумних приладів залишкова кількість газів не перевищує $1 \text{ см}^3 / 0,1 \text{ кг}$.

Повністю звільнити від газів метали і інші матеріали вакуумної техніки, або які досліджуються у вакуумі, неможливо. Тому, наприклад, в електровакуумних приладах, слід чекати, що із часом тиск зросте через виділення газів деталями і стінками об'єму. У зв'язку з цим виникає необхідність використовувати спеціальні матеріали, які називаються *газопоглиначами* або *гетерами*. Фактори, які сприяють поглинанню газів твердим тілом: поверхня, температура, тиск. Якщо речовина піддається випаровуванню у вакуумі, то в пароподібному стані вона стає дуже ефективним поглиначем. Газопоглиначі при розміщенні їх усередині вакуумного приладу підвищують вакуум, створений за відкачки, і поглинають гази, які виділяються при роботі приладу. Утворений на стінках свіжий, чистий шар речовини - активний поглинач (особливо, якщо його відновлювати).

Гетери – це здебільшого метали, які поділяються на такі, що випаровуються і не випаровуються. Газопоглиначі, що випаровуються, виготовляють у вигляді маленьких клаптиків металу, який можна легко випарити. Цей клаптик розігрівають після відкачування так, щоб після випарювання і конденсації він створив на стінці об'єму наліт (плівку) у вигляді дзеркальця, але не осідав би на електродах і не погіршував ізоляційні властивості у середині приладу. Ці газопоглиначі повинні мати високу поглинальну здатність, особливо відносно кисню при температурах, починаючи від кімнатної і до 200°C , а також малу пружність пари ($p < 10^{-5} \text{ Па}$).

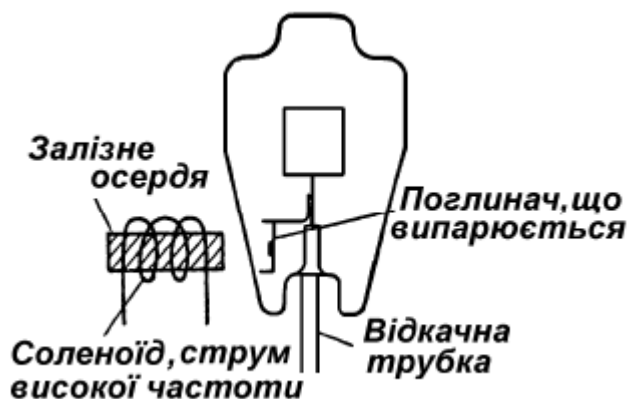


Рис.4.1. Гетер у електровакуумному приладі.

Відповідним вимогам до таких газопоглиначів задовольняє невелика кількість металів. Це у першу чергу магній, барій, алюміній. Найкращим з них є барій, незважаючи на такий недолік, як низька хімічна стійкість. Технологія випарювання зображена на

рис.4.1. Розпилення виконують місцевим нагріванням струмом високої частоти, який підводять до соленоїду із залізним осердям. Утримувач газопоглинача доводять до червоного розжарення, метал газопоглинача випарюється і одразу конденсується на ділянці стінки колби, що проти нього, утворюючи там дзеркальний наліт. Його можна спостерігати на поверхні скляних радіоламп або манометричних ламп. Ця плівка і є гетер, який адсорбує гази. Залежно від тиску міняється колір плівки, з'являються плями і розводи. Якщо гетер стає білого кольору, значить він окислився (розгерметизація). Барій поглинає всі гази, окрім інертних. Використовується Ва у сполуках з Th, Ti, Al. Деколи в якості гетера застосовується магній (світла плівка, а у барію – темна). Проте він поглинає лише кисень.

Якщо випарювання є небажаним при побоюванні забруднення або зниження ізоляційних якостей електровакуумного приладу, використовують газопоглиначі, що не випарюються: листовий тантал, титан або цирконій порошковий, з яких виготовляється функціональний елемент приладу, наприклад, анод. Ще використовують спеціальний сплав церію і торію - *цето*, який проявляє свої властивості в холодному стані, на відміну від перших, робоча температура яких знаходиться в межах 400 - 800°C. Ефективним поглиначем є сплав *циал*, що містить 84% Zr і 16% Al. Циал добре поглинає і утримує все гази в діапазоні температур 400-600° С. Швидкість поглинання азоту цим матеріалом в кілька десятків разів перевищує швидкість поглинання азоту чистим цирконієм.

4.7. Сорбційні вакуумні насоси.

Вище ми побачили, що при взаємодії газів з твердими тілами може відбуватися 2 ефекти - це поглинання і виділення газу. Поглинання газу можна використовувати для відкачування; виділення - для знегажування. Насоси, що працюють на фізико-хімічному зв'язуванні газів діляться на *сорбційні*, в яких використовуються різні види поглинання газів, і *конденсаційні (криогенні)*, в основу роботи яких покладена конденсація газів на охолоджених до низьких температур поверхнях. Дія сорбційних насосів заснована на зв'язуванні газів і пари на поверхнях і в матеріалах, спеціально для цього підготовлених. У таких насосів випускний патрубок відсутній. Щоб відкачування було ефективним, коефіцієнт прилипання газу на сорбуючих поверхнях повинен бути по можливості близьким до 1, а час перебування часток газу тривалим. Це досягається використанням матеріалів з великою енергією фізичного або хімічного зв'язку, зниженням температури сорбуючої поверхні, активуванням газу, наданням молекулам газу великих швидкостей (іонізація і сильні електричні поля), покриттям адсорбованого газу шаром розпорошеного металу.

Вибір металів для гетерів в насосах залежить від багатьох, факторів, серед яких одним з найважливіших, як вже зазначалося, є їх хімічна активність. Матеріалами для гетерів в насосах промислового виробництва служать тугоплавкі метали, такі, як молібден, тантал, цирконій і титан, оскільки виготовлені з них нитки або стрічки можуть розжарюватися безперервно і протягом тривалого часу (до тих пір, поки не перегорять) випаровувати з поверхні метал. Серед наведених металів найкращим для використання в сублімаційних насосах є титан. Швидкість відкачування насоса визначається головним чином площею активної титанової плівки. Таким чином, швидкість відкачування залежить від швидкості осадження плівки титану, і для того щоб швидкість відкачування залишалася постійною в міру зв'язування відкачуваного газу і витрати плівки, необхідно випаровувати відповідну кількість гетера.

Основу процесу відкачування сорбційними насосами складає сорбція газів атомами розпорошеного гетера. Є насоси з термічним і іонним розпорошенням гетера. В першому випадку гетер випаровується при нагріванні (*випарні або сублімаційні насоси*). В другому випадку для посилення як поглинання, так і розпилення активного металу, використовується іонізація газів - *іонно-сорбційні (іонно-гетерні) насоси*. Підвид цих насосів – *магніторозрядні*, в яких гетер розпорошується під дією швидких іонів утворених в електромагнітному полі. Сорбційні насоси, в яких поглиначем є речовина, яка здатна

ефективно поглинати гази шляхом лише фізичної адсорбції (цеоліти, активоване вугілля) називаються *адсорбційними*.

Конденсаційні насоси різняться за родом використовуваних зріджених газів, які застосовуються для охолодження поверхні - водневі, гелієві, азотні.

Основні параметри насосів, що працюють на принципах сорбції газів:

- випарні гетерні ($P_{гр}=10^{-7}-10^{-11}$ Па; $S_{н}=2-20000$ л/с)
- іонно-гетерні ($P_{гр}=10^{-7}-10^{-11}$ Па; $S_{н}=2-50000$ л/с)
- магнітні електророзрядні ($P_{гр}=10^{-7}-10^{-9}$ Па; $S_{н}=2-10000$ л/с)
- адсорбційні ($P_{гр}=10^{-1}-10^{-3}$ Па; $S_{н}=1-10$ л/с)
- конденсаційні (криогенні) ($P_{гр}=10^{-10}-10^{-13}$ Па; $S_{н}=50-100000$ л/с)

Видно, що окрім адсорбційних насосів, усі інші створюють високий і надвисокий вакуум. Нижче розглянемо їх конструктивні особливості.

4.7.1. Випарні насоси. В них гетер нагрівають до високих температур, які забезпечують достатню швидкість його сублімації. Типова схема випарного насоса показана на рис.4.2. Він складається з корпусу 4, в якому розташовується випарник 5. Атоми активного металу (титан, барій) що емітуються з випарника, конденсуються на екранах 2 (в деяких моделях і на стінках корпусу) і забезпечують відкачку хімічно активних газів за рахунок фізичної, хімічної адсорбції, хімічних реакцій і розчинення в твердій фазі. Екран 3 захищає об'єкт, що відкачується від проникнення парів матеріалу випарника. Екрани 2 для підвищення швидкості відкачки можуть охолоджуватися рідким азотом. Граничний тиск в випарних насосах 10^{-7} Па, а при охолодженні рідким азотом 10^{-11} Па. Верхня межа робочих тисків 0,01 Па. Максимальна швидкість дії при відкачці водню досягає 20000 л/с.

Застосування насосів випарного типу неефективно при відкачці продуктів органічного походження. А мале значення теплоти сорбції інертних газів, яке характерне для гетерних матеріалів, унеможлиблює ефективну відкачку цих газів випарними насосами.

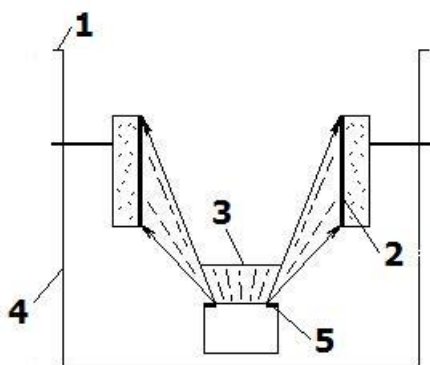


Рис.4.2. Схема випарного насоса.

Конструкція випарних насосів в основному визначається типом випарника. Випарники бувають прямого розжарення, з підігрівом, електронно-променеві та дугові. Найчастіше використовується субліматор – вольфрамовий стрижень з намотаним титановим дротом. Так як в цих насосах газ утримується всередині насоса, то для них в принципі не потрібно постійно діюча допоміжна система форвакуумного відкачування. Необхідно лише створити попереднє розрідження до тиску запуску, при якому можлива робота випарника. Іншими перевагами випарних насосів є їх безшумність в роботі, відсутність вібрації, можливість для більшості конструкцій працювати за будь-якої орієнтації. Сублімаційні насоси особливо ефективні при відкачуванні великої кількості активних газів. Титан хімічно зв'язує O_2 , N , H_2O , утворюючи окисли, нітриди, які мають

дуже малий тиск пари. Оскільки швидкість покриття поверхні металу газом пропорційна P , то для запобігання швидких витрат Ti іонно-сорбційні насоси включають при $P=10^{-3}$ Па.

Параметри сучасних сублимаційних насосів (АВТО-20М, НІБ) дозволяють їх використати для відкачування прискорювачів і установок ТЯР, де ефективно виділяється водень.

4.7.2. Іонно-сорбційні насоси (іонно-гетерні). Це вакуумні насоси, в яких хімічно активні гази видаляються за рахунок сорбції їх гетером, а інертні гази - в результаті інтенсивної іонізації у вигляді іонів під дією електричного поля. Вони здатні створювати розрідження $10^{-7} \div 10^{-11}$ Па.

Іонно-сорбційні насоси розрізняються за типом розпилення гетера:

- насоси із незалежним розпиленням активного матеріалу;
- насоси із саморегульованим розпиленням активного матеріалу.

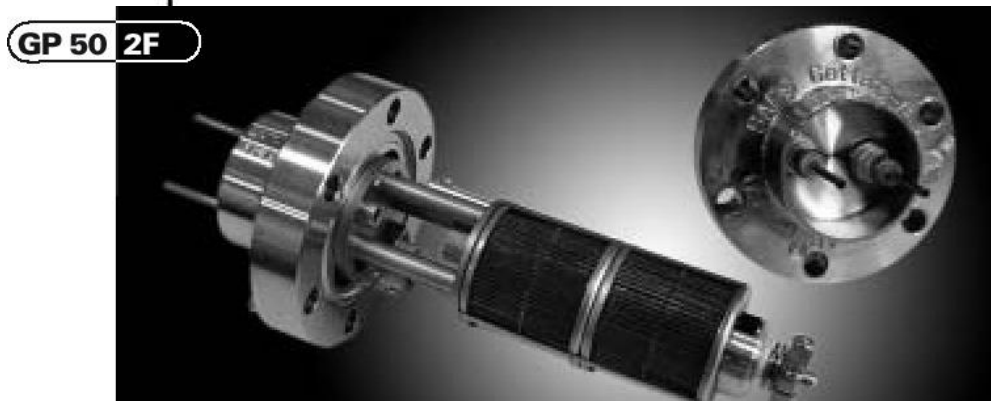
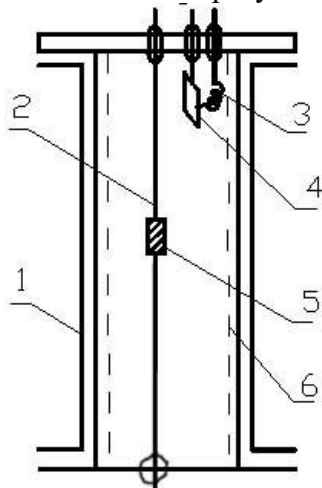


Рис. 4.3. Схема іонно-сорбційного насоса орбітронного типу: 1 – корпус; 2 – анод; 3 – катод; 4 – захисна екранна пластина; 5 – титан (титановий випарник); 6 – сітка.

Орбітронний іонно-сорбційний насос (орбітрон)- приклад насосу із незалежним розпиленням гетера. В орбітроні (рис.4.3) один і той самий пучок електронів використовується для іонізації газів та випаровування титану з твердої фази.

Принцип роботи і конструкція насоса: анод 2 разом із корпусом 1 утворюють циліндричний конденсатор. Анод виготовлений з вольфрамового дроту. Між корпусом та анодом подається напруга від 2 до 7 кВ. На катод 3 подається невеликий додатний потенціал від 50 до 200В. Катод закривається екранною пластинною 4, на яку подається потенціал зміщення, внаслідок чого електрони, що вилітають із катода, мають осьову, радіальну й тангенціальну складові швидкості (рухаються по спіральній траєкторії). Пластина 4 призначена для екранування анода і запобігає прямолінійному руху електронів до анода. Малі розміри анода, додатний потенціал на катоді, наявність пластини 4 змушують електрон, що вийшов із розігрітого катода 3, внаслідок термоелектронної емісії досить довго рухатися у напрямку анода по траєкторіях різноманітних конфігурацій. На своєму шляху електрон стикається з атомами та молекулами залишкової атмосфери та

іонізує їх. Іони прямують до корпусу (колектора) й осідають на ньому, а електрони далі рухаються до анода, розбиваючи молекули на електрони й іони. Одночасно частина швидких електронів нагріває анод і випарник 5 до температури випаровування T_i . Титан випаровується й створює плівку на корпусі насоса, за рахунок якої відбувається хемосорбційне відкачування активних газів.

Поглинання інертних газів обумовлено іншим механізмом. У результаті взаємодії з електронами молекули інертних газів іонізуються, прискорюються і з великими швидкостями вдаряються в корпус, де вони впроваджуються вглиб напорошеного шару титану і замуруються черговими шарами металу.

В конструкції насосів передбачена сітка 6, на яку подається напруга до 1кВ. Призначення сітки - обмежити відрив іонів від корпусу. Швидкість випаровування титану можна змінювати зміною струму емісії катода. Швидкодія орбітронного насоса становить близько 500 л/с. Граничний тиск - до $P_{gr}=10^{-10}$ Па. Для його покращення використовується азот (замість охолодження водою). Граничний тиск при цьому зменшується до 10^{-11} Па.

Конструктивні недоліки насоса:

- обмежений строк служби катода, тому в комплектцію насосів входить декілька катодів;
- відсутність саморегульованої швидкості випаровування титану.

Магніторозрядний насос – це іонно-сорбційний насос із саморегульованою швидкістю розпилення активного матеріалу – титанового поглинача. Насоси, в яких розпилення поглинача здійснюють за допомогою електричного розряду в магнітному полі, називаються *магніторозрядними*. У них використовуватися одночасно два явища: *розчинність газів металом за дії електричного поля і поглинання газів тонкими металевими плівками*. Зовнішній вигляд такого насосу показано на рис.4.4а. Конкретно на малюнку представлено насос НОРД-250 (насос орбітронний, розрядний, діодний, $S=250$ л/с)

Значне поширення магніторозрядних насосів обумовлено їх високими технічними характеристиками, простотою експлуатації й обслуговування, високою надійністю і великим ресурсом роботи (до 150 тис. годин).

Відкачування активних газів магніторозрядними насосами здійснюється в результаті хемосорбції газів постійно поновлюваною плівкою титану. Для виникнення розряду досить випадкової наявності в розрядному проміжку (між катодом і анодом) декількох електронів. Роль магнітного поля – збільшити ефективність іонізації залишкових газів. Під дією сильного магнітного й електричного полів електрони рухаються по спіралі навколо осі розрядної комірки. На своєму шляху електрони здійснюють іонізацію газу. Позитивні іони, що утворюються, бомбардують катод і розпилюють із катодних пластин титан, який осаджується на стінках і аноді. Конструктивно робота таких насосів заснована на принципі так званої «комірки Пеннінга», яка складається з двох паралельних пластинок (катода) і циліндричного анода (з отворами) розташованого між ними (рис.4.4б). Електрони в комірці коливаються ніби в пастці, іонізуючи газ. Для отримання більшої швидкості відкачування з'єднують паралельно велике число комірок.

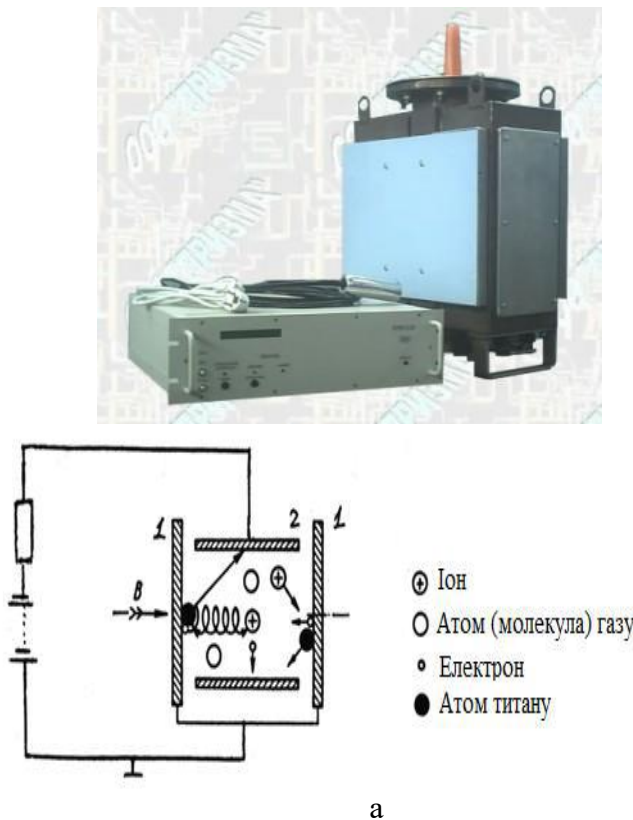


Рис.4.4.Діодний магніторозрядний насос: а) зовнішній вигляд; б) схема: 1 – два елементи катода з титану; 2 – циліндричний анод; B – індукція магнітного поля.

Оскільки основна частина титану, що розпилюється, є нейтральними атомами і молекулами, вони осідають на всій поверхні електродів, але переважно на аноді. Активні газу, потрапляючи на безперервно поновлювану свіжу плівку титану, хемосорбуються нею. Катоди також поглинають газу, але через постійне розпилювання більшої частини поверхні їх внесок у процес відкачування активних газів незначний. Отже, основний механізм відкачки активних газів – це їх хемосорбція плівкою Ti на аноді.

Кількість металу, що розпилюється, приблизно пропорційна розрядному струму (відповідно тиску газу). Тому розпилювання Ti саморегулюється залежно від стану вакууму.

В магніторозрядних насосах також має місце проникнення іонів легких газів H_2 і He всередину катода. Якщо видаляти лише їх, то проникнення H_2 і He всередину матеріалу катода - основний механізм. Значимо, що водень, взаємодіючи з Ti , утворює в порівнянні з H велику молекулу TiH , і може наступити деформація катода (*блістер ефект*). Розпилення Ti іонами H^+ і He^+ мало (легкі іони), тому хемосорбція H_2 і He слабо виражена. Якщо ці газу відкачуються разом з іншими, то хемосорбція вже відіграє помітну роль.

Відкачування важких інертних газів здійснюється в основному катодами. Дифузія усередину Ti відсутня через великі розміри іонів інертних газів. Вони адсорбуються на поверхні. Але катоди весь час розпорошуються, і іони звільняються, але деякі залишаються на ділянках катодів, які не зазнали розпорошення, а також на плівці анода. З часом вони замуруються розпорошеними іонами титану. Такий механізм не створює великої швидкодії, але є основним при відкачуванні інертних газів магніторозрядним насосом.

Особливо багато турбот при відкачці магніторозрядними насосами доставляє аргон (1% у повітрі). Швидкість його відкачки в 100 разів менше, ніж повітря, і в насосі його завжди багато. Аргон видаляється замуруванням в катод до моменту насичення. Після чого іони Ar^+ , які бомбардують поверхню катода, починають вивільняти замуровані раніше іони. Як наслідок підвищується тиск, далі – зростання розпорошення Ti і знову відкачка аргону. Це є явищем аргонної нестабільності.

Оскільки хімічна активність різних газів та ефективність розпилення титану їх іонами різні, і як наслідок швидкодія магніторозрядних насосів істотно залежить від роду відкачуваного газу. Цей недолік меншою мірою властивий *тріодним магніторозрядним насосам*, схема якого показана на рис. 4.5. Тут катод відіграє лише роль джерела Ті, а сорбуючими поверхнями є стінки насоса.

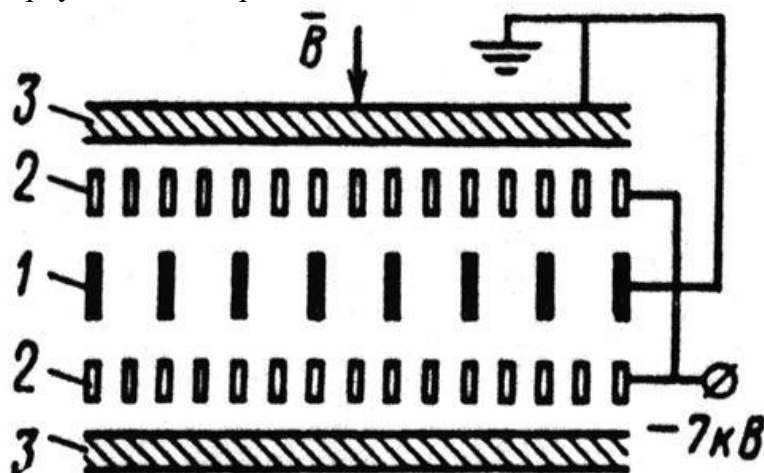


Рис.4.5. Схема тріодного магніторозрядного насоса: 1 – анод; 2 – катоди; 3 – колектор (корпус насоса); \vec{B} – вектор напруженості магнітного поля

Електродний блок утворюють анод, що розміщується всередині, і два катоди. Між анодом і катодом підтримується розряд. Колектором є корпус насоса. Катоди тріодного насоса мають комірчасту і ребристу структуру, через що позитивні іони, що утворюються в розряді під час роботи тріодного насоса, бомбардують катод не під лише прямим кутом, як у діодному насосі, а під гострим кутом. Крім того бомбардується не лише поверхня, а й внутрішній об'єм катоду. Все це істотно збільшує ефективність розпилювання титану, який рівномірно осідає на корпусі насоса. Завдяки тріодній схемі і комірчастій структурі катодів частина іонів, що рухаються з області анода, досягає колектора (корпусу насоса), де нейтралізується і адсорбується. Іони, що досягли колектора, мають малу енергію (пройшли крізь катод і загальмувалися) і не можуть викликати вторинного розпилювання Ті з колектора. Завдяки тріодній схемі насос має підвищену швидкодію щодо інертних газів (збільшується на порядок). Так, для Ag вона становить 1/3 від швидкодії щодо повітря.

До недоліків магніторозрядних насосів можна віднести підвищений знос катоду, нагрів при роботі, велику масу. Для отримання високого вакууму насоси треба прогрівати до $T=400^{\circ}\text{C}$ при 0,5 потужності.

Найбільш популярні насоси НМД, НМТО, НЕМ, НОРД-100, НОРД-250, ТРІОН-150 використовуються у надвисоковакуумних системах та приладах (наприклад, у просвічувальному електронному мікроскопі ПЕМ-125К – рис. 4.6а).



Рис.4.6а. Вакуумна система електронного мікроскопа ПЕМ-125К та надвисоковакуумної установки.

На рис.4.6 б показано сучасні мініатюрні магніторозрядні вакуумні насоси.



Рис. 4.6б. Магніторозрядні насоси: справа - Thermionics AIP-0,2Т (розміри 94×64×35); $S_H=0,2$ л/с; $P_{гр}=10^{-9}$ Па. Зліва-Varian Vaclon Mini (розміри 63×54×54); $S_H=0,4$ л/с; $P_{гр}=10^{-5}$ Па.

Позитивні властивості магніторозрядних насосів:

- 1) можливість створення високого і надвисокого вакууму без загрози забруднення вакуумної камери будь-якою конденсованою парою;
- 2) відсутність рухомих і гарячих елементів;
- 3) з ростом розрідження розрядний струм і відповідно потужність, яку споживає насос, автоматично зменшується;
- 4) залежність $I=kP$ можна використовувати для оцінки ступеню вакууму;
- 5) великий ресурс роботи.

Верхня межа робочих тисків визначається перегрівом електродів насоса. При тисках більше 10^{-3} Па тривала робота насоса можлива лише при додатковому охолодженні його електродів. Короткий час роботи насоса при його запуску можливий від тиску 1 Па. Наявність забруднень на електродах насоса, особливо органічних, зменшує швидкість насоса і погіршує граничний тиск, тому попередня відкачка повинна забезпечуватися безмасляними засобами. Знегажування насосів проводять нагріванням до $400-500^{\circ}$ С.

4.7.3. Адсорбційні насоси. Це сорбційні насоси, в яких зв'язування газів відбувається на сильно розвинених поверхнях пористих матеріалів. Перевагою є відсутність масла, що дозволяє отримати з їх допомогою "безмасляний" вакуум.

Матеріали: цеоліти, активоване вугілля, силікати. Найбільш широко використовуються цеолітові насоси (рис.4.7). Цеоліти - кристалічні пористі алюмосилікати, що отримали назву молекулярних сит, або штучних цеолітів, вони є невеликими пористими гранулами приблизно однакового розміру. Діаметр пор постійний для цеоліту певного типу. Промисловістю випускаються цеоліти типів 3А, 4А, 5А, 10Х і 13Х. Із них цеоліт марки 5А має найбільшу сорбційну місткість щодо повітря. Діаметр його пор дорівнює 0,5 нм, а внутрішня поверхня приблизно в 40 000 разів перевищує зовнішню поверхню гранули. В пори можуть потрапляти лише ті гази, діаметр молекул яких менше розміру пор. Тому добре поглинаються O_2, N_2, CO_2 (0,3 нм).

Насос є балоном, заповненим цеолітом, і пристосований для охолодження рідким азотом. Балон утворений зовнішнім металевим циліндром 1, внутрішнім циліндром 2 і закритий нижнім кільцевим днищем 3 і двома верхніми сферичними днищами 4 і 5, до верхнього краю внутрішнього циліндра 2 засипаний цеоліт, як правило, марки 5А. У насос ЦВН-1-2 поміщається 1 кг цеоліту. Патрубок 6 балон з'єднується із фланцем 7, яким насос приєднується до вакуумної системи. Балон насоса поміщається в посудину Д'юара 10. При заповненні посудини Д'юара рідким азотом і охолодженні цеоліту він сорбує газ. Патрубок 11 запобігає утворенню газової пробки у внутрішній порожнині, що сприяє ефективному охолодженню цеоліту. Насос комплектується піччю (на рис.4.7 не показана), яка встановлюється на місце посудини Д'юара для регенерації цеоліту.

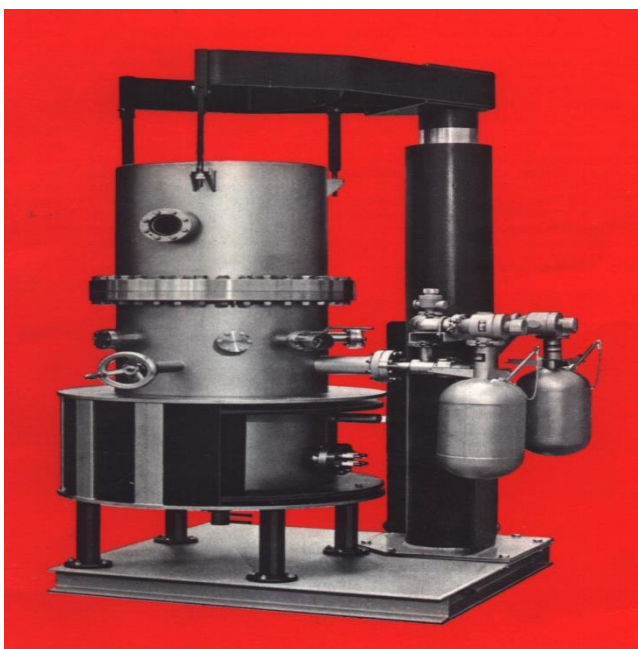
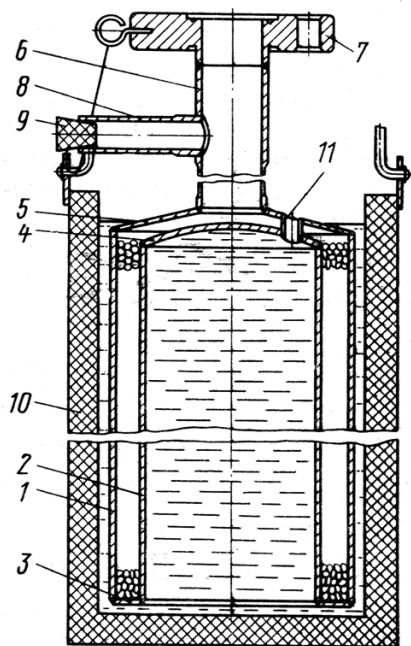


Рис.4.7. Цеолітовий вакуумний насос ЦВН-1-2: 1 – зовнішній циліндр; 2 – внутрішній циліндр; 3 – днище; 4, 5 – верхнє днище; 6, 8, 11 – патрубки; 7 – фланець; 8 – патрубок; 9 – пробка; 10 – посудина Д'юара.

Цикл роботи цеолітового насоса такий. При закритому клапані, що з'єднує його із вакуумною системою, проводять регенерацію, тобто відновлення сорбційної активності цеоліту. Регенерація цеоліту відбувається при прогріванні його при температурі $500^{\circ}C$ упродовж 3 годин. Після регенерації насос охолоджується до температури $-196^{\circ}C$. Після чого насосом можна проводити відкачування. При насиченні цеоліту відкачуванням газом проводять його повторну регенерацію, для чого насос заздалегідь відділяється клапаном від відкачуваної ємності.

Цеолітові вакуумні насоси серійного виробництва призначені для попереднього відкачування від атмосферного тиску до $10^{-2}Pa$ систем із магніторозрядними або гетероіонними високовакуумними насосами, а також для самостійного низьковакуумного відкачування систем, в яких не допускається наявність пари робочої рідини насосів. Водень і гелій зовсім не відкачують через низьку точку кипіння. Часто відкачувана камера

забезпечується двома цеолітовими насосами. Це забезпечує безперервність відкачки: один із насосів відкачує об'єм, в іншому проводиться регенерація.

4.8. Кріогенні насоси.

Кріогенні вакуумні насоси є ідеальним засобом для застосувань, що вимагають одночасно глибокого безмасляного вакууму і великих швидкостей відкачування. Дія кріогенних насосів полягає в адсорбції і конденсації газів і пари на поверхні, температура якої значно нижче температури навколишнього середовища. Молекули, вдаряючись у таку поверхню, зв'язуються нею, причому кількість зв'язаних молекул тим більше для даного газу і певного сорбуючого матеріалу, чим нижче температура поверхні, оскільки час перебування молекули на поверхні з пониженням температури зростає за експонентою. В залежності від фізичних явищ, які відбуваються при низьких температурах кріогенні насоси можна класифікувати наступним чином:

- конденсаційні (конденсація газів на охолоджуваних металічних поверхнях);
- адсорбційні (адсорбція газів на твердих охолоджуваних сорбентах);
- конденсаційно- адсорбційні (адсорбція газів на попередньо сконденсованому допоміжному шарі газу, який легко конденсується);
- кріозахоплюючі (одночасна конденсація газу, що відкачується, і допоміжного газу, який легко конденсується).

Принцип дії конденсаційних насосів базується на конденсації газів на металевих поверхнях (кріопанелях), охолоджених до $T=20\text{K}$ і нижче, а адсорбційних насосів – на сорбції газів твердим сорбентом, який нанесено на кріопанель. Фізична поверхня сорбентів (цеоліти, активоване вугілля, силікагель, плівки окислів металів) на декілька порядків перевищує геометричну поверхню кріопанелі. В якості допоміжного газу в конденсаційно- адсорбційних насосах використовується пари води, спирту, ацетону, діоксид вуглецю, азот, аргон тощо. Робота кріогетерних насосів основана на фізико-хімічному зв'язуванні газів на поверхні і в об'ємі плівки титану, яка постійно наноситься на кріопанель.

Кріогенні насоси використовуються насамперед для створення дуже високого вакууму. Їх включають в роботу зазвичай тільки після того, як за допомогою інших насосів (дифузійних, іонних) отримано достатньо низький тиск. Швидкість відкачки кріогенних насосів досить велика ($S_n=50-100000\text{л/с}$). Вона пропорційна площі кріогенної поверхні і залежить від різниці між кількістю молекул, адсорбованих і десорбованих одиницею поверхні.

Принципова схема кріогенних насосів, незважаючи на різноманіття їх виконання, включає чотири основних елемента: корпус, кріопанель, охолоджувальний пристрій, теплозахисний екран. Кріопанель – основна частина насосу, виготовляється у вигляді дисків, циліндрів, змієвиків тощо. Кріовідкачка – це процес екзотермічний, так як за час роботи насосу на охолоджуваній поверхні в результаті переходу газу в конденсований стан постійно виділяється теплота конденсації. Через це обов'язковою умовою є відвід тепла і підтримка температури панелі на необхідному рівні.

На рис.4.8 показана конструкція конденсаційного насоса. Це посудина з великим відношенням поверхні до об'єму і подвійними стінками (тобто кріопанель циліндричної форми), між якими знаходиться кріогенна рідина (зріджені гази, як азот, водень і т.п.). Вона по мірі випаровування безперервно поповнюється. З метою зменшення швидкості випаровування застосовуються охолоджуючі екрани, що володіють проміжною температурою між кріопанеллю і навколишнім середовищем.

Для відкачування азоту, кисню, аргону або CO_2 температуру стінок камери необхідно знизити до температури кипіння водню $T = 20,4\text{K}$. Для отримання більш низьких тисків у насос заливають рідкий гелій, температура кипіння якого при атмосферному тиску становить $4,2\text{K} (-296^{\circ}\text{C})$. При такій температурі всі гази перебувають у рідкому і твердому станах.

Граничний тиск гелієвого насоса становить $P_{gr} = 10^{-13}$ Па. Це найбільш високий вакуум, який можна отримати промисловим насосом!

На криогенних насосах виникає шар (шуба) із зріджених газів, який необхідно видаляти. Регенерація здійснюється шляхом нагріву до кімнатної температури і відкачки допоміжним насосом.

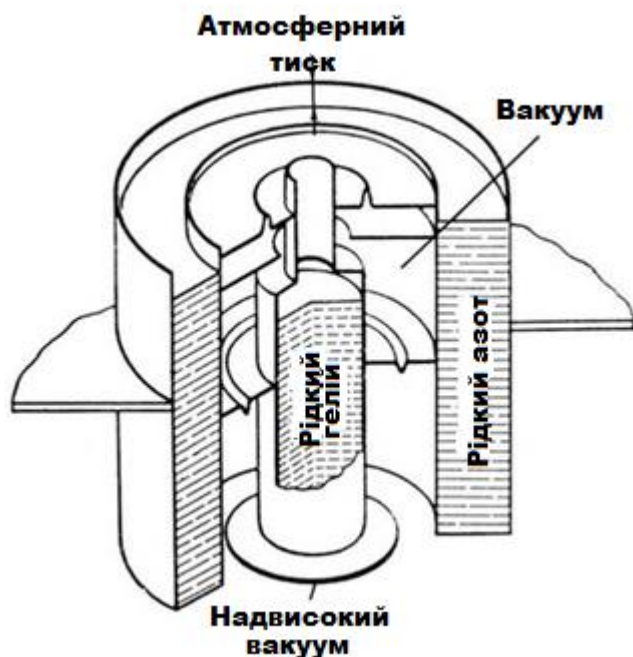


Рис.4.8. Криоконденсаційний насос із рідким гелієм.

До недоліків криогенних насосів слід віднести: селективність при відкачуванні газових сумішей і суттєва зміна граничного тиску при значному підвищенні температури криопанелі; необхідність активувати криопанель сорбентом або використовувати допоміжні засоби відкачування для видалення водню, гелію та неону, парціальний тиск яких визначає граничний вакуум, який створюється криогенним насосом.

У сучасних криогенних насосах використовуються двоступеневі криопанелі (криорефрижератори), де в якості холодоагенту використовується газоподібний гелій. При цьому температура першого ступеня складає порядка 70-80К, а температура другого ступеня 15-20К. Цикл є повністю замкнутим, тому експлуатаційні витрати на холодоагент мінімальні в порівнянні з заливними криогенними насосами, відсутня небезпека перебою в роботі насоса, пов'язана з відсутністю рідкого азоту.

Використання спеціально розроблених для управління системами криогенного відкачування контролерів дозволяє повністю автоматизувати і процес регенерації, забезпечуючи автоматичне перемикавання між працюючими і регенованими насосами під час відкачування, а наявність додаткових пристроїв нагріву корпусу і продувки нагрітим газом скорочує час регенерації до мінімуму. На рис. 4.9 показан насос, який випускається компанією SHI Cryogenics (США). Крионасоси SHI використовуються безпосередньо або у виробництві безлічі напівпровідникового, телекомунікаційного, електронного, напорюючого і спеціального лабораторного устаткування та продукції.

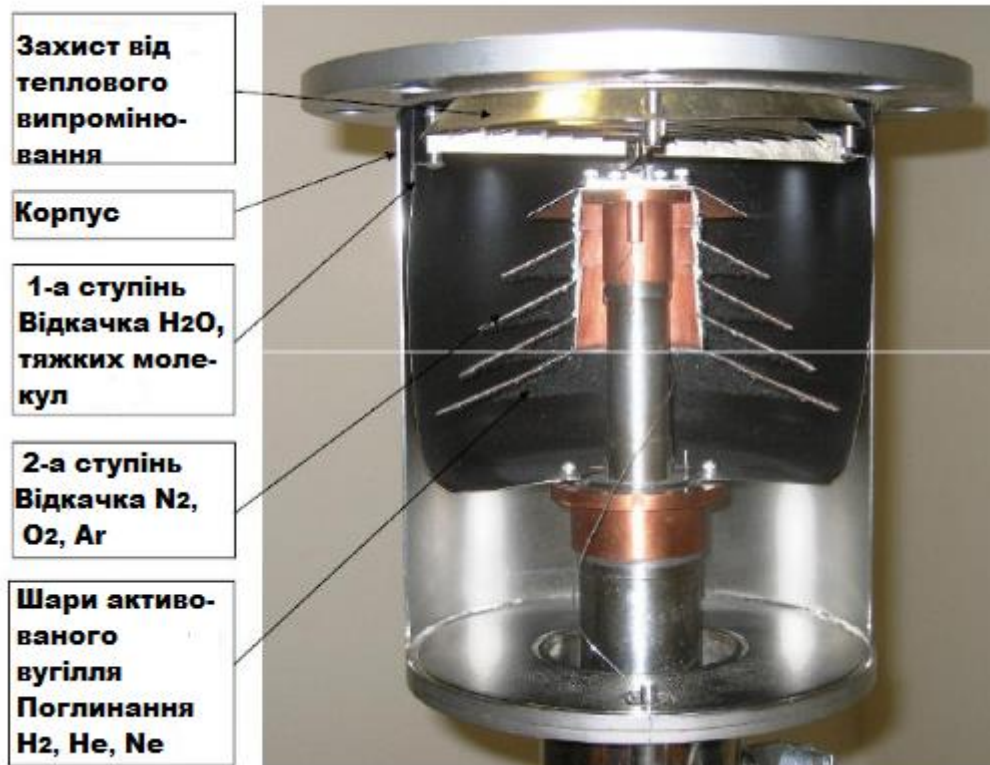


Рис.4.9. Кріогенний насос серії SHI.

При роботі показаного на рис. 4.9 кріонасоса, гелій, який знаходиться при кімнатній температурі і високому тиску, нагнітається спеціальним віддаленим компресором в кріонасос на охолоджену головку поршня, яка термічно пов'язана з двома рядами конденсаційних решіток.

Після попадання на головку поршня під тиском гелій потім розширюється і охолоджує решітки. Зовнішній ряд решіток охолоджується до 80K і використовується для конденсації водяної пари, які зазвичай є основною газовою навантаження. Внутрішній ряд конденсаційних решіток охолоджується до температури 15K і призначений для основної частини решти газів. Всі гази, які конденсуються, переходять в твердий стан з тиском пари менш 10^{-10} Па. Гази, які не конденсуються, такі як гелій, водень і неон одночасно адсорбуються шаром активованого вугілля, охолодженого до 15K.

Л.5-6. ТЕХНІКА ВИМІРЮВАННЯ НИЗЬКИХ ТИСКІВ

Класифікація манометрів. Деформаційні манометри. Гідростатичні вакуумметри. Теплові манометричні перетворювачі. Іонізаційні манометричні перетворювачі. Іонізаційний манометр Байярда – Альперта. Магнітні перетворювачі. Радіоізотопні перетворювачі. Динамічні і радіометричні вакуумметри. Груба оцінка вакууму. Градування вакуумметрів. Методи вимірювання парціальних тисків. Вакуумметри з активним датчиком

5.1.Класифікація манометрів.

Невід'ємною частиною будь-якої вакуумної системи є апаратура для вимірювання тиску розрідженого газу. Область тиску, яка використовується в сучасній вакуумній техніці, $10^5 \div 10^{-12}$ Па. Вимірювання тисків у такому широкому діапазоні, природно, не може бути забезпечено одним приладом. У практиці вимірювання тиску розріджених газів

застосовуються різні типи перетворювачів, що відрізняються за принципом дії і класом точності.

Прилади, за допомогою яких вимірюється тиск, називаються *манометрами*. Слово *manos* у перекладі з грецької означає негустий, тобто **манометр – прилад, що вимірює ступінь розрідження**. Прилади для вимірювання тиску газу нижче від атмосферного називаються *вакуумметрами*, які зазвичай складаються з двох частин - манометричного перетворювача та виміральної установки (вимірвальний блок).

За методом вимірювання вакуумметри розділяються на *абсолютні та відносні*. Показання абсолютних приладів не залежать від виду газу і можуть бути заздалегідь розраховані. Ці манометри вимірюють тиск, як силу ударів молекул у поверхню. Відносна похибка тим менша, чим більше тиск.

При малих тисках (нижче 10^{-3} Па) безпосереднє вимірювання сили ударів неможливо через її малість. У приладах для відносних вимірів використовують залежність параметрів деяких фізичних процесів, що протікають у вакуумі, від тиску. Ці прилади потребують градування за еталонним приладом. Як правило при вимірюванні малих тисків використовуються електронні іонізаційні перетворювачі, принцип роботи яких заснований на іонізації газу електронами і вимірі іонного струму, за величиною якого судять про тиск. Шкали манометрів опосередкованої дії відкалібровані в одиницях тиску або електричних одиницях. Відносні похибки складають 10-60%.

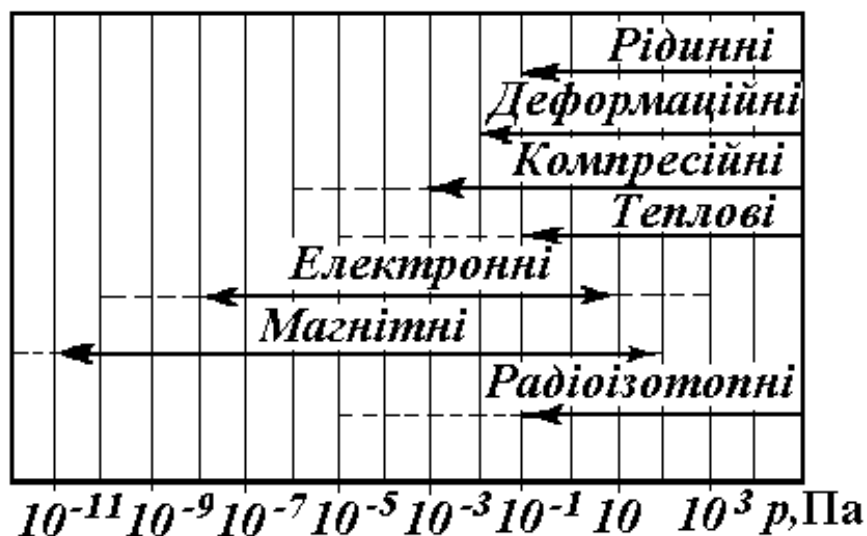


Рис.5.1. Діапазони вимірювання тиску вакуумметрами різних типів.

За принципом роботи манометри розділяють на такі типи: **рідинні** (гідростатичні), **деформаційні**, **компресійні**, **теплові та іонізаційні**; останні, в свою чергу, поділяють на електронно-іонізаційні (електронні), магнітні електророзрядні та радіоізотопні. Рідинні, деформаційні, компресійні – це абсолютні вакуумметри. На рис.5.1 наведено межі тисків, в яких можна проводити вимірювання манометром того чи іншого типу. Найбільший діапазон вимірювання мають *електронні* ($10\text{-}10^{-8}$ Па) та *магнітно-електророзрядні манометричні перетворювачі* ($10\text{-}10^{-11}$ Па).

5.2. Деформаційні манометри.

Деформаційні (або механічні) манометри вимірюють різницю тисків між опорним (барометричним) і надлишковим, що викликає деформацію пружного чутливого елемента за дії з одного боку надлишкового тиску. Тому їх покази не залежать від роду газу.

Пружні чутливі елементи за типом поділяють на трубчаті, мембранні й сильфонні. Прикладом трубчатого манометра є деформаційний манометр, головний елемент якого – це спіральна трубка – трубка Бурдона (рис.5.2). Спіральну порожнисту трубку *1*,

відкритим кінцем через штуцер 2 приєднують до вакуумної системи, таким чином, на зовнішній бік трубки завжди діє атмосферний тиск. Під впливом надмірного тиску трубка розкручується, а під дією розрідження – скручується. При відкачуванні повітря з трубки вона починає скручуватися під дією атмосферного тиску, оскільки за різних радіусів кривизни площі її зовнішньої і внутрішньої поверхонь будуть різними. Рухомий запаяний кінець трубки почне переміщуватися ближче до нерухомого, що викличе від дії зубчастого механізму 3 поворот індикаційної стрілки проти напрямку руху годинникової стрілки. Число n поділок шкали, де зупиниться стрілка, покаже різницю між атмосферним тиском p_a і тиском p всередині трубки, тобто тиск у вакуумній системі буде: $p = p_a - n$. Шкала таких манометрів проградуєвана у відносних одиницях. Якщо у вакуумній системі тиск буде дорівнювати атмосферному, то стрілка вкаже на нульову поділку.

Чутливим елементом може бути також тонка пружна мембрана або сільфон, що виконує таку ж функцію, як і мембрана. У мембранному манометрі (рис.5.3) мембрана 1 герметично ділить об'єм манометра на дві частини, одна з яких приєднується до вакуумної системи, а в другій створено опорний постійний низький тиск: $p_k = 10^{-2}$ Па. З метою збільшення чутливості і зменшення впливу коливань зовнішньої температури мембрану виготовляють з гофрами 2. Для здійснення вимірювань використовують ємнісний збалансований місток Уїтстона, одним з пліч якого буде ємність між мембраною і нерухомою пластиною-електродом 3, відділеним від корпусу манометра (другий електрод) ізолятором 4.

Трубчасті деформаційні манометри мають низьку чутливість, ними можна вимірювати тиски, не нижчі ~ 7 Торр, тоді як мембранними вимірюють тиски в межах 760 - 10^{-4} Торр. Слід також відмітити такі позитивні якості мембранних манометрів на відміну від трубчатих, як незалежність вимірів від атмосферного тиску і від роду газу.

У сільфонних манометрах збільшено хід чутливого елемента за рахунок застосування гнучкої гофрованої трубки.

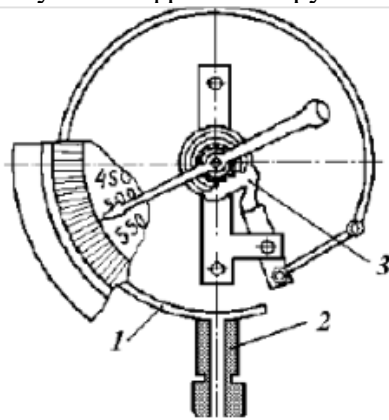


Рис.5.2. Деформаційний манометр.

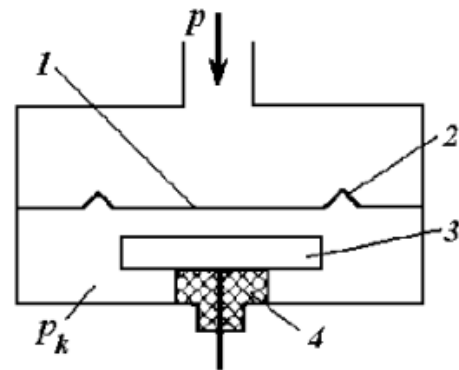


Рис.5.3. Мембранний манометр.

Для перетворення переміщення чутливого елемента в сигнал вимірювальної інформації широко застосовуються індуктивні, диференціально - трансформаторні, ємнісні, тензорезисторні, п'єзоелектричні та інші перетворюючі елементи.

5.3. Гідростатичні вакуумметри.

Цей тип вакуумметрів поділяють на рідинні та компресійні.

Рідинні манометри – це прилади, принцип дії яких базується на використанні закону сполучених об'ємів. Найпростішими рідинними перетворювачами є вакуумметри з відкритим та закритим коліном. Тиск у межах 1... 760 Торр можна вимірювати дуже простими манометрами такими, як барометрична трубка. Щоб визначити тиск у вакуумній системі, необхідно спочатку визначити атмосферний тиск допоміжним манометром, а потім встановити різницю h між рівнями рідини (рис.5.4а). Різниця тисків атмосферного і у вакуумній системі дорівнює: $(p_a - p) = \rho gh$,

де g – прискорення земного тяжіння; ρ – густина рідини: якщо рідиною буде ртуть, то тиск отримаємо безпосередньо в одиницях Торр.

Очевидно, що виміри такого манометра залежать від атмосферного тиску. Щоб позбавитися такої залежності, використовують укорочений U – подібний манометр (рис.5.4б), один з кінців якого заварений. Якщо такий манометр наповнити ртуттю і приєднати до вакуумної системи, то тиск у ній буде визначатися різницею рівнів h за формулою: $p = h$ [Торр]. Чутливість такого манометра можна підвищити у $1/\sin\beta$, якщо одне з колін зробити нахиленим (рис.5.4в). Якщо ж використати не ртуть, а оливу, питома вага якої у 5 разів менша ніж у ртуті, то *чутливість* зросте у 5 разів. Однак, масляні вакуумметри перед початком роботи необхідно знегазити, оскільки масло добре розчиняє гази і пару відкачуваних речовин.

До позитивних якостей рідинних манометрів відноситься можливість безперервних вимірювань і конструктивна простота, а до негативних – крихкість скла і громіздкість, а також невеликий діапазон вимірювання тиску з нижньою межею 10^{-1} Па (10^{-3} Торр).

Компресійні вакуумметри. Принцип дії цих приладів базується на застосуванні закону Бойля – Маріотта при стисненні розрідженого газу.

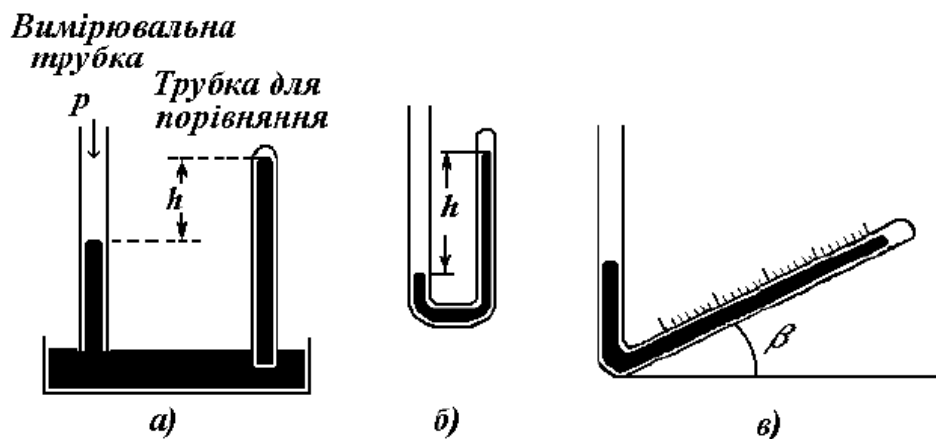


Рис.5.4. Рідинні манометри.

Серед них особливо цікавим є манометр Мак-Леода (рис.5.5), оскільки його часто використовують як еталонний. Газ вакуумної камери з низьким тиском p , що вимірюється, ізотермічно стискають до високого тиску за допомогою ртуті, а потім вимірюють різницю рівнів зрівноваженого стану. Конструктивно він складається з трубки 1, через яку підводиться ртуть до балона 2, з відомим об'ємом V_0 , що зверху має капілярну трубку 3 (трубку стискання), діаметром d , верхній кінець якої заварений. Трубка 1 має відгалуження, яке складається з трубки порівняння 4, розміщеної паралельно до трубки стискання і такого ж діаметра, та трубки 5, яка з'єднує манометр з вакуумною системою. На трубку стискання нанесена позначка L, а на трубку порівняння – позначка K. Вимірювання тиску починають завжди зі сполучення об'єму балона з вакуумною системою через трубку 5, тобто спочатку ртуть має знаходитися нижче місця з'єднання балона і трубки 5 (рис.5.5а). Потім знизу поступово вводять ртуть тим чи іншим способом з резервуару (на малюнку не показано), де вона постійно знаходиться, поки рівень ртуті не досягне позначки L (K). Газ, що знаходився у балоні V_0 , має такий же тиск P , що і газ вакуумної системи, який необхідно визначити, але після стискання його тиск зросте до величини P_1 , а об'єм зменшиться до V_1 . Тепер (відповідно до закону Бойля – Маріотта) можна записати: $PV_0 = P_1V_1$.

Очевидно, що різниця тисків урівноважується тиском стовпчика ртуті висотою h . Якщо тиски виразити в міліметрах ртутного стовпчика, тобто в одиницях Торр, то $P_1 - P = h$, тобто $P_1 = P + h$. Зазвичай компресійними манометрами вимірюють низькі тиски, які не впливають на різницю рівнів h . Тому $P \ll h$, і нехтуючи величиною P у виразі для P_1 , отримаємо:

$$P = h \frac{V_1}{V_0}.$$

Відношення об'ємів V_1/V_0 , що легко визначається через геометричні розміри манометра, називають *мірою стискування*. Тиск P газу у вакуумній системі можна знайти звичайним обчисленням.

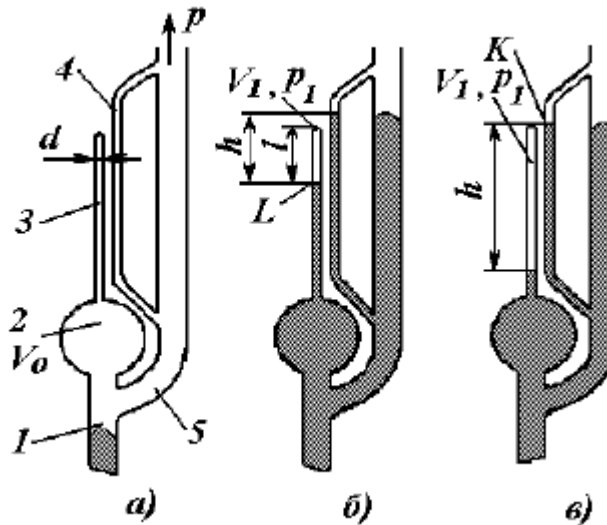


Рис.5.5. Манометр Мак-Леода.

Методи градуювання манометра Мак-Леода. Визначення об'єму V_1 залежить від того, як балон 2 (V_0) буде наповнюватися ртуттю.

а) *Лінійне градуювання шкали вимірювання.* Ртуть піднімають до рівня позначки L , що знаходиться на відстані l від верху трубки стискування. Тоді

$$P = h \frac{V_1}{V_0} = \frac{\pi d^2}{4V_0} l h = C_1 h, \quad \text{де } C_1 = \frac{\pi d^2}{4V_0} l.$$

Величину C_1 називають *сталю компресійного манометра з лінійною шкалою*. У цьому випадку міра стискування постійна для даної мітки і тому тиск, що вимірюється, прямо пропорційний різниці рівнів h . Для розширення діапазону вимірювань вибирають декілька значень l , для кожного з яких існує своя стала C_1 . Трубка стискування в цьому випадку має декілька відрізків з різним діаметром, а трубок порівняння теж буде декілька.

б) *Квадратичне градуювання шкали вимірювання.* Якщо шкала має квадратичне градуювання, то ртуть піднімають до рівня позначки K , що знаходиться на порівняльній трубці на рівні верху трубки стискування. Тоді ртуть підніметься в трубці стискування до іншого рівня на відстані h від її верху. Тепер маємо:

$$P = h \frac{V_1}{V_0} = \frac{\pi d^2}{4V_0} h h = C_2 h^2, \quad \text{де } C_2 = \frac{\pi d^2}{4V_0}.$$

Величину C_2 називають *сталю компресійного манометра з квадратичною шкалою*. У цьому випадку тиск, що вимірюється, пропорційний квадрату різниці рівнів h ; звідки і назва методу квадратичного градуювання. Міру стискування манометра з квадратичною шкалою можна змінювати, що дозволяє проводити виміри в більш широкому діапазоні P .

Ртуть, що застосовують в компресійних манометрах, піддається дії високого тиску, тому вона має бути абсолютно чистою. Перед використанням вона підлягає хімічному і електролітичному очищенню і вакуумній дистиляції. Для вимірювання низьких тисків виготовляють манометри з великими об'ємами балону (але зважаючи на крихкість скла, не більше 1300 см^3 , зазвичай $V_0 \sim 500 \text{ см}^3$) і діаметром капіляра d не менше $0,8 \text{ мм}$. Зменшення діаметра призводить до зростання ефекту капілярної депресії (ртуть починає

прилипати до стінок трубки, що викликає можливість розділення неперервного стовпчика ртуті, виникає електризація скла). Як приклад граничного випадку можна вказати на манометр з об'ємом $V_0 = 1300 \text{ см}^3$ (маса ртуті 18 кг) і $d = 0,8 \text{ мм}$. Постійна цього манометра $C_2 = 3,86 \cdot 10^{-7}$, що дозволяє при $h = 2 \text{ мм}$ виміряти тиск 10^{-6} Торр . Для вимірювання високих тисків (але не більше 10 Торр) використовують прилади, що мають невеликий об'єм балона ($V_0 < 200 \text{ см}^3$) і капіляр з більшим діаметром.

До позитивних якостей компресійних манометрів відноситься можливість повного розрахунку, що дозволяє використовувати їх як еталонні. Похибка складає 1,5-2 % при тисках 10^{-1} -10 Торр, 2-3% - при $P > 10^{-2} \text{ Торр}$. До негативних якостей відноситься неможливість виконання безперервних вимірів (завжди перед вимірюванням необхідно звільняти балон від ртуті), забруднення парою ртуті (треба приєднувати манометри до вакуумної системи через азотні пастки), крихкість скла, неможливість вимірювань парціальних тисків пари речовин (наприклад, H_2O , CO_2), які легко конденсуються під дією сильного ($\sim 10^6$ разів) стискання. Також проблематично спостерігати за повільною зміною тиску у вакуумній камері.

Похибки вимірювання тисків рідинними, механічними і компресійними вакуумметрами не залежать від природи газу.

5.4. Теплові манометричні перетворювачі.

У теплових манометричних перетворювачах використовується явище переносу тепла газом від нагрітої електричним струмом тонкої платинової нитки до стінок трубки, в якій розміщена ця нитка.

Відомо (п.1.4), що при в'язкісному режимі теплопровідність газу не залежить від тиску, оскільки $\chi = \eta c_v$,

де χ - коефіцієнт теплопровідності газу; η - коефіцієнт внутрішнього тертя; c_v - питома теплоємність за постійним об'ємом.

Але при молекулярному режимі течії газу з'являється залежність коефіцієнта внутрішнього тертя від тиску. Він зменшується при зменшенні тиску і в першому наближенні можна записати, що $\chi = kP$. Звідси, чим меншим буде тиск газу, тим менше буде охолоджуватися нагріта нитка і її температура буде зростати як обернено пропорційна функція тиску.

Розрізняють *термопарні* вакуумметри, температура нитки яких вимірюється приєднаною до неї термопарою, і *теплоелектричні* вакуумметри опору, температуру нитки яких визначають за її електричним опором.

Манометр опору складається з двох частин: вимірювальної і частини, що взаємодіє з газом і з'єднується з вимірювальною. Її називають *датчиком або манометричним перетворювачем*.

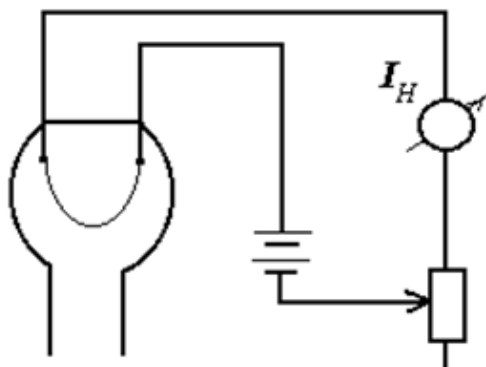


Рис.5.6. Манометр опору.



Рис.5.7. Крива градування.

Манометричний перетворювач має просту будову - це циліндрична скляна трубка, яка відкритим кінцем з'єднується з вакуумною системою там, де потрібно вимірювати тиск, а закритим кінцем відповідним цоколем - з вимірювальною частиною. У цоколь вмонтовані два електроди, до яких приварена платинова нитка, що служить електричним опором R (рис.5.6). Електрична потужність, що використовується для нагрівання платинової нитки, витрачається не тільки на нагрівання безпосередньо нитки (I^2_{HR}), й на нагрівання електродів (P_3), до яких приєднана нитка, на випромінювання відповідно закону Стефана - Больцмана (P_2) і на нагрівання стінок трубки газом внаслідок теплопровідності газу (P_1).

Таким чином рівняння балансу потужності матиме такий вигляд:

$$I_H^2 R = P_1 + P_2 + P_3 ,$$

де I_H - величина струму, яким нагрівається нитка до температури, наприклад, T_1 ; R - величина електричного опору нитки за цією температурою (слід пам'ятати, що електричний опір металів змінюється залежно від температури як $R_t = R_0(1 + \alpha t^o)$, де R_0 - опір при $0^o C$, α - температурний коефіцієнт опору і t - температура за Цельсієм);

$$P_1 = k_1 (T_1 - T_2) p ; P_2 = k_2 (T_1^4 - T_2^4) ; P_3 = k_3 (T_1 - T_3) ,$$

k_1, k_2, k_3 - відповідні множники пропорційності, а T_2 і T_3 - температура стінок трубки і кінців електродів відповідно.

Величини P_2 і P_3 не залежать від тиску газу, коли тиск є більшим ніж 10^{-3} Торр. Якщо P_2 і P_3 є значно меншими за P_1 , то ними можна буде знехтувати. Для того, щоб P_3 була відносно малою достатньо вибрати тонку нитку з малим коефіцієнтом теплопровідності (платина). Від величини P_2 залежить чутливість манометру при різних тисках. Для підвищення чутливості манометра до зміни температури нитки внаслідок дії теплопровідності газу, необхідно, щоб потужність P_1 була якомога більшою за P_2 . У той же час, щоб манометр опору мав високу чутливість при вимірюваннях низьких тисків, нитку необхідно нагрівати до відносно низької температури. У цьому разі теплопровідність газу стає дуже малою і при низькій температурі нагріву випромінювана потужність теж зменшиться. Навпаки, при більших тисках вимірювання вигідно виконувати при вищій температурі нагріву нитки, тобто при більшій величині струму I_H . Таким чином, величина вимірюваного тиску і чутливість перетворювача залежать від величини струму I_H і температури нагріву нитки T_1 .

Вимірювання тиску манометром опору виконують наступним чином:

1) при якомога низькому тиску в лампі (10^{-5} Торр) встановлюють робочий струм, якому відповідає температура нагріву нитки T_1 ;

2) газ, що напускається в лампу, буде охолоджувати нитку і її опір зменшиться, це призведе до зростання струму I_H , який вимірюють.

З метою збільшення чутливості вимірювань манометричний перетворювач підключають до зрівноваженого містка для вимірювання опору, як одне з плечей. Зменшення тиску з початком відкачки призводить до зростання температури нагрівання нитки і, отже, до збільшення її опору. Місток розбалансується і для приведення його до зрівноваженого стану необхідно буде зменшити струм I_H . Оскільки вимірюється струм, а знати треба тиск, то використовують градувальну криву (рис.5.7), з якої за величинами струму і знаходять відповідні тиски (в межах 10^2 - 10^{-2} Торр).

У ВТ застосовуються ВСБ1, 13ВТЗ-блокувальні прилади, датчик ПМТ-6. Також широко вживаються манометри Пірані. Класична схема манометра Пірані часто реалізується у вигляді конструкції, де нитка розжарення, з одним або декількома прямолінійними ділянками, поміщена в циліндричний корпус з металу або скла, зовнішня сторона якого знаходиться в контакті з навколишнім середовищем. Оскільки чутливість датчика тим вище, чим довше і тонше нитка розжарення, зазвичай використовують нитку

малого діаметра (~ 10 мкм), згорнута в спіраль, або дуже тонку стрічку, виготовлену з металу, стійкого до окислення, наприклад з Pt або її сплавів, W, Ni.

Термопарний манометричний перетворювач. Другим прикладом використання залежності теплопровідності газу від його тиску є термопарний манометр (рис.5.8). Через низьку вартість і високу надійність широко використовуються датчики термопарних манометричних перетворювачів марки ПМТ-2 (стара назва ЛТ-2), ПМТ-4 (ЛТ-4). Це лампи зі скляним (ПМТ-2) або металевим (ПМТ-4) балоном (рис.5.8б), в який вмонтовано чотири електроди. Як і в манометрі опору, до двох з них приєднана платинова нитка (дротик) 1 (рис.5.8а), яка нагрівається електричним струмом від батареї *БТ*. До середини платинової нитки приварена термопара 2, вільні кінці якої приєднані до останніх двох електродів, до яких підключається мілівольтметр. Величина робочого струму I_p , що нагріває нитку, контролюється міліамперметром 3 і встановлюється до відповідного значення реостатом *R*. Термопара - це два дротики з різних металів, які з одного кінця з'єднані за допомогою зварювання. Особливістю такої пари є таке явище: якщо зварені кінці нагрівати до температури, наприклад, T_1 , то на вільних кінцях, що охолоджуються до T_0 , з'явиться термопарна електрична рушійна сила (*Т.Е.Р.С.*), величина якої залежить від різниці температур ($T_1 - T_0$) - чим більша ця різниця, тим більшою буде *Т.Е.Р.С.* Вибором відповідних металів можна збільшити *Т.Е.Р.С.* В лампі ПМТ-2 використовується термопара з металів хромеля (90 % Ni + 10 % Cr) і копеля (56 % Cu + 44 % Ni).

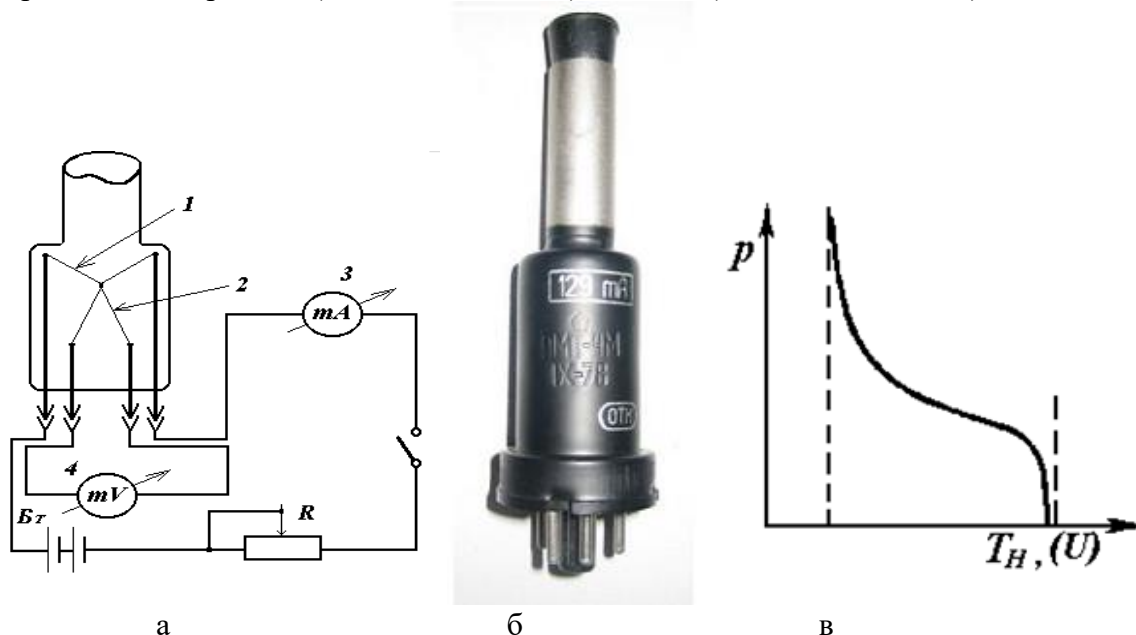


Рис.5.8. Термопарний манометр: а-схема; б- зовнішній вид ПМТ-4М; в-градуювальна крива.

