

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФІЗИКИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

ЦЕНДРА ЮРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

ІНТЕРФЕРОМЕТРИ В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ

Спеціальність 014.08 Середня освіта. Фізика
(Фізика. Інформатика)

Кваліфікаційна робота бакалавра

Науковий керівник:
доктор фіз.-мат. наук, професор
Олександр ГРАБАР

Ужгород 2025

Реєстрація _____

« _____ » _____ 2025 р. _____

Дипломна робота допущена до захисту

Завідувач кафедри: _____ **Височанський Ю.М.**

д. ф.-м. н., проф., академік НАНУ

« _____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____
(підпис)

Феделеш В. І.
к. ф.-м. н., доц.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 50 стор., 21 рис., 23 джерела.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методики вивчення одного з розділів оптики, а саме – інтерференції та приладів на її основі, в курсі фізики середньої школи. На конкретних прикладах щодо принципу дії та особливостей конструкції інтерферометрів проілюстровані як основи фізичних процесів, зокрема хвильової оптики, так і практичні аспекти використання оптичних методів у сучасній техніці. Зроблено короткий огляд історії розвитку даної тематики, дано опис основ інтерференційних явищ, описані основні типи інтерферометричних схем, а також проаналізовано можливості їх комп'ютерного моделювання. Результати роботи можуть бути використані при викладанні курсу фізики в середній школі.

Ключові слова: хвильова оптика, інтерференція, дифракція, інтерферометри.

ABSTRACT

Bachelor's qualification work: 50 pages, 21 figures, 23 sources.

The qualification work is devoted to the development of a methodology for studying one of the sections of optics, namely interference and devices based on it, in the physics course of secondary school. Specific examples of the principle of operation and design features of interferometers illustrate both the basics of physical processes, in particular wave optics, and practical aspects of the use of optical methods in modern technology. A brief overview of the history of the development of this topic is given, the basics of interference phenomena are described, the main types of interferometric schemes are described, and the possibilities of their computer modeling are analyzed. The results of the work can be used when teaching a physics course in secondary school.

Key words: wave optics, interference, diffraction, interferometry.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	
ІНТЕРФЕРОМЕТРІВ.....	5
1.1 Поняття інтерферометра.....	5
1.2 Фізичні основи явища: історичний аспект.....	6
1.3 Фізична природа явища.....	10
РОЗДІЛ 2 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ	
ДИФРАКЦІЙНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА.....	12
2.1 Інтерференційні властивості зонних пластин.....	12
2.2 Інтерферометр на основі однієї та двох зонних пластин.....	16
2.3 Оптичні схеми інтерферометру.....	19
2.4 Експериментальне дослідження за оптичними схемами.....	22
РОЗДІЛ 3 ДИФРАКЦІЙНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТР В ШКІЛЬНОМУ	
КУРСІ ФІЗИКИ.....	30
3.1 Система навчального фізичного експерименту в шкільному курсі фізики.....	30
3.2 Комп'ютеризація навчального експерименту при вивченні явищ інтерференції та дифракції світла.....	32
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ВСТУП

Актуальність дослідження. Потреба в точних вимірах швидко зростає в даний час. Багато з них здійснюються інтерференційними методами. Інтерференційні методи дозволяють з високою точністю визначати величину і розташування неоднорідностей оптичної товщини в прозорих середовищах, таких як кристали, використовувані в якості активного середовища в твердотільних лазерах, пламена, газодинамічні струмені. На практиці для цих цілей зазвичай застосовуються інтерферометри, побудовані за класичними схемами Маха-Цендера, релєя або їх модифікації, проте вони містять велику кількість оптичних елементів, мають підвищену чутливість до різних зовнішніх впливів і вимагають високої точності застосування. Постійно існує необхідність в інтерферометрах, які були б прості у виготовленні і одночасно стійкі до зовнішніх збурень, таким як вібрації, зміна температури навколишнього середовища та ін. Такі властивості притаманні дифракційним інтерферометрам з поєднаними гілками і загальним ходом інтерферуєчих пучків, які застосовуються для контролю форми параболічних і сферичних дзеркал. У цих інтерферометрах роль синтетичного пробного скла виконує спеціальна зонна пластинка (ЗП), що виключає застосування високоякісних і дорогих об'єктивів і розділових пластин великого діаметру. У зв'язку з чим представляє інтерес розробка дифракційних інтерферометрів для контролю оптичних неоднорідностей прозорих середовищ.

Об'єкт дослідження – дифракційний інтерферометр.

Предмет курсового проекту – практичне використання дослідження дифракційного інтерферометра в шкільному курсі фізики.

Мета роботи - дослідити практичне використання дослідження дифракційного інтерферометру в шкільному курсі фізики.

Завдання дослідження:

- дослідити теоретичні аспекти використання приладів типу інтерферометра;

- охарактеризувати інтерференційні властивості зонних пластин;
 - розглянути інтерферометр на основі однієї та двох зонних пластин;
 - проаналізувати оптичні схеми інтерферометру;
 - навести експериментальне дослідження за оптичними схемами;
 - дослідити систему навчального фізичного експерименту в шкільному курсі фізики;
- здійснити процес комп'ютеризації навчального експерименту при вивченні явищ інтерференції та дифракції світла.

Методи дослідження: теоретичні, аналіз, графічні, логічні, системного підходу, порівняння і узагальнення.

Наукова новизна полягає в удосконаленні навчального фізичного експерименту з хвильової оптики завдяки впровадженню імітаційних комп'ютерних моделей явищ інтерференції і дифракції світла.

Практична значущість полягає в розробці та реалізації в практичну діяльність загальноосвітніх шкіл методичних рекомендацій щодо застосування комплексу програмно-педагогічних засобів з хвильової оптики.

Структура роботи. Бакалаврська робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел у кількості 23.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕРФЕРОМЕТРІВ

1.1 Поняття інтерферометра

Інтерферометри - це вимірювальні прилади, в яких використовується інтерференція хвиль. Відповідно до природи хвиль існують інтерферометри акустичні для звукових хвиль і інтерферометри для електромагнітних хвиль: оптичних (ультрафіолетової, видимої та інфрачервоної областей спектра) і радіохвиль різної довжини. До останніх належать оптичні інтерферометри, які набули найбільшого поширення [8, с.14].

Застосовуються інтерферометри досить широко. Так, акустичні інтерферометри і радіоінтерферометри використовуються для вимірювання швидкості поширення хвиль (акустичних і радіо), для вимірювання відстаней між двома випромінювачами хвиль або між випромінювачем і відображає тілом, тобто застосовуються як далекоміри. Як вже говорилося найбільшого поширення набули оптичні інтерферометри. Вони застосовуються для вимірювання довжин хвиль спектральних ліній, показників заломлення прозорих середовищ, абсолютних і відносних довжин, кутових розмірів зірок, для контролю якості оптичних деталей і їх поверхонь, для контролю чистоти обробки металевих поверхонь і так далі [8, с.15].

Принцип дії всіх інтерферометрів однаковий, і розрізняються вони лише методами отримання когерентних хвиль і тим, яка величина безпосередньо вимірюється.

В основі інтерферометрів лежить просторове розділення пучка світла за допомогою того чи іншого пристрою з метою отримання двох або більше взаємно когерентних променів, які проходять різні оптичні шляхи, а потім зводяться разом і спостерігається результат їх інтерференції.

Вид інтерференційної картини залежить від способу поділу пучка світла на взаємно когерентні промені, від їх числа, їх відносної інтенсивності, розмірів джерела, спектрального складу світла.