Відкритим кінцем лампа приєднується герметично до вакуумної системи. Поки тиск у вакуумній системі буде атмосферним, мілівольтметр буде показувати *Т.Е.Р.С.*, близьку до нуля при струмі I_p , заданому для даної лампи при її виготовленні. При достатньому зниженні тиску мілівольтметр 4 почне показувати зростаючу *Т.Е.Р.С.*, тому що теплопровідність газу із зниженням тиску зменшиться і це призведе до підвищення T нитки і термопарного спаю. Коли тиск знизиться настільки, що теплопровідність стане дуже малою і температура нитки перестане зростати, стрілка мілівольметра зупиниться на граничній (максимальній) позначці 10 mV, при умові що струм I_p буде попередньо вірно виставлений і залишатися незмінним; у цей момент витрати тепла ниткою і термопарою будуть зумовлені практично тільки теплопровідністю дротиків і випромінюванням.

Термопарну манометричну лампу виготовляють у запаяному вигляді з вакуумом в середині 10^{-4} - 10^{-5} Торр. Щоб вірно визначити робочий струм запаяної лампи, необхідно

дуже ретельно підібрати величину I_p реостатом R так, щоб стрілка мілівольтметра, який показує величину $T.E.P.C.$, встановилась при цьому струмі незмінно на поділці 10 mV . Цей струм і є робочим для даної лампи і при ньому виконують всі вимірювання. Зрозуміло, що за допомогою термопарної лампи вимірюють фактично не тиск, а $T.E.P.C.$, тому для визначення тиску використовують залежність величини $T.E.P.C.$ від тиску (рис.5.8в).

Тепловими манометричними перетворювачами можна проводити вимірювання для різних газів і пари, вести безперервні спостереження за зміною тиску у вакуумній системі, але слід враховувати їх інерційність (0.3-0.5 хв.); вони не складні для виготовлення. Усе це є їх позитивними якостями. Але вони мають і недоліки, головними з яких є: вузький діапазон вимірювання тиску ($5 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ Торр), оскільки чутливість манометра поза межами діапазону різко знижується і виміри стають неточними; залежність градувальних кривих від сорту газу і зміни робочого струму I_p з часом. Останній недолік виникає тому, що змінюється електричний опір платинової нитки - її поверхня забруднюється паром вакуумних олиव та ін. У зв'язку з цим при використанні теплових манометричних перетворювачів необхідно періодично перевіряти робочий струм. Очевидно, що для цього вакуумну систему необхідно відкачати до тиску не менше 10^{-4} - 10^{-5} Торр. Істотний вплив на похибку вимірювання тепловими вакуумметрами надають коливання температури навколишнього середовища.

Теплові датчики калібруються по чистому повітрю, а залежність показів приладу від роду газу враховується так: $p = p_{\text{повітря}} \cdot q$; де коефіцієнт q для $H_2 = 0,67$, $He = 1,12$, $CH_4 = 0,61$, $Ne = 1,31$, $CO = 0,97$, $CO_2 = 0,94$, $Ar = 1,56$.

5.5. Іонізаційні манометричні перетворювачі.

Вимірювання тиску за допомогою цих манометрів відбувається завдяки іонізації залишкового газу і визначенню іонізаційного струму, що буде мірою молекулярної концентрації, тобто тиску газу. Очевидно, що збільшення струму іонів буде відповідати зростанню тиску.

Іонізаційний манометр, як і термопарний, складається з двох частин: вимірювальної (ВИТ-1,2,3, ВИ-14) і датчика (рис.5.9). Датчик – скляна лампа – перетворювач манометричний іонізаційний ПМИ – 2 (стара назва ЛМ), має вигляд (рис.5.10) скляної колби 1, що закінчується трубкою 2, через яку приєднується до вакуумної системи. У середині колби впаяні три електроди: вольфрамовий катод 3, розміщений на осі колби у вигляді петлі з двома відводами 4, анод – молібденова сітка у вигляді біфілярної спіралі 5, що охоплює катод і також має два відводи 6, і нікелевий колектор іонів 7 у вигляді циліндра, що охоплює ці електроди і має відвід 8. Два відводи у сітки-анода необхідні для розжарювання її електричним струмом, щоб викликати виділення поглинутих газів як з неї, так і з інших елементів лампи. Електрони, що емітуються нагрітим катодом, спрямовуються до анода і створюють електронний струм, а іони, що створилися під дією ударної іонізації, збираються колектором іонів і створюють іонний струм, який вимірюється мікроамперметром (рис.5.11а). Оскільки сітка має великий період намотки, то значна частина електронів не зразу досягає її поверхні, а пролетівши повз неї, опиняється в гальмуючому електричному полі колектора і починає коливальний рух (5 коливань) навколо сітки перед тим, як потрапить до неї. Збільшення довжини траєкторії руху електронів збільшує імовірність іонізації і значно підвищує чутливість манометра. З цією ж метою відстань між сіткою-анодом і колектором іонів роблять відносно великою. Для створення іонного струму достатньо до колектора прикласти від'ємну напругу до 10 В, але для прискорення емісійних електронів необхідна позитивна напруга до 250 В.



Рис.5.9. Іонізаційний датчик ПМИ-2 та вимірювальні прилади: ВІТ-3 (зверху) і Мерадат-ВІТ 19ІТ2 (знизу).

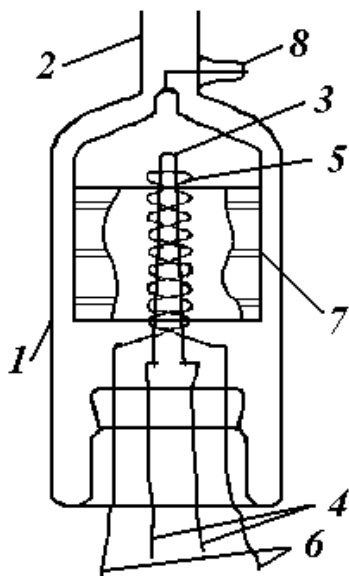


Рис.5.10. Будова ПМИ-2

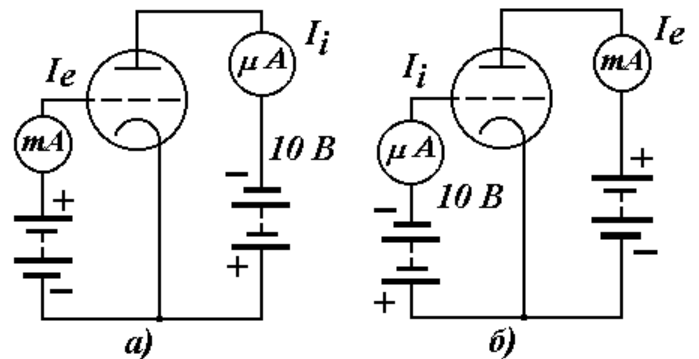


Рис.5.11. Схеми живлення ПМИ-2.

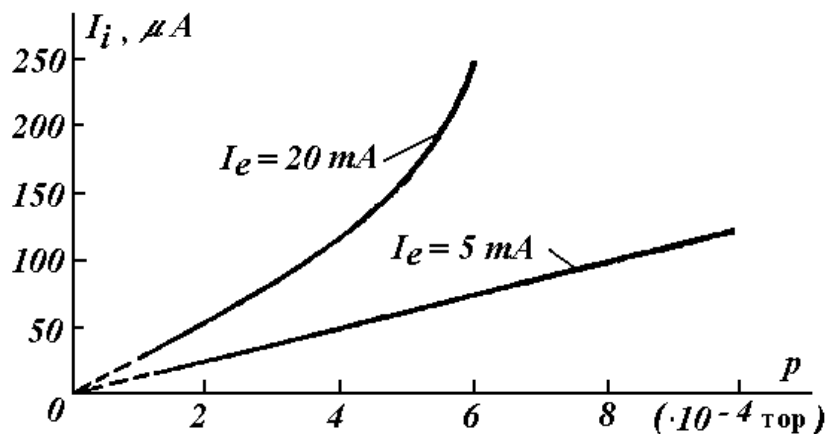
Підключення іонізаційного датчика можна здійснювати також за схемою рис.5.11б, де функцію анода виконує колектор іонів, а іони збираються сіткою 5. Але чутливість манометра при такому підключенні нижча, тому схема а) має більш широке застосування.

З експериментів відомо, якщо тиск газу не перевищує 10^{-3} Торр, то відношення іонного струму до електронного прямо пропорційним до тиску в манометричній лампі:

$$\frac{I_i}{I_e} = k p.$$

Коефіцієнт пропорційності k визначає чутливість манометра і залежить від властивостей газу, його температури, електричного режиму і геометрії. Якщо електронний струм підтримувати завжди на постійній величині, то можна вважати, що $I_i = A p$, де $A = I_e k$ – постійна манометра.

Рис.5.12. Градувальний графік для різних значень електронного струму.



Величину сталої манометра визначають геометрично з градуувального графіка, який будують за допомогою іншого манометра. Очевидно, що при збільшенні величини електронного струму іонний струм також зростатиме. Питома іонізація залежить від роду газу, тому як і для термопарного манометра покази іонізаційного потребують коректування на сорт газу: для повітря $q=1$; N_2 -1; Cl_2 - 0,8; H_2 -0,43; He -0,18; H_2O -0,1; Kr -1,9; пари масла -913.

Градуувальний графік має в основному лінійну залежність (рис.5.12). Тангенс кута нахилу визначає постійну манометра. За підвищених тисків ($>10^{-4}$ Торр) при більшому електронному струмі (20 мА) іонний струм зростає швидше ніж тиск. Це пояснюється виникненням лавинної іонізації. Завдяки лінійній залежності іонного струму від тиску іонізаційні манометри мають високу точність у діапазоні тисків 10^{-3} - 10^{-6} Торр.

До недоліків слід віднести можливість руйнування розжареного катода при раптовому проникненні у колбу атмосферного повітря. Руйнування відбудеться завдяки інтенсивному бомбардуванню іонами, що будуть утворюватися біля катода. Крім цього приєднувати манометр до вакуумної системи треба через трубку великого діаметра, в супротивному разі газовий розряд, що протікає в манометрі, призведе до поглинання газу електродами, тобто до помітного зниження тиску в ньому в порівнянні з вакуумною системою. Тому перед вимірюванням необхідно провести знегажування елементів манометра інтенсивним електронним бомбардуванням, яке створюють розжаренням спіралі анода.

При вимірюванні низьких тисків ($<10^{-7}$ Торр) з'являються помітні неточності, пов'язані з появою фотоелектронної емісії з колектора іонів, що виникають під дією рентгенівських променів, які випромінює анод внаслідок бомбардування його прискореними електронами. Останній недолік частково усувається зміною конструкції.

5.6. Іонізаційний манометр Байярда – Альперта.

Щоб точно вимірювати низькі тиски, Байярд і Альперт створили манометр, в якому колектором іонів слугує тонкий вольфрамовий дротик 1, оточений сіткою – анодом 2, а катод 3 розміщений зовні сітки (рис. 5.13). Анодну напругу було понижено до 100 В. Усе це було зроблено з метою зниження рентгенівського випромінювання і його дії на колектор іонів (мала площа). Дійсно, чутливість такого манометра зростає у 100 і більше разів. Манометр Байярда – Альперта дає точні виміри тисків до $\sim 10^{-10}$ Торр. Розміщення колектора іонів всередині сітки зменшило число іонів, що потрапляли на стінку колби, а не на колектор, тобто при такому розміщенні відповідність іонного струму числу утворених іонів вища. Вимірювання тисків нижчих 10^{-10} Торр обмежується тиском насиченої пари вольфраму, що з'являється при температурі розжарення нитки катода $\sim 2300^{\circ}C$, а також помітному проникненню до колби атмосферного гелію через скло. Градування манометрів виконують шляхом порівняння вимірів з показаннями компресійного манометра.

Іонізаційні електронні перетворювачі широко використовуються в сучасній науці і техніці, зокрема в прискорювачах і накопичувачах. Також принцип роботи іонізаційних манометрів використовують для перевірки ступеня вакууму в запаяних вакуумних приладах. До загального недоліку іонізаційних манометрів слід віднести чутливість до впливу на виміри тиску наявності зовнішніх електричних і магнітних полів.

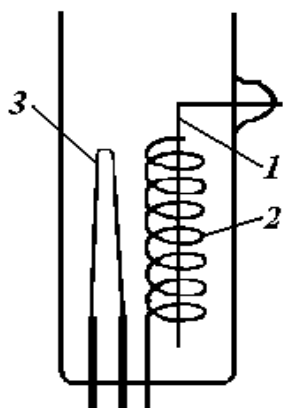


Рис.5.13. Лампа Байярда – Альперта.

5.7.Магнітні перетворювачі.

Це свого роду вдосконалені іонізаційні перетворювачі. Принцип дії магнітних перетворювачів заснований на залежності струму самостійного газового розряду від тиску в схрещених магнітному та електричному полях. Тобто іонізація газу здійснюється не термоелектронами, а забезпечується розрядом між холодними електродами. Застосовують кілька видів електродних систем, які забезпечують підтримку самостійного розряду при високому вакуумі. Насамперед це комірка Пеннінга (рис.5.14), яка складається з двох дискових катодів (в їх ролі може бути корпус) і циліндричного анода. Електрони, що вилітають з катода в результаті автоелектронної емісії, рухаються по спіральних траєкторіях між катодними пластинами. Магнітна індукція B ($E \parallel H$) вибирається більше критичного значення (напруженість складає декілька тисяч А/м), яке відповідає рівності діаметра електрода і діаметра кола, по якому рухається електрон. При зіткненні з молекулою залишкового газу електрон втрачає частину енергії на її іонізацію і переміщається в радіальному напрямку до анода. Утворені позитивні іони рухаються до катода, утворюючи іонний струм I_i (їх маса більша, ніж електронів, тому магнітне поле не впливає на траєкторію руху). Зіткнення позитивних іонів з катодом призводить до утворення вторинних електронів, струм яких пропорційний іонному.

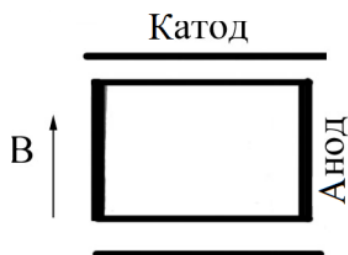


Рис.5.14. Комірка Пеннінга.

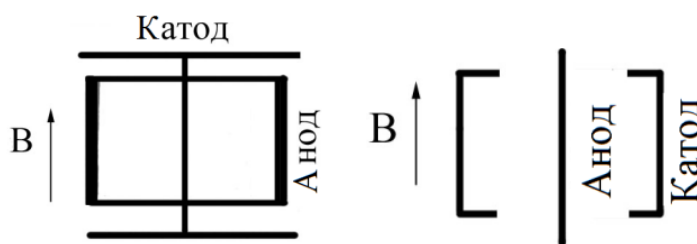


Рис.5.15. Магнетронний і інверсно-магнетронний перетворювач.

Таким чином, розрядний струм магнітного перетворювача:

$$I_p = I_f + I_i + I_v,$$

де I_f - фоновий струм автоелектронної емісії; I_v - струм вторинної електронної емісії. Струм автоелектронної емісії не залежить від тиску, іонний струм і струм вторинної емісії від тиску залежать: $I_i + I_v = aP^n$,

де $a = 0,1 \dots 0,01$ А/Па і $n = 1 \dots 1,4$ - постійні.

Якщо розташувати магнітне поле так, щоб $H \perp E$, то отримаємо магнетронні перетворювачі (рис.5.15). У них катоди з'єднані стрижнем. В інверсно-магнетронних центральний стрижень є анодом, а зовнішній циліндр - катод. Стрижень – це тонкий електрод, який при швидкому нагріванні виділяє адсорбовані гази, і тим самим полегшує загоряння розряду.

Для всіх магнітних електророзрядних датчиків характерно, що прямий проліт електронів, які утворилися в розряді між холодними електродами, до анода, заборонено завдяки застосуванню магнітного поля. В датчиках з ЕІН домінує зворотньо-поступовий рух електронів уздовж осі, в магнетроні – циклоїда, в інверсно-магнетронному перетворювачі – гіпоциклоїда.

Нижня межа вимірювання в сучасних магнітних вакуумметрах може досягати 10^{-11} Па. Інші переваги магнітних вакуумметрів: широкий діапазон дії, простота в експлуатації, стійкість до напускання повітря у вакуумну камеру. Завдяки простоті і надійності вони використовуються для керування технологічними процесами. До недоліків необхідно віднести: – нестабільність роботи через замазлювання електрода (корпусу або катода), що бомбардується іонами; – селективність роботи (різна чутливість до різних газів); – чутливість гірша, ніж у іонізаційного вакуумметра.

Прилади: ВМБ-3,8,14, ВІМ-2 та ін.; датчики: ММ-13, ПММ-3-21, ММ-14, М-4А та ін. На рис. 5.16 показано вакуумметр магнітний блокувальний ВМБ-14, інверсно-магнетронні манометричні перетворювачі з холодним катодом ПММ-32-1 (діапазон вимірюваних тисків $10^{-2} \div 7,5 \cdot 10^{-10}$ Торр) та ПММ-46 (діапазон вимірюваних тисків $1 \div 3 \cdot 10^{-13}$ Торр). Випускаються без скляного корпусу, монтуються на фланці.



Рис.5.16. Сучасні магніторозрядні вакуумметри.

5.8. Радіоізотопні перетворювачі.

Бажання позбутися розпеченого анода та високих напруг, зберігши при цьому принцип вимірювання тиску за іонним струмом, привело до створення манометрів із радіоактивним джерелом. Джерелом іонізації в таких вакуумметрах є α -, β - або γ -випромінювання радіоактивних речовин, наприклад радію, кобальту. Особливо ефективним є використання β - випромінювання. При взаємодії з молекулами газів електрони викликають їх іонізацію. Причому кількість отриманих позитивних іонів прямо пропорційна тиску в робочому об'ємі.

До переваг таких вакуумметрів відносять необмежений термін служби, відсутність високих напруг, лінійність характеристик, а до недоліків – вузький діапазон робочих тисків від 10^5 до 10^{-3} Па (ВР-4 з датчиком МР-8).

5.9. Динамічні і радіометричні вакуумметри.

Динамічні вакуумметри побудовані на різних варіантах перенесення імпульсу. До цих приладів відносяться в'язкісні і кінетомолекулярні вакуумметри. Дія перших заснована на вимірі часу загасання коливального руху поверхні в результаті ефекту демпфування (коливання) після прикладання імпульсу. В кінетомолекулярних вакуумметрах використовується ефект переносу імпульсу від диска, що безперервно обертається, до іншого нерухомого, розташованого дуже близько. Тиск визначається за обертальним моментом нерухомого диска.

До конструкції елементів підвіски таких вакуумметрів пред'являються підвищені вимоги: виникаючі в ній сили тертя і її жорсткість не повинні маскувати вимірювальний обертальний момент. Можливість розробки більш простих, надійних та точних вакуумметрів, що забезпечують вимір низьких тисків, з'явилася з ідеєю використовувати кулю або диск, які вільно підвішені у магнітному полі. Вперше ця ідея була висунута ще в 1946 р., але лише після 1962 р. була реалізована в динамічних вакуумметрах. Це дозволило вимірювати тиск до 10^{-7} Па, проте оптимальний діапазон вимірюваних тисків становить 10^{-2} – 10^{-5} Па. Навіть перші недосконалі в'язкісні вакуумметри представляли собою прецизійні пристрої, що вимагають дорогої електронної системи управління і вимірювання, а також встановлення їх на віброзахисних столах. Такі вакуумметри випускаються промисловістю в невеликих кількостях. Поверхня ротора має бути ідеально гладкою. Зокрема, при негладкій поверхні покази вакуумметра істотно залежатимуть від роду газу.

Радіометричні вакуумметри в порівнянні з в'язкісними володіють тією перевагою, що їх покази не залежать від природи газу. Одним з перших радіометрів був прилад, запропонований Круксом в 1873 р. Основним елементом цього пристрою була легка чотирилопатева вертушка. Якщо до балона, в якому перебувала ця вертушка, піднести джерело світла або тепла, то вона починала обертатися. Причина – *радіометричний ефект*, тобто прояв дії сили відштовхування між двома поверхнями при різних температурах в розрідженому газі. Ефект викликається тим, що молекули газу, які вдаряються у поверхню з $T_1 > T_2$ відбиваються від неї з більшою кінетичною енергією, ніж після взаємодії з холодною поверхнею (T_2). Тоді холодна поверхня твердого тіла (диск, вертушка) з боку нагрітої бомбардується більш швидкими молекулами, ніж з протилежного боку. Завдяки різниці в одержаних імпульсах виникає сила відштовхування. При низькому тиску вона пропорційна тиску, а при високому – обернено пропорційна.

Розроблено радіометричний вакуумметр з магнітною підвіскою, що дозволяє вимірювати тиски до 10^{-8} Па. У цьому вакууметрі основним елементом є вирізаний з полікристалічного магнітно-ізотропного графіту диск діаметром 3 мм і товщиною 0,05 мм, який обертається навколо свого діаметра, розташованого по вертикальній осі статора (рис.5.17). Диск поміщений всередині циліндричного корпусу (статора), виконаного з молібденових смужок, розташованих під певним кутом. Корпус статора за допомогою теплопроводу (металевого стержня), зануреного в рідкий азот, може охолоджуватися до $\sim 78\text{K}$, тоді як скляна оболонка вакуумметра знаходиться при кімнатній температурі. Якщо диск обертається проти годинникової стрілки, то півкола диска (щодо осі обертання) будуть увесь час відступати, а протилежні їм півкола – наступати. В результаті обертотий диск буде або прискорюватися, або уповільнюватися в залежності від напрямку початкового обертання. Швидкість обертання визначається за допомогою фотопомножувача, який фіксує відбитий від обертотого диска промінь світла. При одному повному обороті диска на фотопомножувач потрапляє два імпульси світла.

Зазвичай тиск вимірюється за ефектом гальмування обертотого диска, а швидкість обертання визначається за кількістю імпульсів за певний відрізок часу. При тиску 10^{-7} Па

для вимірювання потрібно близько 60 с. Через це вакуумметр цього типу не придатний для динамічного вимірювання тиску.

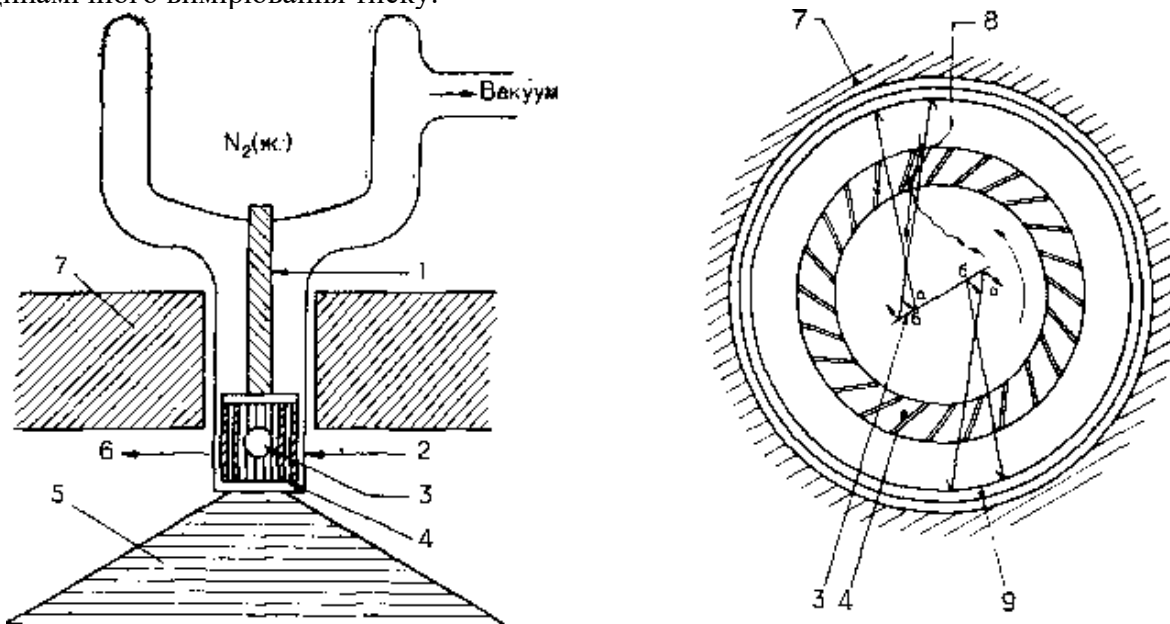


Рис. 5.17. Вакуумметр Еврарз і Бутрі (вид збоку і горизонтальний поперечний переріз): 1 - теплопровід; 2- промінь світла; 3-графітовий диск; 4 - статор (холодний); 5 - магніт; 6 - фотопомножувач; 7 - магніт; 8 - теплове випромінювання; 9 - скляний корпус (нагрітий).

Вакуумметр, температура ротора якого, збігається з температурою навколишнього середовища, може використовуватися як в'язкісний вакуумметр. Проте при в будь-яких вимірах слід враховувати вплив в'язкості газу. Розглянутий вакуумметр являє собою досить складний і дорогий пристрій, проте, будучи абсолютним вакуумметром, він застосовується як еталон для градуювання іонізаційних вакуумметрів.

5.10. Груба оцінка вакууму.

Ступінь вакууму можна оцінити за видом свічення газового розряду в розрядній трубці, яку приєднують до вакуумної системи. Газовий розряд стає помітним при тиску менше 10 Торр і має вигляд "шнуру", що розміщений на осі трубки і випромінює світло. Зниження тиску приводить до розширення шнура і при тиску в 1 Торр він заповнює весь поперечний переріз трубки, але яскравість свічення зменшується. Трубка випромінює слабке дифузне світло. Якщо тиск стає рівним 0,1 Торр, то розряд стає дуже блідим і з'являються світні поперечні смуги (страти). Свічення газу стає майже непомітним при тиску 10^{-2} Торр, але під дією бомбардування стінки трубки іонами та електронами з'являється зеленувата або блакитна флуоресценція скла (залежно від складу скла). Наступне зниження тиску до 10^{-3} Торр приводить до зникнення будь-якого свічення. При $\sim 10^{-4}$ Торр - ніякого світіння (чорний або темний вакуум).

5.11. Градування вакуумметрів.

Існують два основні методи градуювання вакуумметрів: статичний і динамічний. При використанні статичного методу градуюваний вакуумметр під'єднується до вакуумної камери поблизу від зразкового (еталонного) і проводиться порівняння показів обох приладів в умовах рівноваги. Камера повинна бути сконструйована таким чином, щоб гарантувати однаковий тиск по всьому об'єму (неприпустима наявність в камері потоків газу). Крім того, вакуумна система повинна забезпечувати досягнення і збереження значно більш низького тиску в порівнянні з необхідним для проведення вимірювань.

Цей метод найбільш доцільно використовувати для вакуумметрів з робочим діапазоном вимірювань від 10 до 10^{-3} Па, тобто при таких тисках, зазвичай

використовують скляні відпаяні системи. Для таких вакуумметрів може бути досягнута точність краще $\pm 1\%$.

Однак для надвисоких вакуумметрів виконання перерахованих вище умов практично неможливо, що пояснюється наступними причинами. По-перше, єдиними вакуумметрами, які можуть бути використані в якості еталонних, є динамічні і радіометричні вакуумметри, нижня межа вимірювання тиску для яких становить близько 10^{-7} Па. Тому в разі приладів, призначених для умов надвисокого вакууму, доводиться покладатися на градування за допомогою вторинних еталонів (попередньо відградуваних іонізаційних вакуумметрів) або використовувати метод екстраполяції до більш низьких тисків. По-друге, необхідно, щоб залишковий тиск в системі був нижче 10^{-8} Па, досягти якого і для відпаяних систем не просто, крім того, потрібно точно знати склад використаного при градуванні газу, що не завжди вдається. Проте цей метод застосовується і призводить до задовільного результату. Особливо він корисний при перевірці чутливості і градуванні вакуумметрів серійного виробництва.

Проблема атестації вакуумметрів може бути частково вирішена за допомогою методу об'ємного розширення. Суть цього методу зводиться до того, що невелика кількість газу відомого обсягу, що знаходиться при тиску вище 10^{-3} Па (яке може бути виміряне з досить високим ступенем точності), розширюється в камері відомого (великого) обсягу, до якої підключено градуваний вакуумметр. Після розширення та встановлення рівноваги тиск газу визначається за законом Бойля – Маріотта на підставі відомого відношення обсягів, величина якого може досягати 10^7 . Цей метод можна використовувати або багаторазово для двох камер, або для декількох послідовних камер з меншими значеннями відношення обсягів.

5.12. Вимірювання парціальних тисків.

На роботу вакуумних приладів, у тому числі газорозрядних джерел світла, дуже впливає не тільки ступінь вакууму, але й склад залишкових газів. Від того, які гази і їх кількість залишилися в електронному вакуумному приладі залежить якість та надійність роботи. Тому є необхідність аналізу залишкових газів і оцінки їх парціальних тисків при виготовленні таких приладів. Вимірювачі парціальних тисків, як і загальних, характеризуються нижньою і верхньою межами вимірюваних парціальних тисків, чутливістю, а також властивим тільки їм параметром - роздільною здатністю.

Вимірювання парціальних тисків у вакуумних системах в даний час здійснюють двома методами: *іонізаційним і сорбційним*. Іонізаційний метод заснований на іонізації і поділу позитивних іонів в залежності від відношення маси до заряду. Сорбційний метод використовує аналіз адсорбованих газів.

В основному залежно від фізичних ефектів, що використовуються, іонізаційні газоаналізатори аналізатори поділяються на:

а) мас-спектрометри з магнітним розподілом іонів - використовується залежність радіуса кривизни траєкторії позитивних іонів, що рухаються у постійному магнітному полі, від співвідношення заряду q до його маси m ;

б) омегатрони – мас-спектрометри, в яких використовується залежність резонансної частоти коливань іонів у змінному електричному і постійному магнітному полі від співвідношення q/m ;

в) хронотрони – газоаналізатори, в яких використовується залежність часу прольоту іонів однакової відстані від їх маси.

Принцип дії магнітного газоаналізатора (мас-спектрометра) заснований на просторовому поділі моноенергетичного пучка іонів в однорідному поперечному магнітному полі (рис.5.18). Іоноутворення здійснюється електронним бомбардуванням (I_e) нейтральних газових молекул в іонному джерелі 1. Іонне джерело знаходиться під негативним потенціалом щодо землі, тому виштовхує іонний пучок I^+ в простір дрейфу зі швидкостями $v \sim (q/m) 0,5$. У просторі дрейфу діє поперечне магнітне поле з індукцією B ; під впливом сили Лоренца $F_l = qvB$ позитивні іони рухаються в напрямку,

обумовленому правилом лівої руки, по колах постійних радіусів R . При цьому доцентрова сила Лоренца врівноважується відцентровою силою $F_2 = mv^2 / R$. З умови рівності сил $F_1 = F_2$ радіус траєкторії іонів: $R = mv / (qB)$.

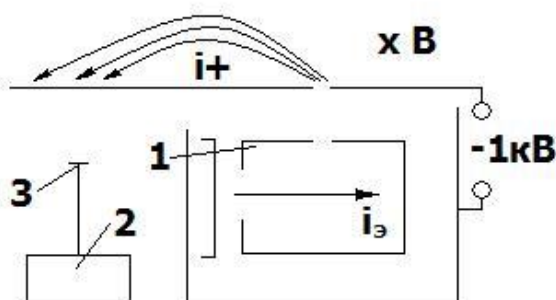


Рис.5.18. Схема магнітного газоаналізатора.

В результаті на колектор 3 потрапляють тільки ті іони, радіус яких відповідає положенню щілини в діафрагмі перед колектором. Змінюючи радіус траєкторії іона R за рахунок зміни прискорюючої напруги або індукції B , можна забезпечити попадання на колектор іонів з різними масовими числами. Іонний струм реєструється приладом 2.

Чутливість мас-спектрометра зростає при збільшенні ширини щілин. Верхня межа робочих тисків 0,01 Па визначається постійністю коефіцієнта чутливості, нижня 10^{-8} Па - фоновими струмами.

Для проведення аналізу за допомогою методу сорбції в камеру з досліджуванним газом, що має звичайний манометричний перетворювач, поміщають вольфрамову нитку, яка прогривається прямим пропусканням струму. Перед початком роботи її треба знегазити прогрівом до 2500 К. Після охолодження на її поверхні адсорбуються молекули залишкових газів. При нагріванні нитки відбувається десорбція газів і тиск у камері підвищується, причому десорбція різних газів відбувається при різній температурі нитки. Для підвищення чутливості приладу необхідно збільшувати адсорбуючу поверхню. Якщо адсорбуючу поверхню охолодити, то можна провести аналіз газів з малою теплою адсорбції.

5.13. Вакуумметри з активним датчиком.

Як ми побачили в цьому розділі, загалом традиційні вакуумметри складаються з пасивного датчика - манометричного перетворювача, який формує сигнал, пропорційний тиску у вакуумній камері, і спеціалізованого вимірювального блоку, який цей сигнал обробляє і здійснює індикацію тиску на вимірювальному приладі. Основним недоліком таких вакуумметрів є те, що сигнал з пасивного манометричного перетворювача малий за величиною (особливо при високому вакуумі). Передача його до вимірювального блоку здійснюється по проводах, іноді досить довгим. Через малу величину сигналу, по-перше, неминучі обмеження, що накладаються на довжину кабелю, який зв'язує пасивний манометричний перетворювач і вимірювальний блок. По-друге, необхідне якісне екранування такого кабелю - тільки за таких умов можна без втрат і спотворень передати малий сигнал. По-третє, у разі манометричних перетворювачів, для роботи яких необхідні високі напруги (інверсно-магнетронні, іонізаційні), живлення до перетворювача підводиться від вимірювального блоку по тому ж кабелю, що також позначається на зручності користування приладом і на точності вимірювань (наприклад, напруга, яка необхідна для роботи інверсно-магнетронного перетворювача складає одиниці кіловольт). Вимірювальний блок такого вакуумметра є вузькоспеціалізованим і розрахований, як правило, на роботу тільки з перетворювачами одного типу.

Вакуумметри з активним датчиком позбавлені цих недоліків. Активний датчик складається з власне манометричного перетворювача - датчика і електронної схеми, розташованої в безпосередній близькості до його виходу. Манометричний перетворювач і електронна схема монтуються безпосередньо на фланці, який приєднується до вакуумної системи. Електронна схема забезпечує обробку сигналу з датчика, і його перетворення в стандартний аналоговий і / або цифровий сигнал. Передача такого сигналу суттєво простіша і надійніша, ніж у випадку традиційних вакуумметрів. Електронна схема формує всі необхідні для манометричного перетворювача робочі напруги з поданої на її вхід напруги малої величини (як правило 24В) - відповідно немає необхідності передавати високу напругу від реєструючого блоку (блоку індикації).

Блок індикації в цьому випадку універсальний і може бути застосований на підключення декількох активних датчиків. Ці датчики можуть бути різних типів. Блок індикації розпізнає їх тип по сигналу з електронної схеми. Сучасні активні датчики можуть складатися з двох перетворювачів – низько- і високовакуумного, причому для користувача такий датчик сприймається як один, розрахований на весь діапазон вимірювань (так звані "full-range" датчики).

Основними напрямками розвитку вакуумметричної апаратури є:

- мініатюризація всіх складових частин вакуумметрів;
- розширення номенклатури і конструктивне вдосконалення комбінованих вакуумметрів і комбінованих перетворювачів тиску,
- розробка і впровадження нових форм вакуумметричних приладів - вторинних електронних пристроїв, сполучених з первинними перетворювачами, і можливістю забезпечити вироблення вимірювального сигналу в цифровому вигляді без відображення на вихідному приладі.

Л7. ВАКУУМНІ СИСТЕМИ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТИ

Вакуумні уловлювачі та їх експлуатація. Призначення та основні вимоги, що висуваються до вакуумних уловлювачів: механічні уловлювачі, низькотемпературні охолоджувальні уловлювачі, адсорбційні уловлювачі, гарячі (термічні) уловлювачі, електричні (газорозрядні) уловлювачі. Вакуумні з'єднання. Конструкційні матеріали, що використовуються у вакуумній техніці. Течі і методи їх пошуку. Особливості надвисокого вакууму. Отримання надвисокого вакууму. Вимірювання надвисокого вакууму. Умовні графічні позначення елементів вакуумних систем.

6.1. Вакуумні уловлювачі та їх експлуатація

6.1.1. Призначення та основні вимоги до вакуумних уловлювачів. При високому тиску (більше 10^2 Па) зворотний потік парів робочої рідини затримується зустрічним потоком відкачуваного газу, і в застосуванні захисних пристроїв не виникає необхідності. При більш низькому тиску, коли довжина вільного пробігу молекул газу стає більше діаметра вхідного патрубку насоса, пари рідини можуть рухатися назустріч основному потоку і проникати у камеру, яка відкачується. Якщо температура насоса вище, ніж температура відкачуваного об'єкта, то зворотний потік буде існувати до тих пір, поки вся пара робочої рідини насоса не переміститься в камеру. Для захисту відкачуваного об'єму від пари робочої рідини використовуються спеціальні пристрої, які називаються *пастками*. Отже, *вакуумними уловлювачами* (пастками) називаються пристрої, що встановлюються у вакуумну систему і призначені для уловлювання пари робочої рідини насоса та зниження тим самим її проникнення у відкачуваний об'єм. Окрім одержання безоливного вакууму пастки уловлюють механічні частинки, які можуть утворюватися у камері і насосі. Таким чином пастки слугують для покращення вакууму. Залежно від діапазону робочих тисків їх поділяють на форвакуумні (уловлювання пари робочих рідин

форвакуумних насосів при в'язкісному та молекулярно-в'язкісному режимах течії пари із насосів) і високовакуумні (уловлювання пари робочих рідин із дифузійних і бустерних пароструминних насосів при молекулярному режимі течії пари з насосів).

Залежно від принципу дії уловлювачі поділяються на механічні (масловідбиваючі), низькотемпературні (конденсаційні), адсорбційні, термічні (гарячі, термосорбційні) та електричні (газорозрядні). Найбільшого поширення набули механічні, низькотемпературні й адсорбційні уловлювачі.

Основними характеристиками уловлювачів є їх *захисна здатність та питома провідність*. *Захисну здатність уловлювача β* визначають як відношення потоку пари робочої рідини $Q'_{п}$, що надходить з насоса в уловлювач за одиницю часу, до потоку пари $Q''_{п}$, який пройшов через уловлювач до відкачуваного об'єму:

$$\beta = Q'_{п} / Q''_{п}$$

Іноді, як показник, що характеризує захисну здатність уловлювача, використовують безпосередньо потік $Q'_{п}$, віднесений до одиниці площі вхідного отвору уловлювача, або парціальну частку пари робочої рідини та продуктів термічного розкладу в спектрі залишкових газів у відкачуваній системі за уловлювачем.

Питома провідність уловлювача визначають як відношення провідності уловлювача $U_{ул}$ до площі його вхідного отвору $F_{ул}$.

При конструюванні уловлювачів залежно від їх призначення до них ставиться ряд вимог, основні з яких наступні:

1. Уловлювачі мають добре захищати відкачуваний об'єм від проникнення пари робочої рідини, тобто повинні мати максимальну захисну здатність.
2. Уловлювачі повинні якомога менше знижувати швидкодію насоса. Правильно сконструйований уловлювач знижує швидкість роботи насоса не більше ніж на 30–40 %.
3. Уловлювачі повинні мати конструкцію, яка б забезпечувала доступ до захисних елементів для їх періодичного очищення.
4. Уловлювачі, які застосовуються в надвисоковакуумних системах, повинні допускати прогрівання до 750 К з метою їх знегажування.
5. Конструкції охолоджуваних пасток повинні забезпечувати малі витрати холодоагента.

6.1.2. Механічні уловлювачі. Для зменшення зворотного потоку пари робочої речовини застосовуються захисні ковпачки, які встановлюються над краєм сопла дифузійного насоса (рис.6.1), та масловідбивачі. Правильно встановлений захисний ковпачок створює бар'єр для теплової хмари пари й перехоплює потік, що викидається із струменя сопла пароструминного насоса.

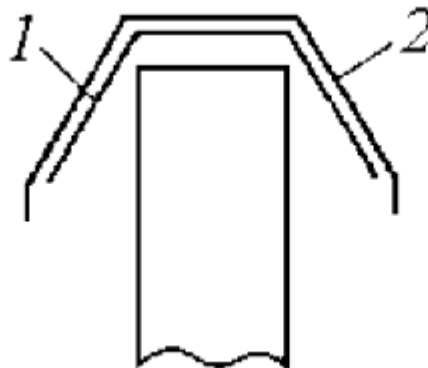


Рис.6.1. Сопло зонтичного типу: 1 – зонтик; 2 – захисний ковпачок

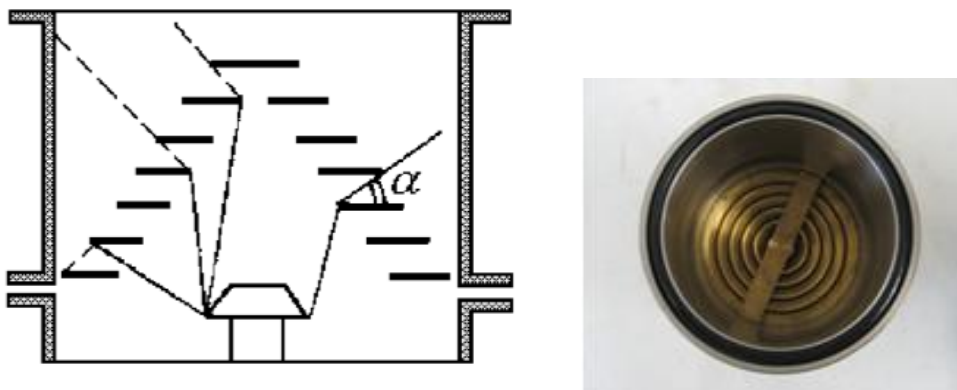


Рис.6.2. Схема (а) та вигляд (б) конічного дискового масловідбивача.

Серед механічних масловідбивачів найбільшу ефективність має конічний дисковий уловлювач, принцип дії якого показано на рис.6.2. Захисна здатність такого уловлювача характеризується максимальним кутом α , утвореним між горизонтальною площиною та вторинним променем потоку, спрямованим у бік високого вакууму (пунктирні лінії на рис.6.2). Потік спрямовується на стінку, де і конденсується. Наприклад, зворотний потік пари масла для пароструминного насоса становить 10^{-3} мг/(с·см²). Якщо на його шляху встановити механічний відбивний ковпачок, то за рахунок відбивання молекул пари її потік зменшується до 10^{-5} мг/(с·см²). Жалюзійні й конічні дискові пастки знижують зворотний потік до 10^{-3} мг/(с·см²). Механічні уловлювачі охолоджуються за рахунок теплопровідності від корпусу насоса або водою. У тих випадках, коли необхідно підвищити захисну здатність масловідбивача, застосовують охолодження до більш низьких температур.

В якості механічних пасток застосовують фільтри-сорбенти. Фільтри із пористих матеріалів зменшують потік парів робочої рідини, які проникають у вакуумну систему з механічних насосів з масляним ущільненням. В якості фільтрів можуть використовуватися пористі нікель, фторопласт, нержавіюча сталь. Найзручнішим матеріалом є пориста нержавіюча сталь із розмірами пор (капілярів) від 4 до 20 мкм. Механізм уловлювання молекул робочої рідини полягає в сорбції молекул на стінках капілярних каналів фільтра, завдяки чому зворотний потік пари масла за фільтром зменшується в 10^6 разів. Тому їх застосовують для уловлювання туману з форвакуумних оливних насосів. Термін дії фільтрів-сорбентів від 200 до 700 годин.

6.1.3 Низькотемпературні охолоджувальні уловлювачі. Для найбільш повного захисту відкачуваної системи від пари робочої рідини пароструминних насосів призначені низькотемпературні уловлювачі, які знижують тиск пари до значення, що відповідає температурі охолоджених елементів уловлювача. Ці пастки не тільки запобігають проникненню шкідливої пари у відкачуваний об'єм, а й вловлюють пару і гази, які є у вакуумній камері, що дозволяє отримувати в добре знегаженій системі тиск залишкових газів на рівні 10^{-8} Па для паромасляних дифузійних насосів і 10^{-10} Па для парортутних. Для паромасляних дифузійних насосів застосовують уловлювачі, охолоджувані до температур від 243 до 77 К.

Процес видалення пари методом конденсації називають виморожуванням, тому уловлювачі з охолоджуваними поверхнями отримали назву *виморожувальних, або конденсаційних*. Виморожувальні уловлювачі поділяють на прості й високовакуумні, а залежно від матеріалу, з якого вони виготовлені, – на скляні й металеві.

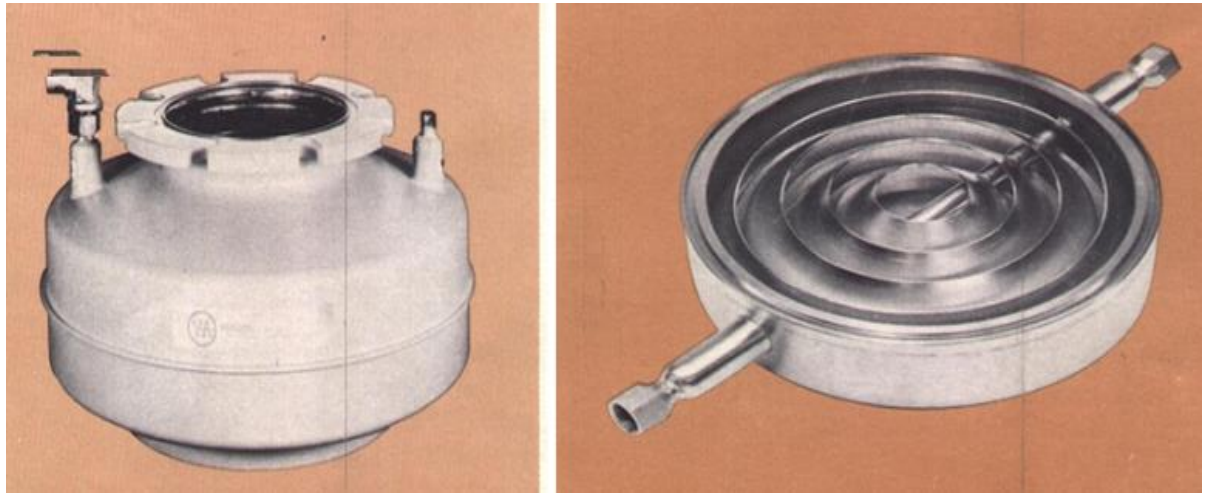


Рис.6.3. Конденсаційні пастки.

На рис.6.3 показано азотні пастки фірми Vacsta (зліва) і фірми Varian (справа). Для охолодження конденсаційних пасток застосовують воду; суміш льоду і NaCl (дозволяє досягти -18°C); суміш льоду і CaCl_2 (-48°C); тверду вуглекислоту зі спиртом (-78°C); фреон (-120°C); рідке повітря (183°C); рідкий азот (-186°C). Дані таблиці 6.1 ілюструють покращення вакууму, який створюється дифузійним насосом для різних робочих рідин, при використанні пасток. Видно, що зниження температури поверхні, на якій конденсуються пара робочої рідини, значно зменшує її пружність.

Табл.6.1

Холодоагент	Температура	$P_{\text{нас}} \text{H}_2\text{O}$, Тор / Па	$P_{\text{нас}} \text{Hg}$, Тор / Па	$P_{\text{нас}} \text{ПФЕ}$, Тор / Па	$P_{\text{нас}} \text{ВМ-1}$, Па
Вода	20°C	17,5/ $2,3 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-3}$ / $1,6 \cdot 10^{-1}$	10^{-7} / 10^{-5}	10^{-5}
Лед	0°C	4,6/ $6 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{-4}$ / $2,6 \cdot 10^{-2}$	10^{-9} / 10^{-7}	10^{-6}
CO_2 (твердий)	-80°C	$4 \cdot 10^{-4}$ / $5,3 \cdot 10^{-2}$	10^{-10} / 10^{-8}	10^{-14} / 10^{-12}	10^{-6}
Рідке повітря	-183°C	10^{-10} / 10^{-8}	10^{-27} / 10^{-25}		10^{-8}
Рідкий азот	-196°C	10^{-12} / 10^{-10}	10^{-28} / 10^{-26}	10^{-18} / 10^{-16}	10^{-8}

6.1.4 Адсорбційні уловлювачі. Незважаючи на те, що охолоджувані уловлювачі забезпечують досить надійний захист відкачуваного об'єму від потрапляння в нього в нього пари робочої рідини, їх головним недоліком є необхідність безперервної подачі охолоджувальної речовини.

Висока адсорбційна здатність деяких пористих речовин-адсорбентів (цеолітів, активованого окислу алюмінію, активованого вугілля, силікагелю, пористих металів) щодо пари масла дає можливість створювати ефективні уловлювачі. Адсорбенти перед використанням потребують очищення шляхом прогрівання до $600\text{--}700\text{ K}$ у вакуумі для видалення вологи та інших домішок, адсорбованих у порах при зберіганні адсорбенту в

атмосферних умовах. Процедура активування повинна повторюватися кожного разу після контакту уловлювача з повітрям. Активування (регенерація) необхідне і після тривалого періоду роботи під вакуумом для видалення адсорбованих парів робочих рідин, якщо уловлювач перебуває у стані адсорбційної рівноваги.

На рис.6.4 показано адсорбційні уловлювачі, які мають вигляд розширеної ділянки вакуумпроводу, яка заповнена адсорбентом. Такі уловлювачі доцільно розміщувати в частині вакуумної системи, яка прогрівається, щоб забезпечити їх автоматичну регенерацію. За допомогою цеолітових уловлювачів, виготовлених за схемою, зображеною на рис.6.4б, можна підтримувати вакуум $\sim 10^{-7}$ Па упродовж декількох десятків днів над вимкненим паромасляним насосом, обладнаним лише механічним відбивачем, охолоджуваним проточною водою.

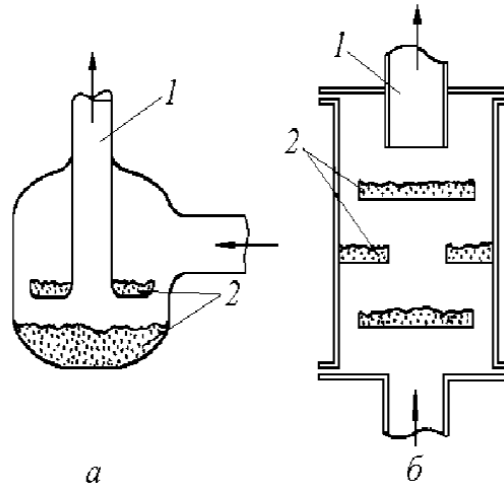


Рис.6.4. Неохолоджувані адсорбційні уловлювачі скляний (а) та металевий (б): 1 – вихідний патрубок; 2 – адсорбент.

Також застосовуються схеми вакуумних адсорбційних уловлювачів, обладнаних електричними нагрівачами для регенерації. Використання адсорбційних пасток у відкачувальних системах із паромасляними дифузійними насосами знижує зворотний потік робочої рідини у відкачуваний об'єм більше ніж у 100 разів. Недоліки: адсорбційні пастки зменшують швидкість відкачування на 30% та їх застосування потребує додаткового вакуумпроводу.

6.1.5. Гарячі (термічні) уловлювачі. Принцип дії термічних уловлювачів базується на розкладанні пари робочої рідини (масла) при її сильному нагріванні на гази (H_2 , CO , CO_2), які легко відкачуються, і вуглець. Отже, зворотний потік пари масла можна значно зменшити, якщо розмістити між дифузійним насосом та відкачуваним об'ємом оптично непрозорий масловідбивач 2, який нагрівається до високої температури (рис.6.5).

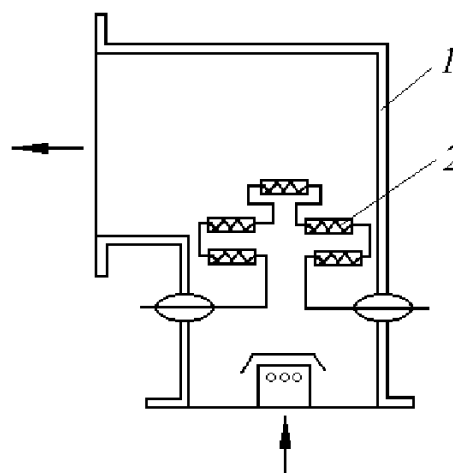


Рис.6.5. Нагрівний уловлювач.

Потрапляючи на масловідбивач 2, молекули масла розкладаються на вуглець та газоподібні компоненти. Перший осідає на стінках 1 уловлювача і служить поглиначем для молекул парів і газів, а газоподібні компоненти відкачуються дифузійним насосом.

Гарячі уловлювачі можна розміщувати з боку насосів попереднього розрідження для того, щоб запобігти потраплянню у високовакуумний насос пари легких фракцій оливо. Оптимальна робоча температура гарячого уловлювача залежить від сорту масла і не перевищує 773К.

6.1.6. Електричні (газорозрядні) уловлювачі. При відкачуванні механічними вакуумними насосами з масляним ущільненням поряд із адсорбційними уловлювачами застосовують електричні (іонні) уловлювачі. Робота їх базується на тому, що молекули пари робочої рідини, потрапляючи в розрядний проміжок, можуть збуджуватися, іонізуватися або дисоціювати при зіткненнях з електронами у вільному просторі. Крім того, молекули, адсорбовані на стінках уловлювача, можуть також дисоціювати на більш легкі складові та вуглець під впливом іонного бомбардування. Збуджені молекули органічних сполук мають підвищену активність до адсорбції та полімеризації й утворюють стійку плівку на стінках уловлювача, яка має гетерні властивості. Частина молекул пари, яка перейшла в іонізований стан, під дією електричного поля може прямувати в бік насоса або на стінку уловлювача, сприяючи полімеризації вуглецеводневих сполук. Газоподібні компоненти, які утворилися при дисоціації, відкачуються насосом, а вуглець осідає на стінках уловлювача.

У більшості електричних уловлювачів мають місце всі перелічені явища, але ймовірність їх перебігу залежить від обраного типу розряду та густини розрядного струму.

Мас-спектрометричні дослідження, проведені на вакуумній системі з електричним уловлювачем, показали, що парціальний тиск пари робочої рідини зменшується приблизно у 100 разів, тиск пари води – у 4 рази, а кисень зникає практично повністю.

Електричні уловлювачі з холодним катодом можна успішно використовувати і на лініях попереднього розрідження, адже інверсно-магнетронний розряд досить стійко горить до тисків ~ 1 Па.

6.2. Вакуумні з'єднання.

6.2.1. Конструкційні матеріали, що використовуються у вакуумній техніці. До матеріалів, що використовуються у ВТ, ставиться ряд вимог:

- вони повинні мати низький тиск парів при робочій температурі;
- мати малу газопроникність та газовіддачу;
- відсутність пор (найкращою вакуумною щільністю володіють метали, піддані вакуумному переплаву);
- повинні мати можливість швидкого знегажування;
- повинні бути корозієстійкими та немагнітними (ця вимога стосується металевих матеріалів).

Оскільки надвисоковакуумні установки потребують прогрівання до температури 573–673К упродовж декількох десятків годин, то не всі матеріали можуть використовуватися як конструктивні для надвисоковакуумної техніки.

Метали використовують у ВТ для виготовлення насосів, вентилів, камер, електродних систем та газопоглиначів. Чавун використовують для виготовлення корпусних деталей, що працюють у маслі в умовах низького та середнього вакууму. Сталі добре паяються та зварюються і можуть використовуватися для виготовлення деталей вакуумних систем, які не прогріваються, тобто в системах для отримання низького та середнього вакууму. Нержавіючі сталі 1Х21Н5Т та Х17Г9АН4 використовують для виготовлення сильно навантажених деталей у ВТ. Сталь 12Х18Н10Т є кислотостійкою, немагнітною, добре зварюється та паяється зі спеціальними флюсами; вона використовується у надвисоковакуумній техніці.

Алюміній марок АД1М, АМЦ використовують для виготовлення прокладок паропроводів масляних насосів, криогенних екранів. Алюміній добре зварюється гелієво-дуговим зварюванням, має малу газопроникність. У зв'язку з цим для виходу електронних та рентгенівських променів із вакуумних камер використовують алюмінієві вікна. Проте Al не стійкий проти дії ртуті, тому користуватися алюмінієвими вентилями і деталями можна лише на вакуумних установках із масляними насосами і ні в якому разі – з ртутними. У надвисоковакуумній техніці Al не використовують.

Нікель завдяки легкості обробки та низькому тиску пари є гарним матеріалом для внутрішніх деталей електровакуумних приладів.

Вольфрам з усіх металів має найбільшу температуру плавлення і найнижчий тиск насичених газів. Тому із вольфраму виготовляють електроди для великих потужностей, нагрівальні елементи для високотемпературних печей, катоди і нитки розжарення в електровакуумних приладах.

Мідь широко застосовується у вакуумній техніці для виготовлення прокладок, внутрішньої арматури і корпусів відпаяних приладів. Рекомендується застосовувати марки найбільш чистої міді МБ (безкисневої). Присутність кисню в міді особливо шкідливо для зварювання міді і пайки або відпалу в водні. Зварні шви виходять пористими.

Латуні Л62 (62% Cu і 38% Zn) і ЛС59-1 (59% Cu, 1% Pb, 40% Zn) застосовуються для виготовлення деталей, що не піддаються прогріванню.

Цинк не використовують у високовакуумній техніці, бо він добре сублимує.

Молибден за своїми властивостями аналогічний вольфраму, але менш крихкий і тому краще обробляється. Використовується для виготовлення сіток та анодів електровакуумних приладів.

З титану виготовляються катоди магніторазрядних насосів.

Скло має низький тиск насичених парів навіть при високих температурах, воно газонепроникне і досить добре обробляється. Усе це призвело до того, що скло є важливим матеріалом ВТ. Дуже поширене вольфрамове та молибденове скло через високу тугоплавкість. Використовують також скло, яке зварюється з металами, – це скло, до складу якого входить ковар. Для ковару і металів коефіцієнти лінійного розширення практично збігаються, що дуже важливо при їх з'єднанні.

Кераміки використовують як герметичні струмоводи, тобто як ізолятори. Поширені такі види вакуумно-щільної кераміки: стеатит, алундова кераміка, форстерит, циркон. Найбільш термостійкою є алундова кераміка (70-96% Al_2O_3) з температурою розм'якшення +1900° С. Вона добре паяється.

З пластмас у ВТ робляться багато деталей: ущільнювачі, мембрани, ізолятори, гнучкі трубопроводи тощо. Широко використовують фторопласт. Він досить еластичний і витримує температури до 523К. Однак для надвисоковакуумних установок він практично не використовується, оскільки при суттєвому нагріванні виділяється фтор, що є дуже активною речовиною.

Гуми використовують у вакуумних установках, крім надвисоковакуумної техніки, тому що вони не витримують нагрівань і вирізняється високим газовиділенням, особливо при T вище 323–473К.

6.2.2. Нерозбірні вакуумні з'єднання. Вакуумні системи невеликих розмірів, призначені для дослідних робіт, часто виготовляються повністю з тугоплавкого скла (С-47, С-87), що витримує інтенсивну термічну обробку. Усі з'єднання в них виконують шляхом паяння, здійснюваного нагріванням з'єднувальних елементів до температури розм'якшення скла. Для жорсткоспаєних скляних з'єднань елементи повинні бути виготовлені зі стекол, різниця коефіцієнтів теплового розширення яких не перевищує 5 %.

Високовакуумні установки великих розмірів внаслідок крихкості скла виготовляють тільки з металу. Особливо потрібно бути обережним, якщо у вакуумній системі є ртуть. У зв'язку з цим мідь, алюміній, золото, срібло і латунь застосовувати не

можна, оскільки на них хімічно діє ртутна пара. У багатьох випадках насоси і вакуумні системи (наприклад, для одержання високого вакууму) виготовляють повністю з нержавіючої сталі.

Жорсткі з'єднання металевих деталей виконують шляхом паяння або зварювання, при цьому перевагу віддають твердим припоєм порівняно з м'якими. Припої, що плавляться при температурі нижче 573К є м'якими, а припої з температурою плавлення вище 573К – твердими. Міцність паяння м'якими припоєми звичайно невисока, а робоча температура з'єднаних деталей повинна бути не вищою 393К. Для запобігання окиснюванню паяння з'єднувальних деталей проводять без флюсу у вакуумі або водневій пічці.

Для виготовлення нерозбірних металевих з'єднань, що використовуються у вакуумних системах великих розмірів, застосовуються різні види зварювання.

Для низьковакуумних систем, а також в ремонтних роботах, часто використовуються клейові з'єднання. Епоксидний клей застосовується для з'єднання сталі, скла і кераміки з робочою температурою не більше 140°C. Кремнійорганічні клеї можуть витримувати короткочасний нагрів до 300-350°C або тривалу роботу при 150-180°C.

6.2.3. Розбірні вакуумні з'єднання. Розбірними називаються вакуумні з'єднання, що дозволяють розділяти і знову з'єднувати окремі вузли й елементи вакуумних систем із дотриманням герметичності стику. Герметичність досягається заповненням зазору між матеріалами, що з'єднуються, замазкою чи використанням фланцевих з'єднань із герметичними прокладками (гума, фторопласт, м'які метали). Вимоги до розбірних вакуумних з'єднань: 1) мінімальне натікання і відсутність газовиділення, 2) достатня механічна міцність, 3) технологічність у виготовленні і зручність в експлуатації, 4) здатність витримувати багаторазові прогрівання без порушення герметичності, 5) можливість легкої перевірки на герметичність.

З'єднання на вакуумних замазках використовують для з'єднування скляних і металевих трубок та приєднання до вакуумної системи дифузійного насоса. Найбільш поширеною вакуумною замазкою є *піцеїн*. Він виготовляється з бджолиного воску й очищеного дьогтю і при кімнатній температурі має пружність пари $\sim 10^{-6}$ Па. Зі збільшенням температури вище 323К піцеїн розм'якає і плавиться, а пружність пари може зростати до 10^2 Па. Тому місця з'єднань на піцеїні не можна піддавати нагріванню.

Розбірні з'єднання з гумовими прокладками широко використовуються у вакуумних установках з температурою прогрівання не вище 453К і застосовуються в основному в системах середнього вакууму (10^{-4} Па). Гумові ущільнення прості у виготовленні, дають вакуумно-герметичні з'єднання з поверхнями, обробленими до 6-го класу шорсткості, допускають швидке й багаторазове складання і розбирання без заміни ущільнювальної прокладки. До недоліків гумових ущільнень відносять порівняно високі газопроникність і газовиділення. Термостійкість гуми мала, але найтермостійкіші сорти мають робочу температуру близько 300°C. Перевагою гуми є відмінні пружні властивості, завдяки яким вона є прекрасним матеріалом для вакуумних ущільнювачів. Вакуумні гуми поділяються на звичайні та термостійкі, на маслостійкі і немаслостійкі. Нестійка до олів *біла вакуумна гума* дуже еластична, з малою газопроникністю. Діапазон робочих температур - від + 90 до -10°C. Маслостійка *чорна гума* має гіршу еластичність і більше газовиділення, але меншу газопроникність.

На рис.6.6 показані приклади найбільш часто застосовуваних видів фланцевих з'єднань із гумовими прокладками. Найпростішим є ущільнення між двома плоскими фланцями (рис.6.6а), але воно не забезпечує точної фіксації деталей. Крім того, у цьому з'єднанні не обмежується максимальне зусилля на прокладку, що часто призводить до її перевантаження і пластичної деформації. Ущільнення, показані на рис.6.6 б – д, обмежують максимальне зусилля стиску, що спричиняє деформацію гумової прокладки на 30–40% від її первісної товщини, і забезпечують фіксацію ущільнювачів. Оскільки гума

практично не стискається, то в ущільненнях, передбачене місце для розтікання гуми при деформації.

Крім гуми, як ущільнювачі, набувають застосування полімерні матеріали: *фторопласт-4*, *поліетилен* та інші. Вони мають найменше газовиділення у вакуумі. Однак, поліетилен через недостатню термостійкість може застосовуватися в тих випадках, коли тепловий режим вакуумної апаратури не перевищує 313–323К. Найменше газовиділення (на порядок нижче, ніж у кращих сортів вакуумної гуми) з усіх полімерних матеріалів має фторопласт-4. До того ж він характеризується великим діапазоном робочих температур (78 - 523К) і високою хімічною стійкістю, вищою, ніж у Au і Pt.

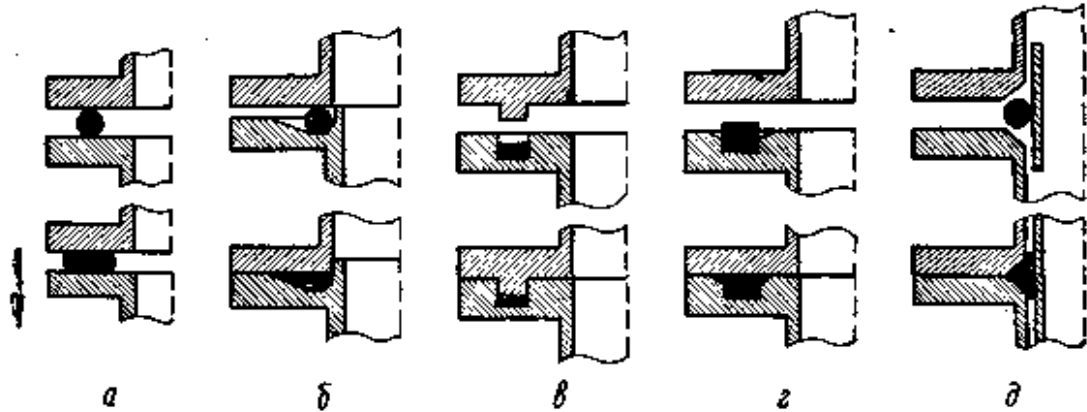


Рис.6.6. Фланцеві з'єднання з гумовими прокладками.

Розбірні з'єднання з металевими ущільнювачами застосовують в основному в системах із тиском нижче $7 \cdot 10^{-5}$ Па і які допускають тривале і багаторазове прогрівання до температури 723–823К у процесі знегажування. Герметизація з'єднаних поверхонь досягається шляхом заповнення мікронерівностей за рахунок пластичної деформації матеріалу прокладки. Для металевих ущільнювачів найбільш часто використовують мідь, золото, алюміній, свинець, індій. Газовиділення металевих прокладок у 10^3 разів менше, ніж у кращих сортів вакуумної гуми, і вони практично виключають проникнення газу через матеріал ущільнювача. Однак ущільнення з металевими прокладками технологічно більш складні у виготовленні, допускають обмежену кількість зборок і добре працюють лише при близьких коефіцієнтах лінійного розширення елементів з'єднання. Схеми найбільш поширених з'єднань із металевими ущільнювачами показані на рис.6.7.

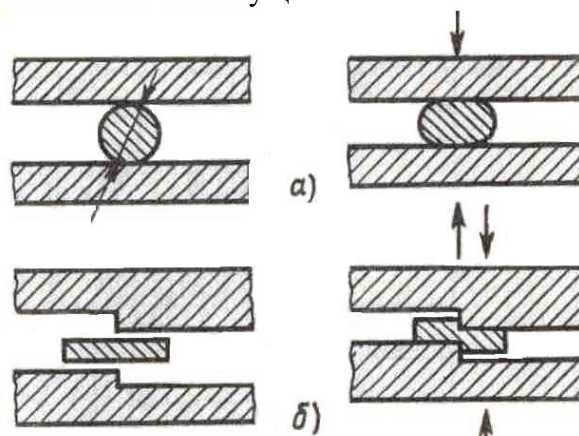


Рис.6.7. Схеми ущільнень з металевими прокладками:
а - дротова прокладка; б - плоска прокладка, що працює на зріз.

У ВТ застосовують також гнучкі з'єднання (трубки, трубопроводи). Гнучкі з'єднання із синтетичних матеріалів (полівінілхлорид, фторопласт, вітон та інші) мають порівняно з гумовими набагато менше газовиділення, і їх можна застосовувати у

високовакуумній частині установки для отримання вакууму не нижче 10^{-4} Па. Дуже поширеними є металеві з'єднання. Гнучкі з'єднання, що прогриваються, виготовляють із металу у вигляді шлангів та еластичних сільфонів (рис. 6.8).

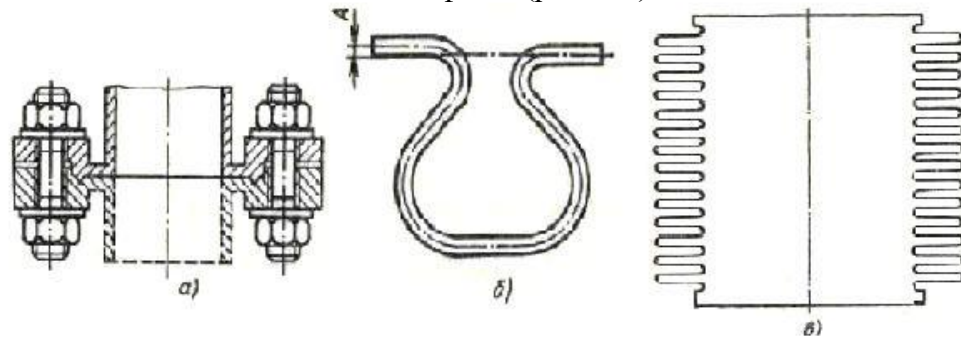


Рис.6.8. Конструктивні форми трубопроводів:
а-жорсткий трубопровід; б-вигнутий трубопровід; в-сильфон.

Сильфони – тонкі металеві гофровані трубки з товщиною стінки 0,2 мм, виконані із сплаву міді з цинком, берилієвої бронзи і нержавіючих сталей. Вони краще працюють на стиск, ніж на розтяг, тому застосовуються переважно для виготовлення перехідних гнучких ланок вакуумних систем, а також для передачі руху у вакуум. Для здійснення великих вигинів вакуумпроводів вони непридатні. У цьому разі застосовують гофровані металеві шланги.

6.2.4. Передача руху у вакуум. У вакуумній техніці й технологіях часто виникає необхідність у передачі руху у відкачуваній об'єм. Це зумовлено розміщенням механічного приводу зовні вакуумної камери. Пристрої для передачі руху поділяють на види:

- для передачі зворотно-поступального руху;
- для передачі обертального руху;
- для передачі коливального руху.

Для передачі зворотно-поступального руху використовують сальникові, мембранні або сільфонні вводи. Для передачі обертального руху використовують магнітні, сальникові або складні комбінації вводів. Коливальний рух до систем уводять за рахунок застосування мембранних або сільфонних вводів. Для вводів низького та середнього вакууму застосовують гумові або фторопластові ущільнення. Гумові ущільнювачі для сталевих конструкцій завжди змащують (наприклад, дисульфідом молібдену MoS_2 , порошковим графітом). З кращого боку зарекомендували себе рухомі з'єднання, в яких за ущільнювач використовують фторопласт-4. Високовакуумні та надвисоковакуумні вводи роблять металевими через необхідність нагрівання для знегажування. Гнучкі елементи конструкцій вводів забезпечують герметичність упродовж сотень тисяч коливань.

6.2.5. Запірно-регулююча апаратура. Запірно-регулююча апаратура являє собою комплекс функціональних засобів вакуумних систем, призначених для перекриття газових потоків, дозування потоків газу, стабілізації тиску газів у вакуумних системах і камерах, аварійного захисту вакуумних систем при розгерметизації тощо. Для перекриття вакуумних потоків використовують вакуумні клапани і затвори, класифіковані за низкою ознак конструктивного і експлуатаційного характеру: за призначенням, формою, типом приводу, робочим тиском, способом герметизації тощо.

В якості натікачів можуть застосовуватися пористі матеріали, деякі метали, проникні для окремих газів, наприклад платина для водню, срібло для кисню. Мікрометричне переміщення голки в отворі, зміна зазору між матеріалами з різними коефіцієнтами лінійного розширення можуть бути застосовані для створення і регулювання великих вакуумних опорів. Вакуумні крани застосовуються в установках з малим газовідділенням, в лініях попереднього розрідження і у випадках, коли не потрібно

отримання великої провідності. У металевих клапанах і затворах, що працюють при кімнатній температурі, використовуються гумові та фторопластові ущільнювачі.

Основні експлуатаційні характеристики затворів:

- ступінь герметичності, яка обумовлена потоком натікання газу через ущільнювальну пару, складає 10^{-7} - 10^{-11} Па м³/с;
- провідність у відкритому положенні, яка визначається відношенням потоку газу, що проходить через порожнину вакуумного клапана, до різниці тисків у його вхідному і вихідному отворах;
- швидкодія, яка визначається часом герметичного перекриття;
- ресурс, який визначається числом циклів перекриття ущільнювальної пари із забезпеченням заданого ступеня герметичності.

6.3. Течі і методи їх пошуку.

Ідеальна герметична вакуумна система повинна зберігати розрідження, створене системою відкачки, після виключення насоса протягом нескінченного часу. Однак без активного відкачування тиск в будь-якій реальній системі зростатиме з часом. Основними причинами є "відгазовка" (десорбція різних молекул зі стінок вакуумної системи, наприклад молекул води) і *течі* (проникнення сторонніх молекул ззовні системи).

Течі - негерметичність, здатність перепони (яка обмежує замкнутий об'єм) пропускати назовні (у разі підвищеного тиску усередині порожнини) або всередину (в разі зниженого тиску або вакууму) небажані газоподібні речовини. Прилади, які дозволяють визначити місце течі, - *течешукачі*. Течешукачі реагують на фізико-хімічні властивості газів, які називаються *пробними*.

Слід визнати аксіомою, що абсолютна герметичність в принципі неможлива. Через це всі течі в першу чергу класифікують за ступенем впливу на технологічний процес, що проводиться на обладнанні:

- течі, які не детектуються існуючим обладнанням;
- течі некритичні для технологічного процесу - найчастіше ці ж течі не детектуються, оскільки економічно недоцільно використовувати значно дорожчі і чутливі прилади для пошуку в некритичних діапазонах;
- течі помірно критичні для технологічного процесу; це течі, які при використанні певних технологічних прийомів можуть бути усунені або їх вплив може бути зведене до некритичного;
- критичні течі, що роблять неможливим завершення технологічного процесу без отримання браку або розвитку аварійної ситуації;

Усі виявлені при тестуванні течі обов'язково треба усунути, оскільки поступове збільшення виявлених натікань або кумулятивна дія кількох старих і нових течій можуть легко перевищити критичний поріг.

При виготовленні вакуумних систем через пори або тріщини в матеріалах можлива поява течі.

Класифікація течій на вакуумних установках:

- течі по фланцевим ущільненням: легко детектуються і локалізуються, оскільки доступ до них відкритий, відгук приладу на тестовий газ швидкий, релаксація також настає швидко;
- течі по манжетним ущільненням: тяжко детектуються, але досить добре локалізуються;
- течі по зварних швах: відносно легко детектуються, проте дуже погано локалізуються через протяжності дефектних ділянок;
- порожнинні течі, що знаходяться в закритому корпусі: виявити можна тільки після того, як корпус досить наповниться тестовим газом або він розподілиться по корпусу, течі погано детектуються і локалізуються;
- течі по трубопроводах: відносно добре детектуються, але погано локалізуються через сильне запізнювання відгуку, особливо на трубопроводах малого діаметру;

-течі у вакуумних насосах: дуже добре детектуються і локалізуються, за умови, що система вакуумних насосів течешукача забезпечує більш глибокий вакуум ніж тестовані насоси; при наявності відкритого вихлопу тестованих насосів завжди з'являється сигнал про течі через зворотний потік газу.

-блукуючі течі: найбільш складні для детектування та локалізації; виникають через перенесення тестового газу повітряними потоками різного походження; можлива поява блукуючого сигналу через попадання тестового газу на вихлоп форвакуумного насоса самого течешукача .

Допустима сумарна величина натікання $Q_{нат}$.

1. При безперервній відкачці системи зі швидкістю S_0 потрібно її відкачати до тиску P_1 , тоді $Q_{нат} \leq S_0 P_1$, звідси $Q_{нат} < \frac{S_n U}{S_n + U} P_1$, тобто навіть при наявності течі, при

правильному підборі S_n , U , можна досягти робочого тиску.

2. Ізольована система об'ємом V , що знаходиться під вакуумом або під надлишковим тиском. Зміна тиску за рахунок негерметичності не повинно перевищувати Δp за Δt , тобто $Q_{нат} \leq V \Delta p / \Delta t$. Натікання, як характеристика герметичності вакуумної системи, визначається як добуток об'єму (V), який займає газ, на $\Delta p / \Delta t$.

Через малі розміри дефектів, що викликають течі, виявити візуально їх практично неможливо. Для визначення місця течії розроблені наступні методи їх пошуку: а) пробного газу; б) високочастотного розряду; в) люмінесцентний; г) радіоізотопний; д) бульбашковий.

Метод пробного газу отримав найбільш широке поширення через високу точність. Його схема приведена на рис.6.9.

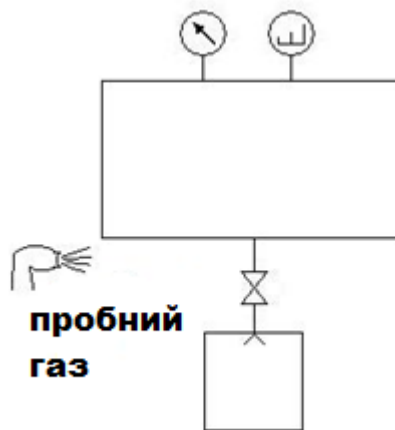


Рис.6.9. Метод пробного газу.

Після отримання вакууму у випробуваному об'єкті місце, яке перевіряється на наявність течі, обдувається пробним газом, який через дефект-отвір починає надходити в об'єкт і реєструється мас-спектрометром. Для запобігання підвищення тиску об'єкт повинен перебувати під безперервною відкачкою. Основним пробним газом є гелій. Це пов'язано з тим, що гелію в атмосфері мало ($5 \cdot 10^{-4}\%$) і він відсутній в продуктах газовиділення вакуумних систем. Тому фонові ефекти при роботі з ним позначаються значно менше, ніж у випадку застосування інших речовин. Мала молекулярна маса гелію і щодо велика її відмінність від ефективної маси іонів, що утворюють сусідні піки в мас-спектрі (водень H_2 і вуглець C^{++}), дозволяють знизити вимоги до роздільної здатності аналізатора і застосовувати досить простий магнітний аналізатор з високою чутливістю ($7,5 \cdot 10^{-6}$ А/Па), що відповідає можливості реєстрації парціального тиску гелію $P_{min} = 10^{-10}$ Па. Крім того, гелій має майже в три рази більшу проникаючу здатність, ніж повітря; отже, потрібно менш чутливий прилад для визначення течі однакових розмірів. Найбільш поширеним є гелієві течешукачі СТИ-11, ПТИ-6,7,10 та інші. На рис.6.10а показано основний і винесений пульти управління ПТИ-7А. Сучасні автоматизовані гелієві

течешукачі мають ряд переваг в порівнянні з ними, такі як час включення, час виключення, габарити, простота роботи. Мінімальний потік, який реєструється може досягати $3 \cdot 10^{-13}$ Па м³/с. Мас-спектрометричні гелієві течешукачі дозволяють здійснювати пошук витоків різними способами (щупа, вакуумної камери, обдування і ін.). Зразком таких приладів є високоякісні течешукачі серії MS американської компанії VIC (рис.6.10б).

При використанні методу пробного газу слід враховувати інерційність випробувань. Для уточнення місця течі поверхню покривають вакуумною замазкою, яка в момент припинення проникнення пробного газу фіксує місце течі. Так можна визначити координати місця течі з точністю до декількох мм. Замість пробних газів іноді використовують рідини - спирт, ефір, бензин, ацетон. При цьому час проникнення рідини може досягати декількох годин. Тому рідини використовують для індикації грубих течій при високому тиску.



Рис.6.10. Течешукачі.

Розроблено та освоєно у виробництві малогабаритні гелієві мас-спектрометричні течешукачі ТИ1-14 і ТИ1-15, високочутливий стенд СВТ-2, вдосконалені галогенні БГТИ-7 і ТИ-2-8, принципово нові електронно-захоплюючі 13ТЕ-9-001 і ТИЕ-2, що використовують в якості пробного газу *елегаз* (гексафторид сірки – надзвичайно інертний газ).

Окрім мас-спектрометричних приладів за методикою пробного газу використовуються й теплові течешукачі. Теплові течешукачі являють собою прилад, який працює на відмінності теплопровідності між газами. Сенсор такого течешукача складається з двох мікропорожнин, через які вентилятор простягає повітря. В одну порожнину газ надходить з пробовідбірника, в іншу з торця. У порожнинах знаходяться ідентичні нитки розжарення, включені в електричний місток. Таким чином, при появі в пробовідбірнику газу з теплопровідністю, відмінною від теплопровідності повітря, нитка в одній з порожнин змінює свою температуру, отже, й опір. У схемі з'являється різниця потенціалів, яку течешукач автоматично інтерпретує і переводить в стандартні одиниці виміру потоку. Завдяки тому, що теплові течешукачі можуть працювати з газами, як з більшою теплопровідністю, так і з меншою, кількість можливих тестових газів дуже велика. Чутливість теплових течешукачів залежить від тестового газу. Чим більша різниця теплопровідностей у пробного газу і повітря, тим вище чутливість.

Сучасні теплові (катарометричні) портативні течешукачі GasCheck англійської компанії Ion Science об'єднують в собі можливість визначення течі різних газів з чутливістю до 10^{-5} см³/с по гелію і невеликі габарити, що дозволяють розмістити такий портативний прилад в одній руці (рис.6.10 в).

Метод високочастотного розряду полягає в тому, що при наближенні електрода високочастотного трансформатора до місця течі утворюється спрямований розряд. Поява розряду пов'язана з пониженням тиску повітря в місці течі і поліпшенням умов

електричного пробою газового проміжку. Цей метод зручний для визначення течі в скляних вакуумних системах.

Люмінесцентний метод використовує проникнення розчину люмінофора в капілярні течі. Тестуємий об'єкт тривалий час витримується в розчині люмінофора. Після видалення люмінофора з поверхні об'єкта заповнені капіляри виявляються у вигляді крапок або смуг при опроміненні ртутно-кварцовими лампами. Люмінофор дає жовте або червоне свічення.

Радіоізотопний метод виявлення течі полягає в тому, що випробовувані об'єкти протягом деякого часу витримуються в атмосфері радіоактивного газу. Після видалення радіоактивного газу і ретельного очищення поверхні від радіоактивних забруднень залишаються такими, що випромінюють тільки негерметичні прилади. Метод застосовується при автоматичній перевірці на герметичність малогабаритних напівпровідникових приладів.

Бульбашковий метод найбільш простий. У випробуваному об'єкті створюється надлишковий тиск газу, і об'єкт занурюється в рідину. Діаметр бульбашки в місці його утворення дорівнює діаметру капіляра. Воду без утворення бульбашок можна нагріти до 80°C, масло до 200°C.

6.4. Особливості фізики надвисокого вакууму.

Надвисоким вакуумом називають газ, тиск якого нижчий за 10^{-6} Па (10^{-8} Торр). Надвисокий вакуум створюють у камерах для імітації космічного простору, в низці експериментальних установках, у деяких приладах. Він також необхідний для дослідження фізичних властивостей дуже чистої поверхні твердого тіла і підтримки її в такому стані впродовж достатньо тривалого часу. У зв'язку з цим іноді надвисокий вакуум визначають як стан розрідженого газу, при якому чиста поверхня тіла покривається мономолекулярним шаром адсорбованого газу за час 100 секунд.

6.4.1 Отримання надвисокого вакууму. При дуже низькому тиску переважна частина газу перебуває в адсорбованому стані на поверхні вакуумної апаратури, а також у розчиненому стані всередині її матеріалу, і лише незначна частина – у відкачуваному об'ємі. Досяжний ступінь вакууму визначається рівновагою між швидкістю відкачування газу та швидкістю його надходження у відкачуваній об'ємі за рахунок десорбції газу із стінок і натікання ззовні через мікроскопічні отвори. Для отримання надвисокого вакууму натікання ззовні зводять до мінімуму, а апаратуру разом із корпусом вакуумної камери знегажують, прогріваючи у вакуумі при температурі 573–773К. Тому зазвичай корпус вакуумної камери виготовляють із щільних, зварних корозієстійких матеріалів, що мають низький тиск пари матеріалу і легко знегажуються при прогріванні (нержавіюча сталь, скло, кварц, вакуумна кераміка). Особлива проблема, що для виготовлення надвисоковакуумних пристроїв придатні лише речовини з дуже низьким тиском пари в умовах робочих температур, тобто ті, які випаровуються надзвичайно повільно, не встигаючи забруднити вакуумну камеру. Таких матеріалів зовсім небагато: алюміній, мідь, тантал, титан, вольфрам, молібден, залізо, платина, срібло та ще декілька металів, спеціальні вакуумні кераміки і кварцове скло. Причому матеріали повинні бути дуже чистими (наприклад, вміст домішок у міді – не більше 0,001 %). Проте навіть при дотриманні таких умов *утримати вакуум вище 10^{-6} Па можна лише одним способом – за рахунок безупинної роботи насосів.*

У надвисокому вакуумі так мало молекул, що будь-яка поверхня довго залишається бездоганно чистою. Як зазначалось вище, для визначення якості вакууму навіть уводять особливий параметр – час, упродовж якого поверхня покривається шаром завтовшки однієї молекули. Для вакууму 10^{-6} Па це всього пара хвилин, а для 10^{-8} Па – вже декілька годин. За цей час цілком можна встигнути нанести матеріал на підкладку практично в ідеальних умовах і відповідно з ідеальною якістю. Сьогодні інтегральні схеми, багато напівпровідникових пристроїв, наноструктури виготовляють методом молекулярно-променевої епітаксії: в умовах надвисокого вакууму потрібну структуру «викладають»

буквально шар за шаром у відповідній послідовності, отримуючи елемент мінімальних розмірів із потрібними властивостями. І це вже не наукові експерименти, а промислове виробництво швидкодіючих інтегральних схем, елементів мобільних телефонів, фотоприймачів і лазерних діодів, якими ми користуємося, не замислюючись про їх «вакуумне» походження.

Нещодавно в Європейському центрі ядерних досліджень змогли отримати перші атоми антиводню – першу штучну антиречовину. Потрібно було уберегти ці унікальні екземпляри від миттєвої анігіляції зі звичайною речовиною, щоб вони проіснували хоч деякий час. Для цього в спеціальній криогенній пастці був створений вакуум на рівні 10^{-15} Па, коли в кожному літрі залишається всього декілька десятків частинок. Лише у таких умовах вдалося на деякий час утримати і приблизно порахувати отримані антиатоми.

6.4.2. Вимірювання надвисокого вакууму. Вимірювання надвисокого вакууму здійснюється електронними іонізаційними і магнітними електророзрядними вакуумметрами (див.р.5). Нижня межа тиску у перших визначається фотоелектронним струмом з іонного колектора під дією рентгенівського випромінювання з анода (що виникає при його електронному бомбардуванні). Існують іонізаційні вакуумметри спеціальної конструкції, в яких фоновий струм знижений. Найбільшого поширення набув манометр Байярда – Альперта (п.5.6) Модулюючи іонний струм у манометрі Байярда – Альперта за допомогою спеціального електрода, вдається вимірювати тиск до 10^{-10} Па. Пригнічення фонового струму електричним полем додаткового електрода (супресора) дозволяє вимірювати ще нижчий тиск (особливо у поєднанні з методом модуляції). Створені конструкції, в яких колектор екранований від потрапляння на нього рентгенівського випромінювання з анода. У манометрі Редхеда іони з області іонізації витягуються через отвір в екрані і за допомогою півсферичного рефлектора фокусуються на тонкий дротяний колектор. У манометрі Хельмера іонний потік, що виходить з отвору в екрані, відхиляється за допомогою 90° кутового електростатичного дефлектора. У манометрі Грошковського тонкий дротяний колектор розміщений напроти отвору в торці анодної сітки і захищений від рентгенівського випромінювання скляною трубкою. Зазначені прилади вимірюють тиск до 10^{-11} Па.

Значне зменшення нижньої межі тиску може бути досягнуте за рахунок збільшення довжини пробігу електронів. У орбітронному манометрі це досягається за допомогою електричного поля, а в іонізаційному магнетронному манометрі (манометр Лафферті) – за допомогою магнітного поля. Такими приладами можна вимірювати тиск до 10^{-10} – 10^{-11} Па. Для вимірювання парціального тиску газів в умовах надвисокого вакууму застосовують мас-спектрометри, наприклад, омегатроном вдається вимірювати тиск до 10^{-8} Па, а статичним, квадрупольним та іншими мас-спектрометрами – до 10^{-11} – 10^{-12} Па.

6.5. Умовні графічні позначення елементів вакуумних систем.

Широка потреба використання вакууму стала причиною розробки й створення вакуумних установок як для наукових досліджень, так і для застосування у промисловості. Вакуумна установка складається з вакуумної системи і ряду допоміжних пристроїв, що забезпечують як її роботу, так і специфічні функції, заради яких розроблялася та чи інша установка. Отже, поняття «вакуумна установка» є більш широким, ніж «вакуумна система». Реальна вакуумна система складається з:

- сукупності пристроїв для створення вакууму (вакуумних насосів);
- відкачуваних обсягів (вакуумної камери), в яких створюється вакуум;
- вакуумних трубопроводів, забезпечених арматурою (затвори, вентилі, клапани), що дозволяє з'єднувати і роз'єднувати елементи вакуумної системи, а також регулювати потік газу в них;
- вимірювальних приладів;
- систем керування, що дозволяють забезпечувати задану логіку роботи.

На рис.6.11 приведена схема системи відкачки доплерівського томографу, сконструйованого і виготовленого в Проблемній НДЛ кафедри квантової електроніки

УжНУ. Попередня відкачка робочої камери 1 здійснюється цеолітовими насосами 10 (або пластинчато-роторним форвакуумним насосом 13) при відкритому вентилі 14. Розрідження в лінії форвакуумної відкачки контролюється вакуумметром 8, підключеним до термопарного датчика 9. Основним робочим насосом приладу є магніторозрядний насос 6 типу НМД-0,4-1, приєднаний безпосередньо до камери. При відсутності натікання й непрацюючому джерелі іонів цей насос після прогрівання камері забезпечує розрідження $5 \cdot 10^{-10}$ Торр ($6.7 \cdot 10^{-8}$ Па). Вентилі ДУ-25 (14) і ДУ-50 при цьому повинні бути закриті. У робочих умовах, внаслідок неминучого газовиділення з нагрітих деталей іонного джерела й інших вузлів установки, розрідження в камері складає 10^{-8} - $5 \cdot 10^{-9}$ Торр, що цілком припустимо для задач експерименту. При використанні іонного джерела із значним газовиділенням магніторозрядний насос 6 може бути використаний у парі з турбомолекулярним насосом 11 (типу ВМН-500). Цей насос також застосовується для відкачки камери 1 і корпуса насоса 6 у режимі їх термічного знегажування. Для нормальної експлуатації турбомолекулярного насоса його вихідний патрубок приєднаний до системи форвакуумної відкачки, котра забезпечує розрідження не гірше 10^{-2} Торр. Тиск на вході ВМН-500 контролюється термопарним датчиком 9. Якщо камеру 1, корпус насоса 6 і вентиль ДУ-50 прогріти до температури $250 - 300^{\circ}\text{C}$ протягом 20-24 годин, то розрідження досягає $5 \cdot 10^{-9}$ Торр ($6.7 \cdot 10^{-7}$ Па).

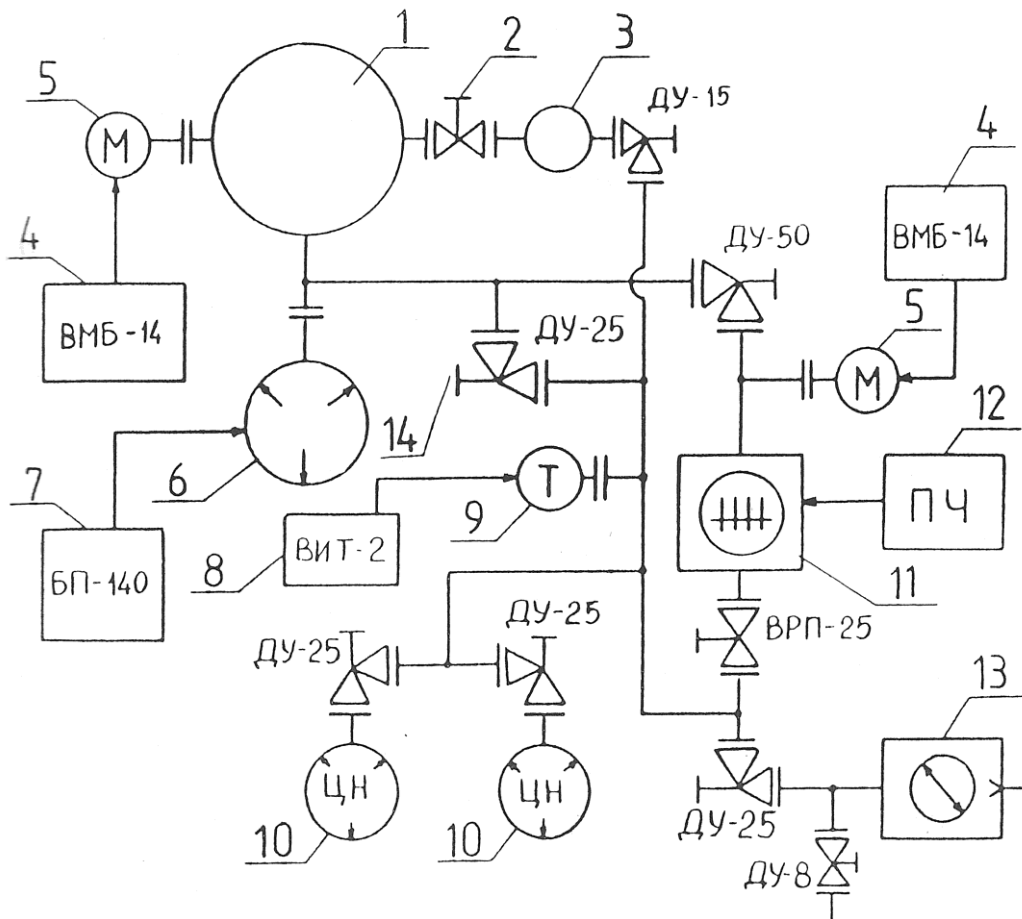


Рис. 6.11. Схема системи відкачки: 1 - робоча камера; 2 - прохідний надвисоковакуумний клапан; 3 - шлюзова камера; 4 - магнітний вакуумметр; 5 - манометричний датчик ПММ-32-1; 6 - магніторозрядний насос НМД-0,4-1; 7 - блок живлення НМД-0,4-1; 8 - іонізаційно-термопарний вакуумметр; 9 - манометрична лампа ПМТ-4; 10 - цеолітовий насос; 11 - турбомолекулярний насос ВМН-500; 12 - блок живлення турбомолекулярного насоса; 13 - форвакуумний насос 2НВР-5Д; 14 - надвисоковакуумний вентиль ДУ-25, що з'єднує форвакуумну лінію з робочою камерою.

Запуск турбомолекулярного насоса 11 проводиться після досягнення в камері 1 і форвакуумної лінії розрідження не гірше $5 \cdot 10^{-3}$ Торр. До закінчення пускового режиму закривається вентиль 14 і відкривається кран ДУ-50. Після досягнення в камері 1 тиску 10^{-4} Торр вмикається магніторозрядний насос 6. Через 1-1.5 години після початку відкачки в робочій камері створюється розрідження не гірше 10^{-7} Торр. Для подальшого поліпшення вакууму (до значень близьких до 10^{-9} Торр) необхідно прогрівати стінки вакуумної камери. Контроль розрідження на вхідному патрубку турбомолекулярного насоса й у робочій камері здійснюється за допомогою вакуумметрів 4 типу ВМБ-14 з магнітними датчиками 5 типу ПММ-32-1. Прогрів камери, вакуумних переходників, вентилів і корпуса магніторозрядного насоса до температури 250°C здійснюється зовнішніми нагрівачами.

Основна частина будь-якої вакуумної системи - вакуумна камера, призначена для створення певних умов при проведенні досліджень або інших процесів у вакуумі, а також ізоляції технологічних процесів або пристроїв від контакту з навколишнім середовищем. Призначення вакуумної камери і особливості створюваних в камері умов (тиску залишкових газів P і парціальних тисків P_i) визначається характеристиками об'єкта, який знаходиться у вакуумі, його розмірами, особливостями технологічного процесу або експерименту.

Однією з важливих характеристик вакуумної системи є величина сумарного газового потоку Q , що надходить у вакуумну камеру під час роботи вакуумної установки. За величиною сумарного газового потоку Q_{Σ} розраховують швидкість відкачування S_0 і вибирають вакуумні насоси. Сумарний потік газів, що надходять в робочий об'єм, визначається так:

$$Q_{\Sigma} = Q_{пр} + Q_{нат} + Q_{диф} + Q_{пов} = PS_0,$$

де $Q_{пр}$ - потік, обумовлений проникністю стінок вакуумної камери, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

$Q_{нат}$ - потік газів, який натікає з атмосфери через течі і з'єднання, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

$Q_{диф}$ - потік газів, обумовлений дифузійним газовиділенням з глибини конструкційних матеріалів і оброблюваних виробів, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

$Q_{пов}$ - потік газу з поверхні робочої камери і елементів в ній, $\text{м}^3\text{Па/с}$;

P - тиск у робочій камері, Па;

S_0 - ефективна швидкість відкачування камери при тиску P , $\text{м}^3/\text{с}$.

Для оцінки газового потоку Q_{Σ} необхідно знати конструкцію і об'єм вакуумної камери, площу її поверхні, матеріали камери і експериментальних об'єктів або тип технологічного процесу і температуру.

Елементи та пристрої на принциповій вакуумній схемі зображують за допомогою умовних графічних позначень. При проектуванні і зображенні схем слід дотримуватись правил, викладених у відповідних стандартах єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД). ЄСКД — комплекс державних стандартів, що встановлюють взаємопов'язані правила, вимоги і норми по розробці, оформленню і обігу конструкторської документації, що розробляється і застосовується на усіх стадіях життєвого циклу виробу (при проектуванні, розробці, виготовленні, контролі, прийманні, експлуатації, ремонті, утилізації).

Вакуумні зв'язки зображують за допомогою ліній зв'язку. Вакуумпровід на схемі показують суцільними лініями незалежно від функцій, які вони виконують в установці. Кожен елемент, що входить у вакуумну систему, повинен мати позиційне позначення, що складається з літерного позначення (коду), що вказує вид елемента, і порядкового номера (номера елемента), що проставляється після літерного коду. Літерний код елемента містить одну або декілька прописних літер латинського алфавіту. Літерні коди найбільш поширених видів елементів наведені в таблиці 6.2.

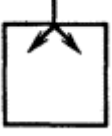
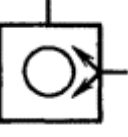
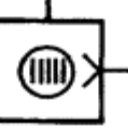
Табл.6.2

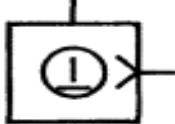
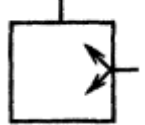
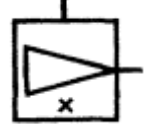
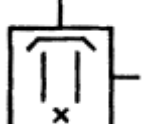
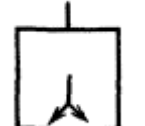
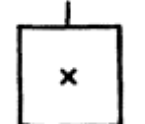
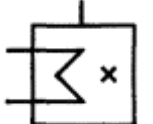
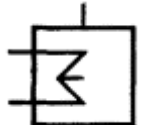
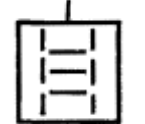
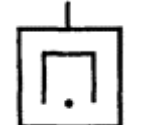
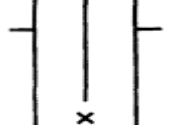
Пристрій	Позначення	Пристрій	Позначення
----------	------------	----------	------------



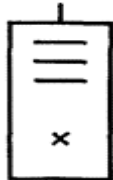






Насос вакуумний: механічний	NI	Уловлювач: Охолоджуваний рідиною	BW
Дваторний (насос Рутса)	NZ	Охолоджуваний повітрям	BA
Обертальний об'ємний без газобаласту	NV	Охолоджуваний рідиною	BL
Обертальний об'ємний газобаластн.	NL	Сорбційний	BS
Водокільцевий	NW	Іонний	BE
Турбо-молекулярний	NR	Вакуумметр: деформац.	PD
Струминний	NB	Рідинний	PL
Ежекторний	NH	Магнітний електророзр.	PM
Комбінован.	NP	Тепловий	PT
Дифузійний	ND	Іонізаційний	PA
Сорбційний	NS	Термоелектр	BT
Адсорбційний	NA	Камера вакуумна	CV
Випарний гетерний	NG	Ковпак вакуумний	CN
Кріосорбційний	NC	Вентиль, клапан, затвор: тарілчастий	VT
Випарний іонний	NE	З електропр.	VM
Кріогенний	NK	З пневмо- або гідропривод.	VP

Перша буква коду елемента – це загальний літерний код (він обов'язковий.) Він несе інформацію про групи елементів, до яких належить даний елемент (наприклад, клапан тарілчастий VT відноситься до виду клапанів V). Порядкові номери елементів вакуумних схем присвоюються відповідно до послідовності розташування елементів на схемі зверху вниз і в напрямку зліва направо. Позиційні позначення проставляються на схемі поряд з умовними графічними позначеннями елементів з правого боку або над ними. Деякі умовні графічні позначення елементів і пристроїв вакуумної системи приведено в табл.6.3.

Табл.6.3

Насос вакуумний. Загальне позначення	
Насос вакуумний механічний	
Турбомолекулярний	

Двороторний (насос Рутса)	
Насоси вакуумні струминні. Загальне позначення	
Ежекторний Замість знаку «X» вказують хімічну формулу робочої рідини (вода, масло, ртуть)	
Дифузійний Замість знаку «X» вказують хімічну формулу робочої рідини (масло, ртуть)	
Насоси вакуумні сорбційні. Загальне позначення	
Сублимаційний (випарно-гетерний)	
Кріосорбційний Замість знаку «X» вказують хімічну формулу сорбента	
Кріогенний	
Випарний іонний	
Магнітний електророзрядний	
Пастка (уловлювач). Загальне позначення Замість знаку «X» вказують тип хладагенту (температура)	

<p>Пастка термоелектрична</p> <p>Замість знаку «X» вказують температуру поверхні</p>	
<p>Пастка адсорбційна</p>	
<p>Пастка іонна</p> <p>Замість знаку «X» вказують температуру поверхні</p>	
<p>Вакуумметри (манометри)</p>	
<p>Вакуумметр. Загальне позначення</p>	
<p>Вакуумметр парціального тиску</p>	
<p>Вакуумметр іонізаційний з гарячим катодом</p>	
<p>Вакуумметр магнітний електророзрядний з холодним катодом (вакуумметр Пеннінга)</p>	
<p>Вакуумметр термоелектричний (термопарний, опору)</p>	
<p>Вакуумметр U-подібний</p>	
<p>Вакуумметр компресійний (Мак-Леода)</p>	

Вакуумметр мембранний (деформаційний)	
Течешукач. Загальне позначення	
Мас-спектрометр	
Вакуумпровід	
Вакуумпровід з вказівкою напрямку потоку газу	
Вакуумпровід гнучкий, шланг	
Вакуумне з'єднання. Загальне позначення	
фланцеве	
штуцерне	
швидкороз'ємне	
Клапан:	
прохідний	
кутовий	
Засувка	
Кран прохідний	
Електропривід	
Електромагнітний привід	
Камера вакуумна	

Л.9. Фізичні основи спектроскопії

Вступ. Шкала електромагнітних хвиль. Оптичний діапазон. Типи оптичних інструментів. Людське око - найбільш універсальний оптичний прилад. Світлотехнічні характеристики оптичного випромінювання. Роль спектральної апаратури для вирішення окремих проблем науки та техніки. Границі та особливості ВУФ. Спектр. Види спектрального аналізу. Джерела випромінювання. Явища, що використовуються для розкладання світла в спектр. Їх фізичний зміст.

ВСТУП. СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ

Відкриття спектрального аналізу було підготовлено класичними дослідженнями Ньютона, Волластона, Фраунгофера та інших вчених. Були відомі факти, що вказують на характерно випромінювання ряду речовин. Так, Тольбат ще в 1826 р робив експерименти з пофарбованим полум'ям, а Алтер в 1854 році запропонував ознаки для визначення деяких металів за їх іскровим спектрами. Однак роком народження емісійного спектрального аналізу вважається 1859 року, коли німецькі фізик Кірхгоф і хімік Бунзен опублікували спільну роботу з виявлення лужних металів за допомогою спектроскопа і встановили, що атоми поглинають ті ж самі довжини хвиль, що і випускають, і що кожному хімічному елементу належить свій, характерний для нього, і тільки для нього, лінійчатий спектр, який є такою ж постійною характеристикою елемента, як, скажімо, його атомний вагу. Ця обставина і покладено в основу спектрального аналізу.

До 1923 р спектральний аналіз мав, головним чином, якісний характер і зіграв важливу роль у відкритті нових елементів. Методами спектрального аналізу було відкрито 25 елементів періодичної системи Д.І. Менделєєва, в тому числі: цезій і рубідій (Кірхгоф і Бунзен, 1861 г.), талій (Крукс, 1861 г.), індій (Райх і Ріхтер, 1863 г.), галій (Лекок де Буабордан, 1875), гелій (Локьер, 1868 г.). Рамзаем і Релеєм були відкриті інертні гази аргон, неон, ксенон і криптон; потім були відкриті 14 рідкоземельних елементів і, нарешті, в 1923 р гафній.

У чисто виробничій обстановці спектральний аналіз почав використовуватися в 1923 р в Англії для сортування призначеного до переплавки металевого брухту, при цьому застосовувався спектроскоп з дифракційною решіткою.

У Росії якісний спектральний аналіз вперше широко застосував в 1909 р академік В.І. Вернадський при геохімічних дослідженнях.

Починаючи з 1930-х рр., Атомна спектроскопія розвивається як спосіб кількісного визначення елементів і стає основним методом дослідження складу речовини в самих різних областях науки і техніки: металургії, геології, астрономії, біології, медицині та ін.

Основними перевагами спектроскопії перед іншими методами аналізу є: висока чутливість (10^{-5} ... $10^{-7}\%$) - практично чутливість спектрального аналізу завжди вище чутливості вагового хімічного аналізу; досить хороша точність (3 ... 5%) - при малих концентраціях точність спектрального аналізу перевершує точність хімічного аналізу і може кілька поступатися йому при великих концентраціях; експресному - в абсолютній більшості випадків при спектральному аналізі витрати часу від взяття проби і до отримання кінцевого результату незрівнянно менше, ніж при інших методах аналізу; багатокомпонентність - методами спектрального аналізу можливе одночасне визначення 20 і більше елементів, в той час як при хімічному аналізі можливо тільки роздільне визначення кожного елемента, для чого потрібне проведення окремих специфічних реакцій; контроль виробів без їх руйнування - спектроскопія залишається єдиним доступним методом аналізу великогабаритних виробів і предметів, що не допускають пошкодження їх поверхонь; вимога малої кількості аналізованого зразка - у багатьох випадках для проведення спектрального аналізу досить сотих часток грама досліджуваної речовини; універсальність - практично одні і ті ж методи спектрального аналізу придатні для визначення різних елементів і в найрізноманітніших об'єктах - від природної сировини до живої клітини; документальність - при фотографічному варіанті

методу (отримання фотопластинки) або при фотоелектричної реєстрації (стрічка самописця або роздруківка) результати аналізу можуть зберігатися тривалий час і бути документом, за яким можна багаторазово провести перевірку правильності і точності аналізу.

Нарешті, є область досліджень, не доступна до теперішнього часу ніяким іншим методам аналізу, крім спектрального. Йдеться про вивчення складу небесних тіл і міжзоряного речовини. Спектральний метод аналізу має в цій області повну монополію

Шкала електромагнітних хвиль.

Електромагнітне випромінювання розповсюджується у просторі як хвилі різних довжин, однак атоми і молекули випромінюють електромагнітні хвилі окремими порціями – квантами, поведінка яких подібна до поведінки окремих частинок. Квант при взаємодії з речовиною поглинається нею цілковито. Квантові, як і частинці, притаманне певне значення енергії, проте ця енергія залежить від хвильової характеристики – частоти коливань або довжини хвилі:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

де E – енергія кванта;

h – стала Планка ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с);

ν і λ – частота і довжина хвилі електромагнітного випромінювання.

Шкала електромагнітних хвиль

<i>Довжина, м</i>	<i>Частота, Гц</i>	<i>Найменування</i>
10^6-10^4	$3 \cdot 10^2-3 \cdot 10^4$	<u>Наддовгі</u>
10^4-10^3	$3 \cdot 10^4-3 \cdot 10^5$	<u>Довгі (радіохвилі)</u>
10^3-10^2	$3 \cdot 10^5-3 \cdot 10^6$	<u>Середні (радіохвилі)</u>
10^2-10^1	$3 \cdot 10^6-3 \cdot 10^7$	<u>Короткі (радіохвилі)</u>
10^1-10^{-1}	$3 \cdot 10^7-3 \cdot 10^9$	<u>Ультракороткі</u>
$10^{-1}-10^{-2}$	$3 \cdot 10^9-3 \cdot 10^{10}$	Телебачення (НВЧ)
$10^{-2}-10^{-3}$	$3 \cdot 10^{10}-3 \cdot 10^{11}$	Радіолокація (НВЧ)
$10^{-3}-10^{-6}$	$3 \cdot 10^{11}-3 \cdot 10^{14}$	<u>Інфрачервоне випромінювання</u>
$10^{-6}-10^{-7}$	$3 \cdot 10^{14}-3 \cdot 10^{15}$	<u>Видиме світло</u>
$10^{-7}-10^{-9}$	$3 \cdot 10^{15}-3 \cdot 10^{17}$	<u>Ультрафіолетове випромінювання</u>
$10^{-9}-10^{-12}$	$3 \cdot 10^{17}-3 \cdot 10^{20}$	<u>Рентгенівське випромінювання (м'яке)</u>
$10^{-12}-10^{-14}$	$3 \cdot 10^{20}-3 \cdot 10^{22}$	<u>Гамма-випромінювання (жорстке)</u>
$\leq 10^{-14}$	$\geq 3 \cdot 10^{22}$	<u>Космічні промені</u>

Електромагнітним хвилям притаманні величини довжин хвиль від декількох кілометрів (радіовипромінювання) до малих часток ангстрема ($1\text{\AA} = 10^{-10}$ м) (гамма-випромінювання). Вузенька ділянка шкали електромагнітних хвиль від 400 нм до 750 нм (приблизні значення) утворює так звану видиму область; хвилі з цієї ділянки можуть безпосередньо сприйматись людським оком. Справа і зліва до цієї ділянки дотикаються інфрачервона і ультрафіолетова області. Між останньою і γ -променями розташована область рентгенівського випромінювання.

Поділ шкали електромагнітних хвиль на вказані області зумовлений різними джерелами їхнього випромінювання, різними методами розкладання у спектр, різними методами реєстрації.

В залежності від частоти чи довжини хвилі (ці величини пов'язані між собою), електромагнітні хвилі відносять до різних діапазонів. Хвилі в різних діапазонах різним чином взаємодіють із фізичними тілами.

Електромагнітні хвилі з найменшою частотою (або найбільшою довжиною хвилі) належать до **радіодіапазону**. Радіодіапазон використовується для передачі сигналів на віддалі за допомогою [радіо](#), [телебачення](#), [мобільних телефонів](#). У радіодіапазоні працює [радіолокація](#). Радіодіапазон розділяється на метровий, дециметровий, сантиметровий, міліметровий, в залежності від довжини електромагнітної хвилі.

Електромагнітні хвилі з вищою частотою належать до інфрачервоного діапазону. В інфрачервоному діапазоні лежить теплове випромінювання тіла. Реєстрація цього випромінювання лежить в основі роботи приладів нічного бачення (тепловізори). Інфрачервоні хвилі застосовуються також для вивчення теплових коливань у тілах і допомагають встановити атомну структуру твердих тіл, газів та рідин.

Електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі від 400 нм до 760 нм належать до діапазону видимого [світла](#). В залежності від частоти й довжини хвилі видиме світло розрізняється за [кольорами](#). КОЖНОМУ Кольору відповідає певна частота.

- **Ультрафіолетове випромінювання** (від [лат.](#) *ultra* — «за межами»), скорочено **УФ-випромінювання** або **ультрафіолет** — невидиме [оком](#) людини **електромагнітне випромінювання**, що займає [спектральну](#) область між [видимим](#) і [рентгенівським](#) випромінюваннями в межах [довжин хвиль](#) 400-10 [нм](#).
- Уся область ультрафіолетового випромінювання умовно ділиться на: *ближню* від 400 до 200 нм. Відкрито в 1801 році німецьким вченим [Йоганном Ріттером](#) і англійським вченим [Вільямом Волластоном](#) за фотохімічним впливом випромінювання на [хлористе срібло](#) (AgCl).
- *далеку*, або *вакуумну* (200-10 нм). Назва зумовлена тим, що випромінювання цієї ділянки сильно поглинається повітрям і його дослідження проводять за допомогою [вакуумних спектральних](#) приладів. Знайдено німецьким вченим [В. Шуманом](#) за допомогою побудованого ним вакуумного [спектрографа](#) з [флюоритовою](#) призмою (1885–1903) та безжелятинових фотопластин. За допомогою чого він отримав можливість реєструвати короткохвильове випромінювання з довжиною хвилі до 130 нм. Англійський вчений [Т. Лайман](#), вперше збудувавши вакуумний спектрограф з увігнутою [дифракційною ґраткою](#), реєстрував ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі до 25 нм (1924 рік). До 1927 року був вивчений весь проміжок хвиль до рентгенівського випромінювання.
- Оптичні властивості [речовин](#) в ультрафіолетовій області спектру значно відрізняються від їх оптичних властивостей у видимій області. Характерною межею є зменшення прозорості (збільшення [коефіцієнта поглинання](#)) більшості тіл, прозорих у видимій області. Наприклад, звичайне [скло](#) непрозоре при інтенсивності випромінювання — $\lambda < 320$ нм; в більш короткохвильовій області прозорі лише [увіолеве скло](#), [сапфір](#), [фтористий магній](#), [кварц](#), [флюорит](#), [фтористий літій](#) і деякі інші матеріали. Найдальшу межу прозорості (105 нм) має фтористий літій. Для $\lambda < 105$ нм прозорих матеріалів практично немає. З газоподібних речовин найбільшу прозорість мають [інертні гази](#), межу прозорості яких визначається величиною їхнього [іонізаційного потенціалу](#). Найкороткохвильовішу межу прозорості

має гелій(He) — 50,4 нм. Повітря непрозоре практично при $\lambda < 185$ нм через УФ-поглинання киснем.

Більша частота, а, отже, й енергія квантів такого світла призводить до більш руйнівної дії ультрафіолетових хвиль на біологічні об'єкти. Земна поверхня захищена від шкідливої дії ультрафіолетових хвиль озоновим шаром. Для додаткового захисту природа наділила людей темною шкірою. Проте ультрафіолетові промені потрібні людині для продукування вітаміну D. Саме тому люди в північних широтах, де інтенсивність ультрафіолетових хвиль менша, втратили темне забарвлення шкіри.

Електромагнітні хвилі ще вищої частоти належать до рентгенівського діапазону. Вони називаються так тому, що їх відкрив Рентген, вивчаючи випромінювання, яке утворюється при гальмуванні електронів. В закордонній літературі такі хвилі заведено називати **X-променями**, поважаючи бажання Рентгена, щоб промені не називали його іменем. Рентгенівські хвилі слабо взаємодіють із речовиною, сильніше поглинаючись там, де густина більша. Цей факт використовується в медицині для рентгенівської флюорографії. Рентгенівські хвилі застосовуються також для елементного аналізу та вивчення структури кристалічних тіл.

Найвищу частоту й найменшу довжину мають γ-промені. Такі промені утворюються внаслідок ядерних реакцій і реакцій між елементарними частинками. γ-промені мають велику руйнівну дію на біологічні об'єкти. Проте вони використовуються у фізиці для вивчення різних характеристик атомного ядра.

Оптичний діапазон випромінювань - діапазон електромагнітного випромінювання з довжинами хвиль від 10 пм до 1 мм. Оптичний діапазон підрозділяється на чотири області: рентгенівську (10 пм — 5 нм), ультрафіолетову (5—380 нм), видиму (380—770 нм) та інфрачервону (770 нм - 1 мм). Інфрачервона область включає короткохвильову (0,77—1,5 мкм), середньохвильову (1,5—20 мкм) і довгохвильову (20 мкм — 1 мм) ділянки.

ОКО ЯК ОПТИЧНА СИСТЕМА

Око являє собою оптичну систему, яка дає зображення на світлочутливій сітчастій оболонці очного яблука — сітківці.

Око як оптичний прилад складається з чотирьох лінз (рис. 1):

- 1) рогова оболонка 1 — основна за оптичною силою лінза;
- 2) опукло-ввігнута рідка лінза (передня камера) — розсіювальна лінза, основний компенсатор аберації в оптичній системі ока;
- 3) кришталік 3 — лінза, яка забезпечує акомодацію ока;
- 4) склоподібне тіло 4.

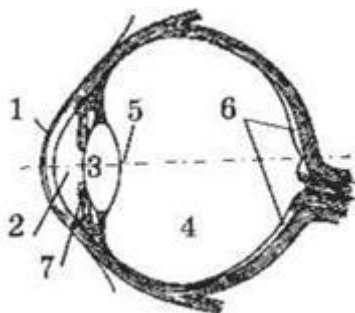


Рис. 1

Оптичний центр ока 5 міститься біля задньої стінки кришталіка. Перед кришталіком є так звана райдужна оболонка 7, в якій посередині є отвір — зіниця 2; він може змінювати свій діаметр залежно від того, яка кількість світла потрапляє в око. При більшій

інтенсивності світла зіниця звужується (≈ 2 мм), при малій (0,01 лк) — розширюється (≈ 8 мм). За кришталіком міститься очне яблуко, заповнене склоподібним тілом. На дні очного яблука розташована сітківка b , яка сприймає зображення. Через оболонку ока в задній його частині входить зоровий нерв.

Акомодація ока — фокусування зображення різновіддалених предметів на сітківці ока. Відбувається за допомогою стиснення чи розтягування кришталіка очними м'язами (змінювання фокусної відстані ока).

Межі акомодатії для нормального ока від 15—20 см до ∞ .

Здатність ока до акомодатії забезпечує зображення предметів на поверхні сітківки.

Відстань найкращого зору (L_0) — це відстань до предмета, що розглядається, коли око акомодує при ненапруженому кришталіку. Для нормального зору $L_0 = 25—30$ см.

До вад ока належить короткозорість (зображення отримуємо перед сітківкою) і далекозорість (зображення отримуємо за сітківкою). Для компенсації короткозорості застосовують окуляри із розсіювальних лінз, а далекозорості — окуляри із збиральних лінз.

Оптична вісь ока — пряма, що проходить через оптичний центр ока і центр жовтої плями сітківки.

Редуковане око — схематично зображене око із здійсненою акомодатією (без дотримання масштабів)

$$h = a \operatorname{tg} \varphi,$$

$$h \sim \operatorname{tg} \varphi,$$

де φ — кут зору на предмет;

a — оптична база ока (стала величина).

Лінійні розміри зображення на сітківці ока прямо пропорційні тангенсу кута зору.

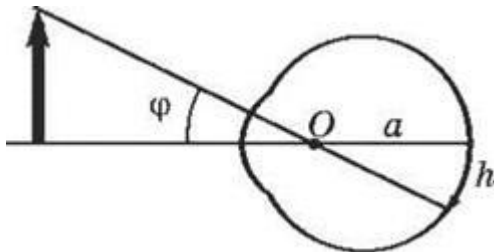


Рис.2

Світлотехнічні характеристики оптичного випромінювання

Променистий потік, що оцінюється по зоровому відчуттю яку він справляє, називається світловим потоком (Ісв). Зорові відчуття сильно залежать від зовнішніх умов. При визначенні світлових характеристик випромінювання за основу прийняті характеристики денного зору. Оскільки око є селективний приймач випромінювання, що володіє неоднаковою чутливістю до випромінювання різних довжин хвиль, то променистим потокам однакової потужності, але різного спектрального складу, відповідають різні величини світлового потоку. Світловий потік вимірюється в спеціальних світлових (Світлотехнічних) одиницях.

Для встановлення системи світлових одиниць прийнятий універсальний еталонний платиновий випромінювач, який представляє собою модель абсолютно чорного тіла, т. е. рівноважний температурний випромінювач з точно фіксованою температурою 2042 ° К (Температура затвердіння розплавленої платини), яка визначає спектральний склад і потужність його випромінювання.

Силою світла джерела випромінювання називається просторова (або кутова) щільність створюваного ним світлового потоку:

$$J = \frac{dI_{cs}}{d\omega}$$

ω - тілесний кут, в якому поширюється випромінювання.

За одиницю сили світла прийнята сила світла еталонного випромінювача - кандела (кд).

Одиниця світлового потоку - люмен (лм) являє собою світловий потік, який випускає точковий випромінювач з силою світла $J = 1$ кд в межах тілесного кута $\omega = 1$ стерadian.

Повний світловий потік, що випускається джерелом з силою світла в 1 кд рівномірно в усіх напрямках, дорівнює $I_{cs} = 4\pi$ лм.

Освітленість поверхні називається відношення падаючого на неї світлового потоку до площі A рівномірно освітленої поверхні:

$$E = \frac{I_{cs}}{A}$$

Одиниця освітленості E - люкс (лк) дорівнює освітленості площі в 1 м^2 при падінні на неї світлового потоку в 1 лм.

Точкове джерело світла з силою світла в 1 кд, поміщений в центрі сфери з радіусом в 1 м, створює на поверхні сфери освітленість в 1 лк. Сила світла точкового джерела і створювана ним освітленість пов'язані співвідношенням:

$$E = \frac{J}{r^2} \cos \theta,$$

де r - відстань від джерела світла до освітлюваної їм поверхні; θ - кут між напрямком світлового потоку і нормаллю до освітлюваної поверхні.

При нормальному падінні світла E [лк] = J / r^2 , якщо J - в канделах, а r - в метрах.

Зв'язок між енергетичними та світловими характеристиками

Зв'язок між енергетичними (об'єктивними) і світловими (суб'єктивними) характеристиками випромінювання здійснюється з урахуванням спектральної характеристики чутливості «усередненого» людського ока. Спектральна чутливість ока характеризується величиною, що отримала назву відносна і вимірюваної в лм / Вт

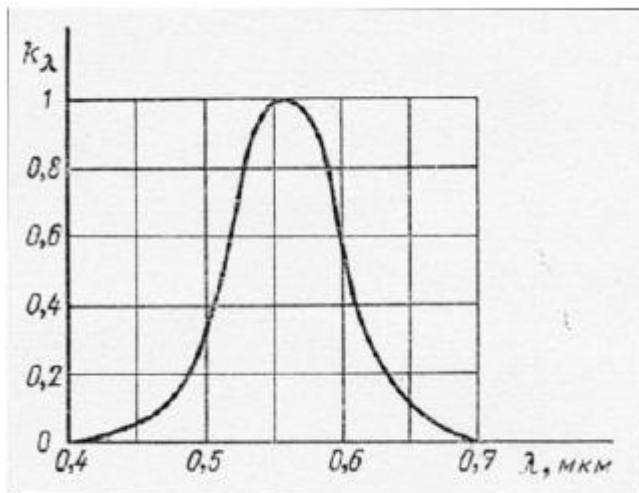


Рис.3 Спектральна характеристика відносної видимості k_λ

На малюнку 3 приведена спектральна характеристика відносної видимості k_λ , показує відносний рівень світлового відчуття, що виникає в результаті дії на око монохроматичного випромінювання різних довжин хвиль, але однакової потужності.

Експериментальними вимірами встановлено, що 1 Вт променистого потоку монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_{max} = 555 \text{ нм}$ (що відповідає максимуму видимості) дорівнює 683 лм світлового потоку. Інакше кажучи, чутливість

середнього ока в максимумі кривої відності (555 нм - зелене світло) чисельно дорівнює 683 лм / Вт.

Таким чином, можливості зорового аналізу світлового потоку обмежені, по-перше, вузьким спектральним діапазоном, по-друге, залежністю зорових відчуттів від умов спостереження і спектрального складу випромінювання.

Отже, бачимо що для одержання інформації про характеристики оптичного випромінювання не достатньо лише органів відчуття – ока (лише мала частина шкали електромаг. хвиль займає ВО). Потрібні прилади.

Оптичні прилади – прилади, будова яких ґрунтується на законах поширення світла або на використанні властивостей світла поділяються на пристрої, які служать для **вивчення відносного розташування об'єктів і аналізу розподілу інтенсивності на вибраній площині**. До них, наприклад, належать:

- фотоапарат
 - телескоп
 - мікроскоп
 - лазер
 - кінопроектор
 - кінокамера
- бінокль

- **фотометричні** – які служать для виявлення і вимірювання інтенсивності випромінювання, а також їх розподілу по спектру довжин хвиль. Основна частина цих приладів – спектральні.

Джерелами електромагнітного випромінювання всіх частот є атоми або їхні певні угруповання – молекули.

Встановлено:

1. **Атоми випромінюють не завжди, а тільки за певних умов.** Наприклад, метал починає світитися, тобто випромінювати, після того, як буде нагрітий до деякої температури.

2. **Упорядковане за довжинами хвиль електромагнітне випромінювання називають спектром.** Спектр випромінювання визначається характером об'єкта, який випромінює. Свічення твердих і рідких тіл утворює *суцільні спектри*. При свіченні газів і пари малої густини отримуємо *лінійчасті* та *смугасті спектри*. Лінійчасті, або атомні, спектри притаманні одноатомним газам, або багатоатомним, що розпались на атоми при збудженні, наприклад, нагріванні. Смугасті спектри притаманні випромінюванню газів у молекулярному стані, тому інша їхня назва – молекулярні.

3. **Лінійчастий спектр атома утворює сукупність великого числа ліній, розташованих за певними закономірностями.** Наприклад, у спектрі водню лінії згруповані у 6 серій;

4 **Спектр кожного елемента є його сталою і строго індивідуальною характеристикою,** яка дає змогу використовувати спектри для аналізу речовини

З метою з'ясування наведених фактів пригадаймо, що атомам хімічних елементів у звичайному незбудженому стані відповідає певна внутрішня енергія. Атоми можливо перевести у збуджений стан з більшою внутрішньою енергією шляхом надання їм енергії ззовні. У цьому стані вони перебувають всього близько 10^{-8} с, бо прагнуть позбавитися зайвої енергії і повернутись у незбуджений стан. Різниця між значеннями внутрішньої

енергії збудженого E_2 і незбудженого E_1 станів $\Delta E = E_2 - E_1$ випромінюється у вигляді кванта. Частота випромінювання ν цього кванта:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

Якщо б внутрішня енергія атомів могла зазнавати будь-яких змін, то у атомних спектрах існували б різноманітні частоти, він був би суцільним, як спектр розжареного твердого тіла. Атомні спектри лінійчаті тому, що внутрішня енергія атомів може змінюватись стрибкоподібно, приймаючи тільки деякі певні дозволені значення. Ці значення для атомів різних елементів є різними. Дозволені значення внутрішньої енергії атома отримали назву дозволених *енергетичних* або *квантових рівнів*. При переході атома із одного стану в інший (нижчий) випромінюється тільки один квант, а кожна спектральна лінія утворена значною кількістю однакових квантів, які випромінювали різні атоми одного елемента.

1. При збудженні атомів речовини спостерігають випромінювання електромагнітних хвиль. Дискретна сукупність квантів, які випромінюють атоми, утворює характеристичний спектр, який називають *емісійним*.

2. При проходженні електромагнітного випромінювання через речовину атоми останньої можуть поглинати кванти, енергія яких відповідає енергії дозволених для цього атома переходів з нижчого енергетичного рівня E_1 на вищий E_m . У неперервному спектрі джерела електромагнітного випромінювання з'являться лінії поглинання, які відповідають частотам $\nu_{l,m}$. Такі спектри називають *спектрами поглинання*, або *абсорбційними*. Кількість ліній поглинання кожного елемента не залежить від концентрації збуджених і незбуджених атомів у речовині, яку опромінюють. Спектр поглинання, як і спектр випромінювання, є характеристичним, оскільки він визначається тією ж системою атомних енергетичних станів. Його основою, як і спектра випромінювання, є резонансні лінії – лінії, які поглинаються або випромінюються при переходах між основним енергетичним рівнем і найнижчим дозволеним збудженим рівнем.

3. Лінійчаті спектри випромінювання і поглинання завдяки своїй характеристичності дають змогу здійснювати аналіз речовини. Аналіз за допомогою спектрів випромінювання називають *емісійним спектральним аналізом*, а за допомогою спектрів поглинання – *абсорбційним спектральним аналізом*.

4. Лінійчаті спектри випромінювання і поглинання спостерігають або у вигляді вузьких смужок різної інтенсивності, розташованих у порядку зміни довжин хвиль (фотографічна, або візуальна реєстрація), або у вигляді такої ж послідовності піків, висота яких залежить від інтенсивності (фотоелектрична реєстрація).

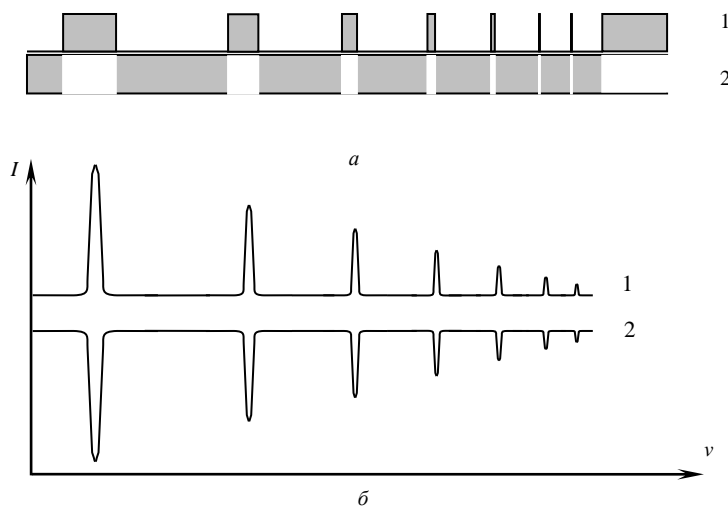


Рис. 3 Лінійчаті спектри випромінювання (1) і поглинання (2):
 а – фотографічна або візуальна реєстрація;
 б – фотоелектрична реєстрація

Молекулярні спектри випромінювання і поглинання утворюють смуги (сукупність щільно розташованих ліній), які відповідають електронним переходам з основного стану у збуджений.

Атомні і молекулярні спектри є основою для емісійного і абсорбційного спектрального аналізу.

Класифікація методів спектрального аналізу та області їхнього застосування.

Спектральний аналіз – фізичний метод визначення хімічного складу і будови речовини за її спектром. Присутність у спектрі тих чи інших частот (ліній спектра) дає змогу визначити склад речовини (*якісний аналіз*). Інтенсивність ліній у спектрі пропорційна кількості частинок, які зумовили виникнення ліній; вона засвідчує про їхній кількісний вміст у об'єкті дослідження (*кількісний аналіз*).

Залежно від характеру досліджуваного спектра розрізняють аналіз за спектрами випромінювання (емісійний спектральний аналіз), аналіз за спектрами поглинання (абсорбційний спектральний аналіз), аналіз за спектрами комбінаційного розсіяння світла, люмінесценції, рентгенівського та радіовипромінювання, ядерного магнітного резонансу. Відповідно до завдань, які вирішують, існує розподіл на спектральний аналіз елементарного складу речовини (*атомний спектральний аналіз*) за спектрами випромінювання, поглинання, люмінесценції та рентгенівських променів і спектральний аналіз молекулярного складу речовини (*молекулярний спектральний аналіз*) за спектрами поглинання в усіх областях спектра, спектра люмінесценції та комбінаційного розсіяння.

На основі приведених класифікацій стає зрозумілим, що, наприклад, аналіз за спектрами випромінювання атомарного складу речовини є атомно-емісійним спектральним аналізом.

У рамках перелічених типів спектрального аналізу існують різні методи залежно від джерела збудження і приймача спектра. Наприклад, візуальний і фотографічний атомно-емісійний спектральний аналіз (приймачі: око і фотопластинка), атомно-емісійна полуменева спектрометрія (джерело збудження – полум'я, приймач – фотоелемент) – це різні методи атомно-емісійного спектрального аналізу. Найпоширеніші методи абсорбційного спектрального аналізу – спектрофотометрія і колориметрія.

Бачимо, що є значна кількість різних методів спектрального аналізу. Вибір одного із них для проведення конкретного дослідження пов'язаний зі зручністю та ефективністю цього методу для розв'язування даної задачі. Головним критерієм вибору є основні метрологічні характеристики методу, зокрема **абсолютна і відносна чутливість**. Трапляються ситуації, за яких визначити присутність елемента за допомогою відомих поширених методів неможливо. Коли елемент випромінює чи поглинає, він засвідчує свою присутність у вигляді ліній спектра на фоні сигналів інших елементів. Отже, прилад сприймає сумарний сигнал досліджуваного елемента і фону. За певного співвідношення сигналів фону та елемента виокремити останній неможливо, що й пояснює існування **межі визначення елемента, тобто абсолютної та відносної чутливості**.

При неможливості безпосереднього визначення елемента нерідко використовують непрямі методи аналізу. У цьому випадку відбувається визначення сполуки, у яку входить шуканий елемент. Непрямі методи використовують для визначення елементів, резонансні лінії яких перебувають у далекій УФ-області, тобто значно нижче 200 нм – ВУФ.

Основні характеристики і області застосування спектрального аналізу. Як ми бачимо, за допомогою спектрального аналізу можна визначити як атомний (елементарний), так і молекулярний склад речовини. Спектральний аналіз дозволяє проводити якісне відкриття окремих компонентів аналізованої проби і кількісне визначення їх концентрацій.

Речовини з дуже близькими хімічними властивостями, які важко або навіть неможливо аналізувати хімічними методами, легко визначаються спектрально. Наприклад, щодо просто виконується аналіз суміші рідкоземельних елементів або суміші інертних газів. За допомогою спектрального аналізу можна визначити ізомерні органічні сполуки з дуже близькими хімічними властивостями.

Методи атомного спектрального аналізу, якісного і кількісного, в даний час розроблені значно краще, ніж молекулярного, і мають більш широке практичне застосування. Атомний спектральний аналіз використовують для аналізу найрізноманітніших об'єктів. Область його застосування дуже широка: чорна та кольорова металургія, машинобудування, геологія, хімія, біологія, астрофізика та багато інших галузей науки і промисловості.

Слід зазначити, що широта і обсяг практичних застосувань молекулярного спектрального аналізу, особливо останнім часом, швидко і безперервно ростуть. Це пов'язано, перш за все, з розробкою і випуском спектрально-аналітичної апаратури для цього методу.

Область використання молекулярного спектрального аналізу охоплює, головним чином, органічні речовини, хоча можна з успіхом аналізувати і неорганічні сполуки. Молекулярний спектральний аналіз впроваджується, головним чином, в хімічній, нафтопереробній та хіміко-фармацевтичній промисловості.

Чутливість спектрального аналізу, як правило, дуже висока. Мінімальна концентрація визначається речовини, яка може бути виявлена і виміряна спектральними методами, коливається в широких межах в залежності від властивостей цієї речовини і складу аналізованої проби. Прямим аналізом при визначенні більшості металів і ряду інших елементів порівняно легко досягається чутливість 10^{-3} - $10^{-4}\%$, а для деяких речовин навіть 10^{-5} - $10^{-6}\%$. І тільки в особливо несприятливих випадках чутливість зменшується до 10^{-1} - $10^{-2}\%$. Застосування попереднього відділення домішок від основи проби дозволяє сильно (часто в тисячі разів) підвищити чутливість аналізу.

Завдяки високій чутливості атомний спектральний аналіз широко застосовується для аналізу чистих і особливо чистих металів, в геохімії та ґрунтознавстві для визначення мікроконцентрацій різних елементів, в тому числі рідкісних і розсіяних, в промисловості атомних і напівпровідникових матеріалів.

Чутливість молекулярного спектрального аналізу для різних речовин змінюється в ще більш широких межах. У ряді випадків ледве вдається визначати речовини, вміст яких в аналізованому зразку становить відсотки і десятки частки відсотка, але можна навести приклади і дуже високої чутливості молекулярного аналізу 10^{-7} - $10^{-8}\%$.

Точність атомного спектрального аналізу залежить, головним чином, від складу і структури аналізованих об'єктів. При аналізі зразків, близьких за своєю структурою і складом, можна легко досягти високої точності. Помилка в цьому випадку не перевищує $\pm 1-3\%$ по відношенню до обумовленої величиною. Тому, наприклад, вельми точним є серійний спектральний аналіз металів і сплавів. У металургії і машинобудуванні спектральний аналіз став в даний час основним аналітичним методом.

Значно нижче точність аналізу речовин, склад і структура яких сильно змінюється від проби до проби, але останнім часом і в цій області становище помітно покращився. Став можливим кількісний спектральний аналіз руд, мінералів, гірських порід, шлаків і тому подібних об'єктів. Хоча повністю завдання ще не вирішена, кількісний аналіз неметалевих проб зараз широко застосовується в багатьох галузях промисловості: в металургії, геології, при виробництві вогнетривів, скла та інших видів продукції.

Відносна помилка визначення при атомному спектральному аналізі мало залежить від концентрації. Вона залишається майже постійною як при аналізі малих домішок і добавок, так і при визначенні основних компонентів зразка. Точність хімічних методів аналізу піддається суттєвому зниженню при переході до визначення домішок. Тому атомний спектральний аналіз точніше хімічного в області малих концентрацій. При середніх концентраціях (0,1-1%) визначених речовин точність обох методів приблизно однакова, але в області високих концентрацій точність хімічного аналізу, як правило, вище. Молекулярний спектральний аналіз дає зазвичай більш високу точність визначення, ніж атомний, і не поступається в точності хімічним навіть при великих концентраціях.

Швидкість спектрального аналізу значно перевищує швидкість виконання аналізу іншими методами. Це пояснюється тим, що при спектральному аналізі не потрібно попереднього поділу проби на окремі компоненти. Крім того, сам аналіз виконується дуже швидко. Так при застосуванні сучасних методів спектрального аналізу точне кількісне визначення декількох компонентів в складному зразку займає всього кілька хвилин з моменту доставки проби в лабораторію до отримання результатів аналізу. Тривалість аналізу, звичайно, зростає, коли для підвищення точності або чутливості потрібна попередня обробка проби.

З високою швидкістю проведення спектрального аналізу тісно пов'язана його велика продуктивність, що дуже істотно при масових аналізах. Завдяки великій продуктивності і малому витраті реактивів і інших матеріалів вартість одного аналізу при застосуванні спектральних методів зазвичай мала, незважаючи на значні початкові витрати на придбання спектрально-аналітичного обладнання. Більше того, як правило, чим вище початкові витрати і складніше попередня підготовка аналітичної методики, тим швидше і дешевше виконання масових аналізів.

За своєю суттю спектральний аналіз є приладовим методом. При використанні сучасної апаратури число операцій, що вимагають втручання спектроскопіста, невелика. Встановлено, що і ці залишилися операції можуть бути автоматизовані. Таким чином, спектральний аналіз дозволяє підійти до повної автоматизації/определення хімічного складу речовини.

Спектральний аналіз є універсальним. З його допомогою можна визначати практично будь-які елементи і з'єднання в найрізноманітніших твердих, рідких і газоподібних аналітичних об'єктах.

Для спектрального аналізу характерна висока вибірковість. Це означає, що майже кожна речовина може бути якісно і кількісно визначено в складній пробі, без її поділу.

Незалежно від існування значної кількості методів спектрального аналізу можна стверджувати, що для реалізації кожного із них необхідні:

- ☞ *джерело випромінювання* – джерело енергії, що спричинює збудження атомів речовини, яку аналізують;
- ☞ *засіб виділення сигналів кожного елемента* – спектральний прилад;
- ☞ *приймач випромінювання* – засіб спостереження (чи реєстрації) спектра.

Задача спектрального приладу - розкладання падаючого на нього випромінювання на монохроматичні складові. У більшості приладів таке розкладання здійснюється за допомогою диспергуючого елемента - призми або дифракційної решітки, які різним чином відхиляють пучки світла різних довжин хвиль.

Класична спектральна установка складається із вказаних трьох основних частин, а також має певну кількість спеціальних пристроїв – об'єктивів, лінз і щілин, які забезпечують необхідні параметри світлового потоку: фокусування, конденсація, паралельність тощо.