Методи отримання когерентних пучків в інтерферометрі дуже різноманітні, тому існує велика кількість різних конструкцій інтерферометрів. За кількістю інтерферуючих пучків світла оптичні інтерферометри можна розбити на багатопроменеві і двопроменеві [8, с.16].

Багатопроменеві інтерферометри використовуються головним чином як спектрометри високої роздільної сили для дослідження тонкої структури спектральних ліній та визначення їх форми, а двопроменеві інтерферометри є переважно технічними приладами [8, с.19].

Отже, інтерферометри - це вимірювальні прилади, в яких використовується інтерференція хвиль.

Принцип дії всіх інтерферометрів однаковий, і розрізняються вони лише методами отримання когерентних хвиль і тим, яка величина безпосередньо вимірюється.

1.2 Фізичні основи явища: історичний аспект

У 1881 р. американський фізик Альберт Майкельсон вперше спробував виявити ефірний вітер за допомогою винайденого ним інтерферометра. Висновок автора свідчив: «ці результати можна інтерпретувати як відсутність зміщення інтерференційних смуг. Результат гіпотези стаціонарного ефіру, таким чином, виявляється невірним, звідки випливає висновок, що ця гіпотеза помилкова. Цей висновок прямо суперечить поясненню явища аберації, яке всюди використовується і яке передбачає, що Земля рухається крізь ефір, а останній залишається в спокої» [14, с.154].

1887 р. А. Майкельсон І. Едвард, В. Морлі повторили досвід Майкельсона з більш досконалою апаратурою (була збільшена довжина

оптичних шляхів, і значно зменшені всілякі перешкоди). Висновок авторів: «... очікувалося зміщення 0.4 смуги. Дійсне ж зміщення було, звичайно, менше, ніж $1/20$, а можливо, що і менше, ніж $1/40$ частина. Але оскільки зміщення пропорційно квадрату швидкості, то відносна швидкість Землі і ефіру, можливо, менше, ніж $1/6$ орбітальної швидкості Землі, і вже звичайно менше, ніж $1/4$ » [14, с.155].

1905 р. Е. Морлі, І Дайтон та К. Міллер провели експеримент з метою перевірки впливу матеріалу на величину скорочення Лоренца-Фіцджеральда. Порівнювалися ефекти в інтерферометрах з базою з пісковика і з дерева. Висновок авторів: «тому ми могли декларувати, що експеримент показав: якщо є певний ефект природного походження, він становить не більше сотої частини обчисленого значення. Якщо, як передбачалося, сосна схильна до впливів, то ступінь впливу та ж, що і на пісковик. Якщо ефір біля апарату не рухається разом з ним, а відмінність в швидкості менше, ніж 3.5 км/з, значить, ефект впливу на матеріал анулює шуканий ефект. Можна думати, що проведений експеримент довів лише, що в спокійній підвальній кімнаті ефір захоплюється разом з нею. Тому ми хочемо підняти місце розміщення апарату на пагорб, закрити його тільки прозорим покриттям з тим, щоб подивитися, чи не буде виявлений який-небудь ефект» [14, с.158].

Осіною 1905 р. Морлі і Міллер перенесли інтерферометр з підвального приміщення лабораторії на евклідові висоти поблизу Клівленда, на висоту приблизно 300 футів над озером Ері, в місце, вільне від будь-яких перешкод і будівель. Було проведено п'ять серій спостережень (1905-1906 рр.), які дали певний позитивний ефект, що становить приблизно $1/10$ очікуваного вітру. Існувала підозра, що це могло бути викликано впливом температури, хоча прямих вказівок на це не було» [14, с.158].

1921 р. Д.К. Міллер. інтерферометр розташовувавв обсерваторії (1860 м.над рівнем моря). «Найперші спостереження, проведені в березні 1921 р., дали позитивний ефект, відповідний реальному ефірному вітру, як якщо б він був обумовлений відносним рухом Землі і ефіру зі швидкістю близько 10

км/с. однак перш ніж опублікувати цей результат, представлялося необхідним вивчити всі можливі причини, які могли б викликати ефект, подібний ефірному вітру. Ці можливі причини могли б зводитися до магнітних деформацій сталеві рами інтерферометра і впливам теплоти випромінювання. З метою повного усунення впливу теплоти випромінювання металеві частини інтерферометра були абсолютно закриті шаром пробки товщиною близько одного дюйма. П'ятдесят серій спостережень, зроблених за цих умов, виявили періодичне зміщення смуг, що збігається з попередніми спостереженнями». Потім підставу приладу було зроблено з бетону. «Результати з таким немагнітним інтерферометром дали позитивний ефект, відповідний ефірному вітру точно такої ж швидкості і напрямку, які були отримані в квітні 1921 р. були випробувані численні варіації умов досвіду. Спостереження проводилися при обертанні інтерферометра за годинниковою стрілкою і проти неї, при швидкому (1 оборот за 40 секунд) і при повільному обертанні (1 оборот за 85 секунд), з важким вантажем, покладеним на кронштейн труби, а потім на кронштейн лампи, з поплавком високо піднятим над рівнем ртуті внаслідок того, що спочатку навантажувався один квадрат, а потім інший. Асистент, який записує спостереження, ходив навколо або ж стояв в різних частинах приміщення, далеко від апарату або ж близько до нього. На результати спостережень жодна з цих варіацій не чинила ніякого впливу. Потім весь апарат був перенесений назад в Клівленд. Протягом 1922 і 1923 рр. було проведено безліч випробувань при різноманітних умовах, доступних контролю, і з різними видозмінами в розташуванні частин апарату». Міллером були так само досліджені впливу температурних змін. «Дана серія дослідів була виконана з метою вивчити вплив мінливості температури в приміщенні інтерферометра і вплив теплоти випромінювання, що падає на інтерферометр. При цьому використовувалося кілька електричних нагрівачів, влаштованих таким чином, що нагріває спіраль була розташована у фокусі увігнутого дзеркала. Непостійність температури викликала повільне, але

поступове зміщення системи смуг в одну сторону, але не викликало періодичного зміщення. Навіть тоді, коли два нагрівачі були розташовані на відстані трьох футів від інтерферометра, що знаходився в обертанні, і посилали тепло безпосередньо до непокритої сталевій рами, вимірюваного періодичного зміщення смуг не спостерігалось. Коли ж нагрівачі були звернені до шляхів світлових променів, закритих склом, періодичний ефект спостерігався, але тільки тоді, коли скло було покрито непрозорим матеріалом, і притому вельми несиметричним чином, коли, наприклад, одне плече було абсолютно захищене картоном, а інше не захищене. Ці досліді показали, що за тих умов, за яких насправді проводиться досвід, Періодичне зміщення смуг не може бути спричинене впливом температури» [17, с.536].

1924 р. Д.К. Міллер в обсерваторії було обрано нове місце на злегка закругленому пагорбі, віддаленому від каньйонів. Приміщення для інтерферометра було зведено так, щоб його орієнтування - напрямок даху і розташування дверей інтерферометр у всіх деталях був той же, що вживався в Клівленді в липні 1924 р у вересні (4 -, 5 -, і 6-го) 1924 р було проведено 275 вимірювань зміщення смуг, причому вимірювання були розташовані в 10 серіях. Результати спостережень виявили певне зміщення, на противагу незначним результатам, отриманим в Клівленді. Відповідний цьому зсуву ефірний вітер по швидкості і напрямку цілком відповідав першому спостереженню на Маунт Вільсон. Частина спостережень була проведена за умов, що шляхи світлових променів були прикриті скляними ящиками, обкладеними гофрованої папером, яка, як показали досліді в Клівленді, абсолютно виключає вплив теплоти випромінювання. Однак ці покриття анітрохи не змінили результату, звідки випливає, що таких впливів взагалі немає [17, с.536].