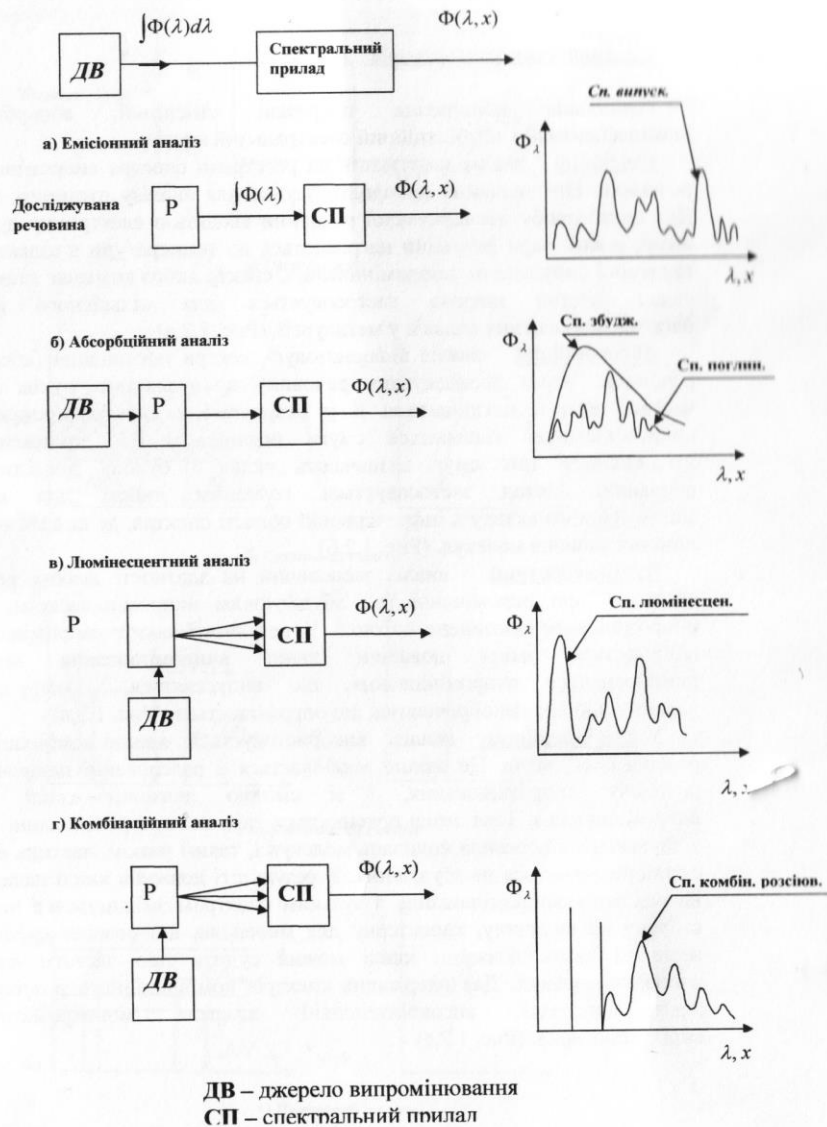


Рис 1.2 Види спектрального аналізу

Найпоширеніші джерела випромінювання: високотемпературне полум'я, різні типи газового розряду (дуга, іскра тощо). Випромінювання розжарених до 3000 К твердих тіл містить помітну частку ультрафіолетового випромінювання неперервного спектру, інтенсивність якого зростає із збільшенням температури. Сильніше ультрафіолетове випромінювання випускає плазма газового розряду. При цьому залежно від розрядних умов і робочої речовини може випускатись як безперервний, так і лінійчатий спектр. Для різних застосувань промисловість випускає ртутні, водневі, ксенонові та ін. газорозрядні лампи, вікна в яких (або цілком колби) виготовляють з прозорих для УФ-випромінювання матеріалів (частіше з кварцу). Будь-яка високотемпературна плазма (плазма електричних іскор і дуг, плазма, що утворюється при фокусуванні сильного лазерного випромінювання в газах або на поверхні твердих тіл, і т. д.) є потужним джерелом УФ-випромінювання. Інтенсивне УФ-випромінювання неперервного спектру випромінюють електрони, прискорені в синхротроні. Для ультрафіолетової області спектру розроблені також оптичні квантові генератори — лазери. Найменшу довжину хвилі з них має водневий лазер (109,8 нм).

Розкладання світла на його складові відбувається диспергуючим елементом спектрального прилада.

Диспергуючий елемент – призма, дифракційна ґратка або їхнє поєднання – розкладає випромінювання у спектр і є головною складовою кожного спектрального приладу.

Світло поширюється зі скінченною швидкістю. Досліди свідчать, що швидкість світла в різних середовищах дорівнює:

$$v = \frac{c}{n}$$

де c – швидкість світла у вакуумі, n – абсолютний показник заломлення.

Дисперсія світла – явище залежності швидкості світла, а також і показника заломлення від довжини хвилі (кольору) або від частоти.

Біле світло – це сукупність електромагнітних хвиль з різною довжиною хвилі. Біле світло при проходженні через призму розкладається в спектр. Найменше заломлюються червоні промені, найбільше – фіолетові. Найбільша швидкість у променів червоного кольору, найменша – у променів фіолетового кольору.

Інтерференція світла. Інтерференцією називають явище, яке виникає в процесі накладання двох (або більше) світлових хвиль однакового періоду в однорідному ізотропному середовищі, внаслідок чого енергія хвиль у просторі перерозподіляється. Інтерферувати можуть тільки когерентні хвилі, тобто хвилі рівних частот і сталої у часі різниці фаз. Когерентні промені дістають поділом пучка світла від одного і того ж самого джерела на два промені або використовуючи лазери.

Результуюче коливання максимально підсилюється тоді, коли різниця ходу додаваних хвиль дорівнює парному числу півхвиль або цілому числу довжин хвиль.

$$\Delta l = \pm n \lambda \quad \text{max}$$

Результуюче коливання ослаблюється, якщо різниця ходу додаваних хвиль дорівнює непарному числу півхвиль

$$\Delta l = \pm (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{min}$$

де Δl – різниця ходу двох хвиль, які збуджують коливання в даній точці,

λ – довжина хвилі, $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ - називають порядком інтерференційного максимуму або мінімуму.

Приклади спостереження інтерференції хвиль:

1. Виникнення кольорів тонких плівок.
2. Виникнення кілець Ньютона (смуги однакової довжини).

Інтерференція використовується для :

1. Перевірки якості обробки поверхонь.

Нерівність обробленої поверхні до 10^{-6} см зумовлює викривлення інтерференційних смуг.

2. Просвітлення оптики.

Усунення відбивання світла від поверхонь оптичних приладів завдяки нанесенню на їх поверхню плівки з показником заломлення меншим за показник заломлення матеріалу, з якого виготовлена оптична система.

3. Інтерферометри – прилади, призначені для точного вимірювання довжини світлових хвиль, визначення показника заломлення газів.

4. Голографія – метод створення зображень, заснований на збереженні інтерференційної картини, що створюється при освітленні об'єкта.

Дифракція світла - явище огинання перешкод світловими хвилями, які поширюються в неоднорідному середовищі. Дифракція спостерігається під час проходження світла через малі отвори чи огинання світлом перешкод, розміри яких малі (співмірні) порівняно з довжиною хвилі.

Явище дифракції хвиль тісно пов'язане з інтерференцією хвиль. Дифракційна картина, по суті, є нічим іншим, як інтерференційною картиною хвиль, на шляху яких є перешкода. Чим менший розмір перешкоди, тим більша дифракція.

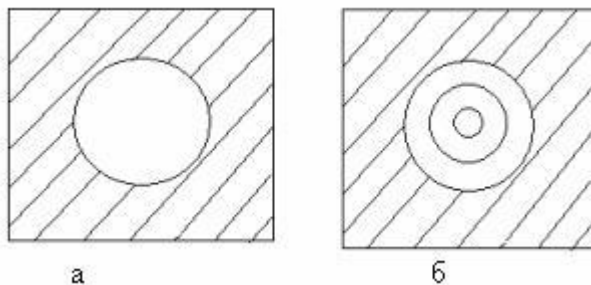


Рис.4

а – дифракційна картина, коли діаметр отвору порівняний з відстанню до екрана
 б – коли діаметр отвору в тисячі разів менший за відстань до екрана;

Оптичний прилад з великою кількістю вузьких прозорих щілин (розділених непрозорими проміжками), на яких спостерігається явище дифракції, називають дифракційною решіткою. Вона використовується для дослідження спектрального складу світла і визначення довжини хвилі.

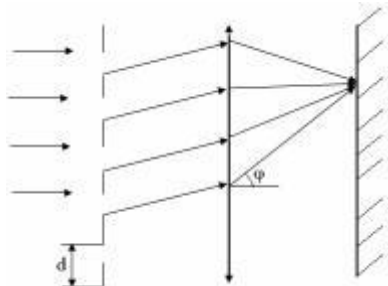


Рис.5

Формула дифракційної решітки (умова, за якої хвилі, що йдуть від щілини, підсилюють одна одну):

$$d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda - \text{max}$$

$$d \sin \varphi = (2k+1)\lambda/2 - \text{min}$$

k – порядок максимуму;

λ – довжина хвилі;

d = a + b – період дифракційної решітки;

a – ширина прозорих щілин;

b – непрозорих щілин .

Диспергуючий елемент у поєднанні з вхідними і вихідними щілинами та об'єктивами утворює головну частину спектрального приладу – *монохроматор*. Монохроматор дає змогу виокремити лінію певної довжини хвилі так. Диспергуючий елемент розділяє у просторі хвилі різної довжини внаслідок того, що вони мають різні показники заломлення (явище дисперсії). При повороті диспергуючого елемента на вихідну щілину монохроматора фокусується випромінювання певної довжини, яке і фіксує приймач у вигляді зображення щілини – лінії. Колір випромінювання зумовлений його частотою або довжиною хвилі. Отже, випромінювання певної довжини хвилі буде монохроматичним (однокольоровим). Монохроматор дає змогу отримати випромінювання певної довжини хвилі у вигляді ліній певного кольору. Ці лінії називають спектральними.

Реєстрація отриманих спектрів може здійснюватись різними типами приймачів: людським оком (*візуальна реєстрація*), фотопластинкою (*фотографічна реєстрація*),

приладами, у яких за рахунок явища фотоелектру відбувається перетворення випромінювання в електричний струм. У цьому випадку реєстрація є *фотоелектричною*.

Для реєстрації УФ-випромінювання при $\lambda > 230$ нм використовуються звичайні фотоматеріали. В більш короткохвильовій області до нього чутливі спеціальні мало**желатинові** фотопрошарки. Застосовуються фотоелектричні приймачі, що використовують здатність випромінювання викликати іонізацію і фотоелектр: фотодіоди, іонізаційні камери, лічильники фотонів, фотопомножувачі і ін. Розроблений також особливий вид фотопомножувачів — *каналні електронні помножувачі*, що дозволяють створювати мікроканалні пластини. В таких пластинках кожний осередок є каналним електронним помножувачем розміром до 10 мкм. Мікроканалні пластини дозволяють одержувати фотоелектричні зображення в УФ-випромінюванні й об'єднують переваги фотографічних і фотоелектричних методів реєстрації. При дослідженнях також використовують різні люмінесцентні речовини, що перетворюють УФ-випромінювання у видиме світло. На цій основі створені прилади для візуалізації зображень в УФ-випромінюванні.

Спектральні прилади з візуальною реєстрацією називають *спектроскопами*, з фотографічною — *спектрографами*, з фотоелектричною — *спектрометрами*.

Для визначення довжини хвилі тієї чи іншої спектральної лінії за її положенням у спектрі слугують вимірні мікроскопи, спектропроектори, інші допоміжні прилади. На фотографії спектра (спектрограмі) мікрофотометрами визначають інтенсивність лінії за її почорнінням.

Сучасний спектральний прилад містить у собі низку засобів, які у поєднанні з засобами мікропроцесорної техніки виконують функції цих допоміжних приладів і звільняють аналітика від клопітких операцій та обчислень.

Л.9. СПЕКТРАЛЬНІ ПРИЛАДИ

Світлофільтри. Характеристики та параметри абсорбційних світлофільтрів. Інтерференційні світлофільтри. Структурна схема спектрального приладу. Класифікація спектральних приладів. Характеристики спектральних приладів. Схема найпростішого спектрального приладу з використанням призми. Призначення його елементів. Призначення вхідної щілини спектрального приладу. Вимоги до вибору вхідної щілини. Об'єктив коліматора. Використання вгнутих дзеркал замість лінз. Призначення об'єктива камери. Причина нахилу фокальної площини до оптичної осі спектрального приладу.

СФІТЛОФІЛЬТРИ

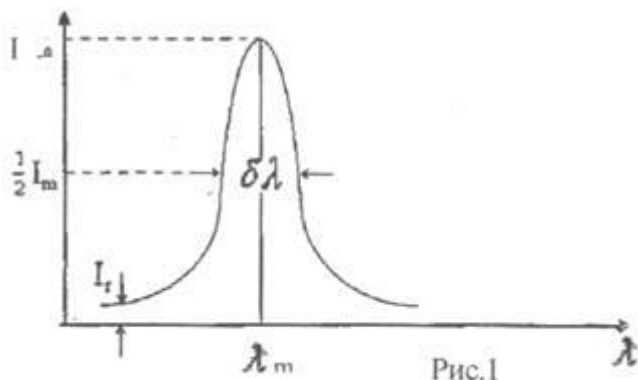
С. служать для виділення або усунення необхідної спектральної області в наукових дослідженнях, у фотометрії, спектрофотометрії, колориметрії, поєднуються майже зі всіма оптичними і спектральними приладами. У фотографічній і кінематографічній практиці їх застосовують для зменшення розсіяння серпанком, поліпшення перенесення кольорів і передачі світлотіні, зйомки в інфрачервоних променях. У світлотехніці вони уживаються для сигналізації, кольорового освітлення, зміни колірної температури джерел світла. С. необхідні у всіх випадках, коли потрібно уникнути небажаної нагрівальної дії інфрачервоного випромінювання, фотохімічних і інших дій ультрафіолетового випромінювання, або ослабити або виправити спектральний склад видимого випромінювання (так, вони є основним елементом багатьох захисних *окулярів*). Без С. неможлива інфрачервона, ультрафіолетова і люмінесцентна мікроскопія. Ці приклади не вичерпують надзвичайного різноманіття сфер застосування С.

Велике значення в оптиці має проблема монохроматизації світла, тобто виділення певного інтервалу довжин хвиль. Порівняно вузькі спектральні області випромінювання можна

виділити за допомогою монохроматичних світлофільтрів. На відміну від більш складних спектральних приладів - монохроматоров, світлофільтри мають значно більшим перерізом світлового пучка і більшою апертурою.

Світлофільтри змінюють спектральний склад або енергію падаючого на них світлового випромінювання без зміни форми його фронту. Основні характеристики (параметри) світлофільтрів наступні:

а) Спектральна ширина смуги пропускання $\delta\lambda$, рівна ширині спектрального інтервалу, на кордонах якого інтенсивність минулого світла дорівнює половині інтенсивності в максимумі смуги пропускання (Рис.1)



б) Пропускання (прозорість) в максимумі смуги пропускання (або оптичній щільності $D = -\lg T$)

$$T = \frac{I_m(\lambda_m)}{I_0(\lambda_m)}$$

де I_0 - інтенсивність світла, що падає на світлофільтр, I_m - інтенсивність світла, що пройшло через світлофільтр в максимумі смуги пропускання.

в) Довжина хвилі λ_m , відповідна максимуму смуги пропускання.

г) Залишкове пропускання I_r , рівне інтенсивності світла, що пропускається світлофільтром в області спектра, віддаленого від λ_m на відстані багато більшій λ_m . Замість залишкового пропускання часто використовують так званий фактор контрастності світлофільтру

$$C = \frac{I_m}{I_r}$$

Світлофільтри називаються сірими або нейтральними, якщо їх пропускання в досліджуваному спектральному інтервалі не залежить від довжини хвилі. Фільтри, що не відповідають цій умові, називаються селективними. Селективні світлофільтри призначаються або для відділення широкої області спектра, або для виділення вузької спектральної області. Світлофільтри останнього типу називаються монохроматичними. Вони часто застосовуються замість інших спектральних приладів, так як зазвичай пропускають набагато більший світловий потік, ніж прилади з диспергуючими елементами (призмами, дифракційними ґратами і ін.). Однак роздільна здатність світлофільтрів часто невелика - в більшості випадків ширина смуги пропускання становить десятки і сотні ангстрем. Кращі вузькосмугові світлофільтри мають ширину смуги пропускання менше 1 ангстрема, однак інтенсивність пропускається ними світла невелика. Тому основне призначення світлофільтрів - груба монохроматизація або неселективне ослаблення випромінювання.

Існують кілька типів монохроматичних світлофільтрів.

а) абсорбції світлофільтри.

Застосовуються найбільш широко. Ослаблення світла в них відбувається головним чином в результаті поглинання речовиною фільтра. Інтенсивність світла I_0 , що пройшов через поглинаючий шар світлофільтра, зменшується відповідно до закону Бугера-Ламберта:

$$I_1 = I_0 \cdot \exp(-k l),$$

де k - коефіцієнт поглинання, l - товщина шару.

Коефіцієнт пропускання (пропускання) абсорбційних фільтрів визначається формулою

$$T_1 = (1 - R_1^2) \exp(-k l),$$

де R_1 - коефіцієнт відбиття світла від поверхні фільтра. Затриманий фільтром світловий потік повністю перетворюється в тепло, що призводить до їх нагрівання і деякої зміни оптичних властивостей.

В даний час найбільш споживані скляні абсорбційні світлофільтри, які стійкі до світлових і теплових впливів і мають високі оптичні якості. Маючи в своєму розпорядженні один за одним кілька скляних світлофільтрів, можна отримати досить вузькосмугові фільтри для всієї видимої і ближньої ультрафіолетової частини спектра.

Порівняно рідше застосовуються рідинні і газові абсорбційні фільтри. Наприклад, для виділення ультрафіолетової області спектра використовують фільтр у вигляді кварцового кювети з насиченими парами бромю. Така кювету практично непрозора в області довжин хвиль 400-600 нм. До їх достоїнств відноситься можливість виготовлення в лабораторних умовах і *плавна зміна характеристик S при зміні концентрацій компонентів розчину*. Повітря непрозорий для області спектра з довжинами хвиль коротше 180 нм завдяки головним чином поглинанню кисню. Тому повітря служить в спектроскопічних дослідженнях природним газовим фільтром.

Відомо, що напівпровідники непрозорі для випромінювання з довжиною хвилі меншою деякого значення λ_0 і прозорі для більш довгохвильового випромінювання. Положення краю або межі поглинання визначається зонною структурою напівпровідника і відповідає енергії переходу електрона з валентної зони в зону провідності. Таким чином, напівпровідник - прекрасний світлофільтр, який різко обмежує спектр з короткохвильового боку. Більшість напівпровідників прозоро лише в інфрачервоній області спектра. Деякі скляні фільтри зобов'язані своїми властивостями присутності найдрібніших напівпровідникових кристалів.

б) Відбиваючі світлофільтри.

До них відносяться тонкі металеві плівки і багат шарові діелектричні покриття. Тонкі металеві плівки наносяться на кварцову або скляну підкладку випаровуванням або катодним розпиленням. На рис.2 наведені спектральні коефіцієнти відбиття R_1 срібла і алюмінію.

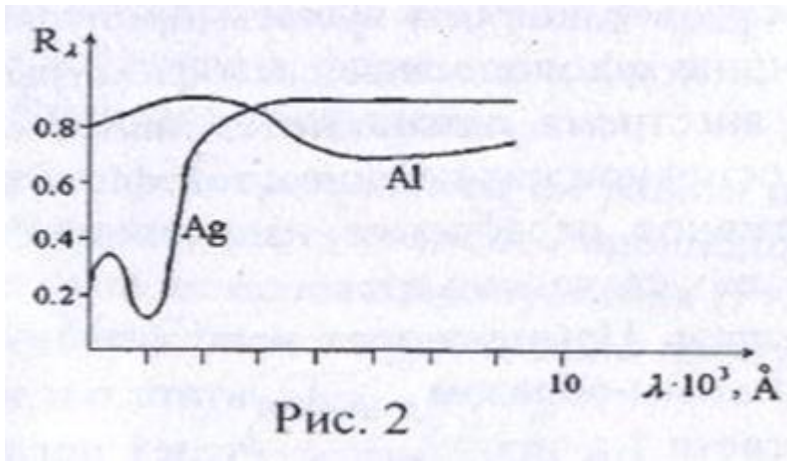


Рис. 2

Для отримання нейтральних металевих шарів зазвичай використовують платину, паладій і родій, рідше алюміній. Тонкі металеві плівки срібла і лужних металів служать для виділення різних ділянок в ультрафіолетовій області спектра (див. Рис.2). Фільтри з металевими плівками послаблюють світло головним чином в результаті відбивання від поверхні.

в) Селективні відбивні світлофільтри.

До відбиваючих світлофільтрів належать також багат шарові діелектричні дзеркала. У них відбивання випромінювання певних довжин хвиль відбувається в результаті багатопроменевої інтерференції. Цей метод дозволяє створити відбиваючі системи з дуже високим коефіцієнтом відбивання при малих втратах на поглинання, що є суттєвою перевагою в порівнянні з металевими дзеркалами. Необхідність виготовлення дзеркал з малим коефіцієнтом поглинання сильно зросла в зв'язку з розвитком лазерної техніки.

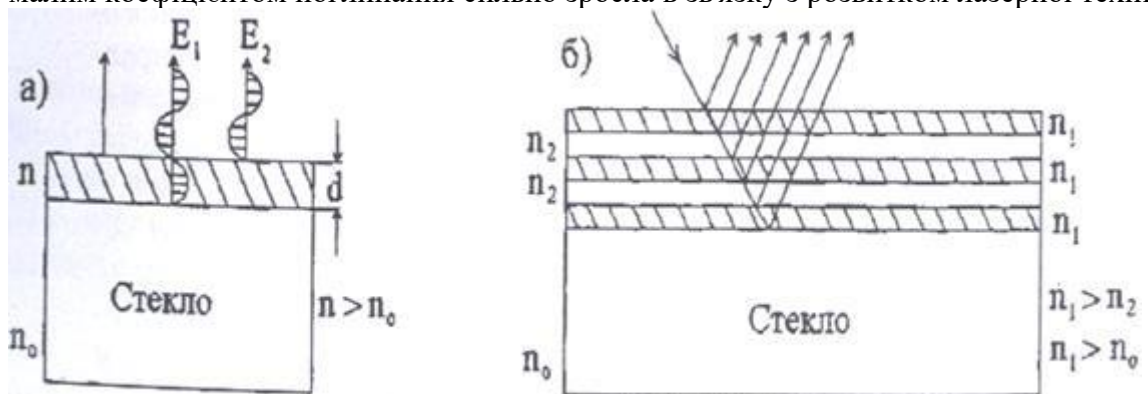


Рис.3

На рис.3 представлена схема, яка пояснює збільшення коефіцієнта відбивання скляної пластинки з показником заломлення n_0 за рахунок нанесення на її поверхню діелектричної плівки з показником заломлення $n > n_0$. Товщина такої плівки визначається з умови:

$$n \cdot d = \frac{\lambda}{4}$$

де $n \cdot d$ - оптична товщина плівки, λ - довжина хвилі, для якої коефіцієнт відбиття буде максимальним.

Оптична різниця ходу інтерферуючих хвиль (відбитих від межі розділу повітря - плівка і плівка - скло) становить в цьому випадку

$$\Delta = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} = \lambda$$

тобто відповідає максимуму інтенсивності.

Додаткова різниця ходу хвиль з'являється в зв'язку з тим, що при відображенні хвилі на межі повітря-плівка відбувається втрата напівхвилі, оскільки $n_{\text{пов}} < n$. При цьому проходять хвилі послаблюють одна одну.

Отримати більше значення коефіцієнта відбиття ($R_1 > 30\%$) таким чином проте не вдається. Для досягнення цієї мети необхідно перейти до багатопроменевої інтерференції, яка здійснюється в багатошарових діелектричних дзеркалах.

Такі дзеркала отримують нанесенням на прозору підкладку тонких діелектричних шарів з однаковою оптичною товщиною (чвертьхвильові шари):

$$n_1 \cdot d_1 = n_2 \cdot d_2 = \frac{\lambda}{4}$$

але з різними показниками заломлення: між двома шарами діелектрика з високим показником заломлення n_1 розміщують шар діелектрика з малим показником. В цьому випадку всі відбиті хвилі синфазні підсилюють одна одну в результаті інтерференції. Різниця ходу, яку відбиті промені набувають в кожному з шарів, становить при нормальному падінні:

$$n_1 \cdot d_1 = 2n_2 \cdot d_2 = \frac{\lambda}{2}$$

Для деякого інтервалу довжин хвиль в результаті інтерференції всіх взаємодіючих хвиль виходить максимум, ширина якого тим менше, чим більше число інтерферуючих пучків. Комбінуючи шари різної товщини, можна отримувати потрібні спектральні криві для коефіцієнта відбиття R_1 . Для отримання значень $R_1 \sim 99\%$ і більше (такі коефіцієнти необхідні для лазерної техніки) необхідно нанести 11-13 шарів і більше (рис.36). Такі інтерференційні дзеркала відбивають в досить вузькій спектральній області, і чим більше коефіцієнт відбиття, тим вужче область довжин хвиль, для якої реалізується таке значення R_1 ..

г) Інтерференційні світлофільтри.

Дія їх заснована на явищі багатопроменевої інтерференції. Найпростіші світлофільтри складаються з плоскопараллельної пластинки типу інтерферометра Фабрі-Перо з дуже малою відстанню d між дзеркалами (порядку декількох довжин хвиль або декількох десятків довжин хвиль). Наприклад, застосовуються інтерференційні фільтри, виготовлені в такий спосіб: на скляну підкладку p (рис.4) методом електронно-променевого напилення в вакуумі нанесені послідовно діелектричне дзеркало S_1 прозорий розділовий шар D і друге діелектричне дзеркало S_2 . Центральний елемент фільтра D виконаний з SiO_2 і має

$$d = \frac{\lambda_m}{2n}$$

товщину $d = \frac{\lambda_m}{2n}$, де λ_m - довжина хвилі, відповідна максимуму пропускання фільтра (при нормальному падінні променів), $n = 1,45$ - показник заломлення шару.

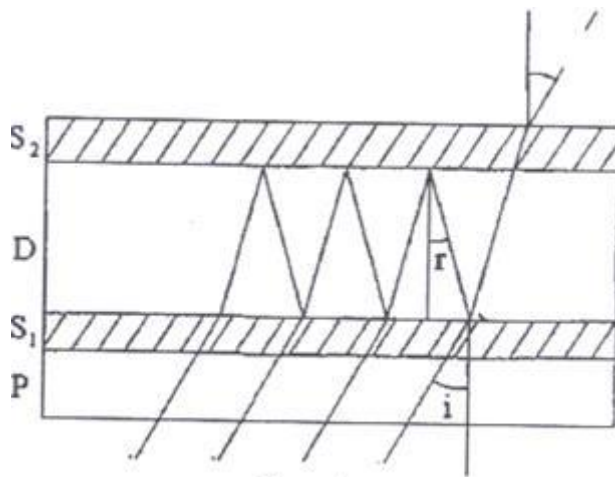


Рис.4

Кожне дзеркало вдає із себе одинадцять послідовних шарів ZrO_2 - і SiO_2 з оптичними

товщинами, рівними $\frac{\lambda_m}{4}$. Дзеркала S_1 і S_2 мають коефіцієнти відбиття R близькі до одиниці. Падаючі на світлофільтр промені зазнають багаторазові відбиття від дзеркальних поверхонь S_1 і S_2 , внаслідок чого виникають промені 1,2,3,4, які, інтерферують між собою, дають в світлі розподіл інтенсивності з різкими смугами пропускання. Цей розподіл залежить від різниці ходу між сусідніми променями, від коефіцієнтів відбивання і поглинання дзеркал. Якщо промінь падає на світлофільтр під кутом i і набуває в центральному шарі багатократне віддзеркалення, то два послідовно виходячих променя матимуть різницю ходу (див. Рис. 4):

$$\Delta = 2dn \cos r = 2dn \sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2},$$

де r - кут заломлення.

Інтерференція на максимум буде спостерігатися за умови:

$$\Delta = 2dn \cos r = m\lambda_m,$$

з якої випливає, що значення довжини хвилі максимуму пропускання світлофільтра зменшується зі збільшенням кута заломлення r або кута падіння i . Таким чином, якщо оптична товщина центрального шару фільтра дорівнює dn то є ряд смуг пропускання, довжини хвиль максимумів яких складають відповідно (при нормальному падінні):

$$\lambda_{m1} = \frac{2dn}{1}, \lambda_{m2} = \frac{\lambda_{m1}}{2} = \frac{2dn}{2}, \dots, \lambda_{mN} = \frac{\lambda_{mN-1}}{mN} = \frac{2dn}{mN}.$$

Рис.5 схематично представляє смуги пропускання інтерференційного світлофільтру. Фільтри, призначені для виділення першої найбільш довгохвильової смуги пропускання, називаються фільтрами першого порядку. Вони мають оптичні товщини $dn = \lambda_{m1}$ і потребують подавлення лише короткохвильових максимумів пропускання з довжиною хвилі λ_{m2} , λ_{m3} і т.д.

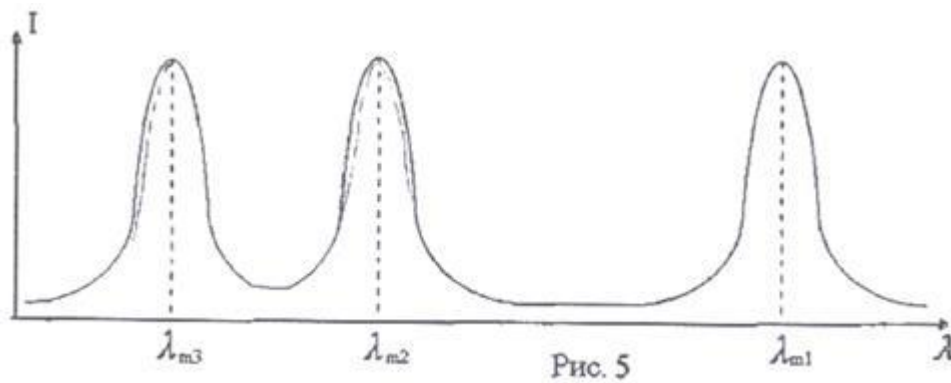


Рис. 5

Зазвичай це легко здійснюється або спеціальними абсорбційними фільтрами, або поглинанням матеріалу підкладки самого фільтра. Відзначимо, що спектр пропускання інтерференційного фільтра поряд з λ_{m1} , λ_{m2} матиме ряд інших смуг різної інтенсивності, пов'язаних зі складним характером інтерференції на багатошаровому покритті фільтра. Наприклад для інтерференційних світлофільтрів С1, С2 і С3 значення λ_{m1} рівні 629, 567 і 496 нм відповідно.

д) Дисперсійні світлофільтри.

Дія таких фільтрів заснована на дисперсії світла - залежності показника заломлення від довжини хвилі. Вони являють собою кювету, наповнену порошком з прозорого матеріалу. У кювету заливається рідина, залежність показника заломлення якої від довжини хвилі така, що показники заломлення рідини (1) і порошку (2) збігаються лише для певної довжини хвилі (рис.6).

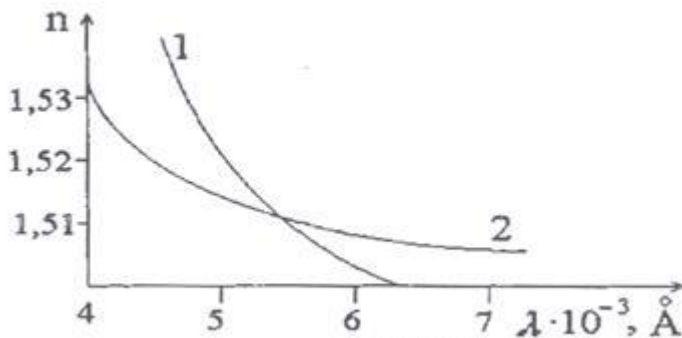


Рис.6

Тоді кювета оптично однорідна для променів світла цієї довжини хвилі, але розсіює випромінювання інших довжин хвиль, що лежать по обидва боки від заданої. Щоб смуга пропускання фільтра була вузькою, необхідно щоб нахили кривих дисперсії рідини і порошку розрізнялися якомога більше.

Зазвичай дисперсійні С. виготовляють з порошоків безбарвних стекел, залитих органічними рідинами. Змінюючи ПЗ рідини, змінюють λ_0 . То ж відбувається при зміні температури. Висока температурна чутливість приводить до необхідності термостатування дисперсійних С., що обмежує їх використання.

Основи роботи спектрального приладу

Основним призначенням спектрального приладу є розкладання випромінювання складної структури на елементарні (одночастотні, монохроматичні) складові й вимірювання їх інтенсивності. Іншими словами, спектральний прилад проводить гармонічний аналіз випромінювання. Всі відомі методи розкладання випромінювання на елементарні складові можна поділити на дві групи. *Перша* група методів – просторове розкладання випромінювання в спектр або селективна фільтрація. *Друга* група методів – виділення спектральних складових за допомогою оптичної модуляції або селективна модуляція. Вказані 2 методи мають принципову відмінність. Однак в загальному вигляді,

не зважаючи на той чи інший метод, роботу будь-якого спектрального приладу можна представити так. Нехай на вхід спектрального приладу подається складний сигнал, спектральний розподіл якого описується функцією $f(\lambda)$. Спектральний прилад розкладає та реєструє цей розподіл. Прилад в цілому можна охарактеризувати деякою функцією $\tilde{a}(\lambda, \lambda')$, яка описує його спроможність виділяти вузькі ділянки спектру шириною $d\lambda$ і називається апаратною функцією приладу. Ясно, що чим менша ширина функції $\tilde{a}(\lambda, \lambda')$, тим точніше, детальніше може бути відновлено розподіл $f(\lambda)$. Зареєстрований спектральний розподіл енергії на виході $F(\lambda)$ буде описуватись функцією

$$F(\lambda) = \int_0^{\infty} f(\lambda') \tilde{a}(\lambda, \lambda') d\lambda'$$

(1). Інтеграл (1) носить назву згортки функцій

$\tilde{a}(\lambda, \lambda')$ та $f(\lambda)$. Зрозуміло, що тотожність функцій $F(\lambda) \equiv f(\lambda)$ можлива тільки у

випадку, коли $\tilde{a}(\lambda, \lambda')$ є д-функцією. Процес вимірювання спектрів зводиться до наступного: досліджуване випромінювання з розподілом $f(\lambda)$ направляється на селективний фільтр або селективний модулятор, який здійснює вибірку елементарних компонент функцією $\tilde{a}(\lambda, \lambda')$. Візуально представити принцип роботи спектрального приладу можна за допомогою рисунку 1.

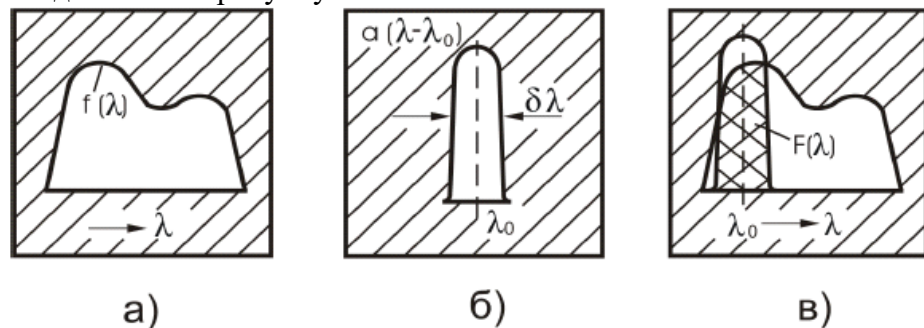


Рис.1. Візуальне представлення принципу роботи спектрального приладу: а – вхідний сигнал; б – апаратна функція; в – формування вихідного сигналу.

а) селективна фільтрація

Метод селективної фільтрації є історично першим і найбільш поширеним методом спектрометрії. Прилади, що працюють за принципом селективної фільтрації, можуть бути одно- та багатоканальними. В одноканальних приладах досліджуване випромінювання з розподілом $f(\lambda)$ посилається на селективний фільтр, який виділяє з потоку спектральні компоненти шириною $d\lambda$ в околі довжини хвилі λ' й може перенастроюватися (дискретно або неперервно), виконуючи сканування по спектру в часі за деяким законом $\lambda'(t)$. Виділені компоненти реєструються приймачем випромінювання, запис сигналів з якого дає функцію часу $F(t)$. Перехід від аргументу t до аргументу λ (за законом $\lambda'(t)$) дозволяє отримати функцію $F(\lambda)$ – просторово розкладений спектр. У багатоканальних приладах інформація про спектр, який спостерігається – $F(\lambda)$, отримується не в результаті сканування по λ , а шляхом одночасної реєстрації потоків випромінювання різних довжин хвиль $\lambda', \lambda'', \lambda'''$, ... декількома приймачами випромінювання або фотографічним матеріалом. Одноканальні прилади можуть бути одно- та двопробеневими. Приклад одноканальних спектральних приладів з селективною фільтрацією: - спектрофотометр Пульфриха (двопробеневий прилад); - монохроматор УМ-2 (однопробеневий прилад). Приклад багатоканальних спектральних приладів з селективною фільтрацією: - спектрографи ИСП-30, ИСП-51; - квантометри.

б) селективна модуляція

Методи селективної модуляції отримали розвиток в середині 60-х років минулого століття, тому їх іноді називають новими методами спектрометрії. Вони основані на принципі оптичної модуляції досліджуваного випромінювання, коли розділення випромінювання за довжинами хвиль переноситься з оптичної частини приладу в електричну. Спектральні прилади, що працюють по принципу селективної модуляції, також можуть бути одноканальними та багатоканальними. В одноканальному приладі випромінювання складної структури з розподілом $f(\lambda)$ посиляється на спектрально-селективний модулятор, який модулює з деякою частотою $\omega_0 = \text{const}$ лише потік із спектральним інтервалом $\Delta\lambda$ в околі довжини хвилі λ' , а решта потоку залишається немодульованою. Модулятор шляхом перенастроювання послідовно модулює різноманітні λ' з тією ж частотою ω_0 й на виході в результаті отримується функція $F(t)$, значення якої пропорційні відповідним інтенсивностям у розподілі $f(\lambda)$. Тобто функція розкладання випромінювання за довжинами хвиль переноситься з оптичної в електричну частину приладу. В основі багатоканальних приладів із селективною модуляцією лежить принцип мультиплексування. Його суть полягає в одночасному прийманні в закодованій формі потоку випромінювання від багатьох спектральних елементів одним приймачем. З цією метою випромінювання довжин хвиль $\lambda', \lambda'', \lambda''', \dots$ одночасно модулюється різними частотами $\omega', \omega'', \omega''' \dots$. Накладання відповідних сигналів A', A'', A''' утворює в приймачі складний сигнал, частотний спектр якого несе інформацію про спектр вхідного сигналу. При невеликій кількості каналів компоненти з частотами $\omega', \omega'', \omega''' \dots$ виділяються з сумарного сигналу за допомогою електричних фільтрів, відновлюючи таким чином шуканий розподіл $F(\lambda)$ пропорційний розподілу $f(\lambda)$.

Узагальнена структурна схема спектрального приладу

Під структурною схемою любого приладу розуміють ланцюг, що складається з автономних ланок, кожна з яких виконує визначену функцію. Усі ланки в сукупності виконують нову, також визначену функцію.

До складу спектрального приладу входять (рис. 2):

- джерело випромінювання (1);
- передаюча оптична система (2);
- диспергуючий пристрій (пристрій для розкладання випромінювання в спектр) (3);
- приймаюча оптична система (4);
- приймач випромінювання (5);
- реєструючий пристрій (6).

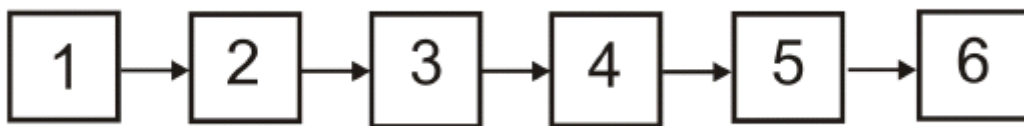


Рис. 2. Структурна схема спектрального приладу

Розглянемо які функції виконує кожна з ланок спектрального приладу.

Джерело випромінювання створює матеріальний носій інформації – потік випромінювання; воно може конструктивно входити до складу приладу (наприклад, ртутна лампа), або може бути віддалене від нього на значну відстань (наприклад, Сонце). Джерело випромінювання може виконувати функцію випромінювача, що збуджує безпосередньо спектр досліджуваної проби (об'єкта досліджень). Наприклад, для вивчення спектрів поглинання джерело являється засобом утворення суцільного спектру, на фоні якого в подальшому спостерігаються лінії та смуги поглинання. Досить широкий клас джерел безпосередньо являють собою об'єкти дослідження (Сонце, зірки, дуги).

Таким чином, призначення джерела – прямо чи опосередковано нести корисну інформацію.

Головною функцією *передаючої системи* являється формування потоку випромінювання від джерела й направлення його на диспергуючий пристрій з якнайменшими втратами.

Головною функцією *диспергуючого пристрою* є розкладання випромінювання на монохроматичні складові. Це найбільш важливий, головний пристрій спектрального приладу.

Приймальна оптична система призначена для формування на приймачі потоку, розкладеного в спектр.

Приймач випромінювання перетворює сигнал, що переноситься потоком випромінювання в інший сигнал: або у вигляді електричного струму, або у вигляді оптичної густини почорніння, або у вигляді зорового сприйняття.

Реєструючий пристрій виконує функцію підсилення сигналу, перетворення його в зручну форму для запису спектру.

Слід відмітити, що деякі пристрої можуть бути відсутніми або можуть бути суміщені в одному пристрої. Дуже гарний і наглядний приклад – фотографічна пластинка: вона є одночасно приймачем випромінювання, реєструючим пристроєм і підсилювачем.

Класифікація спектральних приладів

Існує ряд ознак, за якими можна класифікувати спектральні прилади. До числа основних ознак відносять:

- принцип дії диспергуючого пристрою;
- тип оптичної системи приладу;
- робоча область спектра;
- фізичне явище, що лежить в основі дії приладу;
- спосіб спостереження і реєстрації спектру;
- призначення.

Розглянемо як поділяють спектральні прилади за визначеними ознаками.

За *принципом розкладання випромінювання в спектр* (принципом дії диспергуючого пристрою) розрізняють: прилади – селективні фільтри та прилади – селективні модулятори.

За *типом оптичної системи* приладів розрізняють: звичайні, з окремо оформленими коліматорною та камерною частинами та автоколімаційні, в яких конструктивно суміщені коліматор та камера.

За *робочою областю спектру* розрізняють спектральні прилади:

- для дальньої (вакуумної) УФ області ($\lambda=1\div 185$ нм);
- для УФ області (185÷380 нм);
- для видимої області (380÷760 нм);
- для ближньої, середньої, дальньої ІЧ областей відповідно (760÷2500 нм), (2,5÷50)10³ нм, (5÷100)10⁴ нм.

За *фізичним явищем*, що лежить в основі дії приладу розрізняють:

- дисперсійні (призмові) спектральні прилади;
- дифракційні спектральні прилади;
- інтерференційні спектральні прилади;
- модуляційні спектральні прилади.

Модуляційні в свою чергу за типом модулятора поділяють на:

- інтерференційні; - інтерференційно-поляризаційні; - растрові,

а за видом модуляції на:

- амплітудні; - частотні.

За *способом реєстрації* розрізняють такі типи спектральних приладів:

- візуальні;
- з фотографічною реєстрацією;
- з фотоелектричною реєстрацією.

За методом спостереження розрізняють:

- монохроматори (прилади для спостереження вузьких ділянок спектру);
- поліхроматори (прилади для одночасного спостереження досить широкої ділянки спектра);

Всі монохроматори – одноканальні прилади, всі поліхроматори – багатоканальні прилади. Тут доцільно зупинитися на деяких важливих подробицях багатоканальних приладів:

- при заданому часі експерименту t вони дозволяють виміряти спектр випромінювання джерела з максимальним відношенням сигнал/шум;
- при заданому співвідношенні сигнал/шум вони дозволяють затратити мінімальний час на вимірювання спектру.

Для спрощення розуміння сказаного будемо вважати, що причиною похибок експерименту є шум приймача випромінювання, причому його рівень не залежить від значення потужності випромінювання. Відомо, що при n -кратному вимірюванні будь-

якого параметра точність у визначенні його величини збільшується в \sqrt{n} разів.

Нехай одноканальним приладом необхідно виміряти N спектральних ліній. На

вимірювання кожної лінії буде затрачено час $\Delta t = t / N$. Очевидно, що за час t на багатоканальному приладі з N каналами можна виміряти інтенсивність спектральних ліній

\sqrt{N} раз, що рівнозначно підвищенню точності вимірювань в \sqrt{N} разів.

Наведений перелік ознак класифікації не являється вичерпним. Спектральні прилади можна класифікувати за величиною дисперсії, за роздільною здатністю, за світлосилою, за швидкодією тощо.

Поділ спектральних приладів за призначенням

Розглянемо класифікацію спектральних приладів за призначенням.

1) Спектроскоп

Спектроскоп – це прилад, призначений для візуального спостереження спектрів. Його структурна схема зображена на рис. 3.

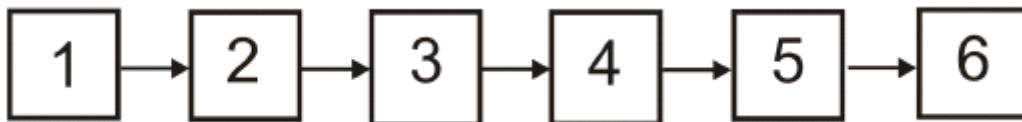


Рис.3. Структурна схема спектроскопа: 1 – джерело випромінювання; 2 – вхідна щілина; 3 – об’єктив вхідного коліматора; 4 – диспергуючий елемент (призма, дифракційна ґратка); 5 – об’єктив вихідного коліматора (камери); 6 – окуляр.

Спектр розглядається через окуляр оком. Через відносно малі можливості ока, як приймача випромінювання (обмеженість області спектра, залежність точності вимірювань від яскравості спектра, фізіологічного стану спостерігача), спектроскопи мають в наш час обмежене застосування.

2) Спектрограф

Спектрограф – прилад, в якому приймач випромінювання (фотографічний матеріал) одночасно реєструє весь спектр, розгорнутий у фокальній площині об’єктива вихідного коліматора (рис.4.).

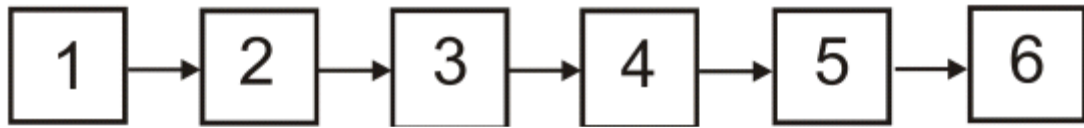


Рис.4. Структурна схема спектрографа: 1 – джерело випромінювання; 2 – вхідна щілина; 3 – об’єктив вхідного коліматора; 4 – диспергуючий елемент; 5 – об’єктив вихідного коліматора; 6 – приймач випромінювання (фотоматеріал)

Всі спектрографи – поліхроматори. Вони можуть бути укомплектовані різноманітними приставками.

3) Спектрометр

В широкому розумінні слова спектрометр – це прилад для вимірювання деякої фізичної величини f за параметром x . Наприклад: бета – спектрометр – прилад для вимірювання функції розподілу електронів за швидкостями; мас-спектрометр – прилад для вимірювання функції розподілу атомів за масами. У вузькому (оптичному) розумінні слова – це прилад для вимірювання оптичних спектрів за допомогою фотоелектричних (або теплових) приймачів випромінювання.

Структурна схема спектрометра зображена на рис.5.

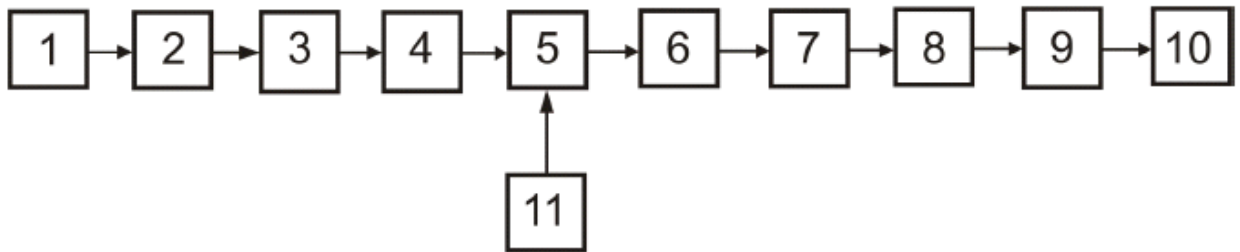


Рис. 5. Структурна схема спектрометра: 1 - джерело випромінювання; 2 - модулятор; 3 - вхідна щілина; 4 - об’єктив вхідного коліматора; 5 - диспергуючий пристрій; 6 - об’єктив вихідного коліматора; 7 - вихідна щілина; 8 - приймач випромінювання; 9 - електричний підсилювач; 10 - індикаторний пристрій (осцилограф, цифро-друкуючий пристрій, вимірювальний пристрій, ЕОМ); 11 - скануючий пристрій

Як правило оптична частина приладу представляє собою монохроматор. Виділення тої чи іншої частини спектру забезпечується скануванням. Скануючий пристрій змінює положення диспергуючого пристрою відносно нерухомої вхідної та вихідної щілин.

Модулятор слугує для переривання потоку випромінювання з певною частотою. Це дозволяє збільшити відношення сигнал/шум і використати більш сучасну електронно-вимірювальну апаратуру.

Спектрометр може бути виконаний і у поліхроматичному (багатоканальному) варіанті. При цьому вздовж фокальної площини вихідного об’єктива розташовують декілька щілин із приймачами випромінювання. Багатоканальні спектрометри називають *квантометрами*.

4) Спектрофотометр

Спектрофотометром називають прилад, призначений для вимірювання різниці або відношення спектральних потоків випромінювання, що пройшли через вимірювальний канал та канал порівняння. Спектрофотометри, як правило, використовують для аналізу спектрів поглинання. Частіше всього вони є двопроменевими приладами: в одному каналі світло проходить через досліджувану речовину, в іншому – через еталон.

Усі спектрометри, як правило, являються монохроматорами.

Розрізняють 3 типи спектрофотометрів:

- з нульовим;
- з відліковим;
- з диференціальним методами вимірювання.

Таким чином існує всього 4 типи спектральних приладів. Тим не менше у літературі зустрічаються інші найменування спектральних приладів, однак усі ці прилади при детальному аналізі їх конструкції можуть бути віднесені до перелічених вище типів.

1. *Монохроматор* – прилад для виділення вузького спектрального діапазона. За побудовою це спектрометр без приймача випромінювання.

2. *Стілоскоп* – прилад, який являється різновидом спектроскопа і призначений для напівкількісного аналізу металів. У нього є шкала довжин хвиль з вказаним положенням найважливіших аналітичних спектральних ліній.

3. *Стілометр* – відрізняється від стілоскопа тим, що має пристрій для порівняння яскравості аналітичних ліній.

Усі модуляційні спектральні прилади за принципом побудови являються спектрометрами. Серед них розрізняють:

- СІСАМ – Спектрометр з Інтерференційною Селективною Амплітудною Модуляцією;
- поляризаційний СІСАМ – також працює за принципом амплітудної модуляції;

- Фур'є-спектрометр – прилад представляє собою спектрометр побудований на основі інтерферометра Майкельсона, з допомогою якого виконується частотна модуляція випромінювання;

- матричний спектрометр (спектрометр Адамара);

- СІС – Селективно-Інтерференційний Спектрометр.

Основними характеристиками спектральних приладів є:

1. Лінійна дисперсія, обумовлена величиною $dl/d\lambda$, тобто числом міліметрів, що припадають на 1 нм інтервалу спектру. На практиці зазвичай використовують зворотню величину $d\lambda/dl$, звану зворотною лінійною дисперсією, яка визначає величину інтервалу довжин хвиль, що вимірюється в нанометрах, що припадає на 1 мм довжини спектра. За лінійною дисперсією розрізняють спектральні прилади малої, середньої, великої та високої дисперсії. Призмові прилади зазвичай мають малу і середню дисперсії (10 ÷ 1 нм / мм). Призмові прилади та прилади з дифракційними ґратами володіють великою лінійною дисперсією (1 ÷ 0,1 нм / мм). Інтерференційні прилади мають високу лінійну дисперсію (0,01 ÷ 0,001 нм / мм).

Спектр насамперед характеризується дисперсією, тобто тим, наскільки змінюється кут відхилення променів залежно від довжини хвилі. Кількісною мірою в цьому випадку є кутова дисперсія приладу $D_\phi = d\phi / d\lambda$ – приріст кута відхилення $d\phi$ при зміні довжини хвилі на $d\lambda$.

2. Роздільна здатність (теоретична і практична). Теоретична роздільна здатність визначається дифракцією в чинному отворі спектрального приладу і виражається відношенням

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda},$$

де - $\Delta\lambda$ різниця довжин хвиль двох дуже близьких спектральних ліній, ще розрізняються окремо при нескінченно малій вхідній щілині приладу. Практична роздільна здатність визначається шириною вхідної щілини, роздільною здатністю приймача випромінювання (очі, фотографічної пластинки), шириною вихідної щілини приладу і аберацією

фокусуючої і диспергуючої систем. Якщо d - найменша відстань, яка розрізняється окремо

приймачем з урахуванням аберацій (або ширини вихідної щілини), то
$$\Delta\lambda = d \frac{d\lambda}{dl}$$

Тоді практична роздільна здатність визначається відношенням
$$R_{\text{пр}} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{dl}{d\lambda}$$
,

тобто пов'язана з лінійною дисперсією приладу.

Роздільні здібності приладів з різними диспергуючими системами істотно розрізняються. Зокрема, призменні спектральні прилади з малою і середньою дисперсією мають порівняно малу роздільну здатність. Вона визначається величиною $10^3, 10^5$. Прилади з дифракційними ґратами можуть мати роздільну здатність $10^5, 5 \cdot 10^5$. Інтерференційні прилади мають дуже високу роздільну здатність, яка доходить до декількох мільйонів.

3. Світлосила характеризує освітленість в спектрі, дану приладом, або променистий потік, що проходить через вихідну щілину приладу. Нехай B_λ - яскравість вхідної щілини приладу. Під цією величиною будемо розуміти інтегральну яскравість для всієї спектральної лінії, а якщо йдеться про безперервний спектр, середню величину функції розподілу яскравості по довжинах хвиль для даної ділянки спектра. Очевидно, що як інтегральна яскравість для спектральної лінії, так і функція розподілу яскравості для безперервного спектра, визначаються джерелом випромінювання, які освітлюють вхідну щілину приладу. Позначимо: S - площа вхідної щілини приладу; Ω - тілесний кут, під яким видно з центру вхідної щілини чинне отвір приладу; τ_λ - прозорість оптики приладу. Тоді повний променистий потік F_λ , що проходить через прилад і досягає спектра, буде:

для спектральної лінії
$$F_\lambda = B_\lambda S \Omega \tau_\lambda$$
,

для ділянки неперервного спектру
$$F_\lambda = B_\lambda S \Omega \tau_\lambda \Delta\lambda$$
.

Тут $\Delta\lambda$ визначається геометричним зображенням вхідної щілини приладу. Якщо цей променистий потік повністю проходить через вихідну щілину приладу і потрапляє на приймач (наприклад, фотоелемент), то світлосила приладу по світловому потоку

визначається наступним виразом:
$$L_\lambda = \frac{F_\lambda}{B_\lambda} = S \Omega \tau_\lambda \quad \text{або} \quad L_\lambda = S \Omega \tau_\lambda \Delta\lambda$$

У разі фотографування спектру має значення освітленість, створювана на фотопластинці. Якщо променистий потік F_λ падає на площу S_1 (визначається геометричним збільшенням

приладу), то освітленість визначається виразом:
$$E_\lambda = B_\lambda \frac{S}{S_1} \Omega \tau_\lambda$$
 для спектральної лінії,

$$E_\lambda = B_\lambda \frac{S}{S_1} \Omega \tau_\lambda \Delta\lambda$$
 для неперервного спектра.

$$L_{\lambda} = \frac{S}{S_1} \Omega \tau_{\lambda} \quad , \quad L_{\lambda} = \frac{S}{S_1} \Omega \tau_{\lambda} \Delta \lambda$$

Світлосила в цьому випадку відповідно буде:

Світлосила спектрального приладу виражається по-різному для фотоелектричної і фотографічної реєстрації спектра.

Принцип роботи монохроматора: його оптична схема, робота та призначення окремих вузлів

Основою кожного спектрального приладу є монохроматор, принципова схема якого наведена на рис.8. Освітлювач 1 (лампа Л, конденсор К) створює рівномірну освітленість у площині щілини Щ₁ яка є вторинним джерелом світла з однаковою на всій площі яскравістю. Передній коліматор 2 необхідний для створення паралельного пучка променів. Щілина Щ₁ знаходиться у фокусі об'єктиву О₁ коліматора і тому проектується на диспергуючий пристрій 3 паралельним пучком. Внаслідок цього монохроматичні промені однакових кольорів, що виходять з диспергуючого пристрою, є також паралельними (на рисунку наведені крайні промені).

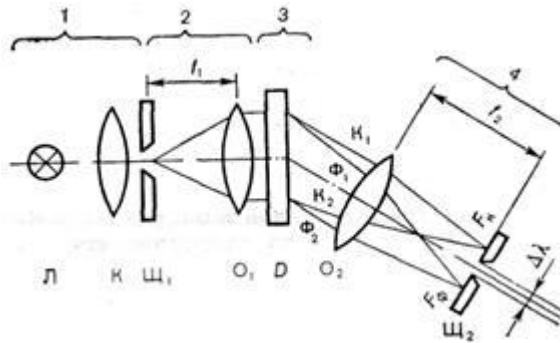


Рис.8. Принципова схема монохроматора

Переміщаючи щілину Щ₂ уздовж спектру, по черзі виділяють інтервали D1 за всією його довжиною. У багатьох схемах приладів передбачено не переміщення щілини, а поворот диспергуючого пристрою відносно нерухомої осі. З рисунка видно, що кожна точка щілини Щ₁ створює в спектрі монохроматичні точки (F_к і F_ф). Отже, уся щілина зображається монохроматичними смужками. Це зрозуміло, якщо лампа Л випускає монохроматичне світло. В цьому випадку на об'єктив О₂ прямує не в'яло променів, а монохроматичний паралельний пучок. Об'єктив О₂ зображує щілину у вигляді монохроматичної смужки, розміри якої визначаються його фокусною відстанню та шириною щілини. Смужка (спектральна лінія) – зображення вхідної щілини коліматора, що утворюється об'єктивом вихідного коліматора. Складне світло створює безліч спектральних ліній, які взаємно перекриваються при суцільному спектрі. Перекривання тим більше, чим ширше щілина. Тому монохроматичність випромінювання, що пропускається вихідною щілиною, зменшується з розширенням вхідній. Міра монохроматичності пучка, що пропускається щілиною Щ₂, називається *чистотою спектру*.

Монохроматор, схема якого наведена на рис. 7, називається *простим (однократним)*. Недолік приладу, що працює за цією схемою, полягає в тому, що на його вихідну щілину, окрім корисного, падає ще і паразитне випромінювання, що відбивається від внутрішніх стінок приладу та його деталей. Це знижує чистоту спектру і, отже, точність спектральних визначень.

Для зменшення інтенсивності паразитного світла усередині приладів встановлюють перегородки, чорнять внутрішні поверхні стінок і оправи лінз. Проте найбільш надійний спосіб підвищення точності вимірів полягає в застосуванні подвійних монохроматоров. Це прилади, що складаються з двох простих монохроматоров, причому вихідна щілина першого служить входною щілиною другого. Нерозкладений внаслідок светорассеяния світло, що виходить з щілини першого монохроматора, розкладається в іншому. В результаті цього спектр, що дається подвійним приладом, виходить чистим.

Освітлювальний пристрій(рис. 9). Джерело світла у монохроматорі повинно бути з рівною яскравістю за всією площею. У протилежному випадку при обробці результатів вимірювання довелося б вносити поправки на нерівномірність яскравості. Щілиною Щ_1 , перед якою встановлюється джерело, є апертурна діафрагма. Вона обмежує кут розкриття пучків, що посилають точками тіла напруження (рис. 9, а). Тому точка А зображається усім об'єктивом, а точка В – тільки його частиною. У зображенні вона виходить менш яскравою, ніж точка А; віньстуючою дії щілини. На рівномірність освітленості впливає структура поверхні джерела. Конденсор К проектує тіло напруження на об'єктив (рис. 8, б). Лінзи конденсора створюють широкий пучок, що заповнює щілину, і усі її точки освітлюються однаково.

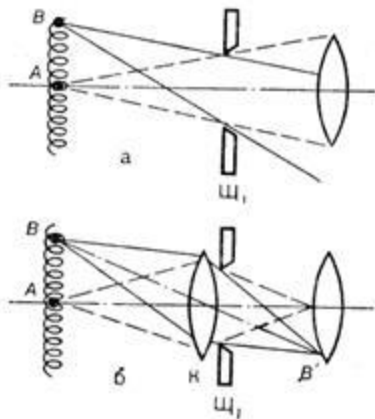


Рис. 9. Схема дії конденсорної освітлювальної системи

Коліматори. Принцип роботи обох коліматорів однаковий. Однак вони виконують протилежні функції: передній дає можливість отримувати паралельний пучок, а задній збирає його в точку. Міра паралельності променів, з якою пов'язана чистота спектру, залежить не лише від ширини щілини, але і від якості виправлення об'єктива на аберації. У деяких монохроматорах використовується принцип автоколімації. Він полягає: пучок світла, що пройшов через об'єктив коліматора, після розкладання в призмі або решітці відбивається плоским дзеркалом і фокусується тим же об'єктивом.

Щілинами коліматорів (ножами) є пари пластинок. Ножі можуть зрушуватися та розсуватися за допомогою гвинтового механізму. Краї ножів виготовляють або зігнутими, або прямими. У першому випадку виходить зігнутою та щілина. Такі щілини служать для компенсації викривлення спектральних ліній при розкладанні, особливо призмою.

Принципи роботи спектрографа: його оптична схема, робота та призначення окремих вузлів

Спектрограф – спектральний прилад, у якому приймач випромінювання одночасно реєструє весь можливий електромагнітний спектр. Приймачами випромінювання можуть бути фотоматеріали, багатоелементні фотоприймачі, електронно-оптичні

перетворювачі. Диспергувальна система (система, що поділяє потік випромінювання залежно від довжини хвилі) може бути призмою, дифракційною ґраткою тощо.

Оптична схема призмового спектрографа. Принципова схема призмового спектрографа наведена на рис. 10. Спектрограф має три основні частини: коліматор, що складається з об'єктиву 2 з фокусною відстанню f_1 і щілини 1, встановленою у фокусі об'єктиву; диспергуючої системи 3, що складається з однієї або декількох заломлюючих призм; і камери, що складається з об'єктиву 4 з фокусною відстанню f_2 і фотопластини 5, розташованою у фокальній площині об'єктиву. Показник заломлення матеріалу призми не однаковий для різних довжин хвиль: $n=n(\lambda)$. Тому неоднорідний за спектральним складом паралельний пучок променів, що формується коліматором і що падає на призму, розбивається в ній на монохроматичні пучки за різними напрямками. Камерний об'єктив 4 збирає ці пучки у своїй фокальній площині, створюючи на фотопластині 5 послідовність монохроматичних зображень щілини – спектральні лінії. У своїй сукупності останні утворюють спектр досліджуваного джерела світла.

За призмою оптична система діє як фотокамера. У монохроматичному світлі камерний об'єктив 4 із фокусною відстанню f_2 утворює у фокальній площині зображення вхідної щілини. У білому світлі зображення вхідної щілини розтягується в прямокутник, оскільки після проходження призми промені різних довжин хвиль мають різний нахил до оптичної осі. Найбільше відхиляються короткохвильові промені (у скляній призмі – фіолетові, для яких показник заломлення максимальний). Із цієї ж причини фокусна відстань камерного об'єктива для них мінімальна, а для червоних – максимальна. Тому фокальна площина камерного об'єктива має нахил до оптичної осі тим більший, чим більша хроматична аберація об'єктива. Щоб уникнути хроматичної аберації, по можливості використовують ахроматичні об'єктиви. У спектрографах у фокальній площині камерного об'єктива розташовують касету з фотопластиною або фотоплівкою, на якій фіксується спектр.

Фокальна площина може бути плоскою або циліндричною. Для приладів з ахроматичною фокусувальною оптикою фокальна площина або площина, дотична до неї, розташована під кутом до оптичної осі, близьким до 90° . В інших випадках кут значно відрізняється від 90° . Спектральні прилади з увігнутими дифракційними решітками не мають особливої ролі грає сама решітка.

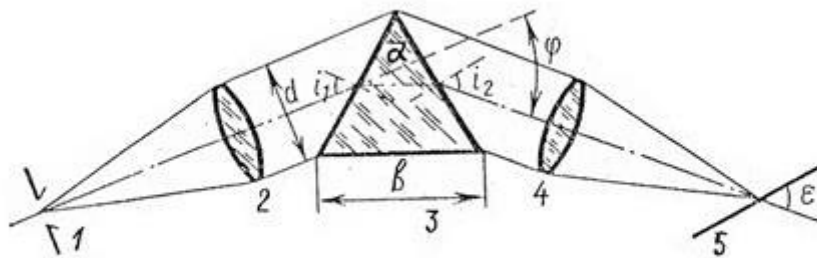


Рис. 10. Оптична схема призмового спектрографа: 1 – вхідна щілина, 2 – об'єктив коліматора, 3 – призма, 4 – камерний об'єктив, 5 – фотопластина, d – діючий отвір приладу, b – довжина основи призми, φ – кут відхилення променя призмою.

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} f_2 = D_\varphi f_2$$

Формула для дисперсії справедлива, якщо для камерного об'єктива виправлено хроматичну аберацію і фокальна площина перпендикулярна до оптичної осі приладу. Врахування нахилу фокальної площини до

осі приладу перетворює вираз на $D_1 = D \varphi f_2 / \sin \varepsilon$, де ε – кут між фокальною площиною та оптичною віссю приладу.

Роздільна здатність спектрографа. Спектральний прилад відображує строго монохроматичне випромінювання, освітлююче вхідну щілину, у вигляді деякого розподілу освітленості. Цей розподіл називають *інструментальним контуром спектральної лінії або апаратною функцією*. Її тип визначається спільною дією різних чинників. До їх числа належить дифракція на діючому отворі спектрографа (діючим отвором d є найменший з отворів (об'єктиву коліматора, призми або камерного об'єктиву), яке обмежує розміри перерізу паралельного пучка монохроматичних променів, що проходять через оптичну систему спектрографа (рис. 10)), різна аберация та інші похибки оптики приладу, ширина вхідної щілини і зерниста структура фотографічної емульсії. Форма інструментального контуру лінії в основному визначається його дією.

Окремі ділянки інструментального контуру якої-небудь лінії вносять формують контури інших ліній. Таким чином, монохроматичні складові початкового випромінювання утворюють кожний елемент реального контуру лінії у спектрі. Таким чином, спектр на виході приладу складають дві функції – істинний розподіл енергії в джерелі та апаратна функція приладу. Спектральний прилад не завжди здатний передати два однакових за довжиною хвилі випромінювання у вигляді окремих спектральних ліній. Інструментальні контури таких ліній перекриваються. При цьому прилад не має дві близькі спектральні лінії.

Для оцінки можливостей приладу створювати окремо спектральні лінії близьких за довжиною хвилі враховують роздільну здатність (роздільну силу):

$$R = \frac{\lambda}{\delta \cdot \lambda} \quad (4.12)$$

де $\delta \lambda$ – межа дозволу приладу, що визначається шириною інструментального контуру лінії.

В результаті дифракції монохроматичного паралельного пучка на діючому отворі прямокутної форми (на призмі) спектральна лінія має форму, показану на рис. 11, а.

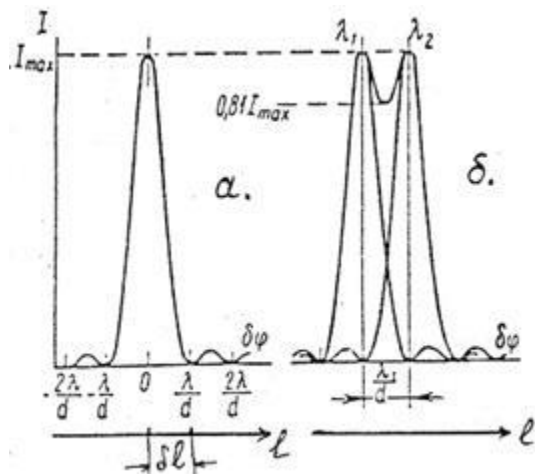


Рис. 11. Розподіл інтенсивності світла у фокальній площині приладу, що виникає в результаті дифракції на діючому отворі прямокутної форми для нескінченно вузької щілини спектрографа: а) поодинокі монохроматичні спектральні лінії; б) дві близькі монохроматичні лінії

Межу дозволу $\delta \lambda$ можна розрахувати за критерієм Релея, згідно з яким дві спектральні лінії рівної інтенсивності є дозволеними при головному дифракційному максимумі

інтенсивності однієї лінії, що співпадає з першим мінімумом (рис. 11, б). Кутова

відстань від першого мінімуму до центру дифракційної картини дорівнює $\delta \cdot \lambda = \frac{\lambda}{d}$ (кут дифракції малий при $d \gg \lambda$). Записавши для d його вираз через кутову

дисперсію $\delta \cdot \varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \delta \cdot \lambda$, отримуємо $\frac{\lambda}{d} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \delta \cdot \lambda$. Тому теоретичне значення для дозволяючої сили призми складає

$$R_{\text{теор}} = d \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (4.13)$$

Таким чином, $R_{\text{теор}}$ пропорційна d , її максимальне значення досягається при заповненні діючого отвору приладу світлом.

При симетричного ході променів через призму для величини $R_{\text{теор}}$ можна отримати формулу

$$R_{\text{теор}} = b \frac{dn}{d\lambda} \quad (4.14)$$

Реальне значення роздільної здатності $R_{\text{пр}}$ менше $R_{\text{теор}}$. Воно обмежується вказаними вище чинниками і може бути розраховане за формулою (4.12), де замість d і використовується $Dl_{\text{пр}}$ – практична межа дозволу, тобто різниця довжин хвиль двох близьких ліній з провалом інтенсивності між ними 20%.

Дозволяюча сила зменшується із збільшенням ширини вхідної щілини s_1 . Для дуже вузької щілини, коли її кутовий розмір s_1/f_1 менше кута $d_j = \lambda/d$, тобто $s_1 < f_1 \lambda/d$, форма інструментального контура ще мало відрізняється від зображеної на рис. 10, а. Із зростанням s_1 лінія розширюється і при $s_1 \gg f_1 \lambda/d$ отримують щілини з геометричним зображенням, ширина якого рівна $s_2 = s_1 f_2 / (f_1 \sin \alpha)$. Граничною між цими двома випадками є нормальна ширина щілини s_n . Визначимо її. Знайдемо таку величину вхідної щілини, коли її геометричне зображення у фокальній площині приладу дорівнює ширині центральної частини головного дифракційного максимуму в цій же площині. Для цього прирівняємо лінійну відстань від центру дифракційної картини до її першого нуля (рис. 11, а) величині геометричного зображення щілини $s f_2 / f_1$. Звідси знаходимо

$$s_n = \lambda \frac{f_1}{d} \quad (4.15)$$

Ширина зображення щілини не може стати менше дифракційної межі. Тому, отримати лінії як можна тонше, марно використовувати вхідну щілину менше за нормальну.