Отже, в 1881 р американський фізик Альберт Майкельсон вперше спробував виявити ефірний вітер за допомогою винайденого ним інтерферометра.

1887 р. А. Майкельсон і Едвард В. Морлі повторили досвід Майкельсона з більш досконалою апаратурою.

1905 р. Морлі і Міллер було провели п'ять серій спостережень (1905-1906 рр.), які дали певний позитивний ефект, що становить приблизно 1/10 очікуваного вітру.

1921 р. Д.К. Міллер. Інтерферометр розташовувався в обсерваторії Маунт Вільсон (1860 м. над рівнем моря). Найперші спостереження, проведені в березні 1921 р., дали позитивний ефект, відповідний реальному ефірному вітру, як якщо б він був обумовлений відносним рухом Землі і ефіру зі швидкістю близько 10 км/с.

1.3 Фізична природа явища

Так як саме на використанні інтерференції світла заснована дія інтерферометрів, то можна приділити невелику увагу цьому явищу.

Інтерференція світла - це складання світлових хвиль, при якому зазвичай спостерігається характерний просторовий розподіл інтенсивності світла (інтерференційна картина) у вигляді змінюючихся світлих і темних смуг внаслідок порушення принципу складання інтенсивностей. Деякі явища інтерференції світла спостерігалися ще Й. Ньютоном, але не могли бути пояснені з точки зору його корпускулярної теорії. Правильне пояснення інтерференції світла як типово хвильового явища було дано на початку 19 ст. Т. Юнгом і О.Френелем [19, с.258].

Найбільш широко відома інтерференція світла, що характеризується утворенням стаціонарної (постійної в часі) інтерференційної картини – регулярного чергування в просторі областей підвищеної і зниженої інтенсивності світла, що виходить в результаті накладення когерентних світлових пучків, тобто в умовах постійної (або регулярно змінюється) різниці фаз. Рідше і тільки в спеціальних умовах експерименту

спостерігаються явища нестационарної інтерференції світла, до яких відносяться світлові биття і ефекти кореляції інтенсивностей. Суворе пояснення явищ нестационарної інтерференції світла вимагає врахування як хвильових, так і корпускулярних властивостей світла і дається на основі квантової електродинаміки. Інтерференція світла має найширше застосування для вимірювання довжини хвилі випромінювання, дослідження тонкої структури спектральної лінії, визначення щільності, показників заломлення і дисперсійних властивостей речовин, для вимірювання кутів, лінійних розмірів деталей в довжинах світлової хвилі, для контролю якості оптичних систем і багато чого іншого [20, с.112].

Отже, інтерференція світла - це складання світлових хвиль, при якому зазвичай спостерігається характерний просторовий розподіл інтенсивності світла (інтерференційна картина) у вигляді чергуються світлих і темних смуг внаслідок порушення принципу складання інтенсивностей.

РОЗДІЛ 2 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ДИФРАКЦІЙНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

2.1 Інтерференційні властивості зонних пластин

Амплітудна зонна пластинка Френеля є основним оптичним елементом пропонуванних дифракційних інтерферометрів, в яких використовується фундаментальна властивість ЗП утворювати в просторі зображень нелокалізовані інтерференційні смуги при освітленні ЗП точковим джерелом. Ці смуги несуть інформацію про параметри ЗП, її якість і мікро-структури джерела випромінювання. В інтерферометрах можуть бути використані як кругові, так і лінійні ЗП.

Принципова схема для спостереження інтерференційних смуг після ЗП при освітленні її віддаленим точковим джерелом приведена на рис. 2.1, Там же вказані прийняті позначення. Екран Е розташований на відстані l від зонної пластинки ЗП. У площинах ЗП і Е введені декартові системи координат з початком в точках O і O' . Вісь Z спрямована уздовж оптичної осі системи перпендикулярно площині ЗП, осі X і X' паралельно зонам ЗП. Далі y -координати будемо позначати ρ , y' – координати – r . межі зон ЗП визначаються формулою $\rho_n = \rho_0 \sqrt{n}$, де n - номер зони, ρ_0 -координата межі першої зони. Функція пропускання ЗП представима у вигляді ряду [10, с.11]:

$$T(\rho) = \sum_{\substack{\rho_0 = -\infty, \\ \rho_0 - \text{целое}}}^{\infty} \frac{1}{\pi \rho_0} \sin\left(\frac{\rho_0 \pi}{2}\right) \exp\left[\frac{i\pi \rho_0 \rho^2}{\rho_0^2}\right], \quad (2.1)$$

Плоска монохроматична хвиля після проходження ЗП розділяється по амплітуді на плоску хвилю, що поширюється вздовж осі z ($\rho_0=0$), і ряд збіжних і розходяться циліндричних хвиль, кожна з яких відповідає непарному порядку дифракції ($\rho_0=\pm 1; \pm 3; \pm 5 \dots$). Фокусна відстань для P -го

непарного порядку $f_p = \frac{\rho_0^2}{\lambda p} = \frac{f}{p}, \lambda$ довжина світлової хвилі. На рис. 2.1

точками S_m і S_p позначені центри сходження циліндричних хвиль m -го і p -го порядків дифракції. Розподіл інтенсивності $I(r)$ в будь-якій зоні дифракції на площині E визначається як результат інтерференції дифрагованих хвиль з комплексними амплітудами $E_p(r)$ [11, с.175]:

$$\begin{aligned}
 I(r) = & |E_0(r) + E_{+1}(r) + E_{-1}(r) + \dots|^2 = I_0(r) + \\
 & + I_{+1}(r) + I_{-1}(r) + \dots + 2\sqrt{I_0(r)I_{+1}(r)} \cos \delta_{0,+1} + \\
 & + 2\sqrt{I_0(r)I_{-1}(r)} \cos \delta_{0,-1} + \\
 & + 2\sqrt{I_{+1}(r)I_{-1}(r)} \cos \delta_{+1,-1} + \dots,
 \end{aligned}
 \quad , (2)$$

де δ_m ; p -різниця фаз хвиль m -го і p -го порядків, що залежить від координат.