Дифракція на вхідній щілині приладу при освітленні вхідної щілини на відстані 50–100 см від джерела світла невеликих розмірів (пунктир на рис. 12). З (4.15) можна отримати,

що $d = f_1 \frac{\lambda}{s_n}$, тобто відстань від центру цієї дифракційної картини до її першого

нуля $f_1 \frac{\lambda}{s_n}$ дорівнює величині діючого отвору d . В цьому випадку центральна частина головного максимуму розміщується в діючому отворі.

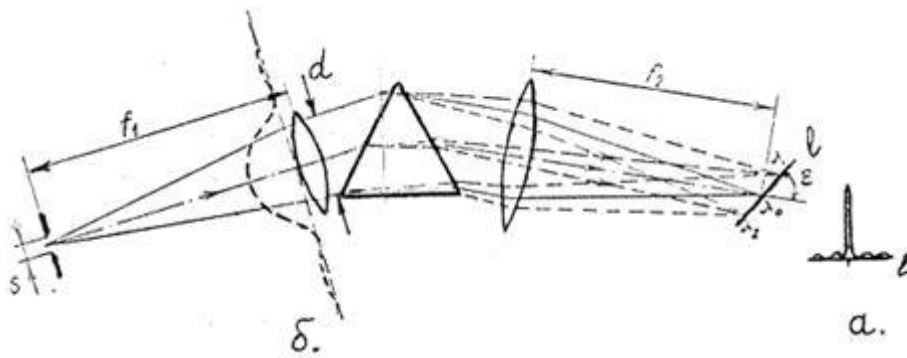


Рис. 12. Оптична схема призмового спектрографа: а) результат дифракції на діючому отворі приладу (впливає на роздільну здатність); б) результат дифракції на вхідній щілині приладу при когерентному освітленні щілини (впливає на величину світлового потоку, що досягає фокальної площини)

Зміна світлового потоку, що проходить в прилад, із зміною ширини щілини наведена на рис. 13. При $s/s_H < 1$ зі зменшенням щілини світловий потік, що проходить в прилад, і освітленість в центрі лінії швидко падають. При $s/s_H > 1$ із збільшенням щілини світловий потік (з одиниці площі щілини) слабо зростає за рахунок попадання в діючий отвір найближчих до головного дифракційних максимумів, а потім його зростання припиняється. Спектральна лінія при цьому має вигляд прямокутника, ширина якого зростає пропорційно ширині вхідної щілини.

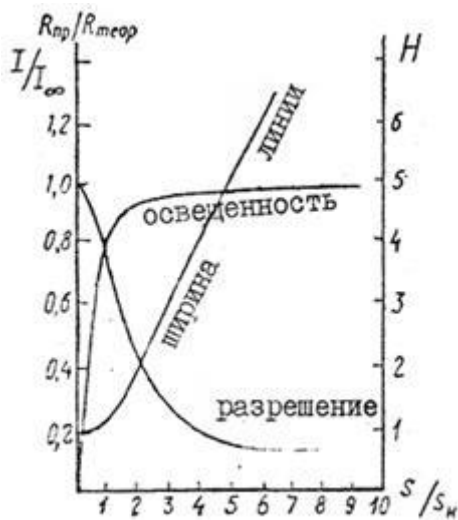


Рис. 13. Залежність освітленості в центрі лінії I/I_∞ , ширина спектральної лінії H і роздільній здатності $R_{пр}/R_{теор}$ від ширини щілини s_H/s

Про критерій Релея

Вивчаючи феномен розсіювання світла, Релей сформулював дуже важливий критерій роздільності джерел світла в оптичних приладах, який тепер носить його ім'я.

Припустимо, ви їдете вночі по неосвітлюваному шосе. Назустріч вас їде інша машина з включеним дальнім світлом фар. Спочатку ви бачите вдалині розмиту світлову пляму. Однак по мірі наближення ви починаєте розрізняти два окремих джерела світла. Тут саме час згадати, що світло фар зустрічної машини ви спостерігаєте через тонкий оптичний прилад, яким є людське око: світло фар ви сприймаєте завдяки надходженню оптичних променів через лінзу кришталіка на сітківку очного дна. Питання: де повинна знаходитися зустрічна машина, щоб ми почали сприймати дві фари окремо?

Згідно класичної теорії дифракції, промінь світла від віддаленого джерела, потрапляючи в круглий окуляр, формує зображення, що складається з ряду світлих і темних концентричних смуг навколо яскравої центральної точки, - так звану дифракційну картину. Закони оптики говорять нам, що реальне джерело світла в нашому сприйнятті буде розмите, і таке розмиття спостерігається в будь-якому оптичному приладі. Якщо ми спостерігаємо два близьких джерела світла, їх розмиті образи накладаються один на інший. Релей якраз і показав, що якщо центральна світлове пляма дифракційної картини одного джерела світла віддалена від центрального світлового плями іншого джерела світла на відстань не менше радіуса першої темної дифракційної смуги, то ми починаємо сприймати два джерела світла роздільно: ця відстань називається лінійною роздільною здатністю оптичного приладу. Якщо два джерела світла віддалені один від одного на відстань d , відстань від них до нас дорівнює D , довжина світлової хвилі дорівнює λ , а діаметр окуляра дорівнює A , то, згідно з критерієм Релея, умовою оптичного розділення двох джерел в окулярі буде: $d/D > 1,22 \lambda/A$.

Іншими словами, якщо точкові джерела світла рознесені на відстань не менше d , спостерігач, перебуваючи на відстані D , зможе розрізнити їх в окулярі діаметром A як розділені, в іншому випадку вони зіллються. Відношення d/D являє собою кутову міру в радіанах (для перекладу в градуси потрібно помножити її на 57,3) між напрямками на два джерела світла. Критерій Релея, таким чином, встановлює межі кутового розділення для будь-якого оптичного інструмента, будь то телескоп, фотоапарат або людське око. (1,22 коефіцієнт визначено математично і вимагає, щоб розмір окуляра і довжина світлової хвилі були виміряні в одних і тих же одиницях.)

Згідно з критерієм Релея, оптична роздільна здатність людського ока дорівнює 25 кутовим секундам, а це менше однієї сотої градуса! Але це в ідеалі. На практиці ж навіть найзіркіші люди здатні розрізнити джерела світла з роздільною здатністю від 3 до 5 кутових хвилин - тобто на порядок гірше. І винна в цьому сітківка - її будова не забезпечує повного використання можливостей кришталика. Таким чином, повертаючись до прикладу, в ідеалі дві фари на прямому шосе можна було б розрізнити як два окремих джерела світла з відстані близько 10 км. На практиці ж людське око починає розрізнити їх лише з відстані близько 1 км. Реальний водій, швидше за все, буде просто засліплений і постарается зосередитися на дорозі, в результаті чого сприйме світ двох зустрічних фар роздільно з ще меншої відстані.

ДОПОМІЖНІ ВУЗЛИ СП

1. Фокусуєчі системи

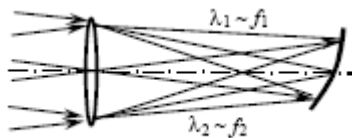
Тут ми розглянемо найбільш широко застосовані схеми коліматорів спектральних приладів і освітлювачів - оптичних систем, фокусуєчих випромінювання джерела світла на вхідну щілину СП, або випромінювання, що виходить з монохроматора, на зразок. У приладобудуванні це один з найбільш важливих питань, але він відноситься більше до технічних наук, ніж до фізики. Тому ми розглянемо фокусуєчі системи з точки зору споживачів, а не розробників.

Коліматори і об'єктиви

Завдання коліматорів - перетворити потік, що розходиться від вхідної щілини в паралельний пучок, об'єктивів - навпаки, паралельний пучок сфокусувати на вихідну фокальну поверхню. І, звичайно, з мінімальними абераціями і мінімальними втратами світла. У спектрографах і поліхроматорах об'єктив камери повинен забезпечити також зручну форму фокальної поверхні (наприклад - плоску) і якісне зображення у всіх її точках. У монохроматорах це завдання дещо простіше. Немає вимог до форми фокальної поверхні і можна уникнути аберації децентрування, пов'язаних з не аксіальними

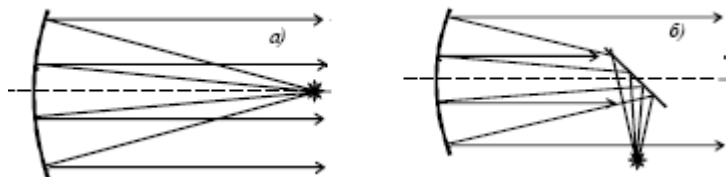
променями в об'єктиві, так що основні чинники, що призводять до спотворення зображення: кінцева висота вхідної щілини і аберації диспергуючого елемента. Основні параметри цих вузлів - світлосила, лінійний розмір і фокусна відстань. Світлосила, тобто тілесний кут, в якому збирається випромінювання від вхідної щілини, або те що виходить з монохроматора, істотна при побудові зовнішніх оптичних систем - освітлювачів. Очевидно, світлосили повинні бути узгоджені. Лінійний розмір визначає апертуру пучка і, отже, дифракційну межу дозволу. Фокусна відстань звичайно не є самостійним предметом обговорення. Можна вважати, що це вторинний параметр, який однозначно визначається обраними з принципів міркувань світлосилою і апертурі. Але знати його необхідно, тому що і лінійна дисперсія, і оптимальна ширина щілини пропорційні фокусній відстані.

Побудова високоякісних лінзових коліматорів, в яких непросто позбутися від хроматичної аберації, - завдання складне. Їх розрахунок - самостійна наука, але загальна схема розрахунку цілком описується відомими законами геометричної оптики лінзових систем зі сферичними або циліндричними поверхнями. Додаткові циліндричні лінзи часто використовують для компенсації астигматизму неосьових фокусуєчих систем, що виникає зазвичай в дзеркальних коліматорах.



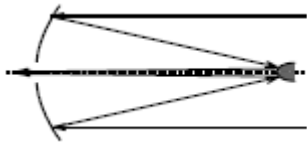
Мал. 2.3.1. Вплив хроматичної аберації на орієнтацію і форму фокальної поверхні спектрографа. $\lambda_1 > \lambda_2$, $f_1 > f_2$.

Лінзовий об'єктив-ахромат - складний і дорогий пристрій, що не завжди виправдовується економічно. У спектрографах залежність фокусної відстані від довжини хвилі призводить просто до викривлення і нахилу фокальної поверхні (рис. 2.3.1). У монохроматорах доводиться переміщати вхідний коліматор або об'єктив камери, домагаючись оптимальної фокусування в робочій області. Дзеркальні коліматори монохроматорів частіше виконують на несферичних дзеркалах - параболоїдних. Рідше застосовуються гіперболоїдні і еліпсоїдні (маються на увазі фігури обертання).



Мал. 2.3.2. Параболічний осьовий коліматор.

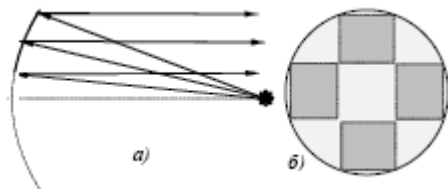
На рис. 2.3.2 показаний хід променів в осьовому параболічному дзеркальному коліматорі. Перевага параболічного дзеркала перед сферичним - відсутність сферичної аберації, зростаючих пропорційно кубу апертури. Недолік - великі, ніж у сфери аберації децентрування. Тому пристрій, що поміщається у фокусі коліматора (джерело випромінювання), не можна винести за межі паралельного пучка, а воно може бути досить громіздко. Ввівши додаткове дзеркало (рис. 2.3.2б), можна відхилити промені, що сходяться до фокусу параболоїда і винести їх за межі паралельного пучка. Якщо для цього використовувати плоске дзеркало, то воно не внесе жодних додаткових аберацій, але теж неминуче задіафрамує центральну частину паралельного пучка і зменшить світлосилу.



Мал. 2.3.3. Об'єктив Косегрена - комбінація параболічного увігнутого і еліптичного опуклого дзеркал.

Ступінь перекривання залежить від того, наскільки близько до фокусу ми поставимо відхиляюче дзеркало. Плоске дзеркало доводиться ставити досить далеко, тому що необхідно винести зображення фокусу за межі дзеркала. Але можна поставити опукле дзеркало з таким розрахунком, щоб помістити його ближче до фокусу параболи, а фокус системи винести за межі параболи. Отримаємо об'єктив Косегрена, рис.2.3.3. Аберації будуть мінімізовані, якщо опукле дзеркало - еліпсоїд обертання, а осі параболоїда і еліпсоїда збігаються.

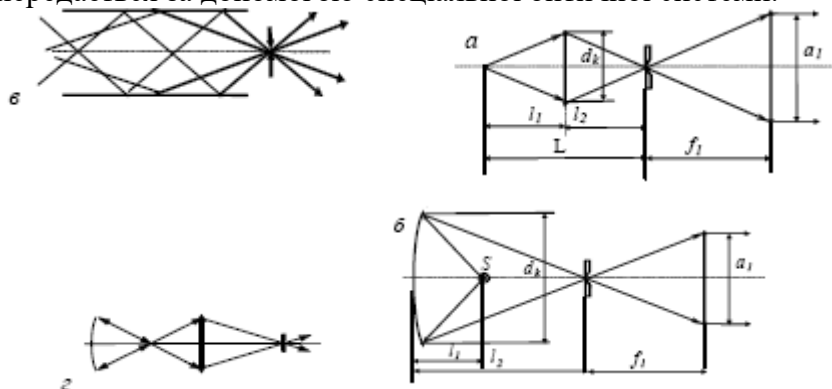
Але в спектральних приладах об'єктив Косегрена використовується рідко. Основна його перевага перед багатьма іншими - співвісність входячого і виходячого пучків - не дуже принципово, так що зазвичай роблять простіше і роблять коліматори з поза осьовими параболоїдами, рис. 2.3.4. Реально виготовляється великий осьовий параболоїд і з нього вирізаються периферійні частини. Для такого дзеркала крім фокусної відстані необхідно точно знати його орієнтацію (оком буває важко визначити, де крутизна більше, де менше) і кут відхилення центрального променя.



Мал. 2.3.4. Внеосевой параболічний коліматор, хід променів (а) і виготовлення внеосевой параболоїдів з великого осьового (б).

Вхідні освітлювачі

Світлосила і роздільна здатність є основними параметрами СП. Для найбільш повного їх використання прилад необхідно правильно освітлити. Тільки в рідкісних випадках вдається розташувати джерело світла в безпосередній близькості до вхідної щілини приладу. Зазвичай він розташовується на деякій відстані і випромінювання на щілину передається за допомогою спеціальної оптичної системи.



Мал. 2.3.5. Найбільш вживані схеми конденсорів: а - лінзовий; б - дзеркальний; в - світловод; г - дзеркально-лінзовий.

Оптична система, що служить для освітлення щілини, називається конденсором. Конденсори застосовують, якщо кутові розміри джерела недостатні для безпосереднього освітлення щілини, а також - коли завданням дослідження є вивчення спектру окремих ділянок джерела. Як конденсор може використовуватися будь-яка лінза, відповідна за своїми розмірами, так як до якості конденсорної оптики пред'являються набагато менші вимоги, ніж до оптики спектрального приладу. Мабуть, основне міркування, яке треба мати на увазі, це те, що ніяка оптична система не може збільшити яскравість освітлювача. Єдино, чого можна досягти, - присунути зображення джерела до вхідної щілини, рис. 2.3.5а-в, або (для прозорих джерел, наприклад, газових) збільшити частку зібраного випромінювання, рис. 2.3.5г.

Якщо ми маємо протяжне джерело, яке видно з вхідної щілини під кутом не менше апертурного кута приладу, то ніякої додаткової оптики не потрібно. Зазвичай все-таки джерело мале або ми не можемо наблизити його досить близько до щілини, щоб заповнити апертуру. Найчастіше в таких випадках використовуються лінзові (рис. 2.3.5а) або дзеркальні конденсори (рис. 2.3.5б). Наближаючи зображення джерела до щілини, вони дозволяють зібрати випромінювання з більшого кута. Конструюючи такі освітлювачі, необхідно заповнити апертуру спектрального приладу, але не вводити зайвих позаапертурних пучків, тобто повинні бути виконані вимоги:

$$\frac{d_i}{f_1} = \frac{d_k}{f_2}; \quad \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_k}$$

Світловод, рис. 2.3.5в, виявляється ефективний в тих випадках, коли поверхня трубки має великий коефіцієнт відбивання. Найкраще, якщо це - циліндр з прозорого матеріалу, в якому ефект повного внутрішнього відбивання виникає при кутах ковзання α , що перевищують величину $\psi_1 / 2$, де ψ_1 - апертурний кут приладу. Коефіцієнт заломлення оптичного скла у видимій області - близько 1,3 або більше, кут повного відбивання $> 35^\circ$, що досить для надсвітлосильних приладів. У зв'язку з розвитком оптоволоконних ліній зв'язку відпрацьовані технології виготовлення кварцових світловодів великої довжини. Вони дозволяють працювати в області від ІК до приблизно 200 нм (далі пропускання істотно зменшується) і дозволяють перенести випромінювання від об'єкта до спектрографа на практично довільне відстань.

Для більш жорсткого випромінювання, де немає прозорих матеріалів, доводиться використовувати порожнисті трубки з відбиваючими стінками. Коефіцієнт відбивання всіх матеріалів при малих кутах ковзання близький до одиниці, але помітно від неї відрізняється навіть при кутах в кілька градусів. В цьому випадку світловод менш ефективний, але він простий і тому широко використовується.

Комбінація дзеркала і лінзи, рис. 2.3.5г, в ряді випадків дозволяє майже вдвічі збільшити освітленість щілини.

Л.10. ПРИЗМА

Хід променя через призму. Параметри призми та зв'язок між ними. Кутова дисперсія призми. Способи збільшення кутової дисперсії. Залежність кутової дисперсії призми від заломного кута. Кутове збільшення. Роздільна здатність призми. Критерій Релея. Практична роздільна здатність. Залежність роздільної здатності призми від її заповнення світлом. Аберації призми.

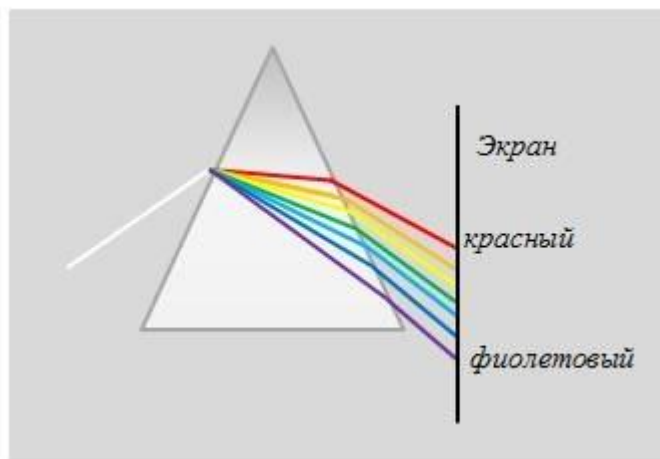
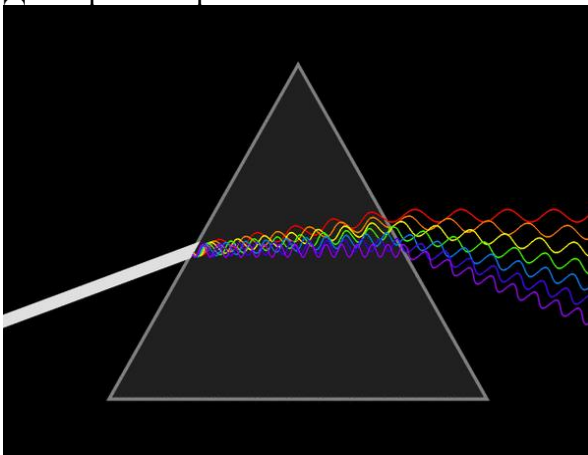
Призма — оптичний елемент у формі багатогранного тіла з прозорого для [світла матеріалу](#), яке застосовують для зміни напрямку поширення [пучків світла](#), розкладання [білого світла](#) в [спектр](#), [поляризації](#) світла тощо.

Для розкладу світла в спектр найчастіше використовуються трикутні призми. Властивість призми розкладати світло зумовлена явищем [дисперсії світла](#) — залежністю [показника заломлення](#) матеріалу призми від [частоти](#).

Для розділення пучка променів на два використовуються [біпризми](#).

Види призми

Дисперсійні призми



[Дисперсія світла](#) в призмі



Дисперсія світла в призмі

Дисперсія світла – це явище, зумовлене залежністю показника заломлення (n) речовини від частоти (або довжини) світлової хвилі. Цю залежність можна характеризувати функцією

$$n = f(\nu) \quad \text{або} \quad n = f(\lambda) \quad (1)$$

де n – показник заломлення; λ – довжина світлової хвилі; ν – частота світлової хвилі.

Існує нормальна та аномальна дисперсія. *Нормальною* дисперсією називається така дисперсія, коли при зростанні циклічної частоти ω показник заломлення n зростає. *Аномальною* – якщо із збільшенням частоти ω показник заломлення n зменшується (рис.1.).

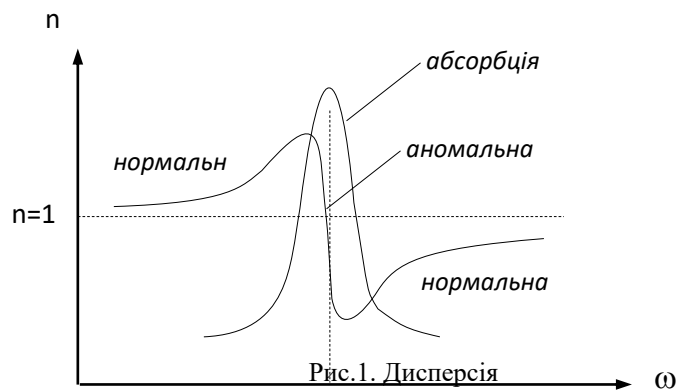


Рис.1. Дисперсія

В області нормальної дисперсії закон дисперсії $n = f(\lambda)$ з достатньою точністю може бути виражений формулою Коші:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (2)$$

де A, B, C – постійні величини для даної речовини.

Явище дисперсії світла використовується в призмових спектральних приладах, де призма із прозорого матеріалу з показником заломлення n є диспергуючим пристроєм, який розкладає світло в спектр за довжинами хвиль. Промені з короткими довжинами хвиль заломлюються сильніше.

Фазова швидкість хвилі (v) – це швидкість поширення фази, тобто швидкість кожної точки хвильової поверхні. Вона напрямлена по нормалі до хвильової поверхні і чисельно рівна:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, ϵ – діелектрична, а μ – магнітна проникність середовища.

Згідно теорії Максвелла:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (4)$$

при $\mu = 1$ $n = \sqrt{\epsilon}$.

Отже

$$v = \frac{c}{n}, \quad (5)$$

звідки

$$n = \frac{c}{v} - \quad (6)$$

відношення швидкості світла (c) у вакуумі до фазової швидкості світла в середовищі (v).

Після відкриття явища аномальної дисперсії і встановлення її зв'язку з абсорбцією, Зельмеєр (1871) розробив повну теорію явища. Від допустив, що молекули мають власні частоти коливань (ω_0), характерні для даної речовини. Виходячи з цього, були пояснені смуги поглинання. Формула Зельмеєра:

$$\varepsilon = n^2 = 1 + \frac{4\pi N e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (7)$$

де N – число атомів в одиниці об'єму речовини; m – маса атома; e – заряд електрона; ω_0 – власна частота коливань атома.

Формула (7) описує залежність показника заломлення n від частоти падаючого світла ω . З неї випливає, що ε не є сталою, яка характеризує речовину, а залежить від частоти падаючої хвилі.

Дисперсійні призми використовуються в спектральних приладах для просторового розділення випромінювань різних довжин хвиль.

- Проста тригранна призма
- Призма Броунінга-Розерфорда
- Дисперсійна призма Аббе
- Призма Амічі (призма прямого зору)

Відбиваючі призми

Відбиваючі призми використовують для зміни ходу променів, зміни напрямку оптичної осі, зміни ліній візування, для зменшення габаритних розмірів приладів. Класифікують відбиваючі призми за кількома ознаками:

- кількістю відбивань в призмі;
- наявністю або відсутністю «даху»;
- характером конструкції призми;
- кутом злому оптичної осі.

Також, окрему нішу серед відбиваючих призм займають призми, які складають з кількох частин, розділених повітряними проміжками. Деякі широко використовуваних призми отримали власні імена:

- [Пентапризма](#);
- Призма Порро;
- [Призма Аббе-Порро](#);
- [Призма Аббе](#);
- Призма Пехана-Шмідта;
- Призма Дове;
- Призми з «дахом»;
- Дихроїдна призма.

Назва призми позначається двома або трьома літерами і числом, записаним через дефіс. Перша літера означає кількість відбиваючих граней в призмі:

- А — одна;
- Б — дві;
- В — три і т.д.

«Дах», умовно, вважають як одну грань і для неї ставлять індекс «к» після першої літери (наприклад, Ак, Бк). Друга буква вказує на характер конструкції:

- Р — рівнобедрена;
- С — ромбічна;
- П — [пентапризма](#);
- У — напівпентапризма;
- М — далекомірна;
- Л — призма Лемана.

Цифри, які записані через дефіс вказують на кут злому оптичної осі. ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$).

Наприклад, «ВкР-45°» — рівнобедрена призма з трьома відбиваючими гранями і «дахом», з кутом злому 45° .

Складені призми вказуються за їх власними іменами і кутами злому осі. Наприклад, «А-0°» — Призма Аббе, «Бк-90°» — башмачна призма з «дахом», «К-0°» — призма-куб.

Поляризаційні призми

- [Призма Ніколя](#)
- Призма Волластона
- Призма Аренса
- Призма Глана-Фуко
- Призма Глазбрука
- Призма Рошона

Спектральною призмою називається багатогранник, зроблений з прозорої речовини, що володіє значною дисперсією показника заломлення $dn / d\lambda$. Похідна від показника заломлення по довжині хвилі $dn / d\lambda$ називається дисперсією речовини. Якщо показник заломлення збільшується зі зменшенням довжини хвилі, то говорять, що матеріал призми має нормальну дисперсію ($dn/d\lambda < 0$) у даному інтервалі довжин хвиль, а призма відхиляє короткохвильові промені (фіолетові) більше, ніж довгохвильові (червоні). Для виготовлення хороших приладів повинен використовуватися матеріал з дуже високою прозорістю, дисперсією, оптичної однорідністю і ізотропністю. Задовільнити всім цим вимогам важко, тому для різних областей спектра використовуються різні матеріали. Наприклад, для ультрафіолетової області спектра придатний кристалічний або плавлений кварц, для видимої області спектра основним матеріалом є скло, в ІК-області - іонні кристали і т.д. Зазвичай в приладах використовуються складні, складові призми, що дозволяють отримувати і високу роздільну здатність, і зручну форму фокальної поверхні. Тут ми розглянемо тільки основні властивості найпростіших тригранних призм.

Розглянемо призму, форма якої наведена на рис. 2.1. Двогранний кут з ребром АВ називається заломлюючим. Площині АВСД і АВС'D називаються заломлюючими гранями призми. Площина, перпендикулярна ребру призми і проходить через його середину, називається площиною головного перерізу.

Нехай на грань призми з заломлюючим кутом А і коефіцієнтом заломлення n в площині головного перерізу падає пучок променів, що становлять кут α_1 з нормаллю N_1 до першої межі призми (рис.2.2). Кут заломлення цього променя позначимо β_1 , кут падіння його на другу грань - β_2 і кут виходу з неї - α_2 . Кут φ , складений падаючим і виходять променями, називається *кутом відхилення*. Закон заломлення і прості геометричні міркування дають чотири рівняння, що зв'язують сім величин:

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 - A, \quad (2.1.1)$$

$$A = \beta_1 + \beta_2, \quad (2.1.2)$$

$$\sin \alpha_1 = n \cdot \sin \beta_1, \quad (2.1.3)$$

$$\sin \alpha_2 = n \cdot \sin \beta_2. \quad (2.1.4)$$

Зазвичай величини A , n і α_1 задані, а цього достатньо, щоб визначити чотири інші.

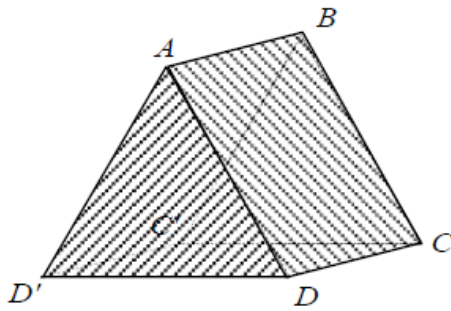


Рис. 2.1. Найпростіша призма
Кут найменшого відхилення

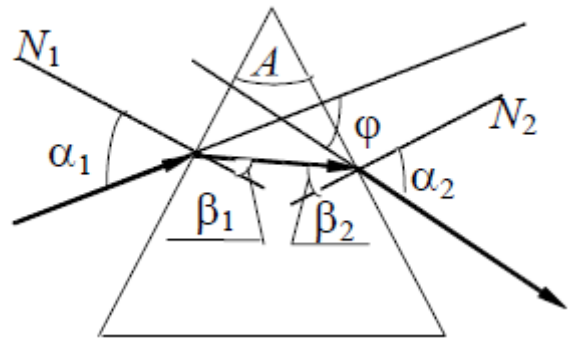


Рис. 2. 2. Хід променів в призмі

У загальному випадку $D\varphi$, як і φ , залежить від параметрів призми та кута падіння променів на призму α_1 (рис. 2.2). При цьому переріз світлового пучка до призми та після заломлення в призмі може змінюватись. Одночасно змінюється й якість одержаного спектра внаслідок астигматизму призми. Вплив астигматизму на якість спектра є мінімальним, якщо промені проходять через систему симетрично, тобто кут падіння променів на вхідну грань призми дорівнює куту виходу променів з призми. При цьому переріз світлового пучка до призми й після неї залишається незмінним, а в призмі промені поширюються паралельно до її основи. Аналіз показує, що в цьому випадку кут відхилення променів у призмі φ є мінімальним, а кутова дисперсія приладу залежить лише від параметрів призми: заломлюючого кута A , показника заломлення n і дисперсії речовини, з якої виготовлено призму $dn / d\lambda$.

Ні в якій реальній оптичній схемі неможливо створити ідеально паралельний пучок променів. Отже, завжди будуть присутні аберації, обумовлені тим фактом, що кут відхилення φ залежить від кута падіння α_1 , причому нелінійно. Для того, щоб мінімізувати ці аберації, слід використовувати таку установку призми, при якій залежність φ (α) мінімальна, тобто - в екстремумі. Система рівнянь (2.1.1)-(2.1.4) дозволяє знайти умови екстремуму φ (α). Для цього прирівнюємо нулю похідну $d\varphi / d\alpha_1$ і з (2.1.1) отримаємо:

$$\frac{d\alpha_2}{d\alpha_1} = -1. \quad (2.1.5)$$

Диференціювання інших рівнянь дасть:

$$d\beta_1 + d\beta_2 = 0, \quad (2.1.6)$$

$$\cos\alpha_1 d\alpha_1 = n \cdot \cos\beta_1 \cdot d\beta_1, \quad (2.1.7)$$

$$(2.1.8) \quad \cos\alpha_2 d\alpha_2 = n \cdot \cos\beta_2 \cdot d\beta_2.$$

$$\frac{d\alpha_2}{d\alpha_1} = -\frac{\cos\alpha_1 \cos\beta_2}{\cos\alpha_2 \cos\beta_1} = -1. \quad (2.1.9)$$

Звідси: З (2.1.9), замінивши кути β на α по (2.1.3) і (2.1.4), отримаємо шукану умову:

$$\frac{\cos^2 \alpha_1}{n^2 - \sin^2 \alpha_1} = \frac{\cos^2 \alpha_2}{n^2 - \sin^2 \alpha_2}. \quad (2.1.10)$$

Це рівність задовольняється при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, що відповідає мінімуму кута відхилення φ . З $\alpha_1 = \alpha_2$ виходить і $\beta_1 = \beta_2$. Падаючий і виходячий промені виявляються симетричними по відношенню до граней призми. В умовах мінімального відхилення кут падіння α , заломлюючий кут призми A , кут відхилення φ і показник заломлення n пов'язані співвідношенням:

$$\sin \alpha = n \cdot \sin(A/2) = \sin((A + \varphi)/2), \quad (2.1.11)$$

яке легко отримати з (2.1.1) - (2.1.4). У всіх практичних схемах використовується установка призми в мінімумі відхилення, тим більше, що така установка, як ми побачимо пізніше, чудова в багатьох відносинах. У тому числі і роздільна здатність призми максимальна саме в мінімумі відхилення.

Кут відхилення φ мінімальний (такий кут називається кутом найменшого відхилення) при симетричному щодо заломлюючих граней ході променів в призмі. Якщо призма рівнобедрена, то промінь в призмі паралельний межі, що лежить проти заломлюючого кута. Кут найменшого відхилення: $\varphi_{\min} = 2\arcsin(n \sin A/2) - A$.

Так як показник заломлення матеріалу призми залежить від довжини хвилі λ , то і кут найменшого відхилення φ буде різним для випромінювань різних довжин хвиль. Тому призму можна застосовувати в якості диспергуючого елемента в спектральних приладах. Співвідношення $\varphi_{\min} = 2\arcsin(n \sin A/2) - A$ можна використовувати для визначення показника заломлення призми.

Кутова дисперсія

$$D_l = f_2 D_\varphi = \frac{f_2 d\varphi}{d\lambda}.$$

Лінійна дисперсія пов'язана з кутовою співвідношенням

Для обчислення кутової дисперсії $D_\varphi = d\varphi / d\lambda$ продиференціюємо по λ основні рівняння (2.1.1) - (2.1.4). Врахуємо, що $d\alpha_1 / d\lambda = 0$, і отримаємо:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{d\alpha_2}{d\lambda}, \quad (2.1.12)$$

$$\cos\alpha_2 \frac{d\alpha_2}{d\lambda} = n \cos\beta_2 \frac{d\beta_2}{d\lambda} + \sin\beta_2 \frac{dn}{d\lambda} \quad (\text{из (2.1.4)}), \quad (2.1.13)$$

$$\sin\beta_1 \frac{dn}{d\lambda} = -n \cos\beta_1 \frac{d\beta_1}{d\lambda} \quad (\text{из 2.1.11}), \quad (2.1.14)$$

$$\frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{d\beta_2}{d\lambda}. \quad (2.1.15)$$

Отсюда:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \frac{\sin A}{\cos\beta_1 \cos\alpha_2}, \quad (2.1.16)$$

или, в мінімуме отклонения, т.е. при $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ и $\beta_1 = \beta_2 = A/2$:

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = 2 \frac{dn}{d\lambda} \frac{\sin(A/2)}{\{1 - n^2 \sin^2(A/2)\}}. \quad (2.1.17)$$

При просуванні в довгохвильову сторону зменшується і $dn/d\lambda$, і n . А зі зменшенням n зростає знаменник в (2.1.17), так що дисперсія призми $d\varphi/d\lambda$ убиває швидше, ніж дисперсія її матеріалу, $dn/d\lambda$.

Кутова дисперсія призми в положенні найменшого відхилення залежить від заломлюючого кута A , показника заломлення n речовини призми і дисперсії матеріалу призми. Тому призми спектральних приладів роблять із стекл з можливо великим коефіцієнтом заломлення і можливо більшої дисперсією (з так званих важких флінтів). При цьому матеріалі призми кутова дисперсія зростає зі збільшенням кута заломлення призми A , але на практиці A зазвичай береться рівним 60° , так як при великих кутах доводиться мати справу з дуже косо падаючим на призму пучком світла.

Відповідно для лінійної дисперсії

$$D_1 = 2f_2 \frac{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}.$$

Кутове збільшення

Нехай на поверхню призми падає вузький пучок променів з точки I, рис. 2.3а. Малий кут між крайніми променями пучка в площині головного перетину позначимо θ . В результаті заломлення продовження цих променів перетнуться в точці I' під кутом ψ , який відрізняється від θ . Величина $\Gamma = \psi / \theta$ називається кутовим збільшенням призми. Кут θ дорівнює зміні кута падіння $\Delta\alpha_1$ для крайніх променів пучка, а кут ψ - зміні кута виходу променів $-\Delta\alpha_2$ з призми. Вважаючи кути ψ і θ малими, замінимо кінцеві різниці диференціалами. Таким чином, $\Gamma = -d\alpha_2 / d\alpha_1$.

У загальному випадку, см. (2.1.5) - (2.1.9), отримаємо:

$$\Gamma = \frac{\cos\alpha_1 \cos\beta_2}{\cos\alpha_2 \cos\beta_1}. \quad (2.1.18)$$

При установці в мінімумі відхилення кутове збільшення дорівнює одиниці. Якщо $\alpha_1 < \alpha$, то $\Gamma > 1$, при $\alpha_1 > \alpha$ - $\Gamma < 1$. Якщо $\Gamma \neq 1$, то в меридіональній площині розмір пучка, або падаючого, або того що пройшов, при проходженні через призму повинен зменшитися. На рис. 2.3б відзначені величини, користуючись якими неважко показати, що дійсно кутове збільшення Γ дорівнює відношенню довжин відрізків bd і ac .

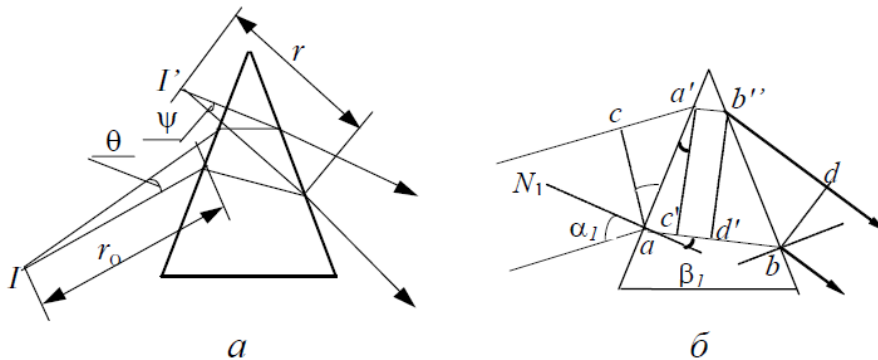
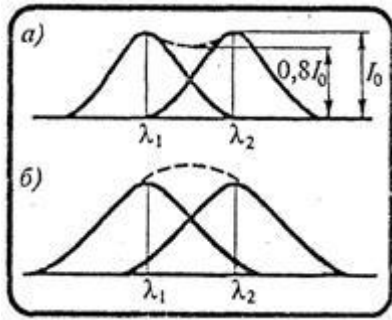


Рис. 2. 3. До розрахунку кутового збільшення призми.

Критерій Релея. Роздільна здатність

Якби навіть існувала ідеальна оптична система (без дефектів і аберацій), зображення будь-якої крапки, що світиться через хвильової природи світла буде у вигляді центрального світлої плями, оточеного чергуються темними і світлими кільцями.

Критерій Релея: зображення двох прилеглих однакових точкових джерел або двох сусідніх спектральних ліній з рівними інтенсивностями і однаковими симетричними контурами можна розв'язати (розділені для сприйняття), якщо центральний максимум дифракційної картини від одного джерела (лінії) збігається з першим мінімумом дифракційної картини від іншого (рис. а).



При виконанні критерію Релея інтенсивність "провалу" між максимумами становить 80% інтенсивності в максимумі, що є достатнім для вирішення ліній λ_1 , і λ_2 . Якщо критерій Релея порушений, то спостерігається одна лінія (рис. б).

Гранична роздільна здатність призми залежить від того, що фронт падаючої на неї хвилі обмежений розмірами призми або іншого отвору, що обмежує ширину пучка - діафрагми. Утворюється дифракційну інструментальний контур, що лімітує граничну роздільну здатність. Припустимо, що на призму падає пучок паралельних променів, ширина якого b обмежена діафрагмою, поставленої перед призмою, або розмірами призми, рис. 2.4. Головне перетин призми - трикутник з основою T і кутом при вершині A . Якщо пучок обмежений діафрагмою, то робоча частина призми - трапеція з основами t_1 і t_2 , вона працює так само, як трикутна призма з кутом A і підставою (t_1-t_2) .

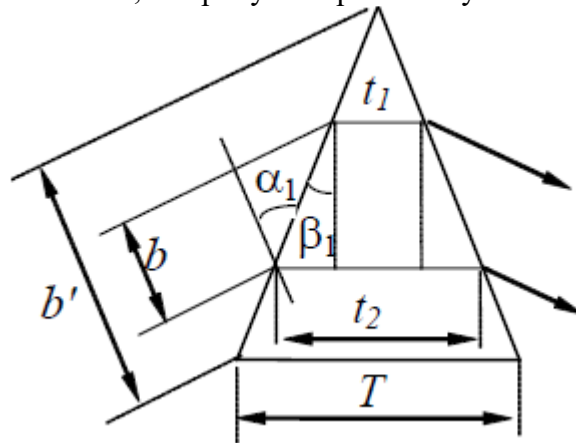


Рис. 2.4. До розрахунку роздільної здатності призми, обмеженої дифракційним розширенням.

В результаті дифракції на щілини шириною b кутовий розподіл енергії буде описуватися формулою

$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2}, \quad (2.1.19)$$

де $u = \pi \cdot b \cdot \sin \varphi / \lambda$. Кутова відстань $\delta \varphi$ між головним максимумом ($U = 0$) і першим мінімумом ($u = \pi$) цієї функції дорівнює:

$$\delta \varphi \approx \sin(\delta \varphi) = \lambda / b, \quad (2.1.20)$$

а з урахуванням кутового збільшення Γ воно стане рівним

$$\delta \psi = \Gamma \delta \varphi = \Gamma \lambda / b. \quad (2.1.21)$$

Якщо на призму падає пучок променів, що містить випромінювання двох ліній з довжинами хвиль λ і $\lambda + \delta \lambda$, то кутова відстань $\delta \varphi$ між напрямками на головні максимуми буде

$$\delta \varphi = \delta \lambda \cdot (d\varphi / d\lambda). \quad (2.1.22)$$

За критерієм Релея з $\delta \varphi = \delta \psi$ отримаємо розділення:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{b}{\Gamma} \cdot \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (2.1.23)$$

З урахуванням (2.1.11), (2.1.17) і (2.1.18) роздільна здатність $R = \lambda / \delta\lambda$ в загальному випадку дорівнює:

$$R = \frac{b}{\Gamma} \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{b}{\Gamma} \frac{dn}{d\lambda} \frac{\sin A}{\cos\beta_1 \cos\alpha_2}, \quad (2.1.24)$$

а для умови мінімуму відхилення, оскільки

$$\frac{t_1 - t_2}{2} = b \frac{\sin A/2}{\cos\alpha}, \quad (2.1.25)$$

отримаємо:

$$R = T \frac{dn}{d\lambda} \quad \text{или} \quad R = (t_1 - t_2) \frac{dn}{d\lambda}. \quad (2.1.26)$$

Можна показати (перевірте), що для призми заданих розмірів найбільша роздільна здатність досягається саме в умови найменшого відхилення.

До сих пір ми розглядали призму, що не поглинає падаючого на неї випромінювання. Але в дійсності завжди має місце та чи інша ступінь поглинання, що позначається не тільки на зменшенні загальної кількості енергії, пропущеної призмою, а й на її роздільній здатності на короткохвильовому краю робочої області. Ефективно починає працювати тільки тонка частина призми. Крім того, ідеальна призма характеризується плоскими заломлюючими гранями і постійним у всьому обсязі показником заломлення. Реальна призма не задовольняє цим умовам. В результаті неоднорідності матеріалу і неточності полірування фронт плоскої хвилі, що пройшла призму, буде спотворений. Ці спотворення також впливають на роздільну здатність.

Аберації призми

Для призми найбільш істотні аберації, пов'язані з наявністю в падаючому на неї потоці непаралельних променів, причому принципово різні аберації виникають через непаралельності один одному променів, що лежать в площині головного перерізу (меридіональної площині приладу) і непаралельності променів в сагітальній площині (перпендикулярній до площини дисперсії). Промені, що вийшли з верхньої точки вхідної щілини, після коліматора дають паралельний пучок, що становить кут γ з меридіональної площиною. Перетин призми площиною з таким нахилом дає трикутник з заломлюючим кутом більшим ніж A . В результаті для променів, що виходять з верхньої та нижньої точок вхідної щілини, зростає кут відхилення φ і дисперсія $d\varphi / d\lambda$. Розрахунок показує, що це призводить до викривлення зображення - пряма вхідна щілина зображується на виході відрізком параболи:

$$y = \frac{z^2}{2\rho}, \quad \rho = f_2 \frac{n}{(n^2 - 1) \frac{\partial\varphi}{\partial n}} = f_2 \frac{\text{ctg}\alpha}{2(1 - n^{-2})}, \quad (2.1.27)$$

що лежить в фокальній площині і зігнута в короткохвильову сторону. Тут y і z - координати в меридіональної і сагітальній площинах; α - кут падіння променів на першу грань призми (в умови мінімуму відхилення), φ - кут відхилення, n - показник заломлення. У короткохвильовій частини спектра n більше і викривлення зображення сильніше.

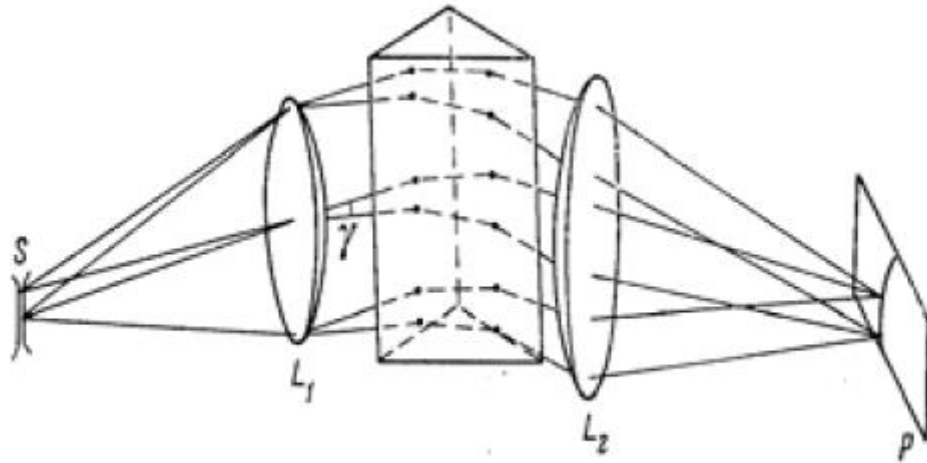


Рис. 2.5. Викривлення зображення щілини при проходженні променів крізь призму.

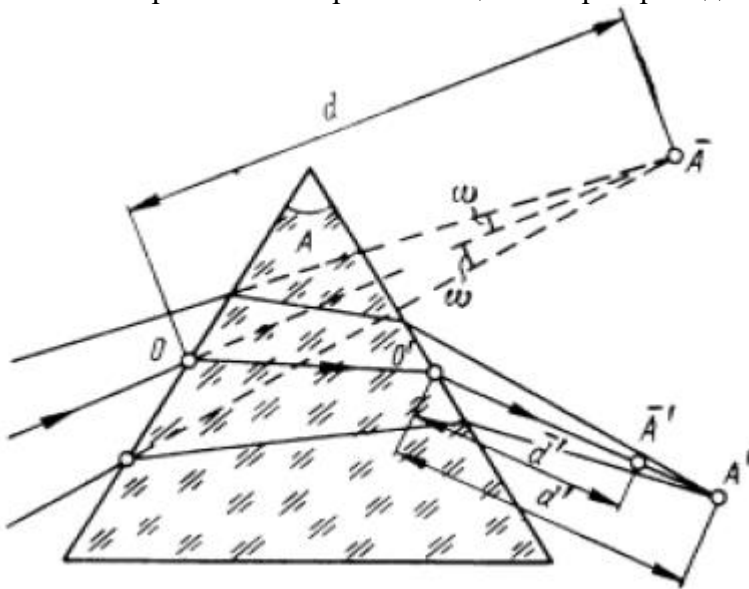


Рис. 2. 6. Призма в пучку, що сходиться має астигматизм, оскільки промені, що йдуть в меридіональній і сагітальній площинах переломлюються по-різному.

Цей вид аберації не настільки страшний, оскільки в спектрографі ми при обробці спектрограми завжди можемо його врахувати, а в монохроматорах просто роблять викривлені щілини. Якщо ж призма працює в пучку, що сходиться (розходить), то виникають непереборні аберації першого і другого порядків.

- 1) Астигматизм першого порядку:

$$K = -\frac{p}{d} \left(n - \frac{1}{n} \right) \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{A}{2} , \quad (2.1.28)$$

де A - заломлюючий кут призми, d - відстань від точки падіння центрального променя на призму до фокусу пучка, що сходиться, p – довжина шляху центрального променя в призмі, тобто відстань OO' на рис. 2.6.

- 2) Аберация другого порядку, що збільшують зображення в напрямку дисперсії (δy) і в напрямку висоти щілини (δz) даються виразами:

$$d \cdot \delta y = - \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \left\{ \frac{3m^2}{\cos^2 A/2} + (M - L)^2 \right\}, \quad (2.1.29a)$$

$$d \cdot \delta z = - \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot m \cdot (M - L). \quad (2.1.29б)$$

Тут α - кут падіння на першу грань. Вирази дані для установки призми в мінімумі відхилення.

Л.11. Типи призми і їх застосування

Речовини для виготовлення призми. Число Аббе. Типи найбільш поширених призми.. Оптична схема спектрографа ИСП-22, ИСП-30. Оптична схема монохроматора ИСП-53. Монохроматор УМ-2. Дзеркальний монохроматор ЗМР-3. Подвійні монохроматори. Подвійний монохроматор типу ДМР-4.

Спектральна призма – це перший пристрій, який було застосовано для розкладання світла у спектр. Спектральною призмою (далі – просто призма) називається багатогранник, виготовлений з прозорої речовини, який має значну дисперсію $\frac{\partial n}{\partial \lambda}$. При проходженні через призму пучок променів змінює свій напрямок, причому кут виходу променів залежить від довжини хвилі. Проходження променя крізь призму пов'язано з переломленням, яке залежить від матеріалу призми.

Для виготовлення хороших призми використовують матеріал, прозорий в досліджуваній області спектра, такий що має велику дисперсію, досить високу оптичну однорідність та ізотропність. Задовільнити всім цим якостям важко, тому для різних областей спектра застосовують спектральні призми, виготовлені з різного матеріалу. Так, для УФ-області спектра часто використовують природний кристалічний кварц. Залежність спектрального коефіцієнта пропускання плавленого кварцу товщиною 1мм наведена на рис. 1. Для видимої області спектра основним матеріалом для виготовлення призми служить скло, як правило, тяжкий флінт (ТФ). Для інфрачервоної (ІЧ) області спектра призми виготовляють з кристалів хлористого натрію і хлористого кальцію. Криві дисперсії деяких оптичних матеріалів наведено на рис.2, де λ - довжина хвилі, n – показник переломлення середовища.

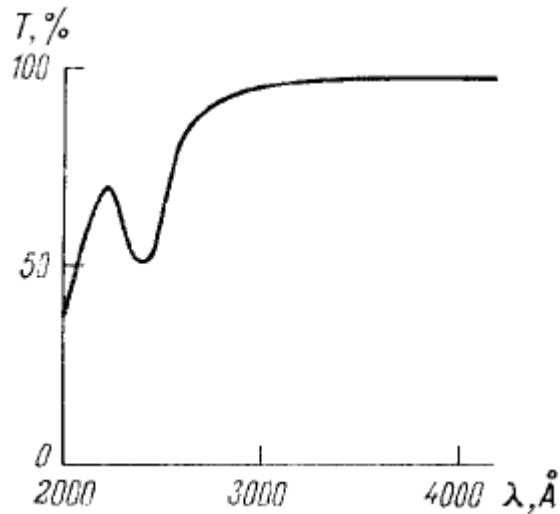


Рис. 1. Пропускання плавленого кварца товщиною 1 см.

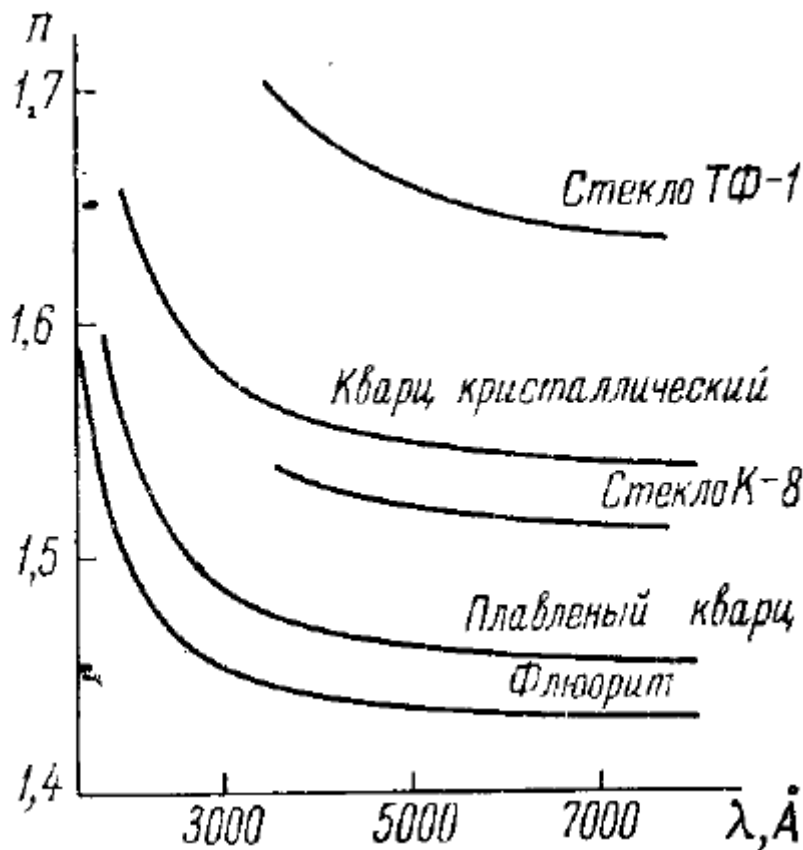


Рис. 2. Криві дисперсії деяких оптичних матеріалів.

Спектральні призми великих розмірів і великої дисперсії можна виготовити з призматичних прозорих посудин, залитих відповідними рідинами. Для УФ-області найбільш підходить дисцильована вода, прозора до вакуумного ультрафіолету, для видимої області спектра – сірковуглець.

Заломлююча здатність оптичного матеріалу характеризується, в основному, такими величинами:

- показником заломлення n_D для жовтої лінії натрію ($\lambda = 589,3$ нм);
- середньою дисперсією $\delta n = n_F - n_C$, де n_F і n_C – показники заломлення для блакитної і червоної ліній водню ($\lambda = 486,1$ нм; $\lambda = 656,3$ нм);
- коефіцієнтом середньої дисперсії γ або числом Аббе

$$\gamma = (n_D - 1)/(n_F - n_C)$$

Оптичні характеристики стекол

Назва	Марка скла	n_D	δn	γ	Назва	Марка скла	n_D	δn	γ
Легкий крон	ЛК-3	1.4874	0,00696	70,0	Легкий флінт	ЛФ-1	1.5406	0,01145	47,2
	ЛК-4	1.4903	0,00753	65,1		ЛФ-7	1.5783	0,01407	41,1
Крон	К-1	1.4982	0,00765	65,1	Флінт	Ф-6	1.6031	0,01590	37,9
	К-3	1.5100	0,00805	63,4		Ф-8	1.6248	0,11757	35,6
	К-8	1.5163	0,00806	64,1					
Баритовий крон	БК-4	1.5302	0,00877	60,5	Баритовий флінт	БФ-12	1.5269	0,01601	39,1
	БК-6	1.5399	0,00905	59,7		БФ-28	1.6641	0,01874	35,4
	БК-10	1.5688	0,01015	56,0					
Важкий крон					Важкий флінт	ТФ-1	1.6475	0,01912	33,9
	ТК-7	1.6137	0,01090	56,3		ТФ-2	1.6725	0,02087	32,2
	ТК-21	1.6568	0,01285	51,1		ТФ-4	1.7398	0,02628	28,2
						ТФ-5	1.7550	0,02743	27,5
						ТФ-10	1.8060	0,03178	25,4

Спеціальні види призм (системи призм)

Найпростіша призма трикутного перетину рідко може задовольнити вимогам побудови зручного і якісного приладу. Тому зазвичай в СП використовуються комбінації призм, що дозволяють отримати потрібний закон дисперсії, більш зручну форму фокальної поверхні і т.д. В практиці устоялися деякі конкретні способи досягнення бажаних параметрів, - певні системи призм, які в більшості випадків називаються іменами їх авторів. Деякі з них наведені на рис. 3. Диспергуючі системи, що складаються з декількох склеєних призм, застосовуються зазвичай для отримання більшої кутової дисперсії і (або) для отримання бажаного кута відхилення променів. Склеєні призми виготовляються з різних сортів оптичного скла (з різними n і $\delta n / \delta \lambda$) і придатні, як правило, лише у видимій області спектра. В ультрафіолетовій та інфрачервоній областях застосування склеєних призм важко, так як, по-перше, відомі клеї тут недостатньо прозорі, а по-друге, в цих областях зазвичай використовуються кристали з істотно різними коефіцієнтами теплового розширення. У цих випадках доводиться застосовувати послідовність призм, розділених повітряним проміжком. Маємо приклади застосування призми з неплоскими поверхнями, комбінації призми і дзеркала та ін.

Призма Резерфорда-Броунинга складається з двох однакових призм з невеликим заломлюючим кутом, виготовлених з крона. Між ними знаходиться третя призма, з великим заломлюючим кутом A і виготовлена з важкого Флінта. Склеєна призма Резерфорда відрізняється від одиночної значно більшою дисперсією, а при заданій дисперсії - меншими втратами на відображення. Крайні призми мають малий коефіцієнт заломлення і хоча вони дещо зменшують сумарну дисперсію, але дозволяють зробити A великим, так як зменшують кут падіння. Основний недолік визначається тим, що при тій же ширині падаючого пучка довжина ходу променів в склеєній призмі більше, ніж в одиночній. Тому застосування призми Резерфорда стає малоефективним у фіолетовій частині спектра, де поглинання важких флінтів вже помітно.

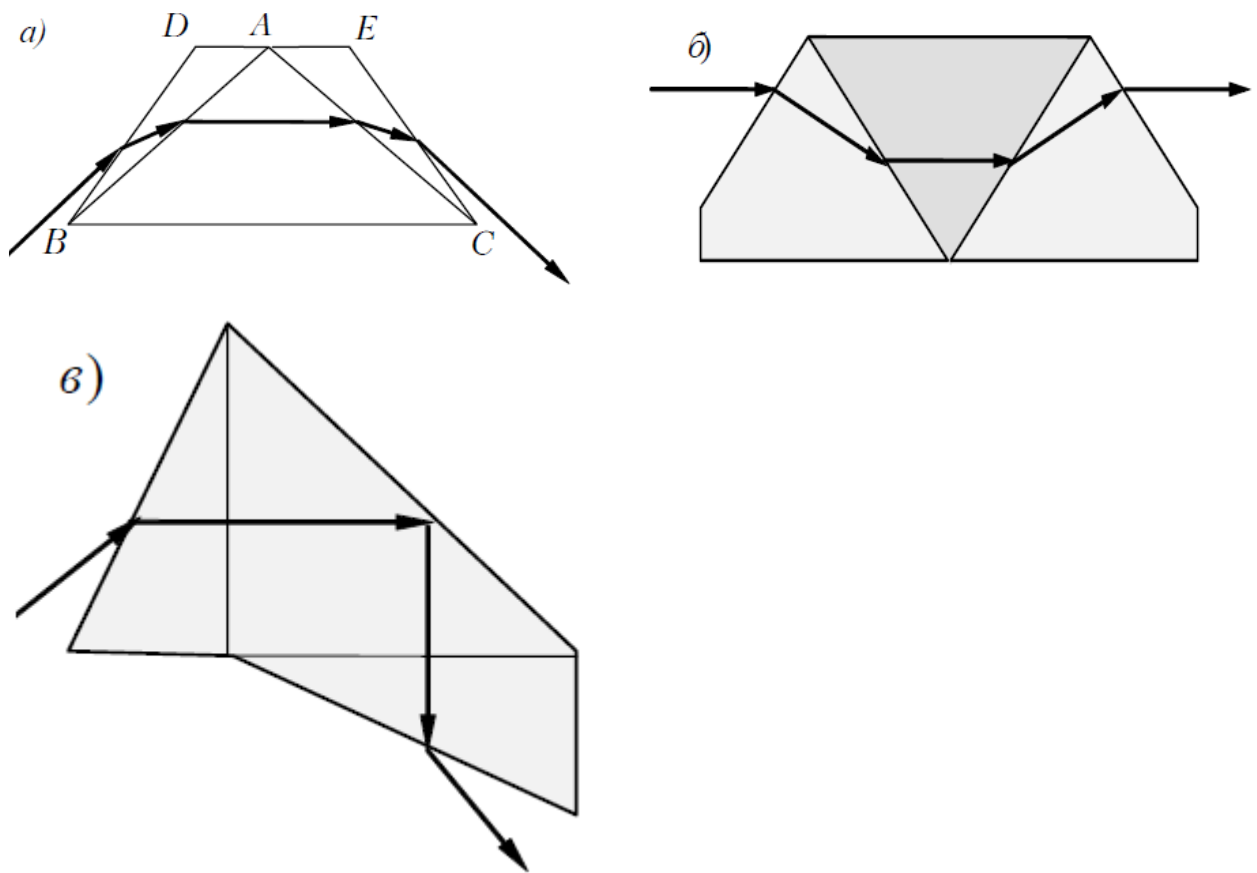


Рис. 3. Деякі типи практично використовуваних призм.

а) Призма Резерфорда-Броунинга,

б) Призма прямого зору, призма Амичі,

в) Призма постійного кута відхилення, призма Аббе.

Призма прямого зору Амичі. У ній для деякої довжини хвилі кут відхилення променів дорівнює нулю, так що можна зробити СП в трубі - оптичні осі коліматорного і камерного об'єктивів збігаються. Вона, як і призма Резерфорда, складається з трьох склеєних призм, крон-флінт-крон. Заломлює кут і показник заломлення середньої призми більше, ніж у бічних. Призма Амичі не дає такої високої дисперсії, як призма Резерфорда, і оптична довжина шляху в ній більше, тобто більше втрати на поглинання. Тому вона не знайшла широкого поширення і застосовується лише в компактних спектрографах і спектроскопах.

Призма Аббе також складається з трьох склеєних призм - двох прямокутних полупрізм з заломлюючим кутом 30° і прямокутної призми повного внутрішнього відображення, що відхиляє промені на 90° . Просторове розкладання спектра в цій системі відбувається лише на гранях полупрізм. Призма Аббе володіє тим властивістю, що для променів будь-якої довжини хвилі, що проходять паралельно підстав полупрізм, кут відхилення дорівнює 90° . За кутової дисперсії і втрат на відображення при ламанні на зовнішніх гранях ця система еквівалентна одиночній призмі з подвоєним кутом заломлення прямокутних полупрізм. Втрати через поглинання в призмі Аббе, звичайно, більше, ніж в одиночній призмі через більшу довжину ходу променів. Тому для збільшення пропускання у фіолетовій частині спектра призма внутрішнього відображення виготовляється зі скла з малим показником заломлення (з легкого крона), а диспергируючі полупрізми - з скла з великою дисперсією (з важкого Флінта). Сталість кута відхилення зручно в монохроматорах, в яких сканування спектра здійснюється просто поворотом призми, а коліматори залишаються без листя. Той же ефект може бути отриманий при комбінаціях призми і дзеркала, наприклад - в установці Водсворт (рис. 4), і з автоколімационной призмою Літтрова (рис.5а), в якій кут відхилення дорівнює 180° . В установці Водсворт досить фіксувати відносно розташування

призми і дзеркала, кут α . Тоді поворот всієї системи щодо падаючого променя призведе лише до зміни кута відхилення пучка в призмі D , але не сумарного кута відхилення φ .

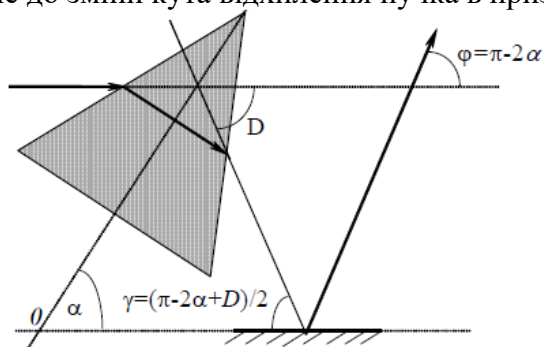


Рис. 4. Схема постійного кута відхилення, схема Водсворта.

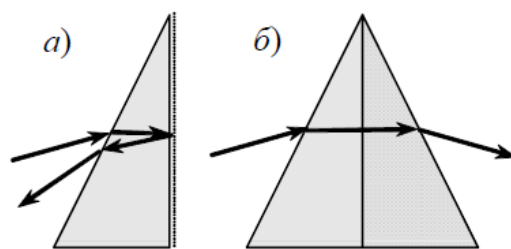


Рис. 5. Призма Літтрова (а) і призма Корню (б).

Призма Літтрова дуже зручна і використовується часто. В багатьох промислових приладах з подвійною монохроматизацією застосовується комбінація призмного і дифракційного монохроматорів. Другий забезпечує високу спектральний дозвіл, а перший - попередню монохроматизацію і одночасно виключає таку неприємність, як накладення порядків дифракції. Від нього не потрібно високої роздільної здатності, але бажано високу якість зображення. Призма Літтрова проста і цим вимогам відповідає.

По суті, в призмі Аббе, рис. 3в, в схемі Водсворт і в призмі Літтрова застосована одна і та ж ідея - в хід променів додано відображення. Різниця тільки в тому, як зроблено дзеркало і під яким кутом встановлено. Відображення відбувається або в поворотній призмі, або на додатковому дзеркалі, або дзеркальної робиться грань призми. Основним матеріалом для призм, прозорих в ультрафіолетовій області спектра, служить кристалічний кварц, але його застосування ускладнене оптичною анізотропією і пов'язаним з нею розщепленням спектральних ліній. Тому призми з кристалічного кварцу робляться з таким розрахунком, щоб уникнути впливу подвійного променезаломлення і оптичної активності кварцу на якість спектру, наприклад, призма Корню. Призма Корню (рис. 5 б) складається з двох прямокутних напівпризм з заломлюючим кутом близько 30° , вирізаних так, щоб промінь, що йде паралельно основі (в умовах мінімуму відхилення для сукупності обох призм), поширювався вздовж оптичної осі кристала. Вони зроблені одна з право-, а інша з ліво обертаючого кварцу, в результаті чого обертання площини поляризації не відбувається. Однак для променів, що поширюються під кутом до осі, обертання площини поляризації НЕ зкомпенсовано і вони відчувають подвійне променезаломлення, що може позначитися на якості спектра. Призма Літтрова, виготовлена з кристалічного кварцу - вдала модифікація призми Корню. Для центрального променя тут автоматично компенсується обертання площини поляризації.

ІСП-22

Основні оптичні характеристики спектрографа ІСП-22:

- Робочий діапазон спектра 2000 - 6000 Å (200 - 600 нм);
- Довжина спектра для робочого діапазону 220 мм;
- Дзеркальний об'єктив коліматора - сферически увігнуте дзеркало з зовнішнім шаром (алюміній);
- Диспергуюча призма - кварцова, типу Корню;
- Найбільший розрахунковий відступ фокальній поверхні від площини фотопластинки 0,3 мм.

Кварцовий спектрограф ІСП-22 призначений для кількісного і якісного емісійного спектрального аналізу металів і сплавів, руд, мінералів, хімічних препаратів і для різних спеціальних досліджень. Прилад може також бути використаний і для абсорбційного аналізу.

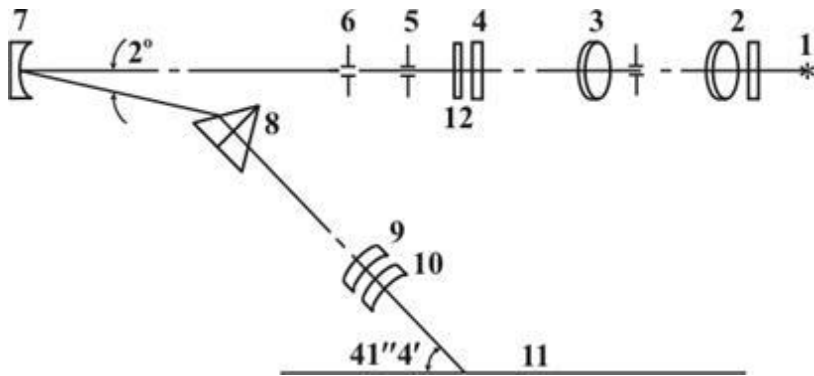


Рис. 6. Оптична схема спектрографа ІСП-22: 1 - джерело світла; 2, 3, 4 - Трьохлінзова система конденсорів; 5 - щілина; 6 - діафрагма для ослаблення впливу розсіяного світла; 7 - дзеркальний об'єктив коліматора; 8 - диспергуюча призма; 9, 10 - лінзи об'єктива камери; 11 - площину спектра, що збігається в спектрографі з площиною емульсії фотопластинки; 12 - ступінчастий послаблювач, який встановлюється перед щілиною в разі потреби. Графік ходу зворотної лінійної дисперсії від довжини хвилі показаний на малюнку.7.