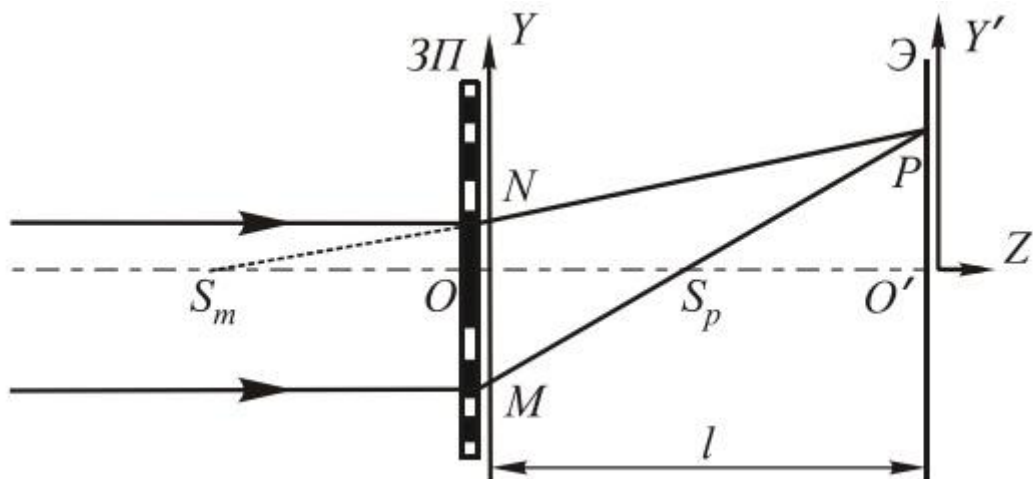


Рис. 2.1 Принципова схема спостереження інтерференційних смуг

Вид інтерференційної картини обумовлюється геометрією поширення хвиль. На рис. 2.2 зображена розрахункова картина інтерференції, що спостерігається на відстані $l=1,4 f$. інтерференційні смуги паралельні зонам ЗП. В області 1 спостерігається Багатопроменева інтерференція $+1, 0$ і -1 порядків. В області 2 превалує двострумнева інтерференція 0 і -1 порядків, інші порядки знижують контрастність картини (тому що зростає $\min I$) і модулюють яскравість. В області 3 виявляються інтерференційні смуги -1 порядку з іншими порядками малої інтенсивності [14, с.5913].

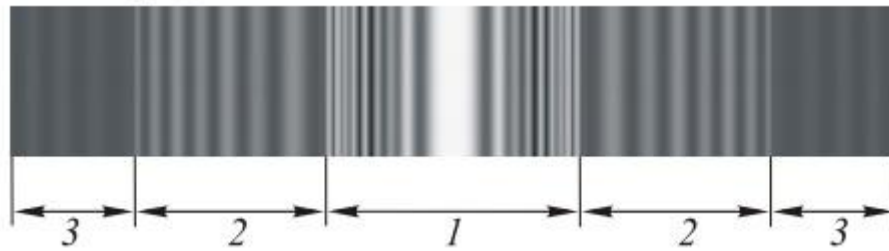


Рис. 2.2 Розрахункова інтерференційна картина на відстані $l = 1,4 f$ від ЗП

Звідси випливає, що світлове поле після ЗП можна розглядати як накладення інтерференційних смуг, що виходять від різних пар пучків (дифракційних порядків). Координати екстремумів смуг, що виходять в результаті інтерференції m -ого і p -ого порядків, неважко визначити стандартним способом. Для цього достатньо розглянути інтерференцію двох циліндричних хвиль з центрами в точках S_m і S_p (рис. 2.1). Домовимося нумерувати максимуми і мінімуми інтенсивності, тобто світлі і темні смуги. Y' - координата екстремуму N -ї смуги визначається різницею ходу пари інтерферуючих променів в точці спостереження P (рис. 2.1). Обчислення можна спростити, оскільки точки S_p і S_m оптично пов'язані з віддаленим джерелом, і в силу умови таутохронізму фази інтерферуючих хвиль можна відраховувати від фокусів відповідних дифракційних порядків. Умова виникнення екстремуму запишеться у вигляді $\phi_m - \phi_p = \pi N$, $N=0,1,2 \dots$ (3) де ϕ_m , ϕ_p - фази хвиль m -го і p -го порядків в точці n -го екстремуму. Записуючи ϕ_m в явному вигляді, отримуємо формулу для знаходження

координат смуг [5, с.207]: $r_N = \tilde{r}_0 \sqrt{N + \varepsilon}$, (4),

$$\tilde{r}_0 = \sqrt{\lambda \frac{|(ml - f)(pl - f)|}{f|p - m|}}, \quad (5),$$

$$\varepsilon = \frac{\varphi_m - \varphi_p}{\pi} \quad r=0. \quad (6)$$

$$dr_N \approx \frac{\tilde{r}_0^2}{2r_N}, \quad N \gg 1.$$

Звідси нескладно обчислити ширину смуги drN :

Контрастність $k(m;p)$ інтерференційної картини залежить від дифракційної ефективності інтерферуючих порядків і розташування екрану і визначається із співвідношення [15, с. 293]:

$$K(m; p) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{\mu(m; p)}}{\mu(m; p) + 1}, \quad (7)$$

де

$$\mu(m, p) = \frac{I_m}{I_p} = \frac{|pl/f - 1|\eta_m}{|ml/f - 1|\eta_p}, \quad (8)$$

а дифракційна ефективність: (9)

$$\eta_p = \begin{cases} 1/\pi^2 p^2, & p \text{ — целое, } p \neq 0 \\ 1/4, & p = 0 \end{cases}.$$

На рис. 2.3 наведено графіки залежності контрастності двопробневих смуг при інтерференції пар $(0;+1)$, $(0;-1)$ і $(-1;+1)$ дифракційних порядків від розташування екрану l .

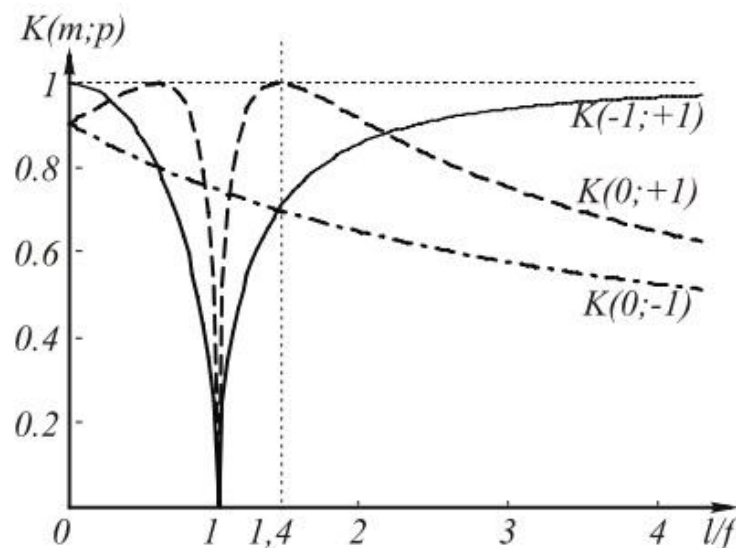


Рис. 2.3 Графік залежності контрастності двопробневих інтерференційних смуг від відстані між екраном і ЗП для основних порядків

Яскравість і контрастність інтерференційної картини у великій мірі визначаються типом джерела світла. З джерелом білого світла вдається спостерігати інтерференцію лише істотно обмежуючи кутовий розмір джерела. Застосовуючи газові лазери (наприклад, He-Ne), контрастні інтерференційні смуги можна спостерігати на відстанях в кілька десятків метрів. Квазімонохроматичні джерела випромінювання, такі як комерційні напівпровідникові лазери, цілком придатні для застосування в дифракційних інтерферометрах [15, с.293].

Отже, амплітудна зонна пластинка Френеля є основним оптичним елементом пропонувананих дифракційних інтерферометрів, в яких використовується фундаментальна властивість ЗП утворювати в просторі зображень нелокалізовані інтерференційні смуги при освітленні ЗП точковим джерелом. Ці смуги несуть інформацію про параметри ЗП, її якість і мікроструктурі джерела випромінювання. В інтерферометрах можуть бути використані як кругові, так і лінійні ЗП.

2.2 Інтерферометр на основі однієї та двох зонних пластин

Найбільш простий дифракційний інтерферометр (Z-інтерферометр) включає в себе джерело випромінювання, коліматор, одну зонну пластинку, реєструючий пристрій, який може бути безпосередньо пов'язано з ПЕОМ. Для забезпечення можливості довільно варіювати напрямок поляризації випромінювання між джерелом випромінювання і коліматором можна вставити чвертьхвильову пластину і поляризатор. Принцип дії Z-інтерферометра пояснюється рис. 2.4, де показаний хід інтерферуючих променів через ЗП [21, с.352].

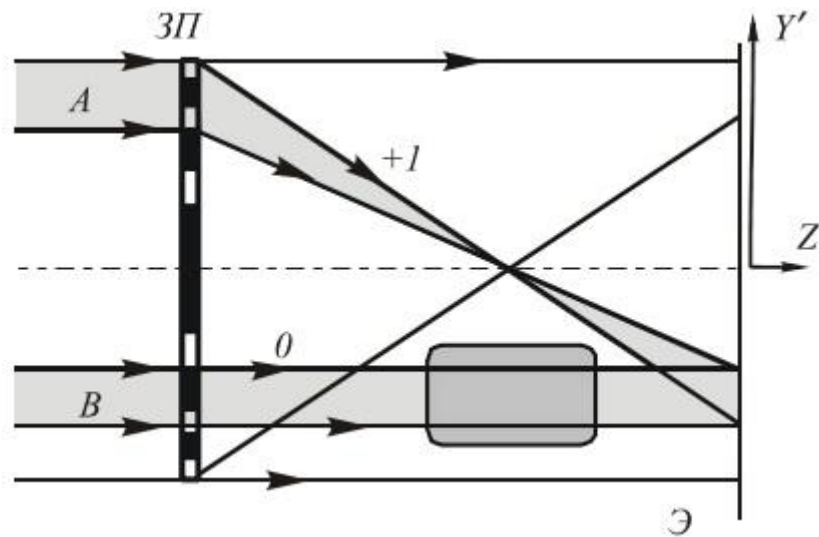


Рис. 2.4 Хід інтерферуючих променів через ЗП в Z-інтерферометрі

Пластинка ділить висвітлює колімований лазерний пучок по амплітуді на пучки, з яких використовуються наступні: +1-ого порядку – в якості опорного (а) і 0-ого – в якості вимірювального (b). Нелокалізовані інтерференційні смуги реєструються в будь-якій площині Е за ЗП. При поміщенні випробуваного зразка в інтерферометр вимірювальний пучок зазнає додатковий набіг фази, смуги зсуваються, і по їх зсуву можна визначити неоднорідності оптичної товщини зразка [23, с.337].

У схемі z-інтерферометра порядки дифракції, відмінні від +1 і 0, породжують паразитні смуги багатопроменевої інтерференції. При відповідному виборі місця розташування площини реєстрації можна домогтися мінімального впливу паразитних порядків і звести інтерференцію до двопробевої. Вплив паразитних порядків може бути малим з трьох причин: паразитні порядки мають малу інтенсивність, або смуги мають низький контраст, або ширини паразитних смуг сильно відрізняються від робочих і тому їх вплив проявляється в модуляції яскравості робочих смуг з частотою паразитних. Найбільшу перешкоду представляють смуги, породжені комбінаціями порядків (0; -1) і (-1; + 1), – у них максимальна контрастність і яскравість. Однак ширини смуг (0; -1) і (0;+1) значно

відрізняються, і тому смуги цих порядків легко розрізнити, в той час як смуги $(-1; +1)$ близькі по ширині до смуг $(0; +1)$ [23, с.338].

Ширина drN робочих смуг в площині реєстрації E (рис.2.4) залежить від фокусної довжини ЗП f , відстані l від ЗП до площини E і довжини світлової хвилі λ . Максимальна контрастність робочих інтерференційних смуг від комбінації порядків $(0; +1)$ спостерігається на відстані $l=1,4 f$ (рис. 2.3), де для ЗП з фокусною відстанню $f=300$ мм і розміром 20×20 мм величина $drN=275$ мкм в центрі картини і $drN=9$ мкм на краю картини. Остання величина і визначає необхідну роздільну здатність реєструючого пристрою. При збільшенні відстані L ширина смуг drN збільшується, однак, по-перше, падає контрастність картини, по-друге, збільшується вплив паразитних порядків, по-третє, починають позначатися ефекти дифракції на апертурі зразка [23, с.340].

Інтерферометри на основі двох зонних пластинок крім джерела випромінювання, коліматора, зонної пластинки і реєструючого пристрою включають в себе додаткову ЗП і вузол фільтрації. Запропоновані нижче три модифікації оптичної схеми дифракційного інтерферометра на двох ЗП (надалі t -інтерферометр) дають можливість виключити обмеження, властиві Z -інтерферометру. Головною їх перевагою є наявність вузла фільтрації, що усуває всі паразитні порядки. Схема $T1$ -інтерферометра дозволяє здійснити візуалізацію оптичних неоднорідностей зразка, а схема $T2$ -інтерферометра – не тільки отримати незашумлені смуги двох - променевої інтерференції, а й змінювати ширини смуг в широких межах. Смуги однакової ширини реалізуються в схемі $T3$ -інтерферометра [23, с.341].

Отже, найбільш простий дифракційний інтерферометр (Z -інтерферометр) включає в себе джерело випромінювання, коліматор, одну зонну пластинку, реєструючий пристрій, який може бути безпосередньо пов'язано з ПЕОМ. Інтерферометри на основі двох зонних пластинок крім джерела випромінювання, коліматора, зонної пластинки і реєструючого пристрою включають в себе додаткову ЗП і вузол фільтрації.

2.3 Оптичні схеми інтерферометра

У дослідженні наведена схема інтерферометра Тальбота на основі двох додаткових ЗП, розташованих конфокально, де використовується властивість зонної пластинки формувати часткове самозберігання на подвійній фокусній відстані. Якщо в цій площині розташувати співвісно з ЗП1 додаткову до неї (негативну) ЗП2, то структура інтерференційних смуг проявиться у вигляді муарової картини. Зокрема, якщо об'єкт дослідження відсутній, то світлі інтерференційні смуги потрапляють на непрозорі зони ЗП2, і на екрані Е спостерігається рівномірно затінене поле. На рис. 2.5 показано хід променів через зонні пластинки в запропонованій нами модифікації Т1 інтерферометра Тальбота. Схема висвітлюється колімованим лазерним пучком, який після проходження ЗП1 розділяється на дифракційні порядки, кожен з яких, в свою чергу, після проходження ЗП2 знову розділяється. Робочими порядками в інтерферометрі є $[0; 0]$ і $[+1; +1]$ (в цьому позначенні перша цифра вказує номер порядку після ЗП1, друга – після ЗП2). Для усунення паразитних порядків в схему включений вузол фільтрації, що представляє собою два конфокально розташованих об'єктива О1 і О2, у фокусі яких розташована діафрагма Д [9, с.141].

Серед усіх пучків, утворених двома ЗП, лише $[0; 0]$ і $[+1; +1]$ паралельні осі, і тому тільки вони сфокусуються у фокальній площині об'єктива О1. Пучки всіх інших порядків сфокусуються в інших площинах, утворюючи у фокальній площині Д плями різного розміру. Через діафрагму пройдуть лише малі центральні частини паразитних пучків. На екрані Е спостерігається картина двопроменевої інтерференції, за винятком малої околиці центру робочого поля поблизу осі, куди потрапляють слабкі пучки паразитних порядків. Розмір інтерферограми в площині Е визначається відношенням фокусних відстаней об'єктивів О2 і О1 [9, с.142].