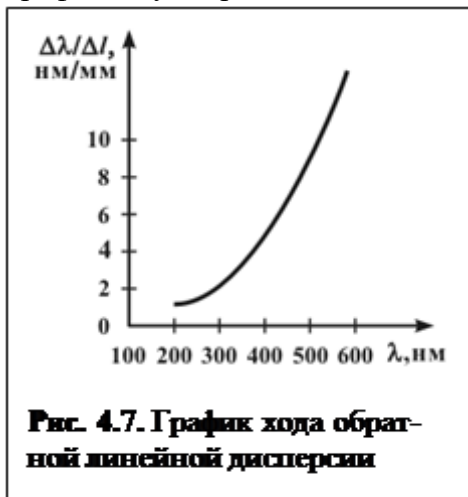


Рис.7. Зворотня лінійна дисперсія

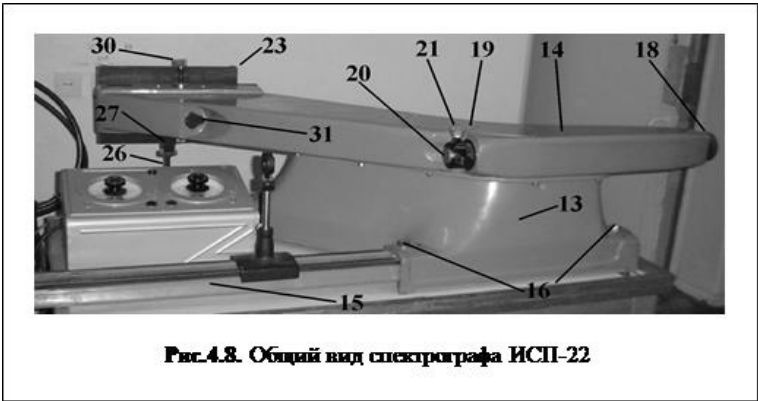


Рис.4.8. Общай вид спектрографа ИСП-22



Рис. 4.9. Составляющие части спектрографа ИСП-22

Рис.8.-9. Спектрограф ИСП-22

Спектрограф ИСП-22 складається з масивної литої станини 13 (рис.8, 9); вікна у верхній частині корпусу для доступу до призми, що закривається кришкою 19; корпусу 14; сталевому рейки 15; сферичного дзеркала 18. Щілина спектрографа має зовні кварцове вікно, закрите кришкою 20 з хрестоподібної маркою для контролю положення джерела світла. Барабан 21 служить для установки ширини щілини, відлік якої проводиться за шкалою з ціною поділки 0,0001 мм. До щілини додаються діафрагма з фігурними вирізами (рис. 10) і глуха шторка. Лівий фігурний виріз діафрагми служить для обмеження висоти щілини. Ліва частина вирізу обмежує висоту щілини зверху і знизу, залишаючи відкритою середню частину її. Положення цього вирізу контролюється по верхній шкалі. Одну поділку відповідає висоті щілини 1,2 мм. Права частина вирізу закриває середню частину щілини, залишаючи відкритими верхню і нижню її частини. Положення вирізу контролюється по нижній шкалі. Відлік по обох шкалах читається проти краю корпусу щілини. Фігурний виріз дозволяє фотографувати в середній частині щілини (ліва частина вирізу) досліджуваний спектр, а зверху і знизу від нього (права частина вирізу) - спектр порівняння (наприклад, спектр заліза). Обидва вирізу при цьому встановлюються за шкалами на один і той же розподіл.

Два вирізи, розташовані в середній частині діафрагми, служать для обмеження висоти щілини в її центральній частині. Менший виріз має висоту 1 мм, більший - 2 мм. Установка вирізів проводиться по двох довгих штрихах, розташованих в лівій частині діафрагми (внизу). Ступінчастий правий виріз називається діафрагмою Гартмана. Встановлюючи його ступені перед щілиною відповідно до лівої нижньої шкалою, ми маємо можливість отримати послідовно 9 дотичних спектрів однакової висоти. Другий, п'ятий і восьмий спектри фотографуються одночасно. Переміщення діафрагми в цьому випадку контролюється за шкалою в нижньому лівому краї. При роботі зі ступінчастим вирізом слід повернути діафрагму на 180 ° і читати відліки проти краю корпусу щілини.

На широкому кінці корпусу спектрографа змонтована його касетна частина. Барабан 22 (рис. 9) касетної частини несе на собі площину 23 з направляючими, в яких переміщується рамка 24 з касетою 25. Переміщення рамки проводиться за допомогою ходового гвинта 26 і маховика 27, забезпеченого кульковим фіксатором, чотири положення якого відповідають одному обороту маховика, т. е. переміщенню рамки на 10 мм. Переміщення касети може бути відраховано з розташованої праворуч міліметрової шкалою 28. Касета двома своїми клиновидними виступами (надягаються на шипи касетної рамки) притискається до її опорної площини, чим досягається відтворюваність положення фотопластинки в приладі. Закріплення касети на рамці здійснюється за допомогою засувки. Барабанчик 30 служить для включення в відкриту камерну частина корпусу міліметрової шкали довжиною 230 мм, карбується при бажанні в спектрограму. У положенні «Спектр» шкала відведена, а в положенні «Шкала» - притиснута до емульсії фотопластинки. Для освітлення шкали під час вдрукування є вікно, закрите заслінкою 31 (рис. 9).

Щоб виконати спектральний аналіз проб, необхідно знайти довжини хвиль спектральних ліній їх спектрів, тобто розшифрувати спектр. Для розшифровки спектрів проб поруч з ними фотографують спектри заліза. Щоб не сталося зрушень спектрів відносно один одного, не можна пересувати касету при зйомці: кожен наступний спектр слід знімати за допомогою ступінчастою діафрагми. Довжини хвиль ліній заліза визначені досить точно, їх можна розрахувати щодо довжини хвиль ліній досліджуваних спектрів. Довжини хвиль ліній заліза вказані в спеціальних атласах. Для розгляду спектрограм застосовуються спектропроектори і вимірювальні мікроскопи. Найбільш поширений спектропроектор ПС-18. Світло від лампи розжарювання поворотною призми, закріпленої в спеціальній голівці, направляється на предметний столик. Об'єктивом спектр фокусується на екран. Предметний столик можна переміщати рукоятками в двох взаємно перпендикулярних напрямках і виводити зображення необхідної ділянки спектра на екран спектропроектора. Спектропроектор дає 20-кратне збільшення. Спеціально випускаються атласи.

Спектрограф ІСП-30

Спектрограф ІСП-30 з кварцовою оптикою призначений для фотографування емісійних спектрів в області 200-600 нм.

Як диспергуючий елемент в ньому використовується кварцова призма Корню з заломлюючим кутом 60 градусів, основою 42 мм і висотою (чинним отвором) 30 мм. Зворотній лінійна дисперсія приладу складає 0.35; 1.60; 3.90 і 11.00 нм / мм при 200, 300, 400 і 600 нм відповідно. Роздільна здатність в області 300 нм - 10000. В цій області розділяються спектральні лінії, що розрізняються не менше ніж на 0.03 нм. Оптична схема спектрографа приведена на рис. 10.

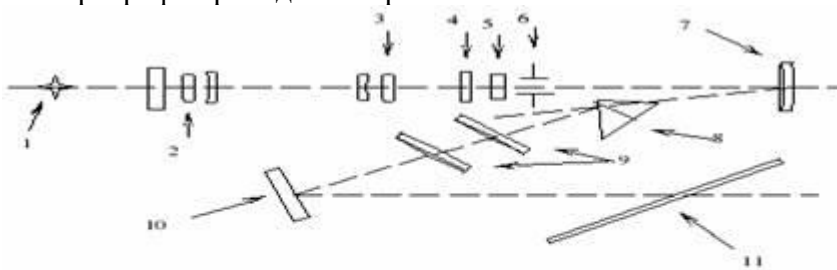


Рис. 10. Оптична схема спектрографа ІСП-30

Випромінювання від джерела збудження 1 проходить трьохлінзовою освітлювач, що складається з конденсорів 2, 3, 4, щілину 6 і потрапляє на дзеркало об'єктива 7, яке

відхиляє падаючі на нього промені і посилає паралельний пучок світла на призму 8, яка розкладає його на монохроматичні складові. Камерний об'єктив 9 з фокусною відстанню 830 мм збирає промені світла так, що на площині 11 довжиною 240 мм, з якої сполучена фотоемульсія, утворюються монохроматичне зображення щілини (спектральні лінії).

Всі деталі оптичної схеми змонтовані на масивній станині, ретельно от'юстовані і закриті світлонепроникною кришкою. Світло вводиться в прилад через щілину з шириною розкриття 0.0 - 0.4 мм. Величина розкриття контролюється барабаном, що має ціну поділки 0.001 мм. Щілина закрита насадкою, в пази якої в залежності від цілей роботи може вводиться або діафрагма з фігурними вирізами, або трьох- або дев'яноступеневий послаблювач. У касетній частині за допомогою затискачів закріплюється касета з фотопластинкою. Переміщення касети кнопками «Вгору» і «Вниз» дає можливість фотографувати на одну платівку кілька десятків спектрів. Поворотом рукоятки на фотопластинку можна надрукувати міліметрову шкалу, яка в подальшому полегшує орієнтування в спектрі.

Спектрограф забезпечений двома реле часу - випалу і експозиції, які керують роботою генератора, затвора, що відкриває доступ світла в прилад, і системою переміщення касети з фотопластинкою.

Для обмеження щілини приладу по висоті служить діафрагма з фігурними вирізами - діафрагма Гартмана (рис. 11), яка поміщається в насадці перед щілиною спектрографа.

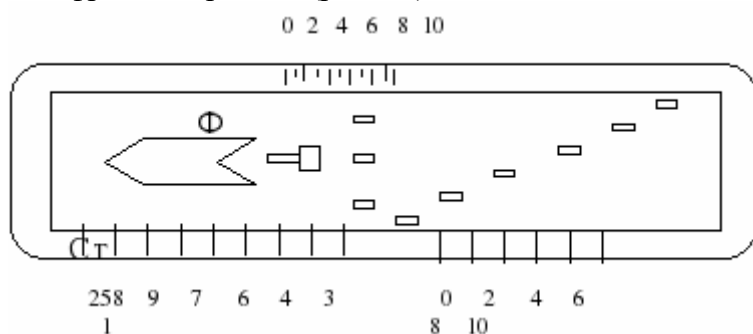


Рис.11. Діафрагма Гартмана

При фотографуванні спектрів для якісного аналізу (без переміщення касети) використовують фігурний (Ф) або ступінчастий (Ст) вирізи діафрагми. Фігурний виріз забезпечує отримання дотичних спектрів порівняння і проби. При цьому діафрагма вставляється в насадку краєм А. При зйомці спектра порівняння положення діафрагми фіксується за шкалою I щодо краю насадки; при зйомці спектра проби - за шкалою III, причому номери поділів обох шкал повинні збігатися. Ступінчасті вирізи дозволяють отримати дев'ять дотичних спектрів, три з яких фотографуються одночасно.

Два вирізи, розташовані в середній частині діафрагми (С), використовуються, в основному, при проведенні кількісного аналізу. Висота спектрів, одержуваних з вузьким і широким вирізами, становить 0.8 і 1.8 мм відповідно. При роботі зі східчастими або центральними вирізами діафрагму вставляють в насадку краєм Б. Установка східчастих вирізів проводиться за шкалою II, центральних - по двох довгих штрихах в лівій частині діафрагми.

ІСП-51

Скляний спектрограф ІСП-51 (рис. 12) Трьохпризмовий спектрограф з робочим діапазоном 360- 1000 нм для видимої області спектра. Прилад працює за звичайною і автоколімаційною схемами. Змінні камери в широких межах змінюють характеристики приладу. З коліматором, об'єктив якого має фокусну відстань 300 мм, можна застосовувати камери з фокусною відстанню об'єктива 120 або 270 мм. Перша камера має велику світлосилу і застосовується при роботі зі слабкими джерелами світла. При роботі з другою камерою світлосила зменшується, але зростає лінійна дисперсія приладу.

Тут, 1 щілина спектрографа, 2 - ахроматичний коліматор. Диспергуюча система складається з трьох призм (3, 4, 5) зібраних за схемою Фестерлінга, 6 - об'єктив камери, 7 -

фокальна площина об'єктива камери. Взаємне розташування призм і їх взаємний рух забезпечують проходження в мінімумі променя будь-якої довжини хвилі, що йде по оптичній осі камери, і відхилення його на постійний кут 90° по відношенню до осі коліматора. Дві з цих призм (3 і 5) тригранні з заломлюючим кутом 63° , середня (4) - призма Аббе з еквівалентним заломлюючим кутом 63° . Така конструкція забезпечує високу якість спектра і плоске поле.

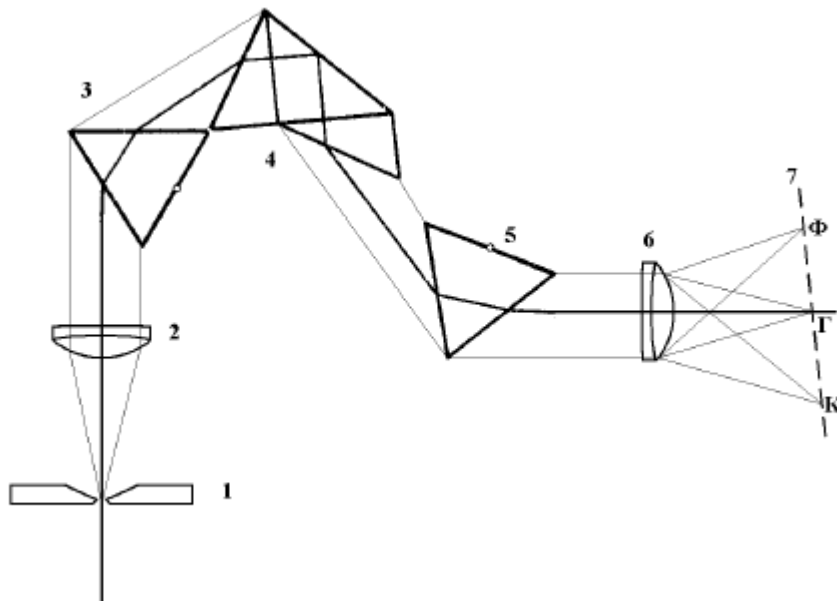


Рис.12. Оптична схема ІСП-51

Для отримання більшої лінійної дисперсії (табл. 2) призматична система ІСП-51 може бути забезпечена камерою УФ-84 з фокусною відстанню $f = 800$ мм і УФ-90 з $f = 1300$ мм. При установці камери УФ-89 замінюється також коліматор спектрографа з $f_1 = 304$ мм на коліматор УФ-61 з $f = 800$ мм. Спектрограф ІСП-51 з об'єктивом камери УФ-90 працює по автоколімаційній схемі. Прилад має три касети, розраховані на пластинки $6,5 \times 9$; 9×12 ; $6,5 \times 18$. Обертанням рукоятки здійснюється перехід від однієї області спектра до іншої. Цей перехід контролюється за шкалою, яка б показала число обертів. Лінійна дисперсія (нм / мм) спектрографа ІСП-51 з різними камерами

Длина волни, нм	Фокусное расстояние объективов камер f , мм			
	120	270	800	1300
1000	77,0	34,2	11,6	3,7
800	44,1	19,6	6,0	2,1
700	33,6	14,9	5,1	1,6
600	19,6	8,7	3,0	0,9
500	10,5	4,7	1,8	0,5
450	6,3	2,8	0,7	0,2
400	4,2	1,9	0,6	0,15
360	2,5	1,1	0,4	0,1

Призматичні монохроматори

Найбільш поширеним приладом цього класу є монохроматор типу УМ-2 (рис. 13), який призначений для роботи в видимій частині спектра. В якості диспергуючої системи застосована призма постійного відхилення. Перехід від однієї області спектра до іншої здійснюють за допомогою барабана, обертання якого пов'язане з поворотом призматичного

столика. За шкалою барабана відзначається кут його повороту, проградуєований за відомим спектром. Монохроматор володіє невеликою дисперсією, тому він може бути використаний при вивченні тільки простих емісійних і абсорбційних спектрів.

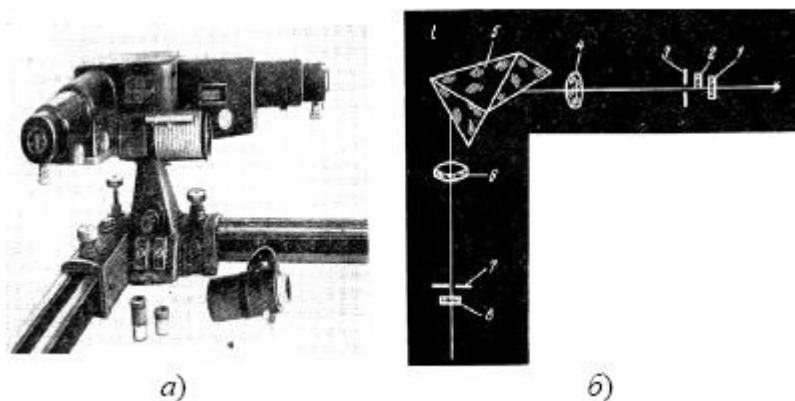


Рис. 13. Універсальний монохроматор УМ-2:

а - зовнішній вигляд; б - оптична схема;

1 і 8 - захисні скла; 2 - поворотна призма для одночасного одержання спектрів двох джерел; 3 - вхідна щілина; 4 і 6 - об'єктиви; 5 - призма; 7 - вихідна щілина.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики монохроматора УМ-2

1. Диспергуючий елемент, його параметри	Призма Аббе ТФ-3 60° база 100 мм	
2. Фокусна віддаль коліматора, відносний отвір	280 мм 1:6	
3. Фокусна відстань камери, відносний отвір	280 мм 1:6	
4. Робочий область спектра, мкм	0,36-1,0	
5. Обернена лінійна дисперсія, нм/мм	для $\lambda = 0,4$ мкм	3,2
	для $\lambda = 0,5$ мкм	8,4
	для $\lambda = 0,6$ мкм	16,5
	для $\lambda = 0,8$ мкм	42,5

ЗМР-3

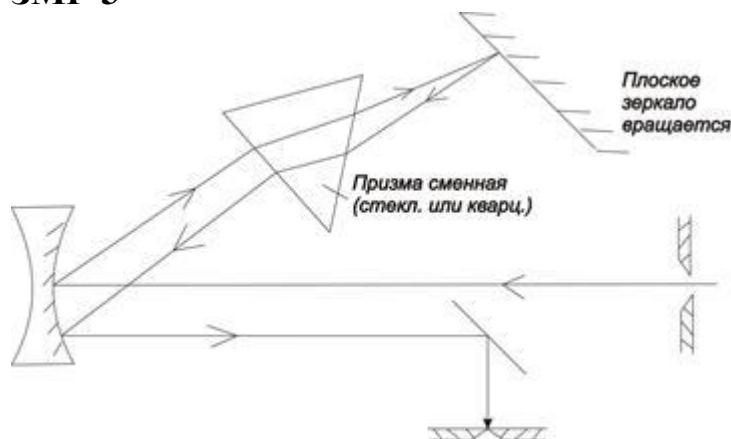


Рис.13. Схема призмового монохроматора із дзеркальною оптикою марки ЗМР-3

Фокусуєуючою оптикою служить параболічне алюмінійоване дзеркало з $f = 270$ мм. Робоча область 220 - 2500 нм. У монохроматоре ЗМР-3 зміна довжини хвилі здійснюється невеликим поворотом дзеркала 4 (рис. 1.4), що дозволяє випромінюванню будь-якої довжини хвилі проходити через призму з мінімальним відхиленням від начального шляху.

Подвійні монохроматори

Для поліпшення чистоти виділеної ділянки спектра проводиться повторне пропускання однохвильова світла з домішкою розсіяного світла - крізь другий монохроматор, утворюється так званий подвійний монохроматор. У них використовуються в основному ті ж оптичні схеми, що і в звичайних. Існують подвійні монохроматори з одноразовим і подвійним розкладанням світла.

У монохроматорі з одноразовим розкладанням світла призми нерухомі. Виділення однохвильова світла виробляється переміщенням середньої щілини «S» Дія призми (в сенсі розкладання) зворотне. Друга половина монохроматора тільки усуває розсіяне світло без додаткового розкладання.

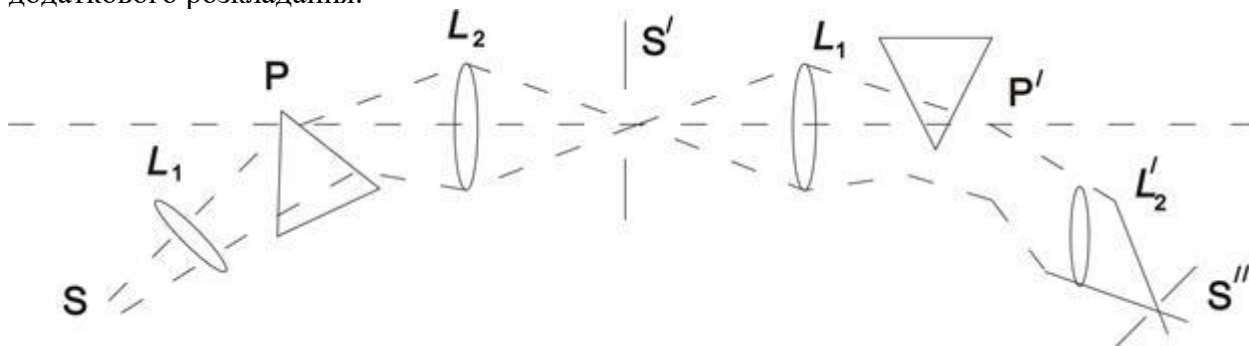


Рис.14. а Монохроматор з одноразовим розкладанням світла

Є монохроматори з подвійним розкладанням, в яких в площині щілини спектр розширюється в 2 рази. Тут обидві дисперсійні системи працюють в одному напрямку, за рахунок чого лінійна дисперсія збільшується в 2 рази. Зміна довжини хвилі проводиться одночасним поворотом обох призми приладу.

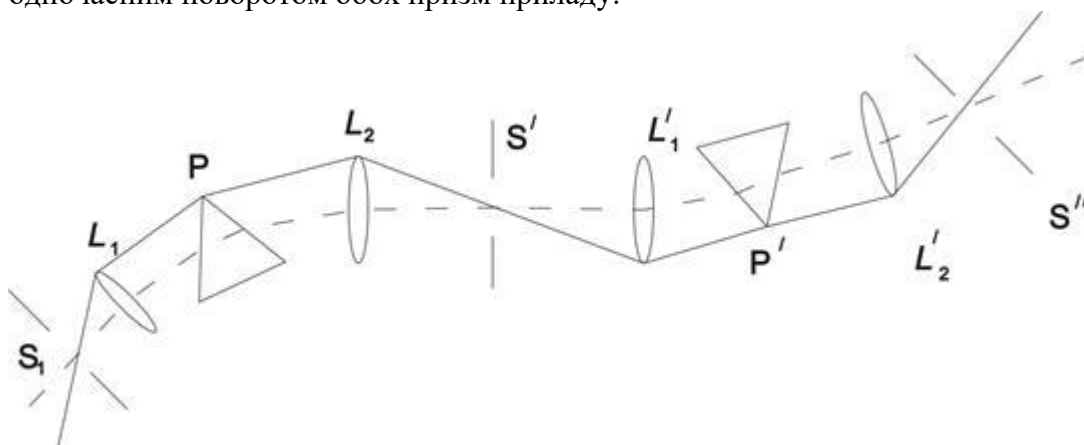


Рис.14. б. Монохроматор з подвійним розкладанням світла

В ультрафіолетовій і видимій частині спектра використовують подвійний монохроматор типу ДМР-4. Конструктивно він являє собою як би з'єднання двох монохроматорів. Це зроблено з метою усунення розсіяного світла. Він має три щілини: вхідні, середню і вихідну. У зв'язку з великим кількістю заломлюючих і відбивають, пропускання подвійного монохроматора дуже невелика, а необхідна точність юстування вище, ніж у простого монохроматора.

Подвійний монохроматор ДМР-4 укомплектований змінними призмами з кристалічного кварцу і скла ТФ-1 (по дві кожного сорту); вони дозволяють проводити вимірювання в області спектра від 210 до 2500 нм. Вхідна і вихідна щілини приладу розташовані на його протилежних сторонах. У напрямку їх осей біля основи монохроматора закріплені дві оптичних лави; по ним ходять два Рейтера, в осьові гнізда яких можна за допомогою гвинта закріплювати стрижні (діаметром 15 мм) будь-яких власників. Як і у монохроматора УМ-2, зміна довжини хвилі виходить з ДМР-4 випромінювання управляється градуированим барабаном; його обертання викликає одночасний поворот

обох парних призм. Для градуювання приладу в довжинах хвиль застосовують два світлофільтру в спеціальній оправі, що дозволяє надягати їх на конденсорні насадки перед вхідною щілиною. Світлофільтрами служать празеодімовое скло ЗС-7 і неодимове ПС-7, мають ряд різких піків поглинання (максимумів і мінімумів) в області від 340 до 2700 нм

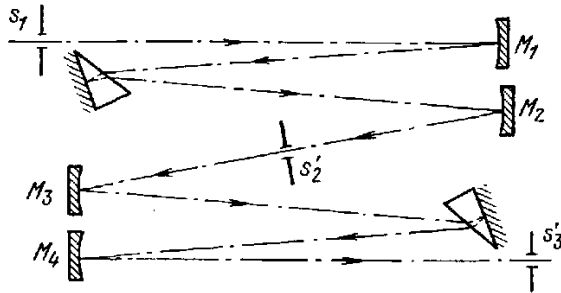


Рис.15. Подвійний монохроматор ДМР-4

Л.12. Характеристики призматичних спектральних приладів

Кутове збільшення. Кутова і лінійна дисперсії. Роздільна здатність призматичного приладу. Практична роздільна здатність. Спектральна ширина щілини, вибір нормальної ширини вхідної щілини спектрального приладу.

Розглянемо основні властивості призматичних систем.

Кутове збільшення призми

Кутовий розхил пучка, який проходить через поверхню a розділу двох діелектриків з показниками заломлення n_1 і n_2 (рис.1 а), змінюється. Змінюється і переріз пучка: переріз падаючого пучка рівний

$D_1 = AB \cdot \cos i_a$, заломленого – $D_2 = AB \cdot \cos r_a$. Співвідношення $\frac{dr_a}{di_a} = \Gamma_a$ називають *кутовим збільшенням* поверхні a . Продиференціювавши інваріант заломлення $n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$ і

використовуючи значення перерізів D_1 і D_2 , одержимо для кутового збільшення поверхні вираз:

$$\Gamma_a = \frac{dr_a}{di_a} = \frac{n_1 \cdot \cos i_a}{n_2 \cdot \cos r_a} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{D_1}{D_2} \quad (8)$$

Розглянемо кутове збільшення призми, яка складається з двох поверхонь a і b і знаходиться в повітрі. Як видно з мал.2, б, кутовий розхил di_a пучка на вході в призму залежить від розмірів вхідної щілини s . В свою чергу, кутовий розхил пучка на виході з призми визначає розміри зображення щілини s' . Збільшення призми знаходимо, перемножуючи збільшення Γ_a і Γ_b кожної з граней:

$$\Gamma = \Gamma_a \Gamma_b = \frac{n_1 \cdot \cos i_a}{n_2 \cdot \cos r_a} \cdot \frac{n_2 \cdot \cos i_b}{n_3 \cdot \cos r_b} = \frac{D_{\text{вх}}}{D} \cdot \frac{D}{D_{\text{вих}}} = \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} \quad (9)$$

де D , $D_{\text{вх}}$, $D_{\text{вих}}$ – перерізи пучка в призмі на вході і на виході.

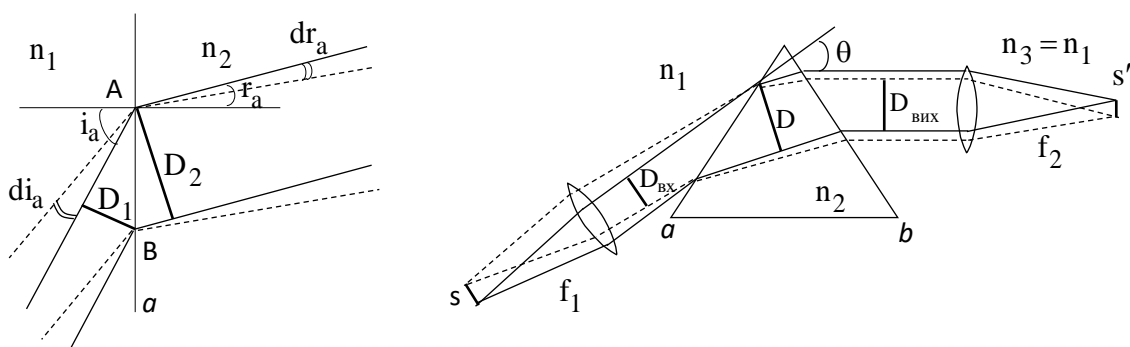


Рис.1. До обчислення кутового коефіцієнта поверхні (а) і призми в повітрі (б); θ – кут відхилення променя призмою

Таким чином, збільшення призми можна знайти за перерізами пучка на вході і на виході. При симетричному ході променів через призму збільшення рівне одиниці. При цьому кут відхилення променя в призмі найменший. Якщо кут мінімального відхилення відповідає середній частині видимого спектра, то для фіолетових променів збільшення призми більше одиниці, а для червоних – менше одиниці. Збільшення призми впливає на ширину s' зображення спектральних ліній:

$$s' = s \cdot \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{\Gamma}{\sin \varepsilon} = s \cdot \frac{f_2}{f_1} \cdot \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{вих}}} \cdot \frac{1}{\sin \varepsilon} \quad (10)$$

де $\frac{f_1}{f_2}$ – збільшення об'єктивів приладу; ε – кут між площиною спектра і віссю камери.

Це особливо помітно в призмових приладах, таких як спектрограф ИСП-51. Наприклад, найменше відхиляється в цьому приладі пучок з довжиною хвилі 471,3 нм, а збільшення призми для довжин хвиль 546,1; 435,8 і 404,7 нм складає відповідно 0,85; 1,35; 1,76. Таким чином, в межах області спектра шириною всього в 140 нм ширина зображення спектральних ліній за рахунок збільшення призми змінюється вдвічі.

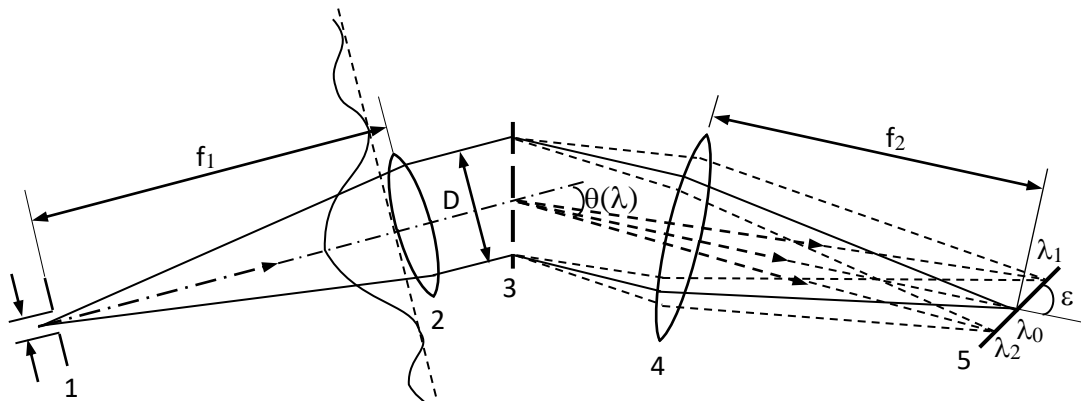


Рис. 2. Схема щілинного спектрального приладу: 1 – входна щілина, 2 – коліматорний об'єктив, 3 – диспергуюча система, 4 – камерний об'єктив, 5 – спектр, D – діючий отвір, ε – кут між площиною спектра і віссю камери

Кутова і лінійна дисперсії

Кутовою дисперсією спектрального приладу називають величину $\frac{d\theta}{d\lambda}$, яка характеризує зміну

кута відхилення θ в залежності від довжини хвилі. Залежність $\frac{d\theta}{d\lambda}$ для кутової дисперсії має вигляд:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \sum_{a=1}^k \frac{1}{n_{a+1}} \cdot \frac{dn_a}{d\lambda} \cdot \frac{\sin \alpha_a}{\cos r_a \cdot \cos r_{a+1}} \prod_{l=a+2}^k \Gamma_l \quad (11)$$

де $\frac{\sin \alpha_a}{\cos r_a \cdot \cos r_{a+1}} = D_\alpha$ – тригонометричний множник призми між поверхнями a і $a+1$, які

утворюють заломлюючий кут α . Наприклад, для трьохпризмового спектрографа ИСП-51 кутова дисперсія, згідно (11), рівна:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\cos r_1 \cdot \cos r_2} \cdot \Gamma_2 \Gamma_3 + \frac{\sin \alpha}{\cos r_3 \cdot \cos r_4} \cdot \Gamma_3 + \frac{\sin \alpha}{\cos r_5 \cdot \cos r_6} \right) \quad (12)$$

Для одної призми одержуємо:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos r_1 \cdot \cos r_2} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot D_\alpha \quad (13)$$

При мінімальному відхиленні промінь в призмі йде паралельно основі, тому $r_1 = i_2 = \frac{\alpha}{2}$ (рис.4).

Здійснивши тригонометричні перетворення і враховуючи, що $\sin r_2 = n \cdot \sin i_2$, з (13) одержимо:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \quad (14)$$

Формулою (14) можна користуватися поблизу кута найменшого відхилення в значній області спектра (в межах зміни кута r_2 приблизно на 10°).

Таким чином, кутову дисперсії призми $\frac{d\theta}{d\lambda}$ описує формула (14).

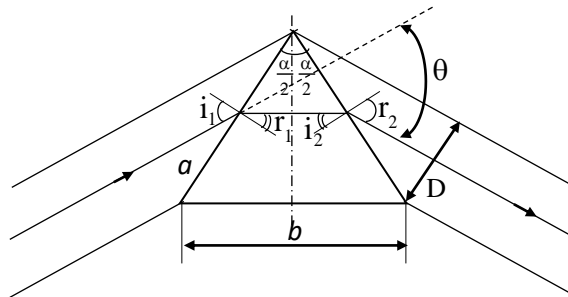


Рис.3. Проходження променя через призму при мінімальному куті відхилення

Для найбільш поширених призм з заломлюючим кутом $\alpha = 60^\circ$ з формули (14) одержуємо вираз:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{2}{\sqrt{4 - n^2}} \quad (15)$$

зручний для орієнтовних розрахунків.

Якщо призма задана, тобто задані $\frac{dn}{d\lambda}$ і кут α , то кутова дисперсія є функцією лише кутів заломлення, які визначаються кутом падіння променя на першу грань призми. Тобто, $\frac{d\theta}{d\lambda} = f(i_1)$. Те ж саме можна сказати і про кутове збільшення призми Γ . Кут відхилення променя θ також є функцією кута i_1 . Всі три залежності зображені на рис.4. Криві розраховані для скляної призми ($n = 1,5$) з заломлюючим кутом $\alpha = 60^\circ$.

На перший погляд здається, що для збільшення дисперсії призми потрібно зменшувати кут i_1 (тоді D_α зростає). Але, з порівняння кривих $D_\alpha(i_1)$ і $\Gamma(i_1)$ видно, що кутове збільшення призми із зменшенням i_1 росте швидше, ніж тригонометричний множник. Роздільність в спектрі при цьому погіршується. Інша справа, якщо збільшувати кут падіння променя. Тоді кутове збільшення призми падає, а дисперсія залишається майже незмінною. Спектральні лінії стають вужчими і при тій же дисперсії роздільність збільшується. Але в цьому випадку зростають втрати світла за рахунок великого відбивання при ковзному падінні (рис.5), а також за рахунок малої величини перерізу пучка світла.

При падінні променів на призму під кутом Брюстера для тієї компоненти поляризації, електричний вектор якої лежить в площині падіння, втрати на відбивання відсутні (рис.5). В цьому випадку кут між відбитим і заломленим променями складає 90° . Тому, як видно з рис.7, $i_1 + \frac{\alpha}{2} = 90^\circ$. Звідси, враховуючи умову кута Брюстера, $\text{tg } i_1 = n$, знаходимо співвідношення між заломлюючим кутом бріюстерівської призми і показником заломлення n речовини:

$$\text{tg } \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{n} \quad (16)$$

Заломлюючий кут бріюстерівської призми, як правило, більший 60° . Наприклад, бріюстерівська призма з плавленого кварцу для $\lambda = 0,49$ мкм ($n = 1,463$) має кут $\alpha = 68^\circ 40'$; заломлюючий кут

призми зі скла ТФ-1 для тієї ж довжини хвилі ($n=1,6605$) складає $62^{\circ}10'$. Такі призми використовують в лазерних резонаторах.

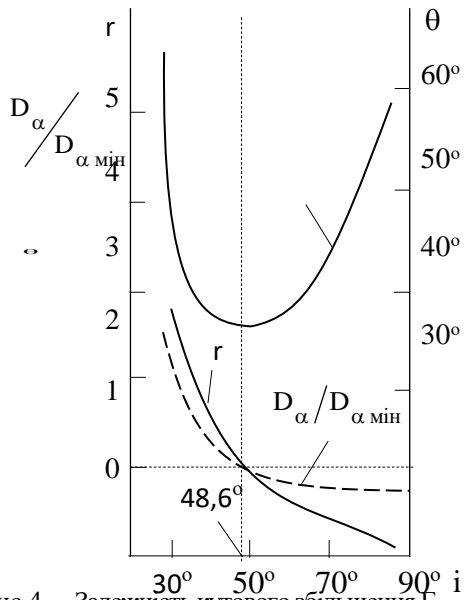


Рис.4. Залежність кутового збільшення Γ , i_1 тригонометричного множника D_α у відносних одиницях і кутового відхилення θ променя від кута падіння на першу грань призми. $D_{\alpha \text{ мін}}$ – значення в мінімумі кута відхилення.

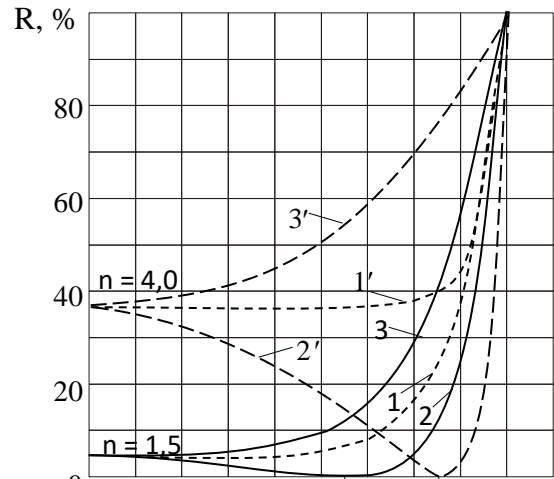


Рис.5. Залежність коефіцієнта відбиття світла від кута падіння променя на поверхню діелектрика: для неполяризованого світла (1) і двох компонентів поляризації (2,3) при $n = 1,5$ і $n = 4,0$.

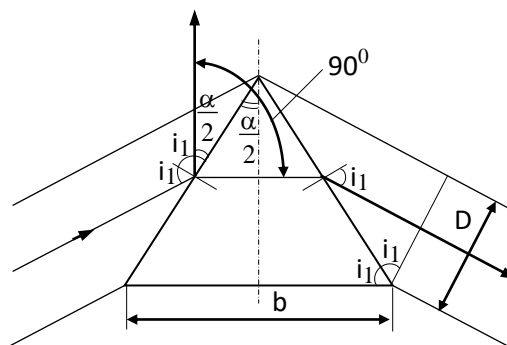


Рис.6. Брюстерівська призма

Як буде показано далі, для призми Брюстера справедливим є співвідношення

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{b}{D} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (17)$$

де b і D – розміри основи призми і перерізу пучка. Врахувавши, що для брюстерівської призми $b=2D$ (це очевидно з рис.7), з (17) одержуємо:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = 2 \frac{dn}{d\lambda} \quad (18)$$

Отже, кутова дисперсія брюстерівської призми чисельно дорівнює подвоєній величині дисперсії матеріалу призми.

Лінійною дисперсією називається відношення $\frac{dl}{d\lambda}$, де l – відстань між лініями спектра у фокальній площині лінзи, λ – довжини хвиль, між якими вимірюється відстань (l).

Лінійна дисперсія $\frac{dl}{d\lambda}$ зв'язана з кутовою співвідношенням:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{f_2}{\sin \varepsilon} \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (19)$$

Призмові прилади звичайно мають невелику обернену лінійну дисперсію $\frac{d\lambda}{dl}$, порядку десятків або одиниць нм/мм. В таблиці (1) приведені основні технічні характеристики монохроматора УМ-2. Дисперсія збільшується в короткохвильову і довгохвильову області спектра у відповідності із збільшенням $\frac{dn}{d\lambda}$ поблизу області поглинання матеріалу призми.

Роздільна здатність призмового приладу

Роздільна здатність згідно критерію Релея виражається формулою:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \quad (20)$$

Роздільна здатність призмового приладу виражається формулою:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{d\theta}{d\lambda} D. \quad (21)$$

Таким чином, роздільна здатність спектрального приладу рівна добутку кутової дисперсії на величину D діючого отвору приладу.

Для мінімуму кута відхилення цей вираз може бути представлено в іншому вигляді. Позначимо сторону призми через a , а основу (базу призми) через b (рис.4). Тоді одержимо:

$$\frac{b}{2} = a \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (22)$$

$$D = a \cos r_2 = a \sqrt{1 - \sin^2 r_2} = a \sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (23)$$

Розділимо вираз (22), подвоївши його, на (23) і помножимо праву і ліву частини в одержаному виразі на $\frac{dn}{d\lambda}$. В результаті одержимо:

$$\frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{b}{D} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (24)$$

Права частина одержаного виразу є кутовою дисперсією $\frac{d\theta}{d\lambda}$ (14). Тому вираз (24) можна записати:

$$\frac{dn}{d\lambda} b = \frac{d\theta}{d\lambda} D \quad (25)$$

Порівнявши (25) і (21), одержимо вираз для роздільної здатності призми:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{dn}{d\lambda} b \quad (26)$$

Цей вираз є більш зручним для розрахунку роздільної здатності, ніж вираз (21), оскільки значення дисперсії оптичних матеріалів можна знайти в таблицях, а розмір основи призми легко виміряти. При діафрагмуванні пучка величина b повинна бути замінена різницею геометричних шляхів крайніх променів пучка в призмі. Якщо у приладі є m однакових призм, то це еквівалентно збільшенню бази b в m раз.

Роздільна здатність призмових приладів може становити десятки тисяч. Для одержання величини $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$ порядку 10^5 потрібні призми великих розмірів, в яких стають помітними поглинання і викривлення за рахунок неоднорідності матеріалу.

Практична роздільна здатність, вибір нормальної ширини вхідної щілини спектрального приладу.

У фокальній площині об'єктива вхідного коліматора спектрального приладу встановлена вузька щілина, довжина якої h_1 багато більше ширини S_1 . Щілина орієнтована так, щоб її довжина була паралельна заломлюючому ребру призми в призматичних приладах або штрихами решітки в дифракційних приладах. При висвітленні щілини випромінюванням досліджуваного джерела саму щілину можна розглядати як джерело випромінювання. Нехай щілину освітлена монохроматичним випромінюванням з довжиною хвилі λ . Побудова зображення в спектральному приладі за правилами геометричної оптики наведено на рис.7. Оскільки щілину знаходиться в фокальній площині коліматора об'єктива, то пучки світла, що виходять з кожної точки щілини, після виходу з об'єктива стають паралельними. Позначимо через $\Delta\varphi$ кут між паралельними пучками, відповідними крайніх точках щілини. Він дорівнює куту, під яким видно щілину з центру об'єктива коліматора, тобто $\Delta\varphi \approx S_1/f_1$, де f_1 - фокусна відстань об'єктива коліматора. Будемо вважати, що після виходу з диспергуючої системи кут між цими пучками залишиться таким же (тобто з метою спрощення не будемо враховувати збільшення диспергуючої системи).

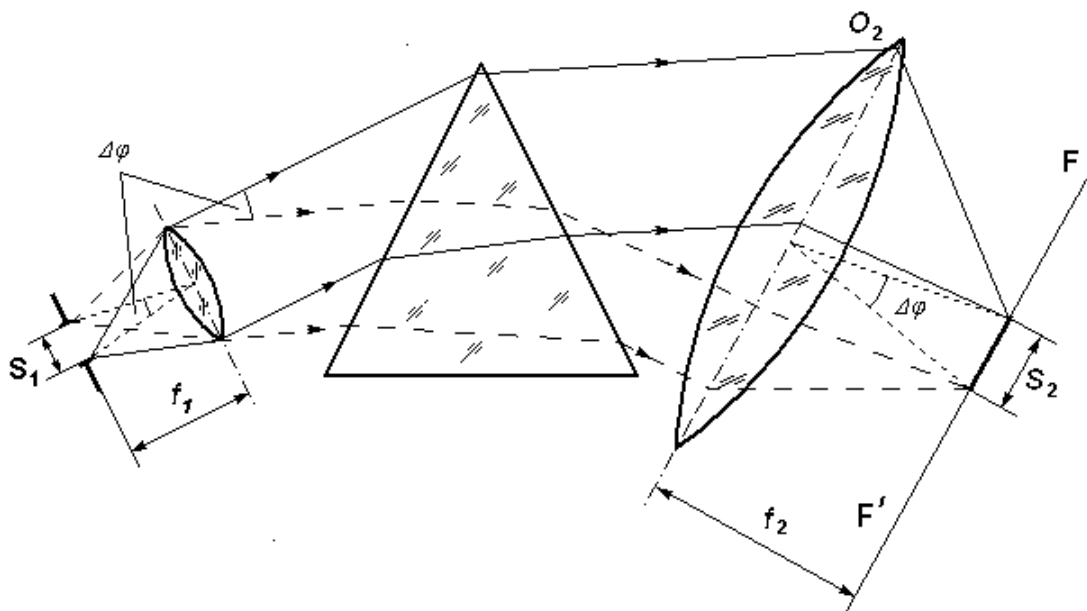


Рис.7. Утворення зображення вхідної щілини. f_1 , f_2 - фокусні відстані об'єктивів вхідного коліматора і камери.

Пройшовши камерний об'єктив, пучки променів сходяться і утворюють в фокальній площині зображення крайніх точок щілини, відстані між якими дорівнює $S_2 \approx f_2 \cdot \Delta\varphi = f_2 \cdot S_1/f_1$, де f_2 - фокусна відстань камерного об'єктива. Таким чином, ширина зображення вхідної щілини дорівнює: $S_2 = S_1 \cdot f_2 / f_1$.

При запису і аналізі спектра принципове значення мають також такі характеристики як *нормальна ширина* і *спектральна ширина вхідної щілини спектрального приладу*. Нехай у випромінюванні, падаючому на вхідну щілину спектрального приладу, містяться дві близькі довжини хвилі λ і $\lambda + d\lambda$. Тоді в фокальній площині камерного об'єктива утворюються два зміщених одна відносно іншої зображення вхідної щілини, які відповідають цим довжинах хвиль (рис.8). Ці зображення ми домовилися називати спектральними лініями. Величину, рівну відношенню відстані dI між центрами спектральних ліній з двома близькими довжинами хвиль λ і $\lambda + d\lambda$, які спостерігаються в фокальній площині камерного об'єктива спектрального приладу, до різниці цих довжин хвиль $d\lambda$ називають лінійною дисперсією D_1 спектрального приладу: $D_1 = dI/d\lambda$.

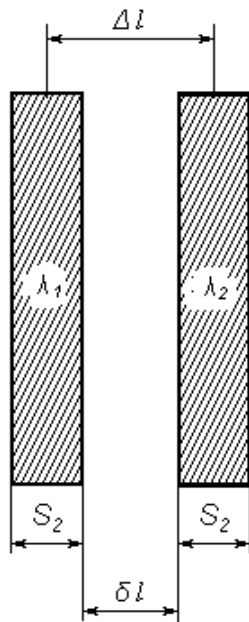
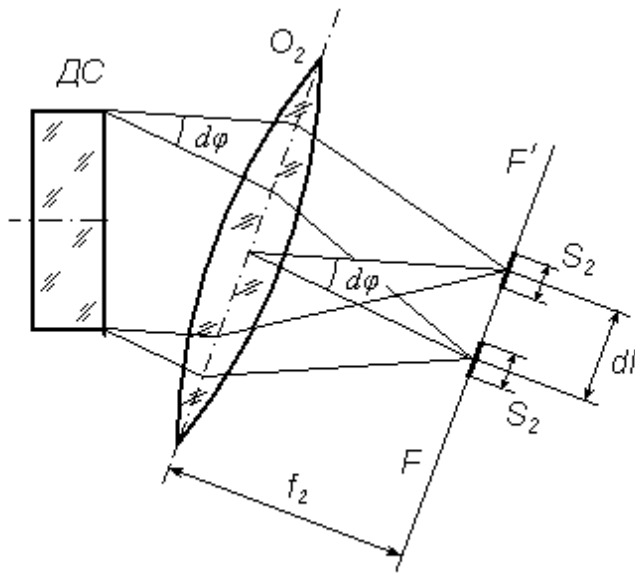


Рис.8. До виразу для лінійної дисперсії.

Рис.9. Зображення щілини в світлі двох близьких довжин хвиль λ_1 і λ_2 .

Лінійну дисперсію також можна визначити як відстань між центрами спектральних ліній з довжинами хвиль, які відрізняються на 1 нм, в фокальній площині камерного об'єктива спектрального приладу.

Якщо кут між пучками з довжинами хвиль λ і $\lambda + d\lambda$ на виході з диспергуючої системи дорівнює $d\varphi$, то відстань dl між центрами спектральних ліній в фокальній площині дорівнює $dl = f_2 \cdot d\varphi$. Підставляючи цей вираз у формулу для лінійної дисперсії, отримаємо:

$dl/d\lambda = f_2 \cdot d\varphi / d\lambda$. Величина $d\varphi / d\lambda = D_\varphi$ є кутовою дисперсією диспергуючої системи.

Лінійна дисперсія спектрального приладу може бути обчислена і через кутову дисперсію його диспергуючого елемента $D_1 = dl / d\lambda = f_2 \cdot D_\varphi$. Величини dl і f_2 зазвичай виражають в міліметрах, а $d\lambda$ - в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), тому лінійна дисперсія має розмірність мм / нм. Відзначимо, що поряд з поняттям лінійна дисперсія досить часто вживається поняття зворотна лінійна дисперсія $d\lambda / dl$. Вона являє собою інтервал довжин хвиль, що уміщається на довжині в 1 мм на спектрі, розташованому в фокальній площині камерного об'єктива. Зворотна лінійна дисперсія має розмірність нм / мм. Лінійна

дисперсія є дуже важливою характеристикою спектрального приладу. Чим більше $d\lambda / d\lambda$, тим більше відстань Δl в фокальній площині камерного об'єктива між спектральними лініями з заданими довжинами хвиль λ_1 і λ_2 і тим точніше воно може бути виміряна. Розглянемо зображення щілини в світлі двох близьких довжин хвиль λ_1 і λ_2 (рис.9). З малюнка видно, що відстань між внутрішніми краями зображень $\delta l = \Delta l - S_2$. Якщо $S_2 < \Delta l$, то зображення щілини не перекриваються ($\delta l > 0$) і, отже, дві монохроматичні складові з довжинами хвиль λ_1 і λ_2 можуть бути представлені в спектрі у вигляді двох окремих ліній. У цьому випадку говорять, що спектральні лінії розділяються (сприймаються роздільно) спектральним приладом. Якщо ж $S_2 > \Delta l$, то зображення перекриваються ($\delta l < 0$), тобто зливаються в одну широку смугу, і ми не можемо точно визначити положення центрів спектральних ліній.

Теоретична межа окремого сприйняття двох спектральних ліній у вигляді двох зображень вхідної щілини в різних довжинах хвиль визначає явище дифракції. Релей ввів критерій розділення дифракційних зображень, який в застосуванні до спектральних приладів звучить так: зображення двох прилеглих спектральних ліній з рівними інтенсивностями і однаковими симетричними контурами можна розділити (розділені для сприйняття), якщо центральний максимум дифракційної картини від одного джерела (лінії) збігається з першим мінімумом дифракційної картини від іншого.

При виконанні критерію Релея інтенсивність «провалу» між максимумами становить приблизно 80% від інтенсивності в максимумі, що є достатнім для візуального роздільного сприйняття двох близько розташованих ліній. Якщо критерій Релея порушений, то спостерігається одна лінія. При розгляді розділення спектральних ліній за критерієм Релея вхідна щілина вважається нескінченно вузьким джерелом світла, а дифракція світла, що випускається щілиною, відбувається на апертурній діафрагмі. Через дифракції зображення тонкої вхідної щілини має вигляд системи смуг, що ускладнює здатність розділити близько розташовані зображення щілин від пучків світла з близькими довжинами хвиль. Паралельний пучок променів монохроматичного світла від нескінченно вузької вхідної щілини, сформований коліматором, після проходження діючого отвору приладу внаслідок дифракції на ньому стає таким, що слабо розходиться. Тому в фокальній площині камерного об'єктива центральний максимум дифракційної картини буде являти собою не нескінченно вузьку лінію, а лінія кінцевої ширини, яку можна назвати дифракційною шириною спектральної лінії. Для кількісних оцінок за дифракційну ширину спектральної лінії приймають половину ширини її центрального максимуму (або половину відстань між першими мінімумами, оточуючими центральним максимумом дифракційної картини від нескінченно вузької вхідної щілини). Вона являє найменшу ширину спектральної лінії, яку можна отримати при використанні конкретного спектрального приладу.

Спектральна ширина щілини

Для вхідної щілини кінцевої ширини, мінімального відстані між спектральними лініями з довжинами хвиль λ_1 і λ_2 , при якому вони ще можуть бути розділені, відповідає випадок, коли зображення вхідної щілини в цих довжинах хвиль стикаються (при наявності 20% провалу інтенсивності між ними), як впливає з рис.9. З огляду на те, що в цьому випадку відстань між центрами спектральних ліній приблизно дорівнює ширині зображення вхідної щілини ($\Delta l = S_2$) і скориставшись визначенням зворотної лінійної дисперсії $d\lambda / d\lambda$, отримуємо, що мінімальна різниця довжин хвиль $\Delta\lambda_0 = \lambda_2 - \lambda_1$, які можна спостерігати окремо, дорівнює $\Delta\lambda_0 = S_2 d\lambda / d\lambda$. Цю величину, рівну різниці довжин хвиль двох ліній, які ще можуть бути розділені спектральним приладом, називають *спектральною шириною щілини* S^* , тобто $S^* = S_2 d\lambda / d\lambda$. З цієї формули видно, що спектральну ширину щілини можна визначити також як ділянку спектра (інтервал довжин хвиль), який укладається в ширині геометричного зображення вхідної щілини на площині спектра (тобто в фокальній площині камерного об'єктива). Спектральна ширина щілини

вимірюється в нм. Чим менше спектральна ширина щілини, тим ближчі монохроматичні лінії можуть бути розділені в спектрі.

Роздільною здатністю (роздільною силою) спектрального приладу називають безрозмірну величину $R = \lambda/d\lambda$, де $d\lambda$ - мінімальна різниця довжин хвиль двох близьких спектральних ліній, які реєструються окремо. Вище ми визначили, що для розглянутого спектрального приладу з вхідною щілиною (зображеного на рис.1), мінімальна різниця довжин хвиль двох сусідніх спектральних ліній $d\lambda$, при якій ці лінії реєструються окремо, являє собою спектральну ширину вхідної щілини S^* . Тому роздільну здатність можна записати у вигляді $R = \lambda / S^*$ або $R = \lambda / S_2 \cdot dl / d\lambda$. Ясно, що для підвищення точності вимірювання довжин хвиль потрібно працювати з можливо меншою шириною зображень щілини S_2 , тобто, відповідно, з більш вузькою шириною вхідної щілини S_1 . Однак виявляється, що пропорційність між S_2 і S_1 (див. Формулу $S_2 = S_1 \cdot f_2/f_1$) дотримується тільки при достатньо широких щілинах (див. Рис.10). Зменшення S_1 призводить до зменшення S_2 лише при ширині вхідної щілини, більшою деякого мінімального значення S_{10} (рис.10). При $S_1 < S_{10}$ ширина зображення залишається майже незмінною ($S_2 \approx S_{20}$), зменшується лише освітленість зображення. Це пов'язано з тим, що при $S_1 < S_{10}$ зображення, що утворюється в фокальній площині камерного об'єктива, вже не є власне зображенням вхідної щілини, а являє собою дифракційну картину через дифракції світла на апертурних діафрагми спектрального приладу. Для визначення ширини щілини, зображення якої в спектральному приладі не спотворено істотно дифракцією, вводять поняття нормальної ширини щілини.

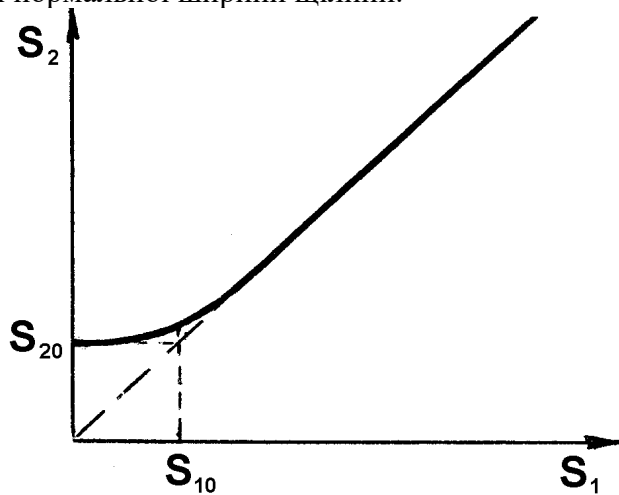


Рис.10. Залежність ширини зображення щілини S_2 від ширини вхідної щілини S_1 .

А за нормальну ширину вхідної щілини домовилися приймати такий розмір вхідної щілини, коли ширина геометричного зображення монохроматичної спектральної лінії буде дорівнює дифракційній ширині цієї лінії. На рис.10 величина S_{10} , при якій порушується лінійна залежність між шириною вхідної щілини і її зображенням, і представляє нормальну ширину вхідної щілини. Роздільна сила на заданій довжині хвилі досягає максимуму при $S_1 = S_{10}$ і не збільшується при подальшому зменшенні вхідної щілини. Вважаючи, що при $S_1 = S_{10}$ співвідношення $S_2 = S_1 \cdot f_2/f_1$ ще виконується, і, з огляду на $dl / d\lambda = f_2 \cdot d\phi / d\lambda$ отримуємо, що максимальна роздільна сила R_0 і мінімальна спектральна ширина щілини S_0^* виражаються формулами

$$R_0 = \lambda \cdot D_1 / (S_{10} \cdot f_2 / f_1) \quad i \quad S_0^* = S_{10} \cdot f_2' / (f_1 \cdot D_1).$$

Зазвичай спектральні прилади сконструйовані таким чином, щоб ширина вхідної щілини S_1 і ширина її зображення S_2 були рівні (тобто $f_2 / f_1 = 1$). В цьому випадку формули набувають вигляду

$$S_0^* = S_{10} / D_1, \quad R_0 = \lambda \cdot D_1 / S_{10} = \lambda / S_0^*$$

Ще однією важливою характеристикою оптичного приладу є його світлосила.

Світлосилою оптичного приладу називають коефіцієнт, що зв'язує величину, яка надходить на вихід приладу (освітленість або світловий потік) з яскравістю джерела. У застосуванні до спектрографа світлосилу визначають як відношення освітленості зображення вхідної щілини у фокальній площині камерного об'єктива до величини освітленості самої щілини монохроматичним світлом. Досить часто за міру світлосили приладу приймають величину d/f_1 , звану відносним отвором (d - величина діючого отвору, f_1 - фокусна відстань об'єктива вхідного коліматора). Відносні отвори спектральних приладів в залежності від їх призначення знаходяться в діапазоні 1: 2 до 1:40.

Л.13. ДИФРАКЦІЙНА ГРАТКА

Дифракційні ґратки та їх застосування. Одержання спектрів за допомогою дифракційної ґратки. Дифракція на плоскій відбиваючій ґратці. Інструментальний контур і розподіл енергії по дифракційним порядкам. Дисперсія і меридіональне збільшення. Роздільна здатність ґратки. Накладення порядків. Ґратки з профільованим штрихом. Ешелет і ешелле. Відмінність одержання спектрів дифракційною ґраткою та призмою. Оптичні схеми з класичними дифракційними ґратками. Оптичні схеми МДР-2 і ДФС-24.

Дифракційна ґратка представляє собою пластинку, на яку нанесено ряд паралельних рівновіддалених штрихів. Розрізняють дифракційні решітки прозорі і відбиваючі. У першому випадку штрихи наносять на поверхні плоскопаралельної пластинки з прозорого матеріалу (наприклад, скла), у другому - на дзеркальній поверхні. Для спектральних досліджень частіше використовуються відбиваючі решітки. Форма дзеркальної поверхні, закон розташування штрихів на ній, форма і профіль штриха можуть бути різні. Застосовуються плоскі і увігнуті (частіше - сферичні) відбивні ґратки. Поверхня відбиваючого штриха в решітках, нарізаних механічно, зазвичай роблять похилою до площини решітки для збільшення інтенсивності пучка, дифрагуючого в потрібному напрямку. Такі решітки називають ґратками з профільованим штрихом, або решітками з концентрацією світла. Іноді подібні прозорі ґратки з великими відношеннями кроку решітки t до довжини хвилі, тобто призначені для роботи в високих порядках дифракції, називають *ешелет*, або *ешелонами*.

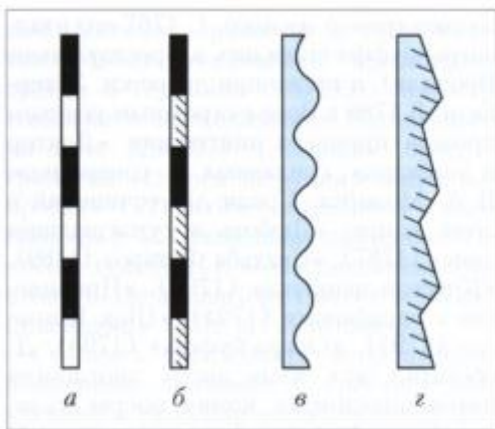


Рис. 1. Види дифракційних решіток:
 а - пропускательна амплітудна;
 б - отражальна амплітудна;
 в - пропускательна фазова;
 з - отражальна фазова.

Увігнуті поверхні мають сенс в тих випадках, коли необхідно гранично зменшити кількість елементів СП для мінімізації втрат інтенсивності. Наприклад, у вакуумній УФ-області спектра ($\lambda < 180$ нм, тут повітря вже поглинає світло) і особливо при $\lambda < 110$ нм, де

відсутні прозорі матеріали, а коефіцієнти відбивання не перевищують $5 \div 25\%$, широко застосовуються оптичні схеми, що не містять коліматорів, - решітка і розкладає спектр і фокусує його.

На плоскій поверхні зазвичай наносять прямі, паралельні еквідистантно штрихи. На сферичній увігнутої поверхні є, як мінімум, два істотно різні способи нанесення штрихів - як меридіани (перетину сфери площинами, що проходять через її центр) або як сліди перерізу сфери паралельними площинами. Ні в тому, ні в іншому випадку відстань між штрихами не постійна по всій поверхні, але закони її зміни дещо розрізняються і розрізняються виникаючі аберації. Якщо поверхня не сферична, а тороїдальна або еліптична, то "найпростіших" варіантів розташування штрихів ще більше. Вибрати кращий можна тільки по виникаючій аберації, та й то можливості вибору зазвичай обмежуються наявною технологією виготовлення решіток. По мірі розвитку технологій удосконалювалися і конструкції решіток, з'явилися увігнуті решітки зі змінним кроком, потім - голографічні решітки (профілі, що відбивають формуються методом об'ємної голографії при інтерференції двох когерентних пучків), що дозволило зробити різкий ривок до поліпшення параметрів дифракційних СП.

Плоскі і увігнуті відбиваючі решітки застосовуються в спектральних приладах для рентгенівської, вакуумної ультрафіолетової, ультрафіолетової, видимій та інфрачервоної областей спектра. Гратки виготовляються на шарах металу, нанесеного випаровуванням у вакуумі на підкладку зі скла ЛК-7, або кварцового скла КВ, безпосередньо на підкладках зі скла Ф-1 або шляхом копіювання на підкладках зі скла ЛК-7. Тороїдальні решітки мають кількість штрихів на 1 мм 300, 600, 200, 1800, 2400; виготовляються з заштрихованої поверхнею 50 ' 40 мм (розмір решітки 60' 50 '10 мм). Радіус кривизни в меридіональному перетині $r_m = 500$ мм і в сагітальному перетині $r_s = 313,4; 325,8; 333,4; 344,4$ і $404,6$ мм. Гратки виготовляються з заштрихованої поверхнею 60 X 50 мм (розмір решітки 70' 60' 15 мм) з радіусами кривизни $r_m = 1000$ мм і $r_s = 668,3$ мм.

Ешелети застосовуються в спектральних приладах для ІК області спектра (мають трикутний профіль); виготовляються на металевих підкладках з алюмінієвого сплаву або шляхом копіювання на підкладках зі скла марки ЛК-7. Ешелети мають кількість штрихів на 1 мм, 2, 4, 6, 12, 24, %), 75 і 100 з робочими порядками першим і другим. Спектральні лінії різкі, симетричні, без помітних дефектів.

Плоскі прозорі решітки поділяються на амплітудні, у яких штрихи мають прозорі і непрозорі (з шару алюмінію) ділянки, і фазові, які є прозорими копіями плоских відбивних ґраток. Грати виготовляються на підкладках зі скла марки К8. Амплітудні решітки мають число штрихів на 1 мм від 0,5 до 1200. Фазові решітки мають число штрихів на 1мм 50, 100, 150, 200, 300, 600 і забезпечують в першому порядку у видимій та ближній ІЧ областях спектру якість спектральних ліній. Кут "блиску" від 1° до 35° .

Гратки-поляризатори застосовуються для поляризації проходить інфрачервоного випромінювання. Грати виготовляються на прозорих в інфрачервоної області спектра підкладках. Поляризатори на підкладках зі скла марки ІКС25 мають коефіцієнт пропускання для неполяризованого випромінювання не менше 25%, а поляризатори всіх інших типів - не менше 30% при ступені поляризації не менше 95% і розмірі решітки не більше 45'45 мм².

Вимірювальні решітки призначені для вимірювання лінійних переміщень по методу інтерференційних смуг.

Дифракційні спектри

Дифракційна ґратка (ґратка) – це періодична система великої кількості паралельних прозорих щілин однакової ширини b , розділених однаковими непрозорими проміжками шириною a (рис. 2). Величина $d = a + b$ називається періодом (сталюю) ґратки. Густота щілин $\sim 10^3$ мм⁻¹.

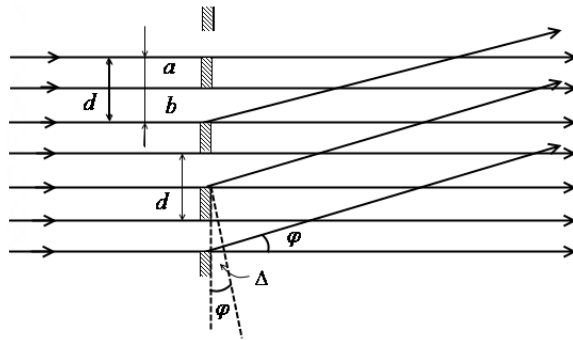


Рис. 2

Реальна дифракційна ґратка – це прозора пластинка, на якій робиться велика кількість гострих царпин (сотні штрихів на міліметр). Кожна царпина, її краї – це і є перевипромінювачі світла.

Для спостереження дифракції, як і у випадку з щілиною, на фокусній відстані F від екрану E ставиться лінза L (рис. 3).

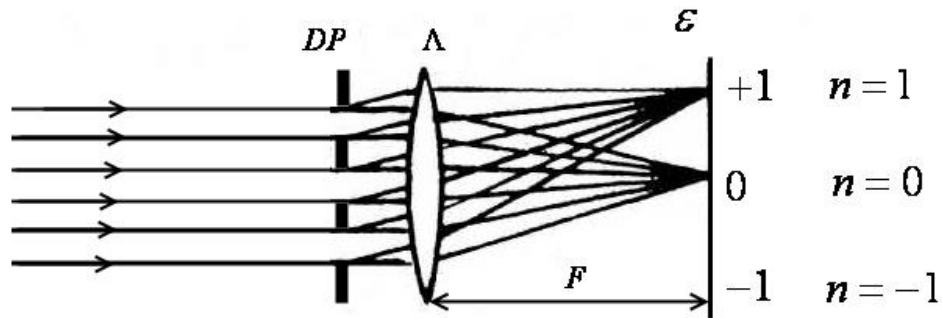


Рис. 3.

Дифракційна ґратка як спектральний прилад

З умови головних максимумів дифракційної ґратки

$$d \sin \varphi = \pm n \lambda$$

маємо:

$$\sin \varphi = \pm \frac{n}{d} \cdot \lambda .$$

Як бачимо, положення головних максимумів (під кутом φ) залежить від довжини хвилі λ . Тому при пропусканні через ґратку білого світла усі максимуми, крім центрального, розкладуться у спектр, фіолетова частина якого знаходиться з боку центра, а червона – на краях. Таким чином, дифракційна ґратка може бути використана як спектральний прилад.

На рис. 4 зображено дифракційні спектри різних порядків.

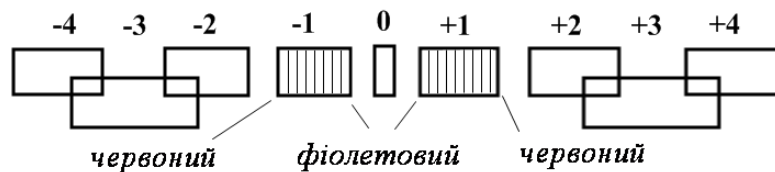


Рис. 4

Спектри більших порядків можуть перекриватись, що залежить від параметрів ґратки.

Дифракція на плоскій відбиваючій ґратці.

Розглянемо інтерференцію окремих хвиль, які зазнали дифракцію на сусідніх дзеркальних смужках в площині головного перерізу, перпендикулярного штрихам ґратки. Інтерференційні максимуми будуть спостерігатися в тих напрямках, для яких різниця ходу сусідніх променів виявиться рівною цілому числу хвиль, тобто положення максимумів має визначатися формулою: $t(\sin\varphi + \sin\varphi') = k\lambda$.

Тут t - крок (постійна) решітки, сумарна ширина відбиваючих і не відбиваючих ділянок; φ' - кут дифракції; φ - кут падіння; k - ціле число, порядок дифракції. Його називають також порядком спектра.

Будемо вважати позитивними кути, які відраховуються від нормалі до ґратки N в сторону за годинниковою стрілкою. Якщо ми визначилися з правилом вибору знака кутів, то можна говорити про позитивні або негативні порядки дифракції, відповідно отримуємо знак k в формулі. Число позитивних і негативних порядків в кожному конкретному випадку легко визначити з явної умови $\varphi, \varphi' < \pi/2$.

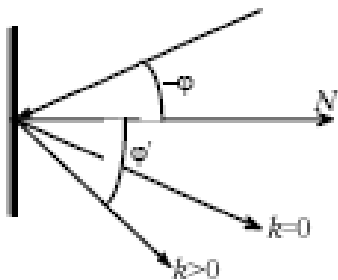


Рис.5. Позначення кутів при дифракції на решітці.

При $\sin\varphi = -\sin\varphi'$ отримуємо $k = 0$, "нульовий" порядок, в якому формула $t(\sin\varphi + \sin\varphi') = k\lambda$.

задовольняється для всіх λ . Це - дзеркальне відображення. При $\varphi \neq 0$ кут дифракції залежить від довжини хвилі, що і дає можливість застосовувати ґратки як диспергуючий елемент. Але, на відміну від призми, ДР розкладає випромінювання кожної довжини хвилі на кілька порядків дифракції, що призводить до втрат світла і накладенню порядків. Це - один з головних недоліків ДР. При одних і тих же умовах (t, φ і φ') ми отримуємо, наприклад, $\lambda = 600$ нм в першому ($k = 1$), 300 нм в другому ($k = 2$), 200 нм в третьому ($k = 3$) порядках. Тому дифракційні прилади часто доводиться доповнювати фільтрами або призмовим приладом невисокого розділення для виділення випромінювання потрібного порядку.