Серед усіх пучків, утворених двома ЗП, лише $[0; 0]$ і $[+1; +1]$ паралельні осі, і тому тільки вони сфокусуються у фокальній площині

об'єктива O_1 . Пучки всіх інших порядків сфокусуються в інших площинах, утворюючи у фокальній площині D плями різного розміру. Через діафрагму пройдуть лише малі центральні частини паразитних пучків. На екрані E спостерігається картина двопроменевої інтерференції, за винятком малої околиці центру робочого поля поблизу осі, куди потрапляють слабкі пучки паразитних порядків. Розмір інтерферограми в площині E визначається відношенням фокусних відстаней об'єктивів O_2 і O_1 [9, с.143].

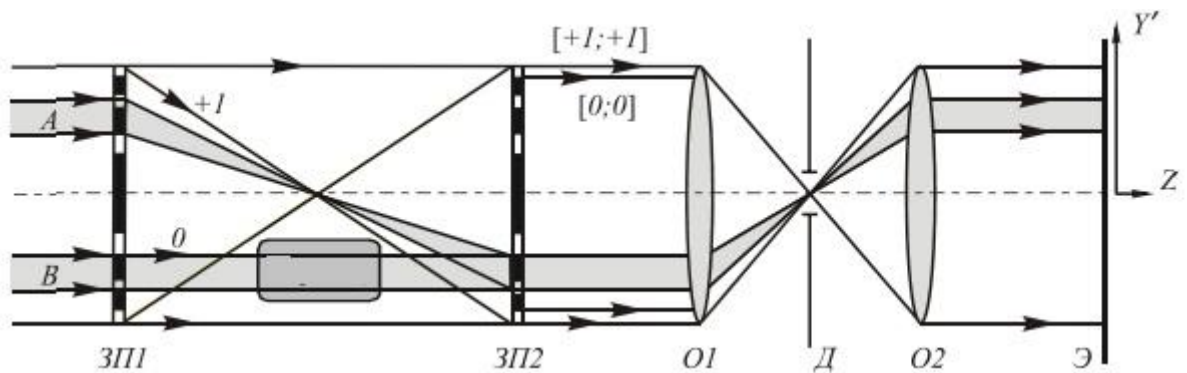


Рис. 2.5 Хід променів через зонні пластинки і вузол фільтрації T1-інтерферометра

На рис. 2.6 наведена оптична схема T2-інтерферометра, де ЗП2 зміщена уздовж оптичної осі і відстань між зонними пластинками становить $2f+\Delta$ (де величина Δ може бути як позитивною, так і негативною). Тоді пучок $[+1; +1]$ перестане бути паралельним пучку $[0;0]$ і в площині реєстрації E спостерігаються інтерференційні смуги змінної ширини [16, с.45].

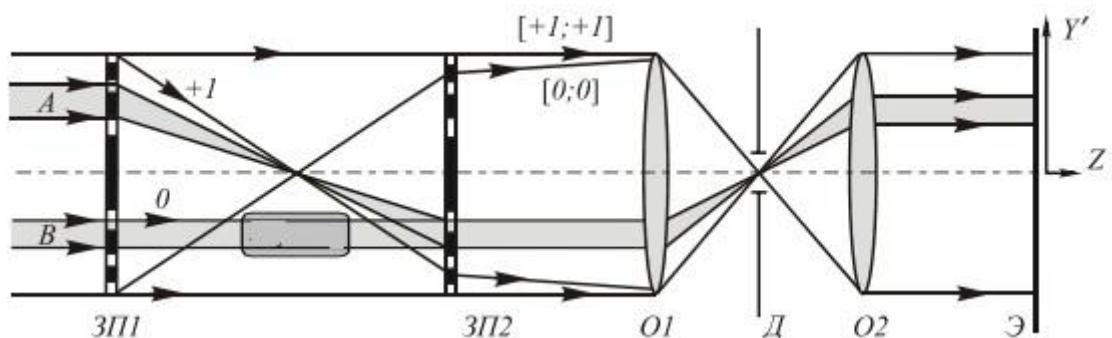


Рис. 2.6 Хід променів через зонні пластинки і вузол фільтрації T2-інтерферометра

Такі ж смуги виникають, якщо не зрушувати ЗП2, а додати між ЗП1 і ЗП2 плоскопаралельну пластину товщиною $d = \Delta / (\lambda) n_0^{-1}$, де n_0 - показник заломлення пластини.

У схемі Т2-інтерферометри інтерференційні смуги розташовані нерівномірно, внаслідок чого неоднорідності оптичної товщини зразка вимірюються в нерівномірно розташованих точках. Цього можна уникнути і зробити смуги рівномірними, якщо зрушувати ЗП2 в уздовж осі Y. Того ж результату можна досягти, якщо в схемі Т2 перед об'єктом розташувати клиноподібну пластину Кп, як показано на рис. 2.7 [16, с.46].

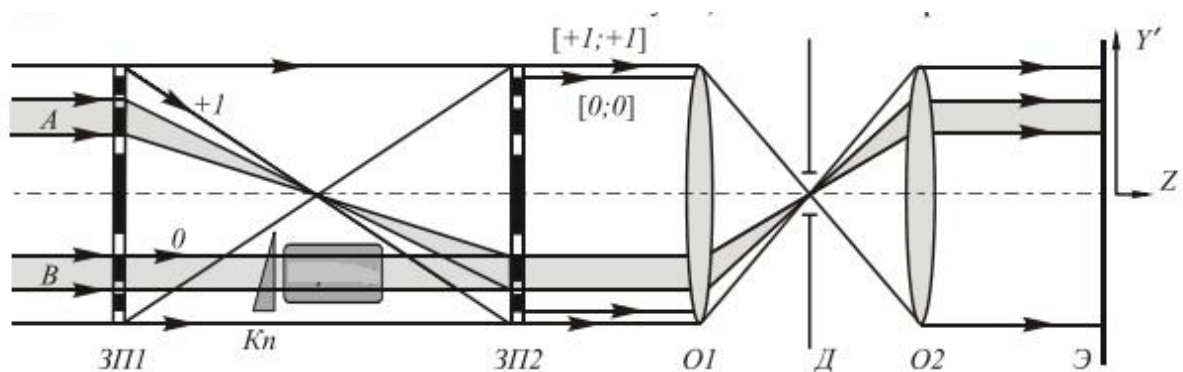


Рис. 2.7 Хід променів через зонні пластинки і вузол фільтрації інтерферометра Т3

Частина пучка $[0; 0]$, що пройшла через клиноподібну пластину, відхилиться на кут $(1) \alpha = \alpha_0 n_0^{-1}$, де α_0 – кут клина, n_0 - показник заломлення речовини, з якого зроблений клин. Пучок $[+1; +1]$ залишиться паралельний осі. Тоді за відсутності об'єкта в площині екрану це будуть спостерігати смуги від інтерфейсу двох плоских хвиль. При внесенні об'єкта в інтерферометр (надалі – Т3) смуги змістяться, і по зміщенню смуги можна буде виміряти неоднорідності показника заломлення, аналогічно тому, як це робиться в схемі Т2 [16, с.48].

Отже, розглянуті три оптичні схеми інтерферометра Т1, Т2 та Т3.

2.4 Експериментальне дослідження за оптичними схемами

Експериментальна установка складається з He-Ne лазера ($\lambda=0,6328$ мкм), коліматора, блоку зонних пластинок, вузла фільтрації, екрану і цифрового фотоапарата. Лазерний пучок розширюється за допомогою двокомпонентного коліматора, який зображений на рис. 2.8. Чверть хвильова пластинка $\lambda/4$ і поляроїд П дозволяють встановлювати поляризацію пучка. Мікрооб'єктив Мо ($40\times$; 0,65) фокусує лазерний пучок в площині розташування фільтруючої діафрагми Дк з отвором діаметром 40 мкм, потім об'єктив О ($i=37$), розташований конфокально з Мо, колімує його [18, с.1468].

Неоднорідності оптичної товщини вивчалися в різних кристалах, нижче наведені результати для анізотропного двовісного кристала калій-гадолінієвого вольфрамату (КГВ).

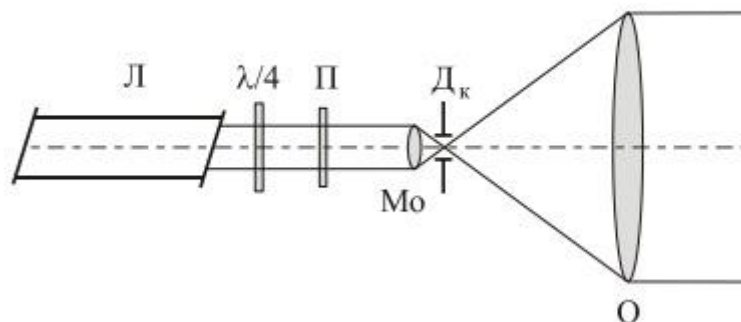


Рис. 2.8 Хід променів через коліматор:

л-лазер, $\lambda/4$ -чверть хвильова пластинка, П-поляроїд, Мо-мікрооб'єктив ($40\times$; 0,65), О-об'єктив ($F=300$ мм), Дк-діафрагма коліматора

Розташування кристалографічних осей a , b , c щодо осей індикатриси показника заломлення P , M , g показано на рис. 2.9, кутові відстані складають: $D \angle m$, $a \approx 24, D \angle g$, $c \approx 20$; осі P і b совпадають і перпендикулярні площині рис. 2.9 [18, с.1468].

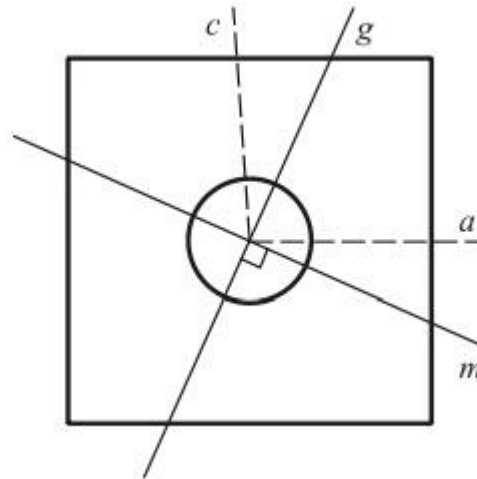


Рис. 2.9 Орієнтація кристаліграфічних осей a, b, c щодо осей індикатриси заломлення p, m, g і граней кристала КГВ

Зразок КГВ розміром $15 \times 15 \times 30$ мм вирізаний з точністю $\sim 1'$ щодо кристаліграфічних осей. Приблизно в центрі робочої апертури уздовж найбільшого розміру-вісь b -зразка розташовується отвір $\varnothing 4,5$ мм. бічні грані і внутрішня поверхня отвору матовані, поліровані торці взаємно паралельні з точністю $\sim 10''$ і площинність витримана з точністю $\sim 0,1$ смуги. Зразок поміщався в установку таким чином, що вісь b збігалася з оптичною віссю інтерферометра, вісь c – перпендикулярна зонам ЗП. Поляризація лазерного променя збігалася з віссю c [18, с.1469].

Амплітудні зонні пластинки розраховані на довжину хвилі $0,6328$ мкм і мають фокусну відстань першого порядку дифракції $f=300$ мм. у схемах t_1, t_2 , і ТЗ зонні пластинки кріпляться таким чином, щоб дифракційні структури на них були звернені один до одного. Розмір діафрагми aD дорівнює $0,2$ мм, фокусна відстань об'єтивів вузла фільтрації O_1 і O_2 дорівнює 75 мм. у площині E поміщається обертовий екран з напівпрозорого паперу і цифровий фотоапарат CASIO QV-3500ex з матрицею розміром 2048×1536 пікселів реєструє інтерферограми [18, с.1469].

Інтерферограма, отримана за схемою Т1, наведена на рис. 2.10 Кристал встановлений так, щоб поляризація лазера була для нього власною.

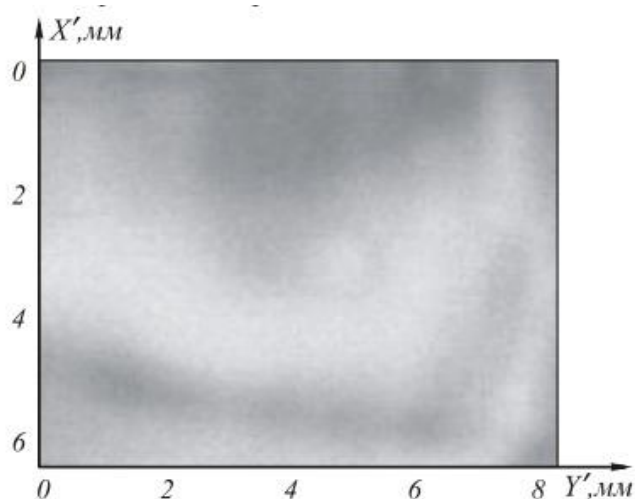


Рис. 2.10. Фотографія інтерферограми кристала КГВ, отримана за схемою Т1
 Фотографії оброблялися за допомогою програми, написаної в системі
 Matlab 5.3.

На рис. 2.11 наведено двовимірне представлення залежності $dn(x',y')$ в робочій області апертури кристала КГВ.

Величина dn змінюється в межах від 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-6}$. Шкала відповідності почорніння кількісній величині dn дана в правій частині рис. 2.11. На апертурі кристала КГВ поміщається одна темна смуга, проте ми наводимо ці дані для порівняння з результатами, отриманими в схемах Т2 і Т3 [22, с.1093].

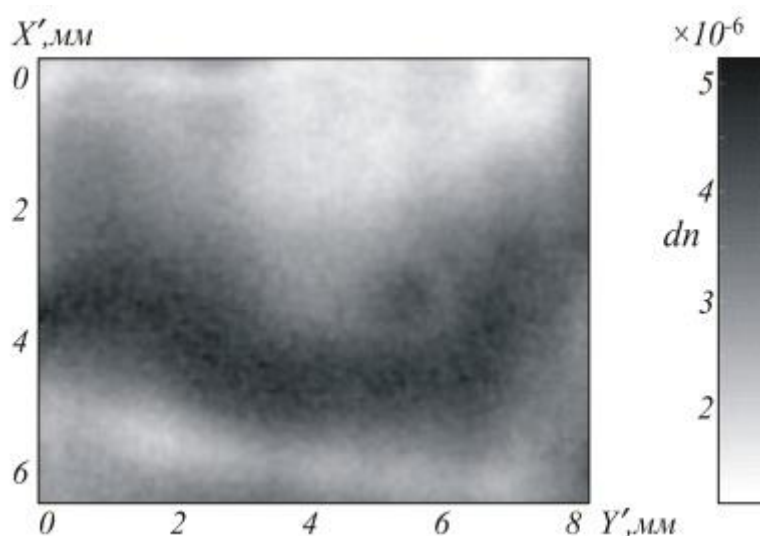


Рис. 2.11 Залежність $dn(x',y')$, отримана за схемою Т1

Інтерферограма кристала КГВ, отримана за схемою Т2, наведена на рис. 2.12. Для знаходження координат максимумів і мінімумів інтенсивності використовувалася спеціально розроблена програма, розрахунки dn проводилися відповідно до алгоритму, описаним вище, за допомогою програми в системі Matlab 5.3. З кроком по x' рівним 0,3 мм, dn визначався в точках екстремумів. У проміжних точках dn обчислювали за допомогою функції кубічної інтерполяції [22, с.1094].