Інструментальний контур і розподіл енергії по дифракційним порядкам.

Просторовий розподіл інтенсивності дифрагованого випромінювання можна отримати, підсумувавши вклади від всіх відбиваючих смужок решітки. Для амплітуди отримуємо:

$$S = A \cdot \frac{\sin u}{u} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} e^{ik\delta},$$

де m - повне число штрихів на робочій поверхні, A - амплітуда падаючої хвилі, дріб описує просторовий розподіл в дифрагованому пучку, а сума - вклади від всіх смужок решітки. Величини u і δ - зсуви фаз в одиночному дифракційному контурі і між контурами, народженими двома сусідніми смужками:

$$u = \pi b'(\sin\varphi + \sin\varphi') / \lambda, \quad \delta = 2\pi t(\sin\varphi + \sin\varphi') / \lambda.$$

Тут $b' = b \cdot \cos\varphi$, b - ширина смужки

Суму можна обчислити за формулою для геометричної прогресії. Інтенсивність дорівнює квадрату модуля S , так що після нескладних перетворень отримуємо

$$I = S \cdot S^* = A^2 \cdot \frac{\sin^2(u)}{u^2} \cdot \frac{1 - \frac{1}{2}(e^{im\delta} + e^{-im\delta})}{1 - \frac{1}{2}(e^{i\delta} + e^{-i\delta})},$$

або, позначивши $v \equiv \delta / 2 = \pi t (\sin\varphi + \sin\varphi') / \lambda$

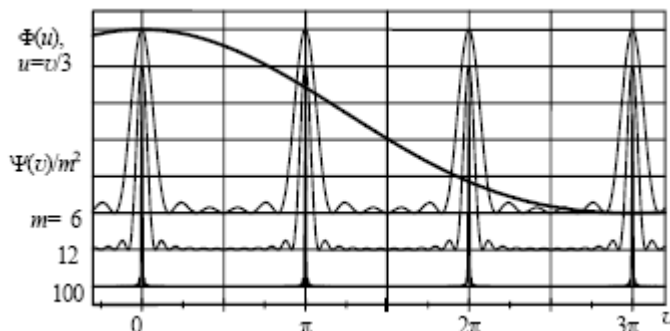
і замінивши комплексні вирази тригонометричними, прийдемо до звичайного запису цього виразу:

$$I = A^2 \Phi(u) \Psi(v) = A^2 \frac{\sin^2(u)}{u^2} \cdot \frac{\sin^2(mv)}{\sin^2 v}$$

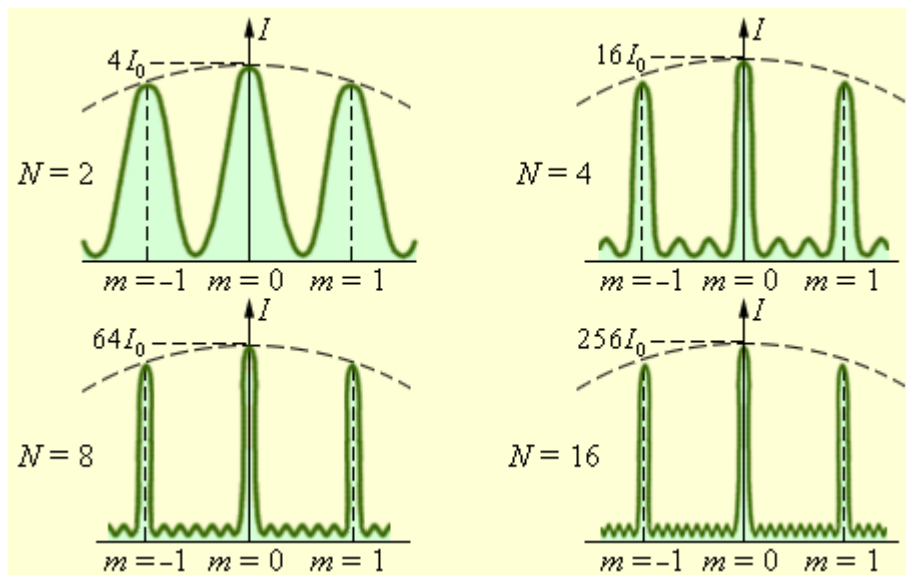
Функції $\Phi(u)$ і $\Psi(v)$ визначають відповідно кутовий розподіл, що виникає при дифракції на окремій смужці, і результат сумовування по смужках. $\Phi(u)$ дає широкий контур, промодульований більш тонкою структурою $\Psi(v)$.

Графіки $\Phi(u)$ і $\Psi(v)$ представлені на рис. 6. Головні максимуми функції $\Psi(v)$, амплітудою m^2 , відповідають $v_k = 0, \pm k\pi \dots$, де k - порядок дифракції. Між ними знаходяться $m-2$ вторинних максимумів (пренебрежимо малої амплітуди) і $m-1$ мінімум, найближчий з яких - в точці $mv = m(v_k - \delta v) = (mk - 1)\pi$. Таким чином, на півширина головного максимуму дорівнює $\delta v = \pi / mk$.

Якщо ми спрямуємо $b \rightarrow t$, тобто $u \rightarrow v$, то фізично замість решітки отримаємо дзеркало шириною mt .



Мал. 6. Графіки функцій $\Phi(u)$ і $\Psi(v) / m^2$ для випадку $b \cdot \cos\varphi = t / 3$. Функція $\Psi(v)$ побудована для решіток з повною кількістю штрихів $m = 6, 12$ і 100 . Інтенсивність вторинних максимумів швидко зменшується з ростом m .



Дисперсія і меридіональне збільшення

Кут відхилення променів на решітці $\theta = \varphi' - \varphi$, так що кутова дисперсія з урахуванням $t(\sin\varphi + \sin\varphi') = k\lambda$, буде

$$D_\theta = d\theta / d\lambda = k / (t \cdot \cos\varphi') = kN_1 / \cos\varphi'$$

де $N_1 = 1/t$ - число штрихів на 1 мм. Зменшення постійної решітки t і збільшення порядку спектра призводять до пропорційного збільшення кутової дисперсії приладу.

Відносна збільшення решітки можна визначити по зміні ширини хвильового фронту пучка:

$$\Gamma = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi'}$$

У нульовому порядку ($\varphi = -\varphi'$) і в автоколімації ($\varphi = \varphi'$) $\Gamma = 1$.

Роздільна здатність ґратки

Роздільна здатність характеризує здатність до розділення близьких спектральних ліній λ_1 і λ_2 . Перехід від однієї довжини хвилі до другої відбувається плавно. Тому для того, щоб була можливість розрізнити дві хвилі, треба щоб їхні обриси були досить чіткими, щоб виступали два максимуми. Розділення вважається граничним, якщо **максимум першої хвилі** припадає на **мінімум другої**. Це так звана умова Релея (рис..8).



Рис.8. Умова Релея

Спектральне розділення решітки визначають напівширина головних максимумів функції $\Psi(\nu)$ і дисперсією.

Їх положення відповідає $\nu = \pi (\sin\varphi + \sin\varphi') t / \lambda = k\lambda$. Найближчі нулі - при $m (\nu - \delta\nu) = (mk - 1) \pi$, так що $\delta\nu = \delta\varphi' \cdot \cos\varphi' \cdot t / \lambda = k\lambda$.

Звідси, за критерієм Релея, отримаємо:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{\delta\varphi'} D_{\varphi} = km$$

Роздільна здатність визначається тільки порядком спектра і повним числом штрихів решітки m . Істотне збільшення числа штрихів решітки можливо лише за рахунок зменшення її постійної, так як в іншому випадку прийдемо до ґраток великих розмірів. Тому для збільшення роздільної здатності іноді доводиться працювати в високих порядках дифракції. Правда, зараз технічно можливе виготовлення решіток з дуже малим кроком. Механічно можна нарізати до 3600 штрихів на 1 мм.

Також існує ще одна характеристика дифракційну решітку - *Дисперсійна область*. Вона визначає для кожного порядку спектральний діапазон від перекриття спектрів. Даний параметр обернено пропорційний порядку спектра m

$$\Delta\lambda = \lambda/m$$

Накладення порядків

Основна формула решітки $t(\sin\varphi + \sin\varphi') = k\lambda$ показує, що одні й ті ж кути дифракції будуть спостерігатися для всієї сукупності довжин хвиль λ_k , що задовольняють співвідношенню $t(\sin\varphi + \sin\varphi') = k\lambda_k$, $\lambda_k = \lambda^1 / k$,

де k - вся послідовність натурального ряду чисел, можливих для даної решітки. Якщо наш робочий діапазон укладений в межах $\lambda_n < \lambda_v$ і ми хочемо працювати в k -му порядку, то накладення порядків буде, якщо виконуються умови

$k \lambda_n > (k - 1) \lambda_b$; $k \lambda_b < (k + 1) \lambda_n$.

Друга нерівність жорсткіше, так що:

$$\frac{\lambda_b}{\lambda_n} \leq 1 + \frac{1}{k}, \quad \frac{\Delta \lambda}{\lambda_n} = \frac{\lambda_b - \lambda_n}{\lambda_n} \leq \frac{1}{k}.$$

або

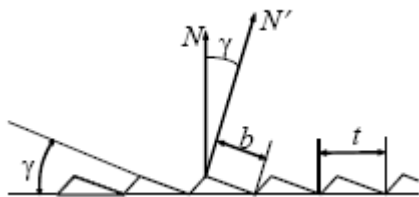
Звідси видно, що робочий діапазон, в якому відсутня накладення зображень різних довжин хвиль, тим менше, чим вище порядок дифракції, або, що те ж саме, чим більше довжин хвиль вкладається в різниці ходу променів від сусідніх штрихів.

Гратки з профільованим штрихом

Дифракційна решітка здатна розкласти падаюче на неї випромінювання в досить широкий (по куту) спектр тільки тому, що ширина кожного штриха порівняна з довжиною хвилі, тому він відбиває випромінювання в широкий дифракційний максимум. Але інтенсивність відзеркалення досить істотно залежить від кута спостереження.

На рис. 6 функції $\Phi(u)$ і $\Psi(v)$ намальовані в припущенні $t = 3b \cos \varphi$. Видно, що їх добуток навіть для випадку настільки вузьких відбиваючих смужок дасть в перший порядок дифракції приблизно 0,65 від інтенсивності нульового порядку. У вищі порядки - ще менше. Збільшити корисну частку світла в потрібному напрямку можна тільки повернувши відбиваючі площини штриха так, щоб максимум функції $\Phi(u)$ був направлений туди ж, куди спрямований потрібний нам головний максимум $\Psi(v)$. Якщо площині штриха і ґратки не збігаються, то в вирази для u і v потрібно підставляти різні кути падіння променів, що і дозволить змістити профілі функцій $\Phi(u)$ і $\Psi(v)$ відносно один одного.

На рис. 9 зображений розріз в головному перетині профільованої відбиваючої решітки, у якій площина штриха повернута щодо площини решітки на кут γ (цей кут називається *кутом блиску*). Тут t і b - крок решітки і ширина відбиваючої поверхні штриха; N і N' - нормалі до ґратки і до штриху. Кути падіння і дифракції φ і φ' відраховуються від нормалі N . Як і раніше, позитивними вважаємо кути, які отримуються обертанням відповідної нормалі за годинниковою стрілкою.



Мал. 9. Решітка з профільованим штрихом.

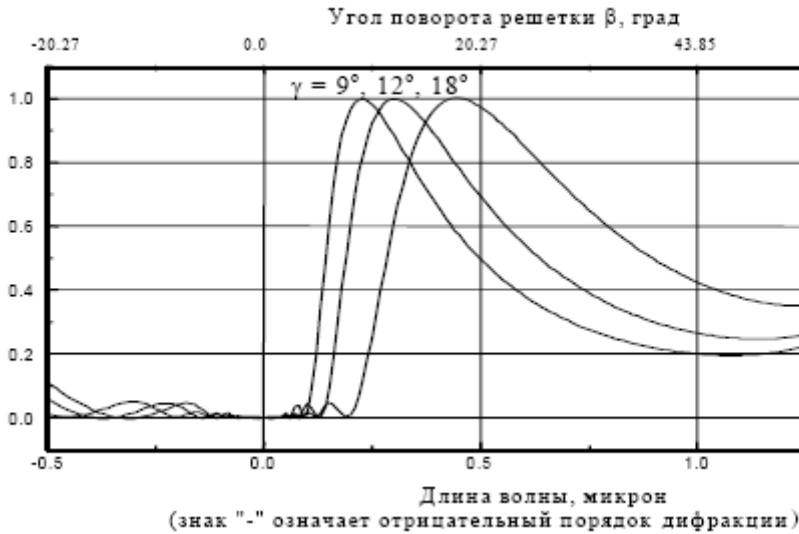
Нехай i , i' - кути між променями і нормаллю N' , $\beta = (\varphi + \varphi') / 2$, а $\theta = (\varphi' - \varphi) / 2$. У цих позначеннях θ - половина кута між променями, а β - кут повороту їх бісектриси відносно нормалі до ґратки. У цих позначеннях $\varphi = \beta - \theta$, $\varphi' = \beta + \theta$, $i = \varphi - \gamma = (\beta - \gamma) - \theta$, $i' = \varphi' - \gamma = (\beta - \gamma) + \theta$. Для u і v маємо:

$$u = \pi b \cdot \cos \varphi (\sin i + \sin i') / \lambda = 2\pi b \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\beta - \gamma) \cos \theta / \lambda,$$

$$v = \pi t \cdot (\sin \varphi + \sin \varphi') / \lambda = 2\pi t \cdot \sin \beta \cdot \cos \theta / \lambda.$$

Виявляється, що величина v , аргумент у функції $\Psi(v)$, що визначає положення головних максимумів, не залежить від γ , а u - залежить, причому, якщо виявиться, що в положенні, відповідному потрібного нам дифракційному максимуму, $\beta = \gamma$, то $u = 0$ і $\Phi(u) = 1$. Це - випадок дзеркального відбивання від поверхні штриха. Навпаки, в нульовому порядку, при $\beta = 0$, інтенсивність буде менше, ніж в робочому порядку.

Ефективність решіток з профільованим штрихом демонструє рис. 10, на якому представлені графіки залежності функції $\Phi(u)$ від довжини хвилі в першому порядку дифракції для решітки з наступними параметрами: $1/t = N_1 = 1200$ штрихів на 1 мм, $b/t = bN_1 = 0,8$, кут блиску $\gamma = 9^\circ, 12^\circ$ або 18° . Розрахунок проведено для установки з фіксованими напрямками променів, кут між якими $2\theta = 60^\circ$. Сканування здійснюється поворотом решітки відносно падаючого і дифрагованого променів.



Мал. 10. Залежність функції $\Phi(u)$ від довжини хвилі для профільованих решіток з щільністю штрихів 1200 / мм і різними кутами нахилу штриха γ .

Головний максимум функції $\Psi(v)$ в першому порядку відповідає $v = \pi$, тобто $\lambda = 2 \cos\theta \sin\beta / N_1$, де β - кут повороту решітки. Для розрахунків отримуємо

$$\sin\beta = \frac{\lambda N_1}{2 \cos\theta}; \quad u = \pi b N_1 \cos(\beta - \theta) \frac{\sin(\beta - \gamma)}{\sin\beta}$$

З рис. 10 видно, що зі збільшенням γ зростає і гранична довжина хвилі, для якої решітка ефективна, і відповідно зсувається максимум ефективності. Тому роблять подібні решітки, погоджуючи кут γ з передбачуваної оптичною схемою приладу (кут θ) і необхідної робочої області.

Відносна інтенсивність головних максимумів різних порядків і її залежність від довжини хвилі визначаються функцією $\Phi(u)$. Функція $\Phi(u)$ приймає своє максимальне значення, коли напрямок дифрагованого пучка збігається з напрямком з напрямком променів, дзеркально відбитих від робочих поверхонь решітки. Довжина хвилі $\lambda_{k,0}$, для якої виконується ця умова в спектрі k -того порядку, дорівнює:

$$\lambda_{k,0} = \frac{2 \sin\gamma \cos\theta / 2}{kN}, \quad \text{де } \vartheta = \varphi' - \varphi.$$

Область довжин хвиль поблизу $\lambda_{k,0}$ називають областю високої концентрації енергії в даному порядку спектру, а кут γ - кутом блиску дифракційної решітки.

Відношення променистого потоку довжини хвилі λ , що направляється ґратками в головний максимум k -того порядку спектра, до світлового потоку цієї довжини хвилі, що падає на решітку, називають коефіцієнтом відображення або **ефективністю решітки** $\rho_k(\lambda)$.

Профільовані дифракційні решітки для ІЧ області називаються **ешелет**. Ешелет характеризується низькими значеннями кута блиску і частоти штрихів, робочої в ешелет є широка грань сходинки. Виконуються ешелет, як правило, на металевих підкладках.

Гратки, призначені для роботи в вищих порядках, у яких робочим є вузька грань сходинки, називають **ешелле**. Кути γ у ешелле бувають 60° і більше.

Порівняння властивостей призми і решіток

Плоскі відбивлючі решітки мають наступні переваги перед призмами:

- область довжин хвиль, в яких можуть застосовуватися призми, обмежується областю прозорості матеріалів придатних для їх виготовлення, в той час як дифракційні решітки можуть застосовуватися в широкому спектральному інтервалі;
- кутова дисперсія дифракційної решітки при малих кутах дифракції майже не залежить від довжини хвилі, у призми ж дисперсія значно змінюється з довжиною хвилі, різко зростаючи до короткохвильовій області, що незручно для вимірювання довжин хвиль окремих спектральних ліній;
- при заданих розмірах диспергуючого елемента його роздільна здатність пропорційна кутовий дисперсії, тому більшість дифракційних спектральних приладів володіє і більш високою роздільною здатністю, ніж призматичні прилади;
- виготовлення призми великих розмірів (понад 150 мм) завжди пов'язане зі значними труднощами, тому що потрібні великі блоки високопрозорого і оптично однорідного матеріалу;
- коефіцієнт відбиття решітки не залежить від її розмірів, а поглинання світла в призмі зростає при її збільшенні за експоненціальним законом.

Основний недолік дифракційних решіток - наявність різних порядків, які накладаються один на одного. Для поділу цих порядків потрібне застосування світлофільтрів або додаткових диспергуючих елементів.

Нарешті, призми більш доступні споживачеві. При наявності матеріалу їх можна виготовити в будь-якій оптичній майстерні, тоді як ділильні машини є в розпорядженні лише невеликого числа великих фірм, таких як Державний інститут прикладної оптики (г. Казань), Державний Оптичний Інститут (м. Санкт-Петербург), ЛОМО (г. Санкт-Петербург), "Бауш і Ломб" (США), "Жобен Івон" (Франція), Шімадзу (Японія).

В даний час дифракційні решітки використовують в якості диспергуючих елементів, якщо потрібні спектральні прилади, які мають досить високими характеристиками, а застосування призми як самостійних диспергуючих пристроїв можливо лише в менш відповідальних випадках. В основному призми використовують в якості додаткового диспергуючого елемента в схемах із схрещеною дисперсією.

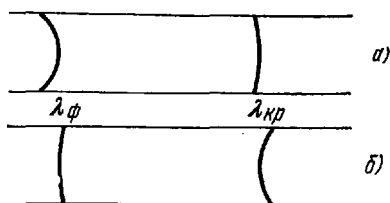


Рис. 3.26. Сравнение кривизны линий призмного (а) и дифракционного спектров (б) (схема).

Оптичні схеми з класичними дифракційними ґратками

Робоча область спектра частково зумовлює тип дифракційної решітки та типи об'єтивів. У видимій області спектра в принципі можливо застосування прозорих дифракційних решіток і лінзових об'єтивів. Однак жоден лінзовий об'єтив не можна однаково добре виправити в широкій спектральній області, і практично неможливо сфокусувати спектр на одній і тій же поверхні зображення при переході від однієї області довжин хвиль до іншої. Дзеркальні об'єктиви вигідно відрізняються від лінзових тим, що не мають хроматичної аберації, і практично у всіх сучасних приладах використовуються дзеркальні

схеми. З урахуванням цього при огляді типових схем спектральних приладів розглянемо саме дзеркальні оптичні схеми.

У дифракційних монохроматорах, не призначених для вакуумної області спектра, зазвичай застосовуються плоскі решітки і фокусуєча оптика зі сферичними або параболічними дзеркалами. При конструюванні монохроматоров з невеликим фокусом і великою площею диспергуючого елемента доводиться мати справу з пучками, що йдуть під великим кутом до оптичної осі і з дзеркалами, що мають великий відносний отвір. Щоб в цих умовах позбутися від значних аберацій, доводиться іноді користуватися асферичними, в першу чергу позаосьовими, параболічними дзеркалами.

У дифракційних монохроматорах широко використовуються схеми Еберта та Черні - Турнера. Схема Еберта, найбільш часто застосовується в довгофокусних монохроматорах і спектрографах з плоскими решітками, показана на рис. 11.

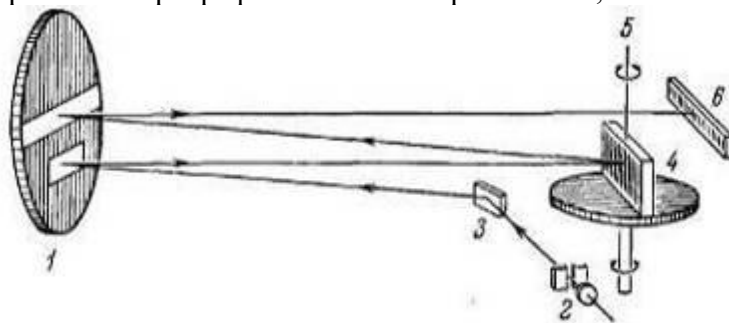
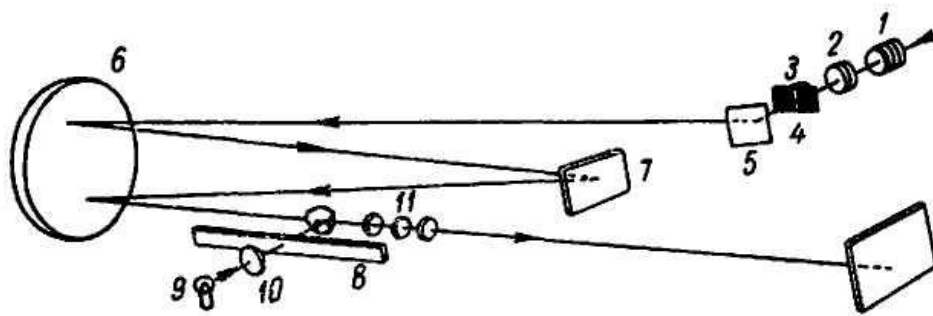


Схема Еберта.

Рис. 11

Об'єктивом коліматора і камери служить сферичне дзеркало 1. Пучок, що йде від щілини 2 і відбитий від поворотного плоского дзеркала 3, після колімування дзеркалом 1 падає на решітку 4, яка може обертатися навколо осі 5. Дифрагованим світло після віддзеркалення від дзеркала 1 падає на вихідну щілину. У разі спектрографа утворюється спектр на фокальній поверхні приладу 6. Легко зрозуміти, що розміри дзеркала в монохроматорі лише трохи повинні перевищувати розмір дифракційної решітки. У спектрографі різні ділянки дзеркала служать для відбивання різних частин спектра. Тому розмір дзеркала в напрямку дисперсії повинен дорівнювати сумі ширини решітки і довжини ділянки спектра, що фотографується.

Найбільш поширеними спектрографами з дифракційною решіткою є спектрограф типу ДФС-8 (рис. 20, 21) і ДФС-13, що мають практично однотипну оптичну систему. Вони випускаються або з дифракційною решіткою, що має 600 штр. / мм, або 1200 штр. / мм з зворотною дисперсією, яка дорівнює 0,6 і 0,3 нм / мм, відповідно. Спектральна робоча область цих приладів 1000 ... 200 нм, тобто вона захоплює вся видиму і ультрафіолетову частини спектра. Перехід від однієї області спектра до іншої здійснюється поворотом решітки за допомогою рукоятки. Одночасно обертається барабан зі шкалою довжин хвиль. Загальна довжина спектра першого порядку з ґратками 1200 штр./мм складає 2,7 м. На фотографічній пластинці одночасно можна сфотографувати ділянку в 54 нм. Вона займає на платівці 18 см. У приладах з ґратками 600 штр. / мм довжина спектра в два рази менше, і на такий же платівці поміщається вдвічі більша ділянка. Прилад розрахований для роботи в першому порядку решітки. Висока роздільна здатність дифракційних приладів досягається завдяки великій фокусній відстані камерного об'єктива.

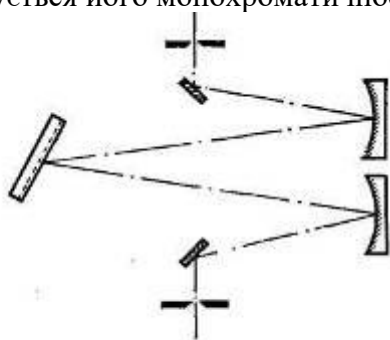


Оптическая схема спектрографа ДФС-8

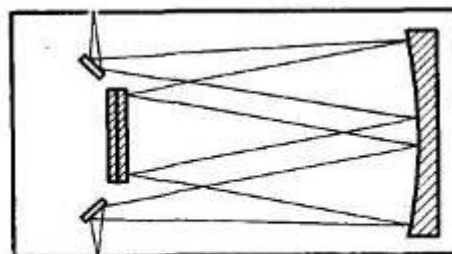
Рис.12

На рис. 12 наводиться оптична схема приладу ДФС-8. Світло від джерела проходить освітлювальну систему, що складається з конденсорів 1, 2 і 3, входної щілини 4, за допомогою поворотного дзеркала 5 потрапляє на сферичне дзеркало 6 і, відбившись від нього, падає на дифракційну решітку 7. Розкладений в спектр пучок повертається на дзеркало 6 і після відбиття від нього збирається в площині фотопластинки. Шкала довжин хвиль 8, нанесена на скляній пластинці, висвітлюється лампочкою 9 через матове скло 10 і за допомогою проєкційного об'єктива 11 зображується на фотопластинці. Для усунення накладення спектрів вищих порядків передбачені фільтри БС4, ЖС12 і КС14. світлофільтр БС4 поглинає ультрафіолетову область спектру коротше 3000 А, ЖС12 - частина видимої області спектра коротше 5000 А, КС14 - область спектра коротше 7000 А.

У короткофокусних монохроматорах пучки падають на дзеркало під великими кутами до осі і схема Еберта призводить до значних аберації. Тому в таких монохроматорах частіше застосовується схема Черні - Турнера з двома дзеркалами. За такою схемою зібраний прилад МДР-2. Об'єктивами служать сферичні дзеркала з фокусом 400 мм. Прилад оснащений трьома змінними решітками площею 140 X 150 мм², що використовуються в першому порядку. Гратки мають 300 штр / мм для області спектра 1-2,5 мкм, 600 штр / мм для 0,5-1,25 мкм і 1200 штр / мм для 0,2-0,6 мкм. При використанні всієї площі решітки аберації помітно знижують роздільну силу. Тому прилад забезпечений двома діафрагмами, що зменшують відносний отвір приладу від 1: 2,5 до 1: 10 або 1: 15. При використанні діафрагми значно зменшується світловий потік на виході приладу, але поліпшується його монохроматичність.



Оптическая схема монохроматора МДР-2.

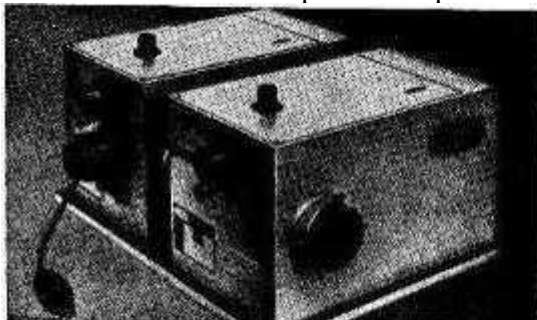


Оптическая схема монохроматора фирмы Jarrell Ash.

Рис.13

На малюнку показаний хід променів в простому монохроматорі Jarrell Ash, зібраному за схемою Еберта. Фокусна відстань дзеркала 25 см. Прилад оснащений змінними щілинами постійної ширини. Основній щілини 0,1 мм відповідає смуга пропускання 3,2 А. Застосовувати більш вузькі щілини не вигідно, так як інструментальний контур розширений абераціями і отримати його вужче 3-4 А неможна.

Два монохроматора легко об'єднуються в один подвійний (рис. 13). При цьому легко сполучаються механізми обертання їх решіток.



Двойной монохроматор фирмы Jarrell Ash, составленный из двух одинарных.

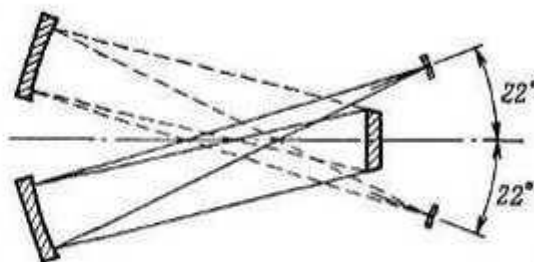


Рис. 4.26. Оптическая схема дифракционного монохроматора McPherson-218.

Рис.14

Такий «тандем-монохроматор» забезпечений змінними решітками 1180 штр / мм з кутом блиску для 3000 і 6000 А. Прилад забезпечений пристроєм для фотоелектричного сканування спектра. В розглянутих схемах дифракційних монохроматорів є додаткові плоскі дзеркала для повороту пучків. Вони викликають додаткові втрати світла і служать причиною зайвого розсіяного випромінювання. Вільний від цих недоліків монохроматор фірми Mc-Pherson зі схрещеними пучками. Модель 218 має схему, показану на малюнку. Асферичні дзеркала мають фокус 30 см. Шість змінних дифракційних решіток (75-2400 штр / мм) дозволяють використовувати прилад від 1050 А до 10 мкм. Для роботи в області довжин хвиль коротше 2000 А прилад можна відкачувати. Конструкція держателя решітки і самих решіток дозволяє легко замінювати їх без додаткової фокусування приладу. Монохроматор забезпечений фотоелектричним пристроєм, що дозволяє реєструвати спектр, скануючи його вручну або мотором з дванадцятьма швидкостями.

Схема Черні - Турнера використовується в подвійному монохроматоре ДФС-24. У ньому застосовано оригінальне розташування решіток «спиною один до одного» (рис. 15). Обидві решітки обертаються навколо однієї осі, і це забезпечує автоматичне узгодження кутів повороту.

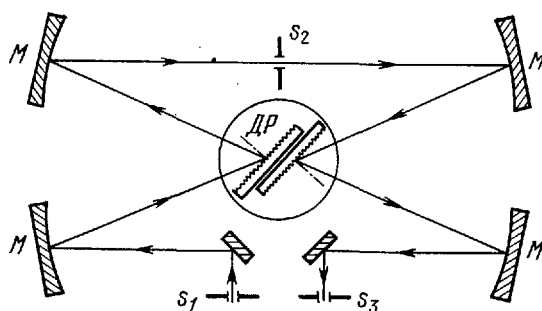


Рис. 3.38. Схема двойного дифракционного монохроматора ДФС-24.

Рис.15

У подвійних монохроматорах, побудованих за іншими схемами, це зазвичай досягається прецизійними механічними пристроями. Спектр реєструється фотоелектричним способом.

Сучасне використання схеми Черні-Турнера (моделі MS2001, MS2001i з однією решіткою) показано на рис.16

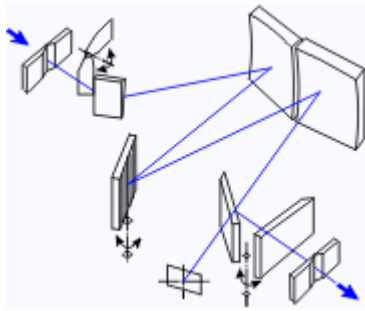


Рис.16

Діапазон довжин хвиль: 180 нм - 60 мкм

Відносний отвір: 1 / 3,6

Фокусна відстань: 200 мм

Розмір дифракційних решіток: 40x40x6 мм

Діапазон сканування, обмежений

кутом повороту дифракційної решітки: 0-1270 нм (для решітки 1200 штр / мм)

Основні дзеркала: сферичні

ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

(Для решітки 1200 штр / мм)

Зворотня лінійна дисперсія: 4,12 нм / мм

відтворюваність: $\pm 0,036$ нм

Спектральний дозвіл: 0,12 нм

Точність установки довжини хвилі: $\pm 0,122$ нм

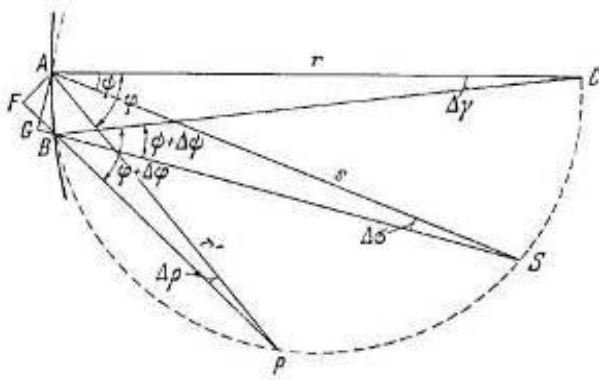
Середній крок сканування: 0,012 нм

Л.14.Увігнуті решітки

Коло Роуlanda. Роздільна здатність увігнуті решітки. Способи установки увігнутих дифракційних ґраток. Установка Пашена-Рунге. Установка дифракційної ґратки за схемами Сейя- Наміока і Ігля. Спектрографи для вакуумного ультрафіолету. Установка із ковзаючим падінням пучка. Поліхроматори. Виготовлення ґраток. Репліки. Духи.

Поряд з плоскими решітками застосовуються також увігнуті решітки, тобто відбиваючі решітки, які нанесені на увігнуту поверхню. Увігнута решітка поєднує в собі властивості диспергуючого і фокусуєчого елементів. Використання увігнутих решіток дозволяє, наприклад, спростити схему монохроматора.

Принцип дії. У 1882 р. Роуланд запропонував поєднати фокусуєчі властивості увігнутого дзеркала з диспергуючими властивостями нарізаною на його поверхні дифракційної решітки. Такі решітки отримали назву увігнутих і широко зараз застосовуються. Увігнута решітка дозволяє до мінімуму спростити схему спектрального приладу за рахунок виключення спеціальної фокусуєчої оптики. Для отримання спектру необхідна тільки щілина і увігнута решітка. Завдяки використанню таких решіток стала доступною область далекого вакуумного ультрафіолету ($\lambda < 50$ нм). Точне вимірювання довжин хвиль в складних спектрах зараз теж не мислиться без великої увігнутої решітки. Повна теорія вгнутої решітки досить складна, і ми наведемо тут лише найбільш прості міркування і основні висновки.



Дифракція на вигнутій ґратці.

Рис.1.

Як правило, ґратка наноситься на поверхню сфери, хоча ґратка, нанесена на торичні і еліпсоїдальні поверхні, володіє відомими перевагами. Будемо вважати, що розміри заштрихованої частини ґратки і висота штриха малі в порівнянні з радіусом сфери r , на яку вона нанесена. Середину середнього штриха ґратки назвемо її центром. Проведемо коло, діаметр якого дорівнює радіусу кривизни ґратки. Це коло дотичне до ґратки в її центрі і лежить в площині, перпендикулярній штрихами. Таке коло називається колом Роуланда. Розглянемо хід монохроматичних променів, що падають на ґратку з точки S , що лежить на цьому колі (рис.1). Нехай A і B - два сусідніх штриха ґратки. Промені SA і SB падають на ці штрихи під кутами ψ і $\psi + \Delta\psi$. Дифраговані промені AP і BP йдуть під кутами φ і $\varphi + \Delta\varphi$ і перетинаються в точці P . Центр кривизни ґратки позначимо через C . Нехай $\angle ACB = \Delta\gamma$; $\angle ASB = \Delta\sigma$ и $\angle APB = \Delta\rho$.

Умова максимуму, як і для плоскої ґратки, отримаємо, прирівнявши різниця ходу сусідніх променів цілому числу довжин хвиль: $(SA + AP) - (SB + BP) = \kappa\lambda$.

Продовжимо промені SB до точки G і PM до точки F так, щоб $SG = SA$ і $PF = PA$. Тоді можна написати

$$(SA + AP) - (SB + BP) = BG + BF.$$

Кути AFB і AGB відрізняються від прямих на величини порядку малих кутів $\Delta\gamma$ і $\Delta\rho$. З тією ж точністю $\angle FAB \approx \varphi$, а $\angle GAB \approx \psi$. Тому $BG \approx AB \sin \psi$ и $BF \approx AB \sin \varphi$.

Тоді рівність $(SA + AP) - (SB + BP) = \kappa\lambda$ можна записати у вигляді

$$AB (\sin \psi + \sin \varphi) = \kappa\lambda, \quad \text{або} \quad t (\sin \psi + \sin \varphi) = \kappa\lambda,$$

де $t = AB$ - постійна ґратки. Таким чином, ми отримали ту ж формулу для положення головних максимумів, що і для плоскої ґратки.

Покажемо тепер, що увігнута ґратка, на відміну від плоскої, володіє фокусувальною дією. Це означає, що промені з довжиною хвилі λ , які виходять із точки S і лежать в площині, перпендикулярній штрихам ґратки, утворюють незалежно від кута падіння ψ головний дифракційний максимум в одній і тій же точці P . Для цього продиференціюємо останні вирази по ψ і φ при постійних λ і k і перейдемо і кінцевим різницям

$$\cos \psi \Delta\psi + \cos \varphi \Delta\varphi = 0.$$

З малюнку видно, що

$$\psi + \Delta\gamma = \psi + \Delta\psi + \Delta\sigma, \quad \text{т. е.} \quad \Delta\psi = \Delta\gamma - \Delta\sigma.$$

$$\text{Аналогічно} \quad \varphi + \Delta\gamma = \varphi + \Delta\varphi + \Delta\rho, \quad \text{т. е.} \quad \Delta\varphi = \Delta\gamma - \Delta\rho.$$

$$\text{З іншого боку} \quad \Delta\gamma = \frac{t}{r}, \quad \Delta\sigma = \frac{t}{s} \cos \psi, \quad \Delta\rho = \frac{t}{r'} \cos \varphi.$$

Підставляючи в $\cos \psi \Delta\psi + \cos \varphi \Delta\varphi = 0$ маємо

$$\cos \psi \left(\frac{t}{r} - \frac{t}{s} \cos \psi \right) + \cos \varphi \left(\frac{t}{r} - \frac{t}{r'} \cos \varphi \right) = 0.$$

Щоб це рівняння задовольнялося при будь-яких φ і r' , необхідно і достатньо, щоб одночасно

$$\frac{t}{r} - \frac{t}{s} \cos \psi = 0 \quad \text{и} \quad \frac{t}{r} - \frac{t}{r'} \cos \varphi = 0 \quad \text{або}$$

$$s = r \cos \psi \quad \text{и} \quad r' = r \cos \varphi.$$

Це рівняння є рівняннями кола в полярних координатах. Діаметр цього кола дорівнює радіусу кривизни решітки r , тобто отримуємо рівняння кола Роуланда. Таким чином, якщо точка S лежить на колі Роуланда, то на тому ж колі лежить і точка P , в якій утворюється головний дифракційний максимум для променів даної довжини хвилі λ . Природно, що для променів різних довжин хвиль λ_1, λ_2 , і т. д. головні дифракційні максимуми відповідно до

$t (\sin \psi + \sin \varphi) = \kappa \lambda$, утворюються в різних точках P_1, P_2 і т. д. Однак всі ці точки лежать на цьому ж колі, утворюючи на ньому спектр джерела, поміщеного в S . У рівняння, що визначає це коло, не входить постійна решітки. Це означає, що будь-яка решітка з радіусом r даватиме спектр, що лежить на одній і тій же окружності.

З цього розгляду не випливає, що промені, що йдуть з точки S , але не лежать в площині роуландового кола, також фокусуються в точці P . Навпаки, легко показати, що решітка має значний астигматизм і зображення точки S являє собою відрізок прямої, паралельної штрихам решітки.

Вираз для роздільної здатності увігнутої решітки збігається з відповідним виразом для плоскої решітки. Кутова дисперсія, як і у випадку плоскої решітки, виходить диференціюванням рівності $t (\sin \psi + \sin \varphi) = \kappa \lambda$, по λ .

Формулу для лінійної дисперсії легко отримати, відряховуючи відстані l уздовж кола Роуланда. Кут φ , будучи вписаним в коло діаметра r , дорівнює $\varphi = l / r$, звідки після диференціювання по λ знаходимо вираз, що зв'яже лінійну і кутову дисперсію ґратки:

$$D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{1}{r} \frac{dl}{d\lambda} = \frac{1}{r} D_l. \quad D_\varphi = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{k}{t \cdot \cos(\varphi)} = \frac{\sin(\varphi) + \sin(\psi)}{\lambda \cdot \cos(\varphi)}$$

Для лінійної дисперсії отримаємо

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} = \frac{\kappa r}{t \cos \varphi}. \quad D_l = r \cdot D_\varphi$$

Зображення щілини, що дається увігнутою ґраткою, володіє, як і у випадку плоскої решітки, деякою кривизною. Остання, однак, мала і може не прийматися до уваги для решіток розмірів, які зазвичай застосовуються. Якщо решітка і щілина розташовані на колі Роуланда, то на цьому ж колі розташовується і спектр. Це впливає з рівнянь

$$s = r \cos \psi \quad \text{и} \quad r' = r \cos \varphi.$$

Можна отримати спектр і при іншому розташуванні щілини і решітки. Однак детальні розрахунки показують, що при розташуванні всіх трьох елементів установки (щілина, приймач, решітка) на роуландовському колі аберації мінімальні. Розрахунок положення спектра проведено для «малої» решітки. Якщо її розміри порівнянні з радіусом, то крім астигматизму з'являються і інші аберації, які погіршують контур спектральної лінії.

Схеми установок увігнутих решіток

Відома велика кількість типів установок увігнутих решіток. У більшості з них все три елемента - щілина, решітка і фокальна поверхню розташовані на колі Роуланда. Однак тільки одна з них, спочатку використана самим Роуландом, називається установкою Роуланда.

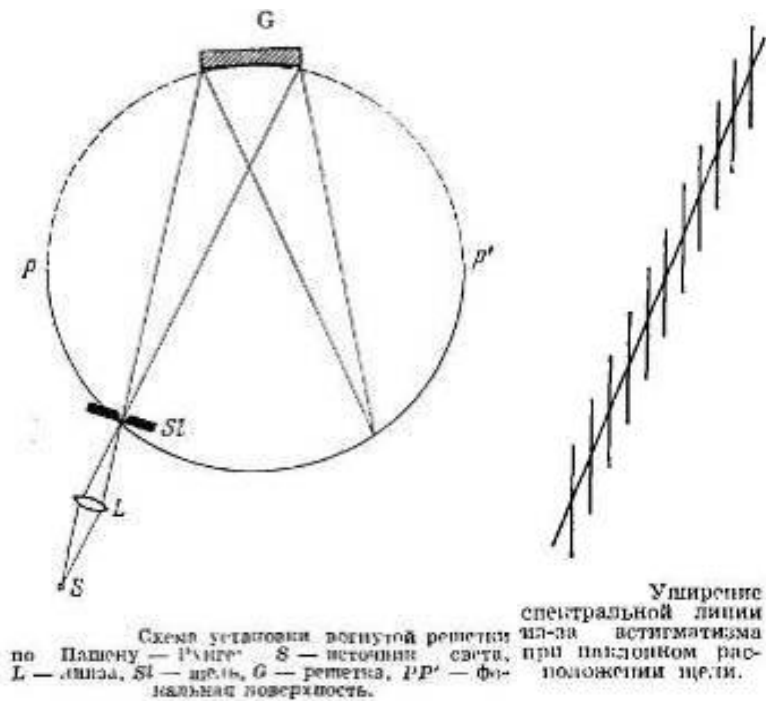


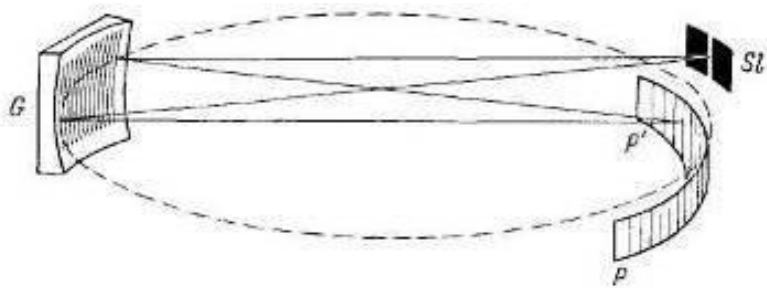
Рис.2.

У цій установці спектр завжди спостерігається в напрямку нормалі до ґратки ($\varphi = 0$). Однак здійснення цієї схеми вимагає досить громіздких механічних пристроїв і значного місця. Її перевага (нормальна дисперсія) практично не окупується, і ця схема зараз не застосовується. Не застосовується в сучасних приладах і схема Абнеся. У цій схемі при переході від однієї області спектра до іншої повинна переміщатися вхідна щілина, а отже і джерело світла. Крім того, в ній дуже важко зберегти необхідну ступінь паралельності штрихів решітки і ножів щілини. Найбільш зручна для застосування з ґратками всіх радіусів кривизни, аж до найбільших, схема Пашена – Рунге (рис.2).. Тут всі три елементи жорстко закріплені на роуландовському колі. Зазвичай вибирається кут падіння $= 45^\circ$, але часто використовують і менші кути - до 10° . За допомогою цієї установки охоплюється на довгій платівці або плівці найбільш широка область спектра. В установці відсутні рухомі частини, що дозволяє легко підтримувати незмінність взаємного розташування елементів і робить її більш дешевою.

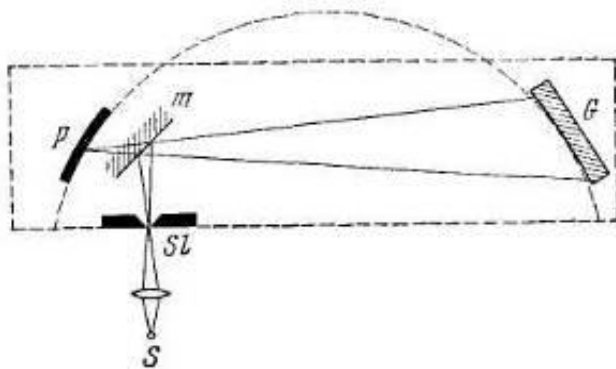
Однак прилади, побудовані за схемою Пашена - Рунге, досить громіздкі, особливо для решіток з радіусом понад 2 м. Крім того, в цих умовах астигматизм решітки досить великий. З обох цих точок зору більш вигідна автоколімаційна установка Ігля, для якої $\varphi \sim \psi$. Схема її показана на рис. 3. Зараз існує ряд модифікацій цієї схеми. Іноді щілину розташовують над або під площиною круга Роуlanda, а спектр утворюється на іншому боці від цієї площини (просторова установка) (рис. 4). Щілина іноді розташовується на продовженні спектра, а іноді збоку від нього, і світло направляється па решітку поворотним дзеркалом або призмою.



Рис.3



Пространственная схема установки вогнутой решетки по Иглю. G — решетка, SI — цель, P/P' — спектр



Один из вариантов установки вогнутой решетки по схеме Иглю: S — источник света, SI — цель, M — зеркало, G — решетка, P — касета.

Рис.4

При просторовій установці щілина і її зображення виявляються не паралельними один одному. Щоб лінії в спектрі були перпендикулярні напрямку дисперсії приладу, щілину доводиться встановлювати під кутом до штрихів решітки. Такий же поворот зображення щілини має місце у всіх спектральних приладів, в яких центри щілини і її зображення не лежать в площині головного перерізу диспергуючого елемента.

Установка Іглю застосовується головним чином для спектрографів. Фотографована ділянка займає порівняно невелику область спектра. При переході від однієї області до іншої доводиться переміщати ґратку, одночасно міняючи кут її повороту і кут повороту касети. Всі три види переміщень досить точно здійснюються за допомогою одного гвинта. Установка Іглю застосовується для решіток всіх радіусів кривизни, аж до найбільших.

Практично повного усунення астигматизму можна домогтися в схемі, запропонованій Водсвортом (Рис.5). Тут решітка освітлюється паралельним пучком, створюваним сферичним коліматорним дзеркалом M . Спектр розташовується на кривій, радіус кривизни якої поблизу вершини приблизно дорівнює половині радіуса кривизни роуландівського кола. Відповідно менше і лінійна дисперсія. Астигматизм дорівнює нулю на нормалі до ґратки і дуже малий на досить великій відстані по обидві сторони від неї. Це істотно покращує умови роботи.

Для монохроматорів часто застосовується схема Сейя - Наміока, в якій спектр утворюється теж не на колі Роуланда. Вона особливо зручна тим, що перехід від однієї довжини хвилі до іншої здійснюється обертанням решітки без переміщення інших деталей установки. При геометрії, зазначеної на рис. 6, аберации виявляється незначними. Схема широко використовується в невеликих монохроматорах, головним чином для вакуумної області спектра, де переваги простий кінематики особливо істотні.

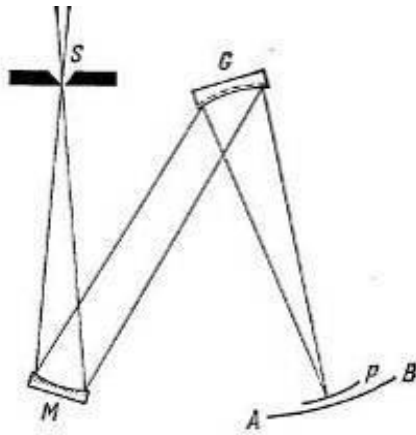


Схема установки вогнутої решітки по Водеварту: S - щель, M - вогнуте зеркало, G - решітка, P - нагорта, AB - резьє для установки нагорта.

Рис.5

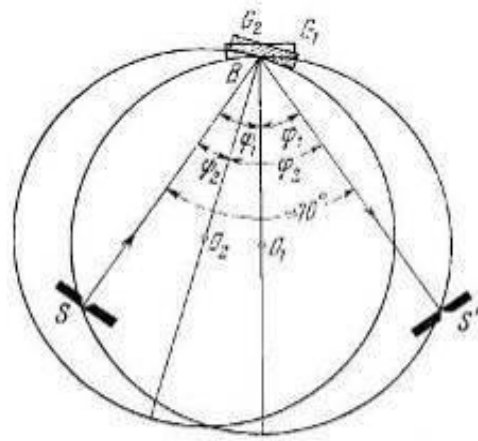


Схема установки вогнутої решітки по Сейя - Наміока: S и S' - перпендикулярные входная и выходная щели монохроматора, G_1 и G_2 - два половинки решітки, B - ось вращения решітки.

Рис.6

Для ВУФ спектра часто застосовується схема Сейя - Наміока (рис. 7). Зображення джерела випромінювання 1 на щілині 2 фокусується і розкладається в спектр ґраткою 3 на детектор 5. Кут між падаючим і відбитим променями обраний $70^{\circ}15'$, так як при повороті решітки (для зміни реєстрованого діапазону довжин хвиль) щілину і детектор сходять з кола Роуланда 4, але при такому виборі кута фокусування погіршується найменшим чином. Тобто для сканування по спектру досить повертати дифракційну решітку.

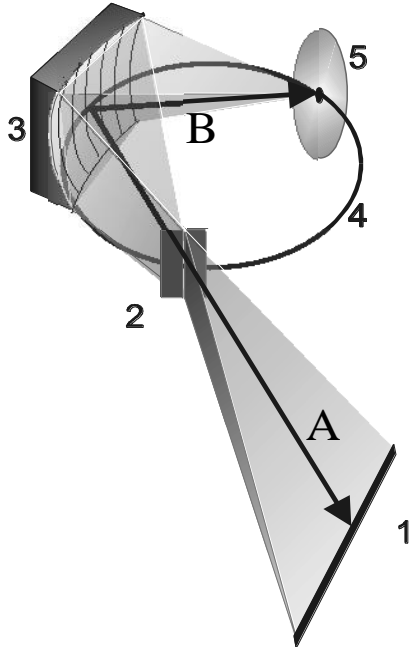


Рис.7

Така оптична схема має значний астигматизм, що не дозволяє отримувати в площині реєстрації зображення входної щілини. Точкове джерело випромінювання фокусується в вертикальну лінію в горизонтальному фокусі і горизонтальну лінію в вертикальному фокусі. Для отримання просторового дозволу необхідно, щоб вертикальний і горизонтальний фокуси збігалися, що має місце при $A \approx 3B$ (рис.7). Таким чином, можна отримати в площині детектора спектр випромінювання по горизонтальній координаті і просторовий розподіл інтенсивності ліній по вертикальній координаті.

Спектрографи для вакуумного ультрафіолету

Особливості техніки реєстрації випромінювання в вакуумному ультрафіолеті в першу чергу пов'язані з непрозорістю газів і твердих тіл. Все спектрографи, які використовуються для вимірювань довжин хвиль в вакуумному ультрафіолеті, мають в якості диспергируючої і фокусуєчої системи увігнуту дифракційну решітку. Існує два основних типи установки решіток, які використовуються в області, де ковзне падіння ще не є необхідним. В установці по схемі Пашена всі частини спектрографа: щілину, решітка і касета - залишаються фіксованими на своїх місцях, причому касета зазвичай розрахована на те, щоб можна було отримати відразу всю вакуумну ультрафіолетову область спектру. Інший тип установки - це автоколімаційна установка Ігля, в якій падаючий і дифрагований промені йдуть приблизно паралельно, а порівняно вузький спектральний інтервал, реєстрований при заданому розташуванні, вибирається шляхом зміни положення решітки та касети.

Розрідження повітря всередині приладу залежить від досліджуваної області спектра і довжини шляху променів в приладі. Так, наприклад, в області 300-900 А, для того щоб при довжині шляху 2 м загальне поглинання не перевищувало 30%, тиск повинен бути меншим $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст., а при 12 м - не більше $5 \cdot 10^{-4}$ ммрт. ст. Якщо врахувати, що в вузьких лініях коефіцієнт поглинання може бути великий, тиск повинен бути не вище 10^{-6} мм рт. ст. Часто доводиться підтримувати різні тиску: відносно великі в камері джерела світла і значно менше в оптичній частині приладу.

Один з перших в Радянському Союзі спектрографів для вакуумної області спектра був сконструйований В. М. Чулановським. Прилад виявився дуже вдалим і до теперішнього часу по вирішенню є найкращим серед приладів такого ж типу.

До конструкції цього приладу були пред'явлені наступні вимоги:

1) час, що йде на відкачку спектрографа і на заміну фотопластинки, має бути максимально скорочено; повинна бути виключена можливість течі і віддачі газу всередині приладу;

2) повинна бути забезпечена можливість попередньої установки решітки на нову ділянку спектра і полегшене фокусування на платівці;

3) роздільна сила решітки повинна бути використана за можливості повністю.

У цьому приладі увігнута решітка з радіусом кривизни 1 м, 1200 штрих / мм, 75 X 65 мм, була встановлена за автоколімаційною схемою Ігля, що забезпечує найменші габарити приладу і невеликий астигматизм в зображенні спектральної лінії. Схема Ігля полегшує роботу в високих порядках спектру і дає можливість надійної інтерполяції довжин хвиль в силу майже постійної дисперсії.

Недолік схеми Ігля - невелика інтенсивність діфрагованого світла при малих кутах падіння. Це обмежує робочий діапазон приладу з боку коротких довжин хвиль. При $\lambda < 400$ А слід застосовувати схеми з великими кутами падіння і дифракції (схеми ковзного падіння променів).

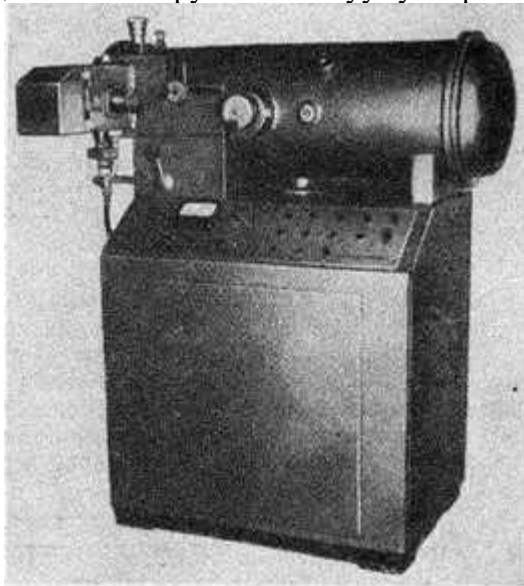
Корпус спектрографа Чулановського складається зі сталевий труби, вилуженої оловом зсередини і зовні; довжина труби 1150 мм, внутрішній діаметр - 164 мм. З боку решітки на трубу напаяний товстий фланець, зовнішня сторона якого добре відполірована і при відкачці закривається товстою скляною пластиною. Це дозволяє спостерігати за встановленням решітки, її освітленістю. Переміщення решітки і її поворот виробляються за допомогою двох шлифов, що проходять через пластину. Щілина відокремлена від корпусу спектрографа перехідним краном, що дозволяє зберігати в джерелі світла потрібний тиск, коли при заміні фотопластинки спектрограф наповнюється повітрям.

Щоб уникнути течі, всі закриваючі частини виготовлялися у вигляді матованих конічних шліфів. Принципово не допускалося прикручення внутрішніх частин зовні через корпус приладу. Щоб уникнути повітряних кишень, отвори для гвинтів робилися наскрізними. Форвакуумне відкачування проводилася масляним насосом. Високий вакуум досягався за допомогою активованого вугілля з горіховою шкаралупи, який занурювався в

рідке повітря. Для закладки в прилад касети і відкачування до готовності до зйомки потрібно не більше 5-6 хв.

Поворот і переміщення дифракційної решітки, вироблені за допомогою шліфів, відлічувалися за ноніусом. Установка решітки перевірялася фотографуванням у видимому світлі. Висока точність установок решітки дозволяла користуватися вузькою щілиною (близько 2-3 мкм) і домогтися кращого використання роздільної сили решітки.

Промисловий зразок приладу такого ж типу випускається під шифром ДФС-29. Робочий діапазон приладу 500- 4000 А. Решітка з радіусом кривизни 1 м, 1200 штрих / мм, 60x50 мм, встановлена за схемою Ігля. Спектр фотографується на 35 мм плівку довжиною 180 мм ділянками по 1500 А. Перехід від однієї ділянки до іншої і зміна касети проводиться без порушення вакууму в приладі.



Вакуумний спектрограф ДФС-29

Рис.8

Випускався раніше спектрограф ДФС-5 з увігнутою ґраткою радіусом 2 м, 1200 штрих / мм, побудований за схемою Пашена-Рунге, дає можливість фотографувати за одну експозицію весь робочий діапазон (500-2000 А) довжиною 610 мм. Його істотним недоліком є необхідність відкриття приладу і відкачування всього його обсягу при заміні плівки.

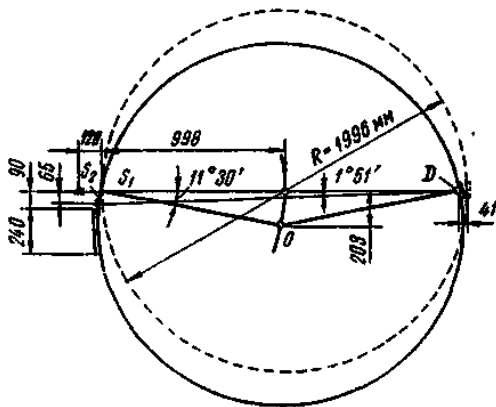
Дуже зручним приладом з гарною якістю спектра для області 500-3000 А виявився двометровий спектрограф нормального падіння променів СП-99. Цей прилад може працювати також і в якості спектрометра. В цьому випадку приймачами служать ВЕУ відкритого типу або ФЕУ-31 з люмінесцируючим екраном; світіння екрана направляєється на катод ФЕУ світлопроводів з надчистого скловолокна марки БК-10.

Прилад побудований за схемою Дауелла (рис. 9). Дифракційна решітка з радіусом кривизни $R = 1996$ мм, 1200 штрих / мм, 50X80 мм укріплена на кінці важеля OD завдовжки $R / 2$, який в точці O з'єднаний віссю з другим важелем OS_1 такої ж довжини. На іншому кінці важеля OS_1 , який обертається навколо нерухомого центру S_1 вхідної щілини, укріплені касета і вихідна щілина S_2 . При повороті важеля OS_1 навколо точки S_1 відбувається одночасно розворот решітки, її зміщення вздовж осі і розворот касети, причому всі оптичні елементи залишаються на колі Роуланда. Кут повороту решітки в діапазоні 0-3000 А становить $11^\circ 30'$, її зміщення вздовж осі S_1D - 41 мм. Дисперсія приладу- 4,15 А / мм. Фотографування проводиться на фотоплівку або фотопластинку розміром 240x60 мм або 240x35 мм ділянками по 1000 А. Без перезарядки касети можна сфотографувати більше 20 спектрів висотою 2 мм. Зміна касети проводиться без порушення вакууму в приладі; камери касети і джерела світла можуть бути герметично відключені від приладу. Відкачування основної камери і камери касети проводиться

вакуумним агрегатом ВА-05-1 і форвакуумним насосом РВН-20. Камера джерела і вхідний щілини відкачуються самостійною вакуумною системою (ВА-01-1 і РВН-20).

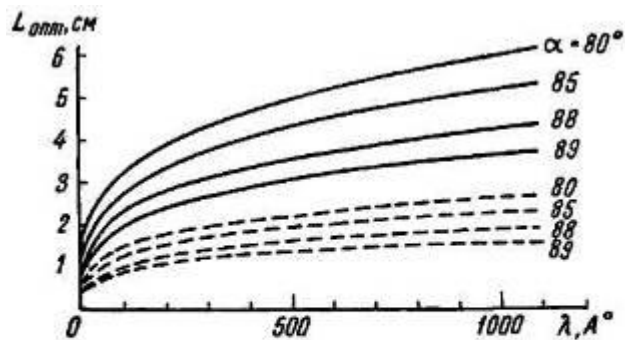
У вакуумній області спектра при довжинах хвиль коротше 400 А застосовуються скляні увігнуті решітки без металевих покриттів зі змінним падінням променя. Кут падіння становить 80-89 ° і навіть більше. Дисперсія приладу зростає в міру збільшення кута падіння. При збільшенні розмірів решітки роздільна здатність спочатку зростає, досягає максимуму, потім починає падати внаслідок збільшення аберацій. Оптимальна ширина L_{opt} решітки залежить від кутів падіння α й дифракції β і від радіусу кривизни решітки R :

$$L_{opt} = 2,42 \sqrt[4]{\lambda R^3 \frac{\cos \alpha \cos \beta}{(1 - \cos \alpha \cos \beta)(\cos \alpha + \cos \beta)}}.$$



Оптическая схема прибора СП-99

Рис.9



Оптимальная ширина дифракционной решетки в зависимости от длины волны для различных углов падения α и радиусов кривизны R решетки 600 штрих/мм:

Рис.10

На рис. 10 представлена залежність L_{opt} від довжини хвилі для різних кутів падіння і радіусів кривизни решітки 600 штрих / мм.

При збільшенні ширини решітки понад оптимального спостерігається асиметричне спотворення контуру лінії. Для того щоб отримати при ширині решітки L_{opt} відповідну їй роздільну здатність, ширину вхідної щілини слід брати рівною:

$$\Delta l_{opt} = \lambda \frac{R}{L_{opt}}.$$

Так як практично неможливо використовувати щілину вужче 1 мкм, роздільна сила лімітується шириною щілини.

У приладів зі змінним падінням габарити тим менше, чим більше кут падіння. Тому спектрографи з ґратками великих радіусів кривизни мають порівняно невеликі розміри. У найбільшому з відомих поки спектрографів змінного падіння решітка 576 штрих / мм має $R = 13$ м. Кут падіння $\alpha = 89^\circ 09'$. У робочому діапазоні 5-120 А дисперсія змінюється від

0,038 А / мм до 0,15 к / мм при 110 А. Фотоплатівки 50x2,5 см закріплюються в тримачі, що охоплює весь робочий діапазон приладу завдовжки 1390 мм.

Існує багато приладів невеликих габаритів. Був випущений прилад ДФС-6 з ґратками $R = 1$ м, 600 штрих / мм, $\alpha = 86^\circ$, робочий діапазон 50-2000 А. Прилад має низку конструктивних недоліків, причому деякі з них можуть бути усунені в процесі експлуатації приладу. В даний час цей прилад замінений приладом ДФС-26 з ґраткою 600 штрих / мм, $R = 3$ м, $\alpha = 85^\circ$. Робочий діапазон приладу 100-2200 А. Касета 60x240 мм переміщається по колу Роуланда в напрямку, перпендикулярному дисперсії. Основний обсяг приладу, камера джерела і камера касети відкачуються незалежними вакуумними системами.

Прилади для ракетних досліджень у вакуумній області спектра побудовані за схемами змінного падіння.

Установка із ковзаючим падінням пучка.

Як уже згадувалося, при переході до області досить коротких довжин хвиль ефективність решіток при звичайних кутах падіння швидко падає зі зменшенням довжини хвиль. Різні решітки поведуться в цьому відношенні по-різному, але в загальному значне зменшення інтенсивності дифрагованого світла починається в районі 500 - 300 А. Причиною цього може служити як зменшення відбивної здатності матеріалу решітки, так і структура поверхні решітки. Слід пам'ятати, що поверхня, яка є оптично рівною для видимого світла, може виявитися грубою для світла, довжина хвилі якого зменшилася в десятки разів. В обох випадках ефективність може бути істотно збільшена установкою решітки в ковзному падінні, тобто під кутом падіння більшим, ніж приблизно 80° . Зростання відбиваючої здатності може бути пояснено як наслідок ефекту повного зовнішнього відбиття, так як коефіцієнт заломлення для досить коротких довжин хвиль стає менше одиниці.

В рівнянні ґратки

$$m\lambda = e (\sin \vartheta - \sin \vartheta')$$

ми можемо замінити кут дифракції ϑ' на $(\vartheta - s/R)$, де s - довжина дуги кола Роуланда від нульового порядку до даної точки (рис. 1), і, диференціюючи, отримати вираз для зворотної величини лінійної дисперсії:

$$\frac{d\lambda}{ds} = \frac{e \cos \vartheta}{mR} = \frac{e \sin \varphi}{mR},$$

яка виявляється пропорційна довжині хорди r' , проведеної з даної точки кола Роуланда до центру решітки. Збільшення дисперсії досить значно: при $\varphi = 10^\circ$ вона приблизно в 6 разів більше, ніж при нормальному падінні.

Відмінною рисою установок зі змінним падінням є їх компактність. Наприклад, прилад з п'ятиметровою ґраткою з 600 штрихів / мм, розташованої під кутом $\varphi = 4^\circ$, має касету довжиною 60 см на область від 0 до 250 А, був змонтований в сталевій трубі довжиною близько 1 м і діаметром 20 см.

ґратки, які використовуються у вакуумному ультрафіолеті, мають, як правило, 600 або 1200 штрихів на мм. Здавалося б логічним для більш коротких λ використовувати решітки з великим числом штрихів на мм, проте при виготовленні таких решіток значно важче забезпечити високу якість нарізки, яка необхідно при просуванні в область коротких довжин хвиль. Дійсно, було виявлено, що з двох ідентичних скляних решіток (одна з 600, інша з 1200 штрихів / мм) грубіша, перша, решітка в області нижче 100 А володіла помітними перевагами перед другою. З іншого боку, була доведена можливість виготовляти і використовувати решітки, що мають до 3600 штрихів / мм.

ґратки нарізаються на дзеркальній бронзі, склі і напилених шарах алюмінію. У разі нарізки на алюмінії можна досить добре контролювати форму штриха, так що вдається

отримати потрібний кут блиску навіть для дуже коротких довжин хвиль. Однак, на загальну думку, для вакуумного ультрафіолету слід виготовляти решітки з неглибоким штрихом, залишаючи частину поверхні незайманою, і тільки ця незаймана частина поверхні ефективно бере участь в утворенні дифракції. Мабуть, це вірно для скла та бронзи, так як штрихи на цих тендітних матеріалах мають, ймовірно, шорстку поверхню. Штрихи, звичайно, не повинні бути дуже тонкими. Якщо вони будуть в кілька разів вужче, ніж відстань між ними, то дифракція стає незначною, весь світ піде в нульовий порядок. Цікаво відзначити, що Вуд виготовляв скляні решітки для двометрового приладу, виробляючи нарізку при дуже слабкому тиску на алмаз, а потім збільшував штрих до потрібних розмірів наступним травленням.

Скляні решітки мають ту перевагу, що їх відбиваюча здатність досить постійна за спектром і залишається низькою навіть у видимій області, тоді як ефективність металевих решіток сильно зростає до довгохвильовому кінцю ультрафіолетової області, особливо підкреслюючи цю частину спектра. Відбиваюча здатність ґратки може бути збільшена шляхом нанесення відповідних покриттів вже після того, як ґратка нарізана. Значне поліпшення дає платинування решіток і алюмініювання решіток шляхом напилення в вакуумі з подальшим покриттям захисною плівкою MgFg значно збільшує їх ефективність аж до 1100 А.

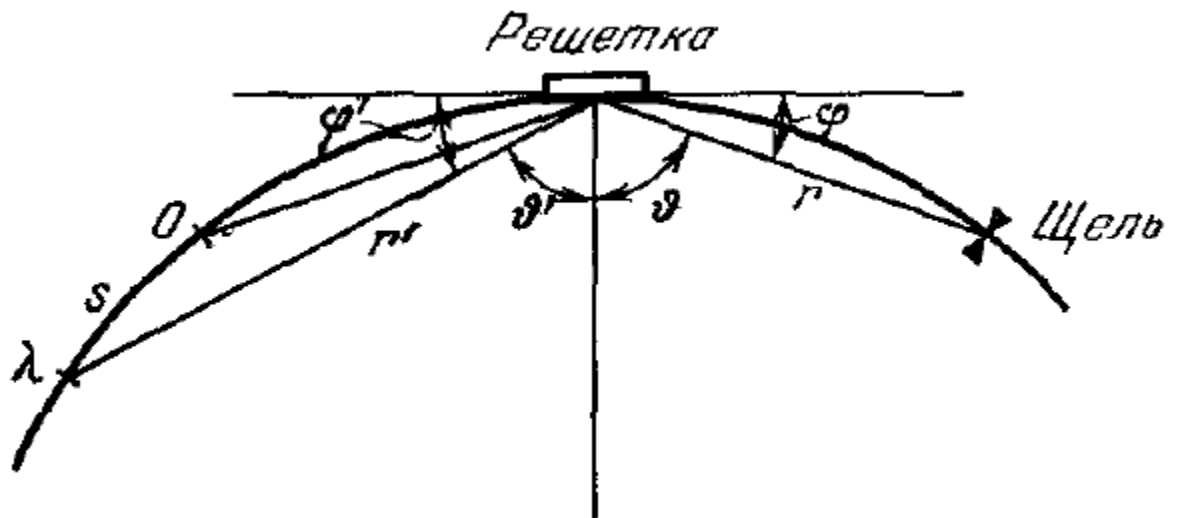
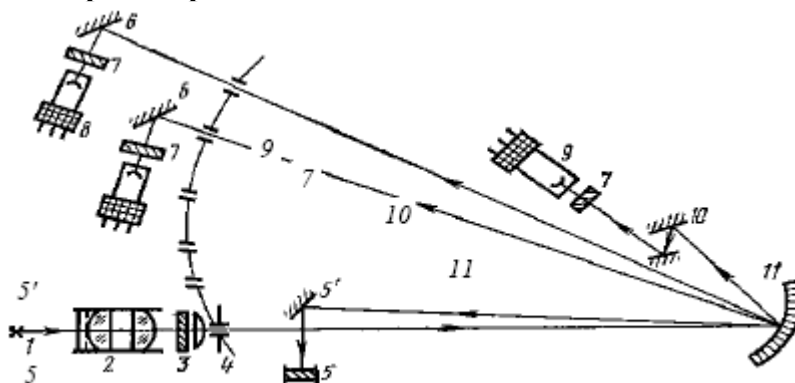


Рис.11

Поліхроматори



Мал. 12. Оптична схема квантометра МФС-4:

1 - джерело світла; 2 - растровий конденсор; 3 - лінза; 4 - щілина;

5 - вікно для перевірки правильності заповнення решітки світлом; 5' - поворотний дзеркало; 6 - сферичні дзеркала; 7 - нейтральні світлофільтри; 8,9 - фотопомножувачі; 10 - дзеркало; 11 - дифракційна решітка

Великого поширення набули багатощілинні прилади, що носять назву поліхроматорів або квантометрів, наприклад, МФС-4 (рис. 12). Кожна вихідна щілина цих приладів виведена на певну спектральну лінію, при цьому загальне число щілин одно 12. Реєстрація - фотоелектрична. Одночасно реєструються інтенсивності випромінювання ліній декількох елементів.

На двадцять чотири каналу розраховані прилади МФС-8 і ДФС-51, що випускаються ОКБ «Спектр», а багатоканальний емісійний спектрометр LS -1000 цієї ж фірми має 48 аналітичних каналів. Реєструча, частина спектрометрів останнього покоління укомплектована ґратами ешелле, помітно підвищує спектральне розділення (іноді використовується Фур'є-спектрометр або інтерферометр Фабрі-Перо), і ПЗС-детектором (лінійкою або матрицею), що істотно розширило можливості приладів.

Застосування сучасних ПЗС-детекторів замість фотопомножувачів в приладах для атомно-абсорбційної спектрометрії з електротермічною атомізацією і широкосмугового випромінювання на основі імпульсного розряду в ксеноні автоматично вирішують проблеми корекції фону. Слід зауважити, що в даний час ринок аналітичних приладів має універсальні і спеціалізовані прилади, що дозволяють вирішувати практично будь-які завдання спектрального аналізу.

Виготовлення ґраток.

За способом виготовлення дифракційні решітки діляться на нарізні (оригінальні), репліки (копії з оригінальних дифракційних решіток) і голографічні. Оригінальні нарізні дифракційні решітки виготовляються за допомогою спеціальної делительної машини з алмазним різцем, профіль якого визначає форму штриха. Виготовлення реплік полягає в отриманні відбитків дифракційної решітки на пластмасах з подальшим нанесенням на них відображає металевого шару. При виготовленні голографічної дифракційної решітки на світлочутливому матеріалі записується інтерференція двох когерентних лазерних пучків. Сучасні решітки, як правило, виготовляються шляхом нарізки алмазним різцем м'якої металевої поверхні. Основою для решітки служать зазвичай скляні заготовки, відполіровані з високою точністю. На заготівлю наноситься випаровуванням шар хрому, поверх нього шар алюмінію, за яким і ведеться нарізка. Необхідний профіль штриха і нахил його граней, що відображають досягається відповідним кутом заточування і установки ріжучого алмазу. Ґратки для видимої області мають від 100 до 2400 штр / мм; найбільш споживані 300, 600 і 1200 штр мм. У разі великої решітки алмаз до кінця нарізки проходить шлях до 10 км і більше. За цей час він стирається, тому форма і глибина штриха в кінці нарізки дещо відрізняються від початкової. З цим пов'язано помітне фокусує дію деяких плоских решіток, яке, однак, не викликає істотних незручностей при роботі. Алмаз, ріжучий ґратки по м'якому металу, видавлює його, створюючи досить складний профіль штриха, який не завжди точно відтворюється. Тому інструментальний контур і розподіл енергії по порядкам не зовсім точно збігається з розрахунковим.

В останні роки в зв'язку з успіхами лазерної техніки та голографії відкрилися можливості голографічного виготовлення дифракційних ґраток. Така ґрати є зареєстрована на світлочутливому матеріалі інтерференційну картину, утворену двома когерентними пучками світла. Картина може бути зареєстрована у вигляді варіації пропускання, відбиття або коефіцієнта заломлення при цьому відповідно утворюється амплітудна, відбивна або фазова решітка з синусоїдальним профілем штрихів. Змінюючи форму інтерферуючих хвильових фронтів, голографічного решітці можна надавати будь-які фокусує властивості, наприклад, отримувати плоскі решітки, аналогічні за дією увігнутою, але позбавлені астигматизму.

Ефективність голографічних дифракційних решіток може досягати 90%.

Голографічні решітки зовсім не дають духів, так як в принципі не мають помилок виготовлення, властивих ґрат, нарізаним на звичайній делительній машині.

Хороша дифракційна решітка повинна мати малим періодом і великим числом смужок. В сучасних хороших решітках число це перевищує 100 000 (ширина решітки до 100 мм, число смужок до 1200 на 1 мм). Смужки повинні бути строго паралельними між собою, і ширина смужок кожного сорту (прозорих і непрозорих) строго однакова (рівність ширини прозорої і непрозорої смужок не обов'язково). Істотно, щоб період решітки d був сталим. Хороші решітки отримують, проводячи тонким різцем паралельні штрихи на поверхні металевого дзеркала (відбивної решітки), причому штрихи, розкидають світло на всі боки, грають роль темних смужок, а незаймані місця дзеркала - роль світлих. Для виготовлення решітки, що працює на пропускання, можна прокреслити штрихи на поверхні скляної пластинки. Для виготовлення решітки потрібно першокласна делительная машина. В даний час широке застосування знаходять дифракційні решітки, отримані в результаті реєстрації на спеціальних фотопластинках інтерференційної картини, що виникає при інтерференції двох плоских монохроматичних світлових хвиль, що падають під різними кутами на площину фотопластинки.

Хороші решітки вимагають дуже високої точності виготовлення. Якщо хоч одна щілина з безлічі буде нанесена з помилкою, то решітка буде бракована. Машина для виготовлення решіток міцно і глибоко вбудовується в спеціальний фундамент. Перед початком безпосереднього виготовлення решіток, машина працює 5-20 годин на холостому ході для стабілізації всіх своїх вузлів. Нарізування решітки триває до 7 діб, хоча час нанесення штриха становить 2-3 секунди.

Репліки. До недавнього часу поширення дифракційних решіток обмежувалося складністю ділительних машин, створення яких було доступно лише деяким країнам. Висока вартість і мала продуктивність цих машин визначає і велику вартість дифракційних решіток. Положення істотно змінилося після того, як були вдосконалені методи отримання копій дифракційних решіток (реплік).

Цікаво відзначити, що якість реплік іноді виявляється навіть вище якості оригінальної решітки. Це пояснюється тим, що пластмаса погано передає дрібні дефекти штриха і останній на репліці виходить "глаже", ніж він був на оригінальній решітці. Після виготовлення репліки покривають шаром.

Репліки увігнутих решіток отримують або спеціально нарізаних опуклих матриць, або в два прийоми - з увігнутою решітки отримують опуклу копію, а з останньої - увігнуті, що застосовуються в спектральних приладах. Репліки покривають алюмінієвим відбиваючим шаром. Роздільна здатність реплік зазвичай нижче, ніж роздільна здатність тієї решітки, з якої вони отримані. Мабуть, їх найбільш доцільно застосовувати замість призм для приладів із середньою роздільною здатністю (близько 20 000), хоча зараз репліки часто ставлять і в великих приладах.

Зараз дифракційна решітка, як правило, обходиться дешевше, ніж еквівалентна їй за розміром і роздільною здатністю призма. В цьому відношенні переваги решітки особливо сильно позначаються в ультрафіолетовій області через високу вартість і рідкість великих шматків оптичного кварцу. Застосування реплік ще більше знижує вартість диспергуючого елемента. Однак слід зауважити, що його вартість становить відносно невеликий відсоток вартості всього приладу і заміна решітки на репліку не призводить до значного здешевлення приладу, позначаючись все ж на якості спектра. Тому захоплення репліками недоцільно, особливо коли мова йде про прилади з фокусом 2 м і більше.

Духи.

Недосконалість машини, що служить для нарізування дифракційних решіток, призводить до появи помилкових спектральних ліній, так званих духів. Розрізняють три види духів. Духи, що викликаються періодичним зміщенням штрихів решітки, визначаються кроком гвинта делительної машини і отримали назву *духів Роуланда*. Вони з'являються праворуч і

ліворуч від істинної лінії і знаходяться від неї на відстані, відповідному решітці зі штрихами, віддаленими на крок гвинта. Довжина хвилі духів Роуланда

$$\lambda_D = \lambda \left\{ 1 \pm \frac{k_D}{k N_D} \right\}$$

k_D —порядок духа, N_D -число штрихів на один оберт гвинта.

Духи симетрично розташовуються по обидва боки від усіх великих спектральних ліній. Легко обчислити відстань духу від основної лінії.

Іноді можна спостерігати духи другого, третього і навіть більш високих порядків.

Відносна інтенсивність духів Роуланда (по відношенню до лінії, яку вони супроводжують) приблизно пропорційна квадрату порядку спектра. Це також дає спосіб їх виділення шляхом вивчення спектру в різних порядках. Вона оцінюється шляхом фотографування на одній платівці кількох однакових спектрів з відносними інтенсивностями 1, 100, 300, 1000 і 10 000.

У хороших решіток відносна інтенсивність духів Роуланда в першому порядку не перевищує 0,1%. У решітках СП ця вимога практично завжди задовольняється. До порівняно недавнього часу спектри високих порядків залишалися недосяжними через великий інтенсивності духів Роуланда. В даний час успіхи, досягнуті в технології нарізування решіток із застосуванням методів інтерференційного контролю кроку різця, дозволили подолати цю перешкоду. У сучасних машинах подача заготовки контролюється по зсуву інтерференційних смуг в результаті переміщення дзеркала, пов'язаного з кареткою машини. В цьому випадку ґратка вільна від періодичних помилок і духи Роуланда практично відсутні.

Більш важко відрізнити від справжніх ліній помилкові лінії, що носять назву "Духів Лаймана". Коли машина періодично пропускає один штрих з'являються духи Лаймана. В цьому випадку помилкові лінії знаходяться на значній відстані від справжніх, що призводило до помилок при розшифровці спектрів. Вони відрізняються нерізким контуром. У сучасних решітках духи Лаймана ніколи не були виявлені, але їх відсутність все ж слід перевіряти для кожної новою решітки. Зараз розроблені методи нарізки решіток, повністю вільних від духів.

Третій тип духів - духи Вуда з'являються поруч з істинною лінією і дуже схожі на тонку структуру лінії. Причина їх появи полягає в неперіодичних помилках. Ці помилки з'являються внаслідок деформації форми різця під час нарізання. Так при нарізанні решітки 2400 штр / мм розміром 100 * 100 мм² різець проходить шлях рівний 24 км. В сучасних решітках духи Вуда також ліквідовані.

Л.15. ПРИЙМАЧІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Явища, на яких будуються приймачі оптичного випромінювання. Характеристики. Класифікація приймачів. Термопари та термостовпчики. Болметри. Вакуумні фотоелементи. Фотоелектронні помножувачі. Фоторезистори. Фотодіоди. Селенові фотоелементи. Принципи роботи і будова приймачів світла на ПЗЗ

Зусилля фізиків вже давно були направлені на те, щоб проводити світлові виміри без кропіткої роботи ока людини шляхом застосування особливих пристроїв. При використанні таких фізичних пристроїв для світлових вимірів участь ока зводиться до спостереження за їх показниками. Однією з причин, що спонукала людство застосовувати об'єктивну фотометрію, є особливості ока людини – неоднаковість його властивості у різних спостерігачів, зміна властивостей в одного й того ж спостерігача залежно від різних обставин – недостатня яскравість, недостатня якісна порогова чутливість тощо.

Робота з фізичними приймачами оптичного випромінювання значно простіша ніж зорові дослідження, які потребують від спостерігача знань, вмінь та навичок. Крім того вони розширюють межі вимірювання від ІЧ до УФ області спектра, що недоступне суб'єктивним методам вимірювання. *Приймачами оптичного випромінювання* називаються пристрої, які перетворюють енергію оптичної області спектра в інші види енергії. Існують різні типи приймачів залежно від типу енергії, в яку вони перетворюють енергію оптичної області спектра: біологічні, хімічні, електричні тощо.

У фотометричній практиці віддають перевагу використанню приймачів, які перетворюють енергію оптичної області спектра в електричну енергію як найбільш зручну для вимірювання. Різноманітність фізичних приймачів значна, але при світлових вимірах використовуються не всі, а тільки ті, спектральна чутливість яких близька до спектральної чутливості ока людини. У цьому разі можна говорити про світлові відчуття спостерігача, який довіряє кількісну оцінку цих почуттів пристроям. При освітленні речовини потік випромінювання може поглинатися в ньому двома способами:

- кристалевою решіткою матеріалу, перетворюючись в теплову енергію решітки, що призводить до нагріву тіла без порушення термодинамічної рівноваги. Різні види зміни електричних властивостей твердого тіла в результаті зміни його температури називають **т е р м о е л е к т р и ч н и м и** явищами ;

- електронами твердого тіла, при цьому тіло переходить у збуджений нерівноважний стан, температура тіла, тобто енергія кристалевої решітки практично не змінюється, а середня енергія електронів збільшується. Зміна електричних властивостей речовини при його освітленні в результаті оптичного збудження електронів називається **ф о т о е л е к т р и ч н и м и** явищами.

Приймачі випромінювання, в яких використовуються термоелектричні явища, називаються тепловими приймачами випромінювання (термопари, термостовпчики тощо). Приймачі випромінювання, в яких використовуються різні фотоелектричні явища, називаються фотоелектронними.

З точки зору практики світлових вимірювань, приймачі випромінювання зручно класифікувати на дві групи: селективні (вибіркові) й неселективні (нейтральні).

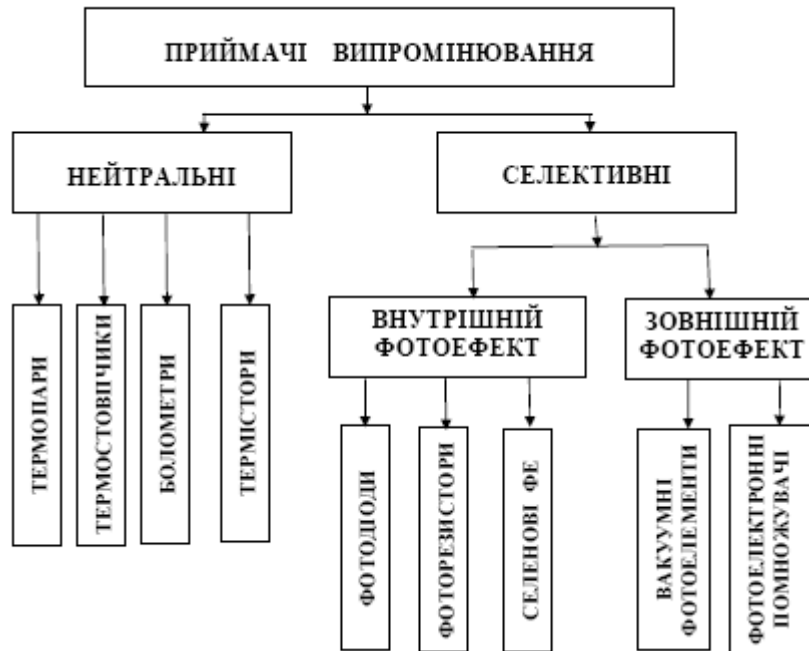
Основною характеристикою приймача будь-якого типу є його *чутливість*, що визначається як відношення реакції приймача на потік випромінювання до значення цього потоку випромінювання:

$$S = r / \Phi.$$

Зручно класифікувати приймачі так, як показано на рис. 2.1.

У селективних приймачів чутливість залежить від довжини хвилі випромінювання і має своєрідну форму спектральної чутливості – різну в різних частинах спектра

$$S_{\lambda} = r_{\lambda} / \Phi_{\lambda}$$



Неселективні приймачі однаково реагують на рівні потужності випромінювання, що на них падають незалежно від частини спектра. Прикладом нейтральної дії випромінювання може бути однакове нагрівання чорної поверхні при попаданні на неї рівних потоків випромінювання в різних частинах спектра. У більшості всі приймачі є селективними.

Проблемою є створення нейтральних приймачів. Всі неселективні приймачі створюють за принципом перетворення тепла випромінювання, для чого використовують спеціальні чорнителі. Для збільшення нейтральності використовують моделі чорного тіла, що являють собою порожнечі з малим отвором і доброю теплоізоляцією.

Неселективні приймачі мають перевагу перед селективними в тому відношенні, що їх спектральна чутливість має повну визначеність.

При розподілі приймачів на селективні й нейтральні слід враховувати той факт, що нейтральні приймачі не обов'язково будуть такими у всіх областях спектра випромінювання. Наприклад, приймачі, які є неселективними для світлової енергії, можуть бути селективними в сусідніх областях спектра.

Серед найбільш важливих характеристик приймачів випромінювання слід особливо виділити:

- інтегральну чутливість (для неселективних приймачів),
- спектральну чутливість,
- відносну спектральну чутливість (для селективних приймачів),
- лінійність,
- інерційність,
- темновий струм,
- робоча напруга живлення,
- та ін. залежно від принципу дії приймача.

Нейтральні приймачі випромінювання

Реакція нейтральних приймачів випромінювання заснована на нагріві, що виникає при поглинанні випромінювання, яке на них падає. Тому збільшення їх чутливості пов'язано з тенденцією збільшення нагріву приймача за рахунок поглинання якомога більшої частини потоку. Для створення неселективних приймачів використовують спеціальні чорнителі (окис платини, чорна цинкова, копоть скипидару і камфори), що забезпечують високий коефіцієнт поглинання. Так, цинкова чорнь в деяких інтервалах інфрачервоного випромінювання забезпечує коефіцієнт поглинання $\alpha = 0,96-0,98$. Всі

нейтральні приймачі мають чорну поверхню, яка здатна поглинати як видиме, так і невидиме випромінювання. Крім того, на підвищення чутливість нейтрального приймача впливає характер теплоємкості. Необхідно, щоб теплоємкість була по можливості малою, а підвищення температури, яке є наслідком поглинання енергії випромінювання, по можливості великим.

Суттєвим фактором також є втрата тепла, які виникають разом з підвищенням температури приймача по відношенню до температури навколишнього середовища. Ці втрати пов'язані із світимістю, теплопровідністю та конвекцією. Для зменшення втрат, пов'язаних з теплопровідністю, зачорнена металева пластина приймача прикріплюється до корпусу за допомогою тонких "містків" з теплоізоляційних матеріалів. Щоб усунути втрати тепла за рахунок конвекції, зачорнену пластину приймача вміщують у вакуумований посуд. У результаті чутливість приймача може збільшитись у сотні разів.

До нейтральних приймачів відносяться: різні болометри, радіометри й термометри.

Термометри та термостовпчики

У термоелементах і термометрах використовується явище нагріву одного з двох спаїв різнорідних металевих провідників, які створюють замкнений контур. У цьому контурі з'являється термоЕРС і виникає електричний струм, сила якого пропорційна різності температур між нагрітим і холодним спаєм, величина якої залежить від роду металів, що складають контур термометри. На рис. 2.2 наведено схему термометри. Загострені кінці 2 проволочок 3 замикаються смужкою пластини 1 у вигляді тонкої фольги, почорнена поверхня якої служить поверхнею приймача. Звичайно спай, що підігрівається, кріпиться на тильній стороні тонкої зачорненої пластини 1, яка разом із спаєм створює чутливий термоелемент. Металевим дзеркалом пучок променів концентрується на зачорненій стороні приймача. Електричний струм, що при цьому виникає можна виміряти за допомогою чутливого гальванометра. Для виміру потужності вузького монохроматичного пучка, що виходить із щілини спектрального пристрою, чутливій поверхні термоелемента надається форма вузького прямокутника (наприклад, розміром 1x10 мм).

Довідкові дані про термоЕРС деяких термометри при нагріві їх на 1 градус порівняно з температурою холодних кінців наведені в табл. 2.1.

Термометри, з'єднані послідовно у ряд дають значення чутливості, яка дорівнює сумі чутливостей окремих термометри. Такий пристрій має назву *термостовпчика*.

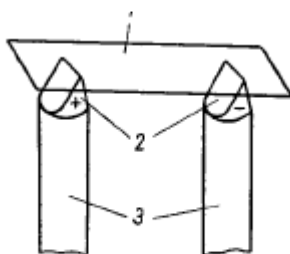


Рис.2.2 - Схема устрою термометри

Таблиця 2.1

Тип термометри	Температурний інтервал вимірювання	Значення термоЕРС (мкВ/градусів С)
Мідь-константан	0-20 градусів	39,5
Залізо-константан	0-20 градусів	52,5
Хромель - конпель	0-100 градусів	71,3
Манганин- константан	0-100 градусів	43,0
Висмут-срібло	0-100 градусів	80,2

Термостовпчики

Улаштування термостовпчиків буває різним. На рис.2.3 наведено схему конструкції термостовпчика. Він звичайно монтується у пластмасовий корпус 6 на металевому кронштейні, що забезпечує легке кріплення на фотометричному обладнанні. Металеве дзеркало фокусує потік випромінювання на приймальні зачорнені робочі поверхні пластин, які кріпляться до ряду послідовно з'єднаних спаїв термопар. Дзеркало може пересуватися у горизонтальній площині, змінюючи при цьому площу робочої поверхні термостовпчика, що забезпечує зміну його чутливості. Термостовпчики застосовуються для потреб світлових вимірювань частіше за інших невибіркових приймаїв із-за простоти та зручності їх використання. Вони добре вивчені і в багатьох випадках мають достатню чутливість. Після фотоелементів термостовпчики знаходяться на другому місці частоти використання.



Рис. 2.3 – Загальний вигляд

Болометри

Болометром називається пристрій для виміру потоку випромінювання, поглинання якого змінює електричний опір нейтрального приймача. Опір багатьох матеріалів залежить від температури. Незначний нагрів, що виникає під дією поглиненого випромінювання і пов'язана з ним зміна опору може бути виміряна загальноприйнятими методами. Болометри бувають металеві й напівпровідникові.

Металеві болометри – це тонка смуга металу, нанесеного розпиленням у вакуумі на скляну, кварцову або целюлозну основу. Найчастіше за метал обирається платина. Щоб добитися неселективного поглинання, зверху болометр покривається чорнителем. Смушка має невеликі розміри: довжина – 1-10мм, ширина – 0,5-2мм, товщина шару – близько одного мікрона. Опір смужки знаходиться в межах 10 – 100 Ом.

Напівпровідникові болометри виготовляють з різних окисних напівпровідників (найчастіше суміші окису марганцю і нікелю, а також кобальту). Шляхом тиску та обжигу отримують смужки на керамічній підложці. Потім проводять почорніння шляхом нанесення шару золота. Напівпровідникові болометри мають опір порядку 1 мОм. Електрична схема застосування болометра базується на містку Уїтстона і наведена на рис. 2.4.

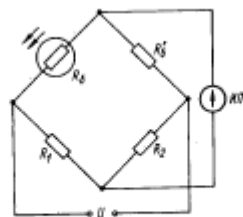


Рис.2.4. - Електрична схема застосування болометра

Останнім часом широке впровадження отримав особливий вид болометрів, які відрізняються виготовленням - *термістори*. Це багатотомні опори з напівпровідників (суміші окислів нікелю, кобальту, заліза, цинку, магнію та ін.) При кімнатній температурі

їх опір складає $(2,4)10^6$ Ом, що дає змогу застосовувати їх в електронних підсилювачах. При збільшенні температури на 1 градус опір зменшується в десятки разів.

Термістори можуть виготовлятися дуже малого розміру, тому інерція показань у них значно менша, ніж у теплових приймачів. Вони широко застосовуються при спектральних вимірах в інфрачервоній області спектра.

Селективні приймачі випромінювання

Фотоелектронні пристрої, вихідний сигнал яких залежить не тільки від потужності, але й довжини хвилі випромінювання, називаються селективними. Слід зазначити, що робота всіх селективних приймачів випромінювання заснована на принципі фотоэффекта. Фотоэффектом називається явище випускання з поверхні металу під дією світла заряджених часток – електронів. Пристрій, робота якого заснована на явищі фотоэффекта, називається фотоелементом.

Фотоелектричні явища (фотоэффект), що складають основу дії фотоелектричних приймачів, можна розділити на два види:

1) зовнішній фотоэффект, або електронна емісія, яка являє собою випускання освітленим тілом вільних електронів у вакуум або газ за рахунок поглинання фотонів. Вільні електрони можуть збиратися на аноді, фокусуватися або прискорюватися електричним полем.

2) внутрішній фотоэффект полягає в переході електронів в об'ємі освітленого тіла в збуджений стан (на більш високі енергетичні рівні) без зміни нейтральності твердого тіла (без виходу електронів за його межі).

Фотоелектронні приймачі випромінювання (селективні приймачі) відрізняються від термоіндикаторів (нейтральні приймачі) більш високою чутливістю, здатністю виявляти світлові потоки меншої інтенсивності, мають значно меншу інерцію.

Вакуумні фотоелементи

В основу дії вакуумного фотоелемента покладено зовнішній фотоэффект, під яким розуміють вихід електронів з поверхні речовини у вакуум або газ за рахунок енергії фотонів. Дослідження показали, що з чистої поверхні металу вилітають електрони тільки під дією фіолетових і ультрафіолетових променів. Потік електронів, визволених під дією світла одним з електродів вакуумного пристрою та вловлювання цього потоку другим електродом, створює у зовнішньому ланцюгу струм, який називається фотострумом. Вакуумний елемент являє собою вакуумну оболонку, яка виконується із скла або іншого прозорого матеріалу, в середині якого розташовуються анод і катод (рис.2.5).

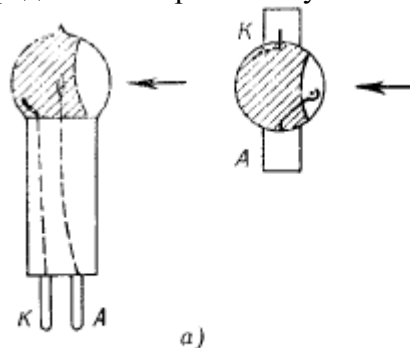


Рис. 2.5 - Схема будови вакуумного фотоелемента

У вакуумних фотоелементах визволени випромінюванням з фотокатоду електрони направляються до аноду під дією прикладеної до нього напруги. Напруга вибирається такою, що б всі електрони попали на анод. Фотоелемент працює в режимі насичення вольт-амперної характеристики. Схема включення вакуумного фотоелемента з охоронним кільцем наведена на рис.2.6.

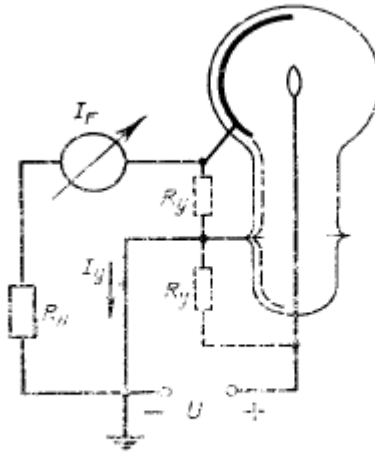


Рис. 2.6. - Схема включення вакуумного фотоелемента з охоронним кільцем

Спектральна чутливість вакуумного фотоелемента та його інтегральна чутливість визначається типом катода. На рис. 2.7 наведені криві відносних спектральних чутливостей фотоелементів з різними типами фотокатодів.

Фотокатод являє собою шар металу або напівпровідника, нанесений безпосередньо на скло колби або на спеціальну основу – звичайно металеву пластину. Робота виходу, яка необхідна для звільнення електронів з чистого металу, велика. Тому фотокатоли з чистого металу застосовують тільки в приладах для роботи в ультрафіолетовій області спектра (“сліпі” фотокатоли з магнію). Найчастіше фотокатоли являють собою складні комбінації з декількох речовин. Так, для видимої області спектра застосовують католи із сурми, оброблені парами одного або декількох лужними металами, наприклад сурм’яно-цезієвий, багатолужний, вісмут – срібноцезієвий, срібнокисне-цезієвий. Всі фотокатоли, які чутливі у видимій області спектра, також чутливі і до ультрафіолетового випромінювання, але для цього використовуються колби, що мають увіолеве віконце. Інфрачервона область спектра має значний інтерес для фотоелектроніки. Фотоелектронні пристрої, які чутливі у найближчій інфрачервоній області спектра, використовують у приладах нічного бачення, астрономії, спектроскопії. Для цієї області спектра може бути застосований фотокатод срібнокиснецезієвий, але розробки в цьому напрямі ще досі інтенсивно ведуться.

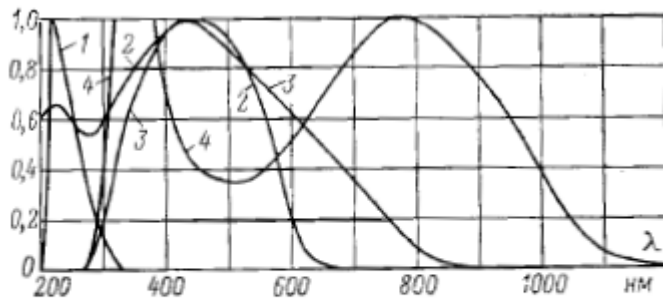


Рис. 2.7 - Криві відносних спектральних чутливостей деяких фотокатодів:

1 - магнієвий (з увіолєвим вікном); 2 - сурмяно-цезієвий (з кварцевим вікном); 3-багатолужний; 4 - кисне-срібляно-цезієвий

Фотокатоли для вакуумного фотоелемента (ВФЕ) можуть бути виконані двома засобами: для роботи “на відбиття”, коли світло падає на фотокатод з боку вакууму (масивні фотокатоли) і для роботи “на провіт”, коли світло поступає з боку прозорої оболонки. ВФЕ з масивними непрозорими фотокатодами використовують як приймачі сфокусованих світлових потоків, постійних або модульованих за амплітудою у діапазоні

невеликих частот (звукове кіно, фототелеграфія, контрольно–вимірювальні прилади). Основна вимога до цих фотоелементів –достатньо висока інтегральна чутливість, стабільність, надійність роботи і взаємозамінність. Серійні фотоелементи цієї групи мають сферичну форму колби з фотокатодом, нанесеним на її внутрішню поверхню і освітлюваним через залишену прозорою частину колби. Від геометричної форми колби залежить ефективність використання світлового потоку, що падає. Для масивних фотокатодів сферична форма фотокатода, освітлена з внутрішньої сторони, є оптимальною: відбита від поверхні фотокатода частина світлового потоку падає на сусідні ділянки вгнутої сфери і знову поглинається катодом. Анод сферичних фотоелементів виконують у вигляді кільця або петлі з тонкої проволочки і розміщують у центрі колби. При виготовленні напівпрозорих срібноокисневоцезієвих фотокатодів склад наносять на скло методом термічного випарювання, такі фотоелементи працюють на просвіт.

До найбільш значущих характеристик вакуумних фотоелементів слід віднести лінійність – пропорційну залежність між фотострумом, що виникає в ланцюзі фотоелемента, і потоком випромінювання, що падає на його прийомну поверхню. Вакуумні фотоелементи мають значно більшу лінійність, ніж інші приймачі.

Найважливішою якістю вакуумного фотоелемента як вимірювального пристрою крім вищезазначеного параметра “лінійність” є стабільність його параметрів. Під стабільністю розуміють постійність значення спектральної чутливості протягом часу й зміни температури навколишнього середовища. Одним з проявів нестабільності є “стомлюваність” – зворотна зміна чутливості. При фотоелектричних вимірах, що виконуються за допомогою вакуумних фотоелементів, часто доводиться спостерігати явище, яке має назву “стомлюваність” катода. Суть цього явища полягає в тому, що при незмінному потоці випромінювання, який падає на катод, і незмінних інших зовнішніх умовах фотострум, який виникає у замкнутому ланцюзі, починає повільно зменшуватися. Згодом в ланцюзі встановлюється постійне значення фотоструму. З цього часу можна проводити вимірювання. Слід зазначити, що стомлюваність фотокатода залежить від складу випромінювання, яке падає. При монохроматичному випромінюванні найбільша стомлюваність відзначається в короткохвильовій частині спектра, найменша – в червоній і інфрачервоній областях. Якщо стомлюваність фотокатода значна, то в процесі освітленості може змінюватися і його спектральна чутливість. Такі фотоелементи, як правило, вважають неприйнятними для проведення експериментів. Тому для виконання світлових вимірів слід обирати фотоелементи, які мають малу стомлюваність. При роботі фотоелемента крім фотоструму в ланцюзі протікає струм, що має назву темновий, який не зникає при припиненні освітленості. Він виникає за рахунок струму втечі по цоколю і колбі, а також за рахунок термоелектронної емісії. Темновий струм перешкоджає вимірам і його по можливості зменшують. У деяких конструкціях вакуумних фотоелементів, які служать для виміру слабких потоків, є третій допоміжний електрод – охоронне кільце, розташоване таким чином, щоб уловлювати струм втечі по балону між выводами катода і анода. У вакуумних фотоелементах з охоронним кільцем струм втечі практично відсутній. Струм термоелектронної емісії можна зменшити охолодженням фотоелемента.

При роботі з вакуумними фотоелементами слід пам'ятати, що кожен з них виготовляється індивідуально за технологією, що включає в себе послідовне нанесення на катод шарів різних хімічних елементів. Така технологія обумовлює індивідуальні властивості кожного з виготовлених фотоелементів.

Крім вакуумних фотоелементів у техніці використовують газонаповнені фотоелементи, які наповнені інертним газом, наприклад аргоном. Такі елементи мають більшу інтегральну чутливість, ніж вакуумні, але малу стабільність, нижчу лінійність і більшу інерцію, що є суттєвим при роботі на високих частотах.

Основними паспортними даними для кожного типу фотоелемента є:

1. Тип фотокатода і спектральний діапазон роботи фотоелемента.
2. Чутливість – інтегральна або спектральна.

3. Рекомендована анодна напруга, що забезпечує насиченість у широкому інтервалі світлових потоків.
4. Допустимий інтервал зміни температури навколишнього середовища, в межах якого зберігається чутливість фотоелемента. Звичайно складає $-20 \div +50$ С.
5. Величина темного струму.

Фотоелектронні помножувачі

Найбільш зручним пристроєм для роботи з малими потоками випромінювання є фотоелектронні помножувачі (ФЕП). У цих пристроях фотоелектрони направляються прискорювальною напругою до системи послідовних вторинних емітерів або динодів. На кожному каскаді один падаючий на динод первинний електрон вибиває з нього декілька вторинних електронів. Підсумкове посилення сягає $10^5 \div 10^9$ разів. На рис. 2.8 подана принципова схема ФЕП.

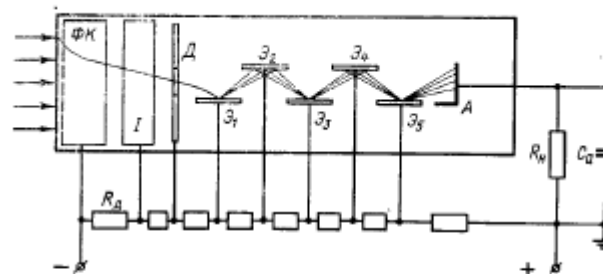


Рис. 2.8 – Принципова схема ФЕП з подільником напруги:
 ФК - фотокатод; І - фокусувальний електрод; Д - діафрагма; Е₁.....Е₃ – діноди;
 А - анод; С_А - ємність анода; R_н - навантаження подільника напруги;
 R_д - навантажувальний опір в ланцюзі анода

Випромінювання, що падає на фотокатод, викликає фотоелектронну емісію. Кількість електронів, емітованих в одиницю часу фотокатодом, пропорційна інтенсивності потоку випромінювання. Електрони залишають фотокатод під різними кутами до його поверхні й з різною початковою швидкістю. Для того, щоб зібрати їх на першому диноді, площа якого може бути значно меншою ніж площа фотокаатода, необхідні фокусувальні електронно-оптичні системи, що складаються з ряду електродів, які утворюють електростатичні лінзи. Простір між фотокатодом і первинним динодом називається вхідною камерою ФЕП. У ній здійснюється фокусування і прискорення фотоелектронів, що направляються на перший динод. Якість електронно-оптичної системи вхідної камери характеризується коефіцієнтом збору електронів, який являє собою відношення числа фотоелектронів, що надійшли до першого диноду, до загальної кількості емітованих фотокатодом електронів. Фотоелектрони, що надійшли на перший динод, викликають вторинну електронну емісію. Кількість вторинних електронів, які залишили перший динод пропорційно коефіцієнту вторинної емісії σ , який залежить від матеріалу, з якого виготовлений динод, та напруги в ланцюгу фотокатод-первинний динод. Напруга на диноди і електроди ФЕП подається такою, щоб між кожною парою динодів створювалось електричне поле. Форма динодів і їх взаємне розташування обираються таким чином, щоб забезпечити можливість збору найбільшого числа електронів з попереднього динода на наступний. Матеріал для виготовлення динодів повинен мати високий коефіцієнт вторинної емісії при невеликих енергіях первинних електронів (~ 1 ЕВ).

Останнім часом з'явилися каналні ФЕП, в яких система динодівзамінена одним розподільчим динодом у вигляді вузького каналу, покритого напівпровідниковим шаром з високим коефіцієнтом вторинної емісії. Упродовж шару напівпровідника розподіляється прискорювальна напруга. Посилення таких пристроїв дещо менше ніж у ФЕП, але вони мають значно менші габарити і вищу міцність.

Фоторезистори

Фоторезистори – селективні приймачі випромінювання, робота яких заснована на явищі внутрішнього фотоелектричного ефекта, який полягає в перерозподілі електронів по енергетичних рівнях за рахунок поглинання кванта випромінювання. При цьому зростає концентрація носіїв струму усередині речовини і з'являється додаткова провідність - фотопровідність. Поглинання квантів випромінювання може проходити як в основній речовині – власний фотоелектричний ефект, так і в суміші –

сумісний фотоэффект. При власному фотоэффекті в зоні провідності з'являються електрони, а у валентній зоні – дірки, при цьому фотопровідність має біполярний характер. При сумісному фотоэффекті електрони переходять або з рівня суміші в зону провідності, при цьому з'являється електронна провідність (n-провідність), або з валентної зони на рівні суміші – діркова провідність (p-провідність). Зміна концентрації носіїв заряду в речовині при його освітленні призводить до зміни його електричних властивостей і називається *внутрішнім фотоэффектом*. При внутрішньому фотоэффекті оптично збуджені електрони залишаються всередині освітленого тіла, нейтральність якого не порушується. Внутрішній фотоэффект можна виявити за зміною електропровідності тіла при його освітленості. Це явище називається *фотопровідністю*.

Напівпровідникові пристрої, дія яких основана на явищі фотопровідності називаються **фоторезисторами**. Фоторезистори звичайно вмикають в ланцюг постійного або змінного струму послідовно з опором навантаження (рис.2.9).

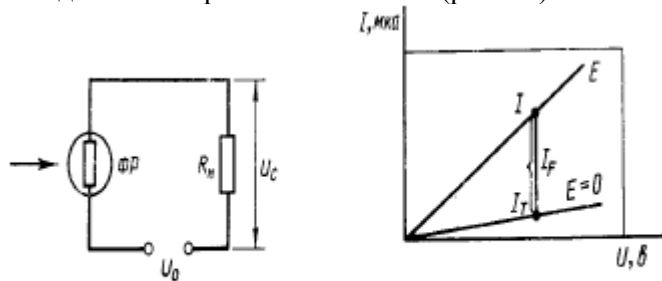


Рис. 2.9. - Схема включення фоторезистора

Основними речовинами, які використовують для виготовлення промислових фоторезисторів, є сульфід або селенід кадмію.

Фоторезистор – дуже розповсюджений приймач випромінювання, являє собою напівпровідник, високий електричний опір якого самітно знижується під дією падаючого на нього випромінювання. Темновий струм фото резистора досить малий, тому що в об'ємі неосвітленого напівпровідника присутня досить мала кількість вільних електронів, здатних рухатися під дією прикладеної до нього зовнішньої напруги.

Будову фоторезистора наведено на рис. 2.10.

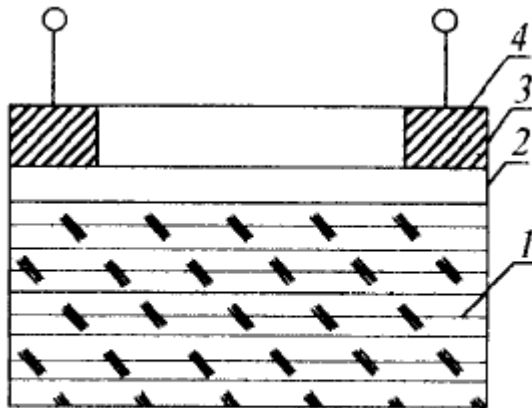


Рис. 2.10 - Схема будови фоторезистора

Фоторезистор виготовляють наступним чином. На основу 1, виконану із слюди або скла, наносяться шар напівпровідника 2, на якому розміщені контакти 3 для подачі напруги. Фоторезистор розміщується в металевому або пластмасовому корпусі 4 з вікном з матеріалу, який є прозорим для випромінювання робочого діапазону фоторезистора. Виникаючий фотоэффект суттєво залежить від довжини хвилі випромінювання і показника поглинання. Якщо випромінювання зовсім не поглинається напівпровідником, то внутрішній фотоэффект і фотопровідність не з'являються. Якщо випромінювання поглинається досить сильно, то процес, який протікає у шарі напівпровідника, також не

створює достатньої фотопровідності, яка може бути виміряна чутливими пристроями. Це обумовлено надто високим опором тонкого шару. На рис. 2.11 наведено типові спектральні характеристики різних видів фоторезисторів із сульфиду кадмію.

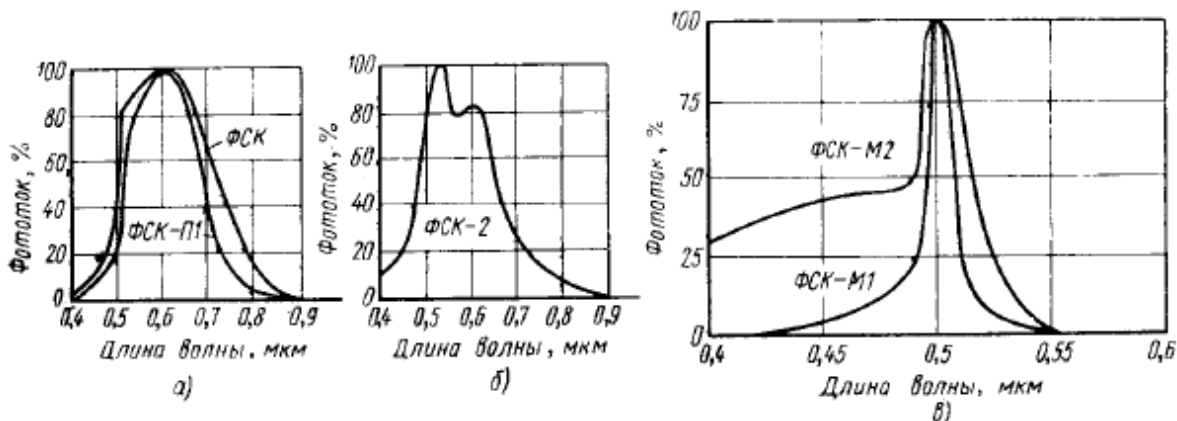


Рис. 2.11 - Типові спектральні характеристики фоторезисторів

Фотодіоди

Фотодіодами називають напівпровідникові пристрої, які працюють на внутрішньому фотоефекті, використовують односторонню провідність р – n – переходу, при освітленні якого з'являється ЕРС – фотогальванічний (ФГ) режим або (при наявності живлення) змінюється значення зворотного струму – фотодіодний режим (ФД). При роботі фотодіода у фотогальванічному режимі в разі освітлення n – області в ній з'являються нові носії заряду – електрони й дірки. Вони дифундують до р – n – переходу, де неосновні носії – дірки переходять в р – область (зворотній струм неосновних носіїв), а електрони, для яких дифузне

поле р – n – переходу є запираючим, залишаються у n – області. При постійному освітленні в р – області накопичуються дірки, а в n – області – електрони. Це призводить до появи фото ЕРС, поле якої направлене проти поля дифузії в р – n – переході. Фото ЕРС знижує односторонню провідність р – n – переходу, що збільшує прямий струм основних носіїв. При роботі фотодіода у фотодіодному режимі до нього прикладається зворотна напруга. У такому разі за відсутності освітленості через р – n – перехід і опор навантаження тече зворотній струм. При освітленості n – області через р – n – перехід і опорне навантаження тече додатковий струм неосновних носіїв. Сумарний струм у ланцюзі складається із темного струму й струму неосновних носіїв. На рис. 2.12 наведені схеми включення фотодіодів у фотогальванічному й фотодіодному режимах.

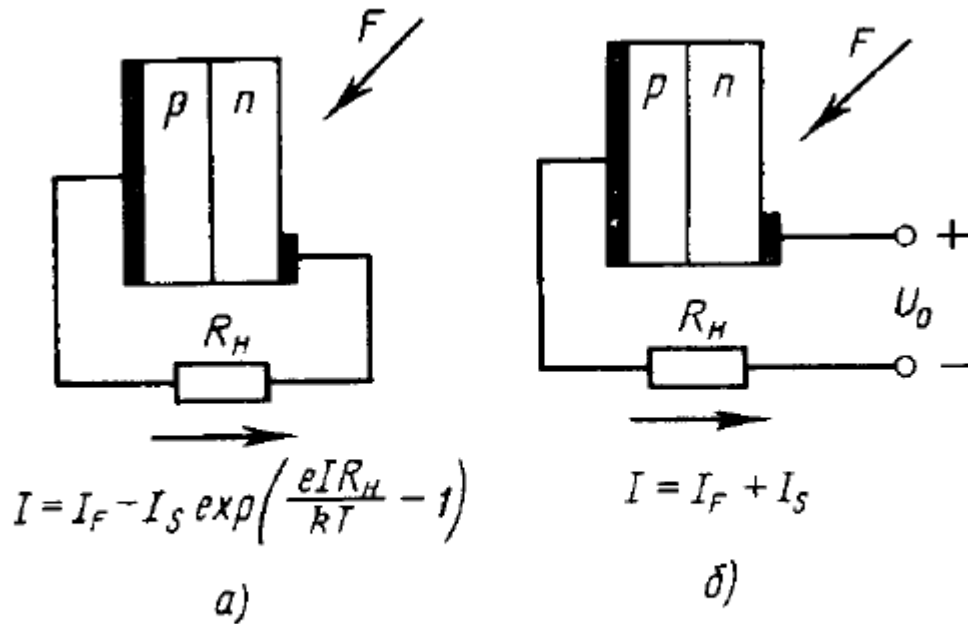


Рис. 2.12 - Схеми включення фотодіода:

а - фотогальванічний режим; б - фотодіодний режим

Процес виготовлення фотодіоду складається з нанесення на металеву основу, яка є одним з електродів, шару напівпровідника, що створює заірний шар. Поверх нього розпиленням у вакуумі наносять шар металу, і закріплюють шайбою для покращення контакту. Вся конструкція розміщується в корпусі. На рис. 2.13 показано конструкцію германієвого фотодіоду типу ФД-3, а на рис.2.14 порівняльні спектральні характеристики германієвого і кремнієвого фотодіодів.

Крім чутливості параметрами, що характеризують властивості фотодіодів, є:

1. Максимальна робоча напруга, величина якої обмежується напругою пробую.
2. Величина темного струму, величина якого визначається концентрацією неосновних носіїв заряду в матеріалі і залежить від ширини забороненої зони напівпровідника й температури.
3. Постійна часу (інерційність).

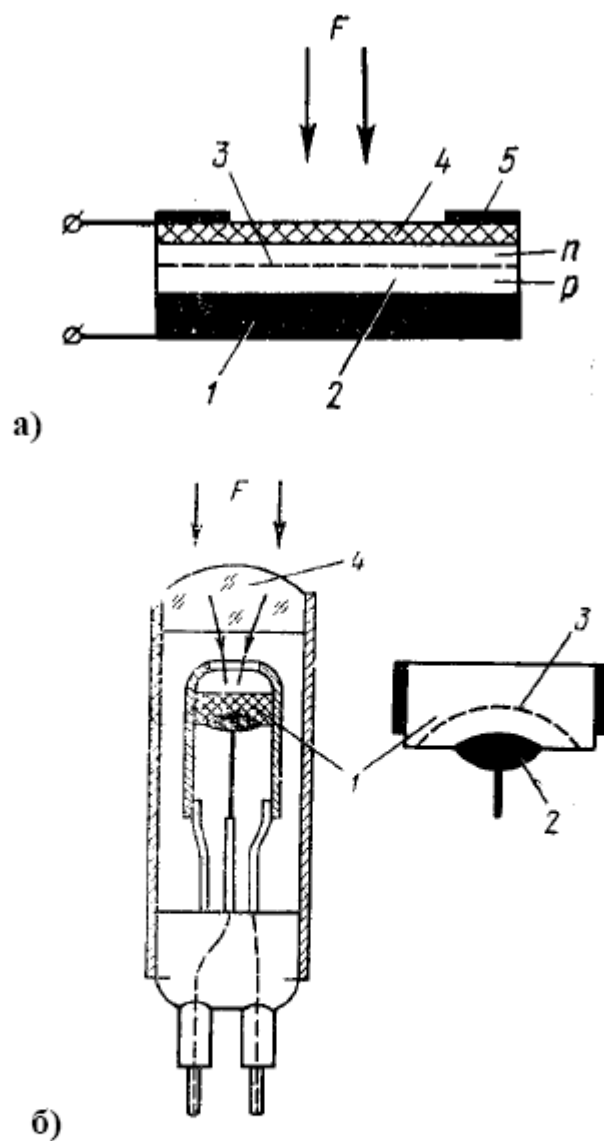


Рис. 2.13 - а) Схематична будова вентильного фотоелемента:

- 1 – контактна пластина (підложка); 2 – шар напівпровідника;
 3 – р-п перехід; 4 – зовнішній прозорий металевий електрод;
 5 – прижимний контактний електрод;

б) конструкція германієвого фотодіода ФД-3:

- 1 - платівка монокристалу германія; 2 - металевий електрод;
 3 - р-п-перехід; 4 - збираюча лінза

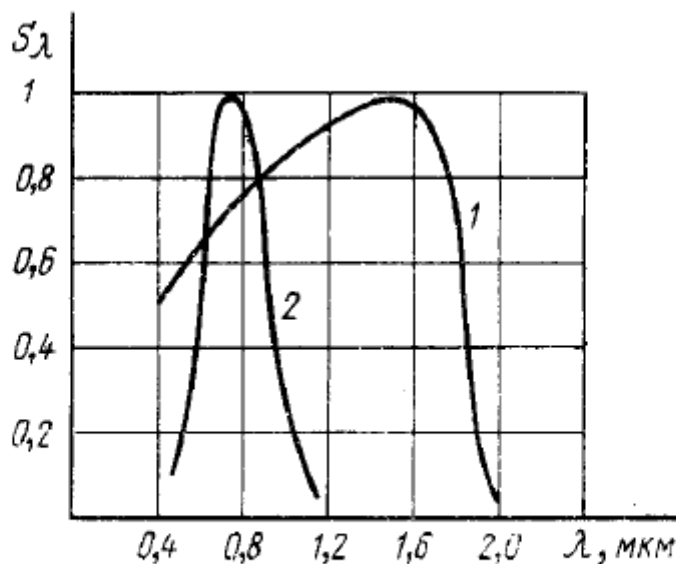


Рис. 2.14 - Порівняльні спектральні характеристики германієвого 1 і кремнієвого 2 фотодіодів.

Селенові фотоелементи

Селенові фотоелементи, або фотоелементи із запираючим шаром є єдиним типом фотоелектричних приймачів, які заслуговують назву фотоелемента. Тільки вони є пристроями, які безпосередньо перетворюють енергію випромінювання, що падає, на електричний струм без зовнішньої напруги. Запираючий шар з'являється у процесі виготовлення фотоелемента на межі між напівпровідником і металом або між двома різнорідними напівпровідниками. Цей шар пропускає крізь себе визволені світлом електрони і не пропускає позитивні заряди, в результаті чого між різними ділянками фотоелемента з'являється різниця потенціалів, яка зникає разом з припиненням освітленості. Якщо електроди освітленого фотоелемента замкнуті проводом через гальванометр, то в зовнішньому ланцюзі потече струм, сила якого залежить від потоку, що падає на чутливий шар фотоелемента. У даний час для світлових вимірів найчастіше застосовують селенові фотоелементи, які є найяскравішим представником фотодіодів, що працюють у фотогальванічному режимі (рис. 2.15).

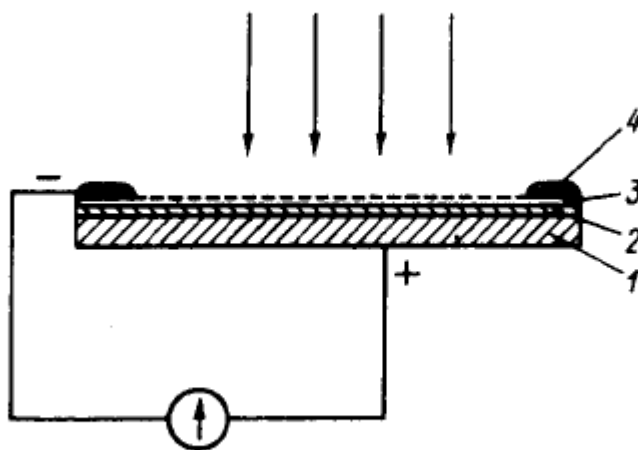


Рис. 2.15 - Переріз селенового фотоелемента із запираючим шаром

Виготовлення селенових фотоелементів полягає в нанесенні шару селену товщиною 1мм методом термічного випарювання у вакуумі на залізну пластину розміром у декілька

квадратних сантиметрів. Поверхня пластини попередньо очищується і шліфується для кращого зчеплення із плівкою селену. Нанесена таким способом плівка селену знаходиться у аморфному стані і не має фотоелектричних властивостей. Для того, щоб селен набув кристалеву структуру і став фотоактивним, заготовку прогрівають при температурі 2000 – 2100 С , близькій до температури плавлення селену. При цьому шар селену переходить в сіру кристалеву модифікацію. Ширина забороненої зони селену при кімнатній температурі дорівнює 2,5 еВ, тип електропровідності – дірковий. Верхній електрод наноситься на поверхню плівки селену методом катодного напилення. Він повинен бути прозорим у всій спектральній області чутливості фотоелемента і мати високу провідність, забезпечуючі контакт із притисною шайбою, яка з'єднується з зовнішньою клемою (другим електродом служить металева підложка, на яку нанесено шар селену). Для зменшення атмосферного впливу фотоелемент покривається плівкою прозорого лаку і монтується в корпус, на якому закріплені клеми виводів. Верхній електрод селенового фотоелемента виготовляють нанесенням у вакуумі тонкого шару кадмію, а потім напівпрозорий шар золота або платини, поверх якого монтується контактне кільце, що є негативним електродом.

Головним достоїнством селенового фотоелемента для світлових вимірів є його висока інтегральна чутливість – близько 500 мкА/ лм , характеристика спектральної чутливості, яка приближається до кривої спектральної чутливості ока людини (рис. 2.16).

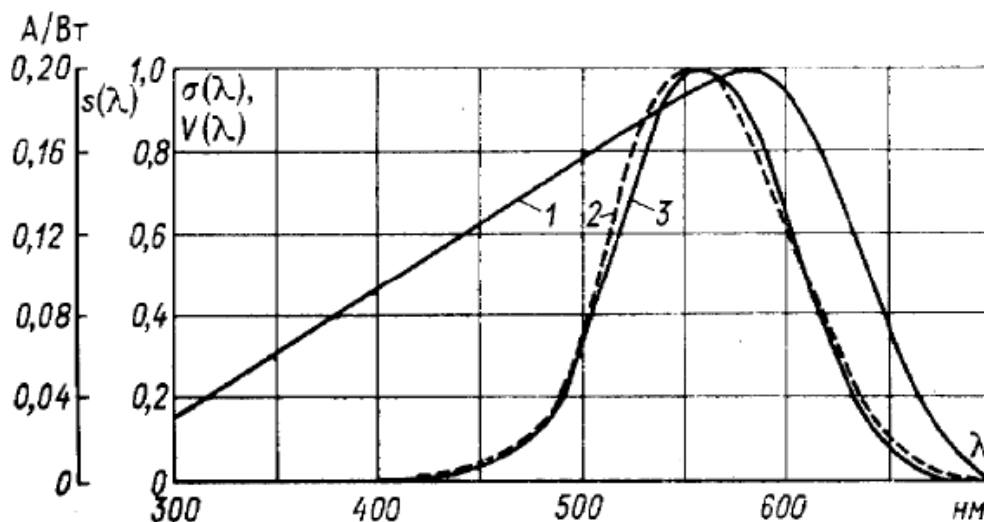


Рис. 2.16 - Криві спектральної чутливості селенового фотоелемента (1), середнього ока (2) і фотоелемента із коригуючим фільтром (3).

При використанні селенових фотоелементів для світлових вимірів слід знати їх особливості:

1. Сила струму зовнішнього ланцюга фотоелемента залежить від спектрального складу випромінювання, що падає.
2. Спектральна чутливість фотоелемента з часом змінюється.
3. Коефіцієнт поглинання залежить від кута падіння потоку випромінювання на поверхню фотоелемента. З ростом кута падіння потоку на поверхню фотоелемента зменшується частка поглинутого потоку.

Принципи роботи і будова приймачів світла на ПЗЗ.

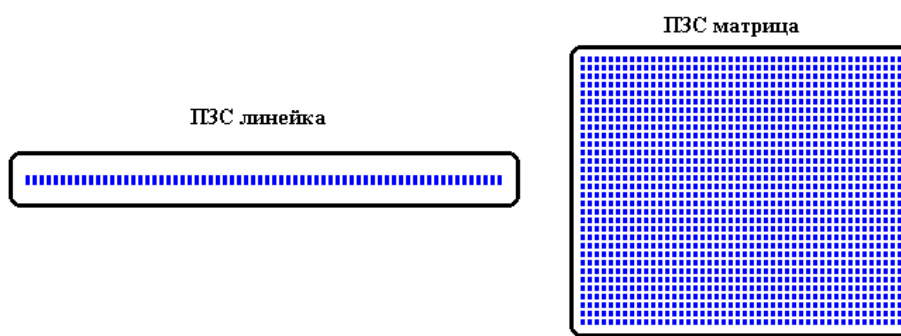
Вперше принцип ПЗЗ з ідеєю зберігати і потім зчитувати електронні заряди був розроблений двома інженерами корпорації BELL в кінці 60-х років в ході пошуку нових типів пам'яті для ЕОМ, здатних замінити пам'ять на феритових кільцях). Ця ідея виявилася безперспективною, але здатність кремнію реагувати на видимий спектр випромінювання була помічена і думка використовувати цей принцип для обробки зображень отримала свій розвиток.. Аббревіатура ПЗС означає "Прилади з зарядовим

зв'язком" - цей термін утворився від англійського "Charge-Coupled Devices (CCD).

Даний тип приладів в даний час має дуже широке коло застосувань в самих різних оптоелектронних пристроях для ресстрації зображення. У побуті це цифрові фотоапарати, відеокамери, різні сканери.

Що ж відрізняє ПЗЗ-приймач від звичайного напівпровідникового фотодіода, що має світлочутливу площадку і два електричних контакти для знімання електричного сигналу?

По-перше, таких світлочутливих майданчиків (часто їх називають пікселями - елементами, які приймають світло і перетворюють його в електричні заряди) в ПЗЗ-приймачі дуже багато, від декількох тисяч до декількох сотень тисяч і навіть декількох мільйонів. Розміри окремих пікселів однакові і можуть бути від одиниць до десятків мікрон. Пікселі можуть бути збудовані в один ряд - тоді приймач називається ПЗЗ-лінійкою, або рівними рядами заповнювати ділянку поверхні - тоді приймач називають ПЗЗ-матрицею.



По-друге, в ПЗЗ-приймачі, зовні схожому на звичайну мікросхему, немає величезного числа електричних контактів для виведення електричних сигналів, які, здавалося б, повинні йти від кожного світлоприймального елемента. Зате до ПЗЗ-приймача підключається електронна схема, яка дозволяє витягувати з кожного світлочутливого елемента електричний сигнал, пропорційний його освітленню.

Дію ПЗЗ можна описати таким чином: кожен світлочутливий елемент - піксель - працює як скарбничка для електронів. Електрони виникають в пікселях під дією світла, що прийшло від джерела. Протягом заданого інтервалу часу кожен піксель поступово заповнюється електронами пропорційно кількості потрапившого в нього світла, як відро, виставлене на вулицю під час дощу. Після закінчення цього часу електричні заряди, накопичені кожним пікселем, по черзі передаються на "вихід" приладу і вимірюються. Все це можливо за рахунок певної структури кристала, де розміщуються світлочутливі елементи, і електричної схеми управління.

Практично точно так же працює і ПЗЗ-матриця. Після експонування (засвічення) проектованого зображення) електронна схема управління приладом подає на нього складний набір імпульсних напруг, які починають зрушувати стовпці з накопиченими в пікселях електронами до краю матриці, де знаходиться аналогічний вимірювальний ПЗЗ-регістр, заряди в якому зсуваються вже в перпендикулярному напрямку і потрапляють на вимірювальний елемент, створюючи в ньому сигнали, пропорційні окремим зарядам. Таким чином, для кожного наступного моменту часу ми можемо отримати значення накопиченого заряду і збагнути, яким пікселям на матриці (номер рядка і номер стовпця) він відповідає.

Коротко про фізику процесу.

Для початку зазначимо, що ПЗЗ відносяться до виробів так званої функціональної електроніки, їх не можна уявити як сукупність окремих радіоелементів - транзисторів,

опорів і конденсаторів. В основі роботи лежить принцип зарядового зв'язку. Принцип зарядового зв'язку використовує два відомих з електростатики положення:

однойменні заряди відштовхуються,

заряди прагнуть розташуватися там, де їх потенціальна енергія мінімальна. Тобто грубо - «риба шукає там, де глибше».

Для початку уявімо собі МОН-конденсатор (МОН - скорочення від слів метал-окисел-напівпровідник). Це те, що залишається від МОН-транзистора, якщо прибрати з нього стік і джерело, тобто просто електрод, відділений від кремнію шаром діелектрика. Для визначеності будемо вважати, що напівпровідник - р-типу, тобто концентрація дірок в рівноважних умовах багато (на кілька порядків) більша, ніж електронів.

Що буде, якщо на такий електрод (його називають затвором) подати позитивний потенціал? Електричне поле, створюване затвором, проникаючи в кремній крізь діелектрик, відштовхує рухливі дірки; виникає збіднена область - деякий обсяг кремнію, вільний від основних носіїв. При параметрах напівпровідникових підкладок, типових для ПЗЗ, глибина цієї області становить близько 5 мкм. Навпаки, електрони, що виникли тут під дією світла, притягнуться до затвору і будуть накопичуватися на межі розділу окисел-кремній безпосередньо під затвором, тобто звальються в потенціальну яму (рис. 1)

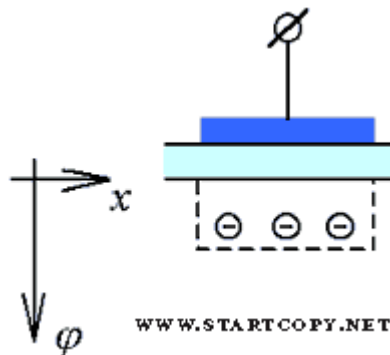


Рис.1. Утворення потенціальної ями при додатку напруги до затвору.

При цьому електрони в міру накопичення в ямі частково нейтралізують електричне поле, створюване в напівпровіднику затвором, і врешті-решт можуть повністю його компенсувати, так що все електричне поле буде падати тільки на діелектрику, і все повернеться в початковий стан - за тим винятком, що на межі поділу утворюється тонкий шар електронів.

Нехай тепер поруч з затвором розташований ще один затвор, і на нього теж поданий позитивний потенціал, причому більший, ніж на перший (рис. 2). Якщо тільки затвори розташовані досить близько, їх потенціальні ями об'єднуються, і електрони, що знаходяться в одній потенційній ямі, переміщуються в сусідню, якщо вона «глибше».

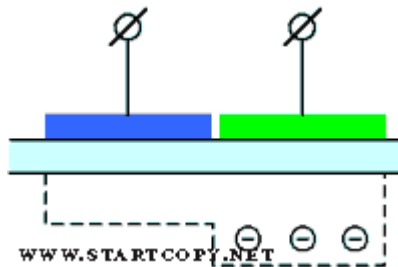


Рис.2. Перекриття потенціальних ям двох близько розташованих затворів. Заряд перетікає в те місце, де потенціальна яма глибше.

Тепер вже має бути ясно, що якщо ми маємо ланцюжок затворів, то можна, подаючи на них відповідні керуючі напруги, передавати локалізований зарядовий пакет уздовж такої структури. Чудова властивість ПЗЗ - властивість самосканування - полягає в тому, що для управління ланцюжком затворів будь-якої довжини достатньо всього трьох

тактових шин. (Термін шина в електроніці - провідник електричного струму, який з'єднує однотипні елементи, тактова шина - провідники за якими передається зміщена по фазі напруга.) Дійсно, для передачі зарядових пакетів необхідно і достатньо трьох електродів: одного передавального, одного приймаючого і одного ізолюючого, що розділяє пари приймаючих і передаючих один від одного, причому однойменні електроди таких трійок можуть бути з'єднані один з одним в єдину тактову шину, що вимагає лише одного зовнішнього виведення (рис. 3).

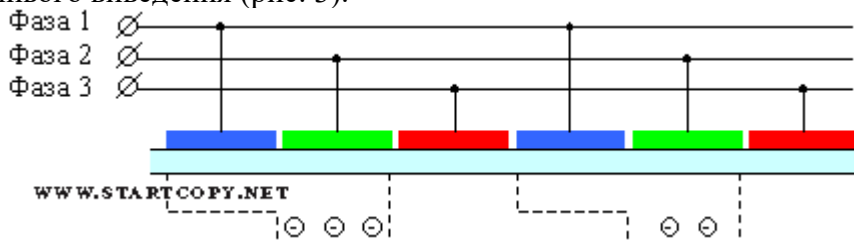


Рис. 3 Найпростіший трифазний ПЗС-регістр.
Заряд в кожній потенційній ямі різний.

Це і є найпростіший трифазний регістр зсуву на ПЗЗ. Тактові діаграми роботи такого регістра показані на рис. 4.

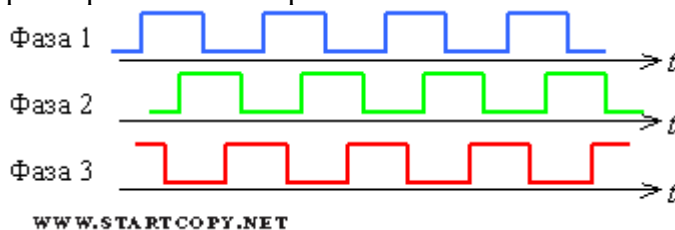


Рис. 4. Тактові діаграми управління трифазним регістром - це три меандру, зрушені на 120 градусів. При зміні потенціалів відбувається пересування зарядів.

Видно, що для його нормальної роботи в кожен момент часу, по крайній мірі, на одній тактовій шині повинен бути присутнім високий потенціал, і, по крайній мірі, на одній - низький потенціал (потенціал бар'єру). При підвищенні потенціалу на одній шині і зниженні його на іншій (попередній) відбувається одночасна передача всіх зарядових пакетів під сусідні затвори, і за повний цикл (один такт на кожній фазній шині) відбувається передача (зрушення) зарядових пакетів на один елемент регістра.

Для локалізації зарядових пакетів в поперечному напрямку формуються так звані стоп-канали - вузькі смужки з підвищеною концентрацією основної легуючої домішки, що йдуть уздовж каналу перенесення (рис. 5).

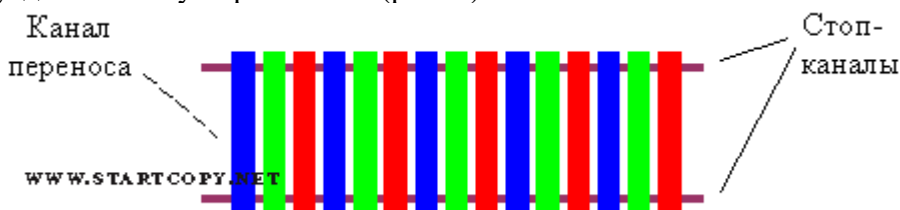


Рис. 5. Вид на регістр "зверху".

Канал перенесення в бічному напрямку обмежується стоп-каналами.

Справа в тому, що від концентрації легуючої домішки залежить, при якій конкретно напрузі на затворі під ним утворюється збіднена область (цей параметр є не що інше, як порогова напруга МОН-структури). З інтуїтивних міркувань зрозуміло, що чим більше концентрація домішки, тобто чим більше дірок в напівпровіднику, тим важче їх відігнати вглиб, тобто тим вище гранична напруга або ж, при одній напрузі, тим нижче потенціал в потенціальній ямі.

Якщо при виробництві цифрових приладів розкид параметрів по пластині може досягати декількох разів без помітного впливу на параметри одержуваних приладів (оскільки робота йде з дискретними рівнями напруги), то в ПЗЗ зміна, скажімо, концентрації легуючої домішки на 10% вже помітно відбивається на зображенні. Свої проблеми додає і розмір кристала, і неможливість резервування, як в БІС пам'яті, так що дефектні ділянки призводять до непридатності всього кристала.

Отже, різні пікселі ПЗЗ матриці технологічно мають різну чутливість до світла і цю різницю необхідно коригувати.