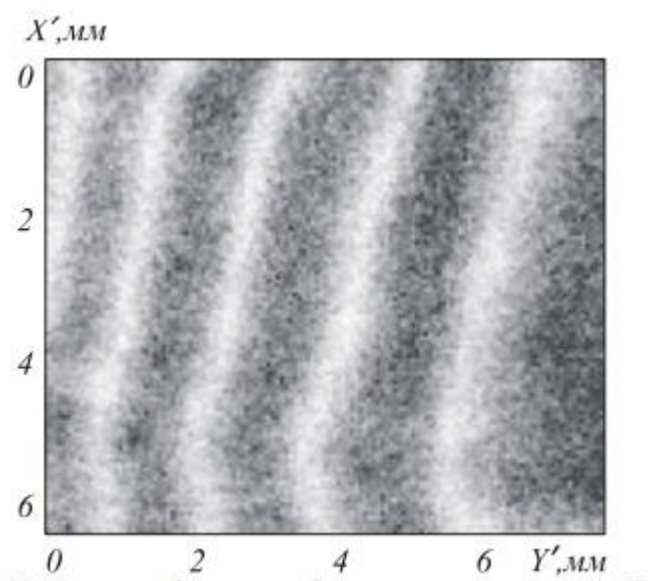


Рис. 2.12 Фотографія інтерферограми кристала КГВ, отримана за схемою Т2

На рис. 2.13 наведено двовимірне представлення $dn(x',y')$ в робочій області апертури кристала.

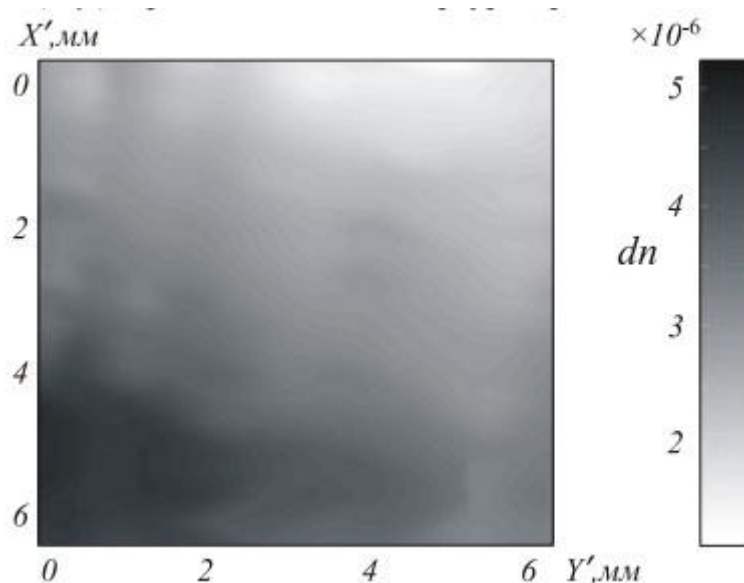


Рис. 2.13 Залежність $dn(x', y')$, обчислена з інтерферограми в схемі Т2

Інтерферограма кристала КГВ, отримана за схемою Т3, наведена на рис.2.14.

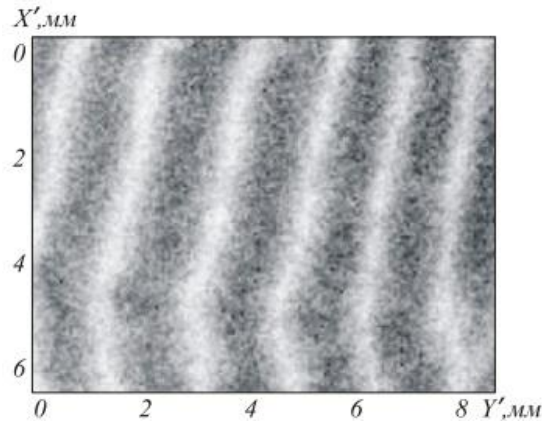


Рис. 2.14 Фотографія інтерферограми кристала КГВ, отриманої в схемі Т3

У даній схемі в якості додаткового елемента Кп використовувалася клиноподібна пластина круглої форми з плавненого кварцу з кутом клина $3,6 \cdot 10^{-4}$ рад. Результат вимірювань $dn(x',y')$ наведено на рис. 2.15 [22, с.1096]. На рис. 2.16 наведено графіки залежності неоднорідності показника заломлення $dn(y')$ від координати Y' при фіксованому значенні $x'=3$ мм, отримані в трьох схемах. Результати вимірювань в схемах Т2 і Т3 з хорошою точністю збігаються, однак, як і очікувалося, більшою мірою відрізняються від результатів вимірювань в схемі Т1.

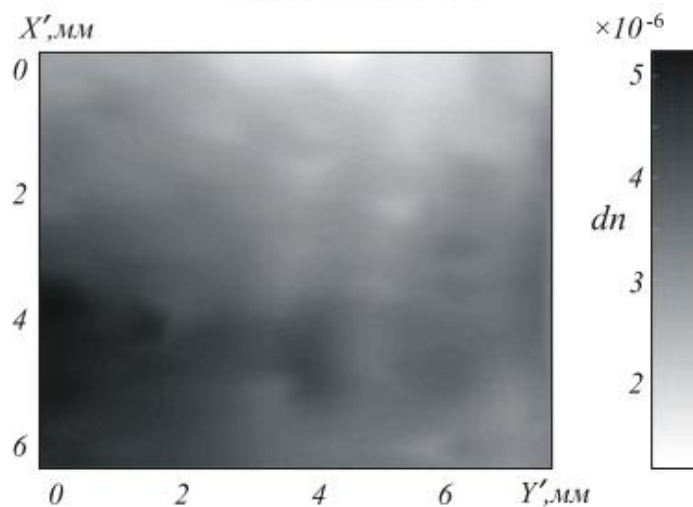


Рис. 2.15 Залежність $dn(x',y')$ для КГВ, отримана в схемі Т3

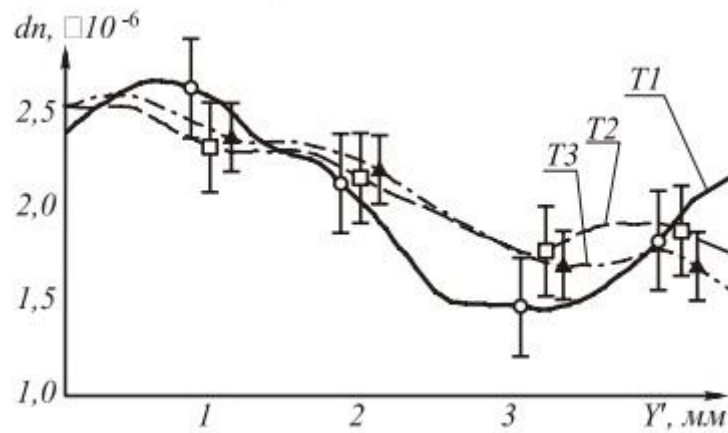


Рис. 2.16 Графіки залежності dn від Y' вздовж лінії $x' = 3$ мм, отримані в трьох схемах. Знаком I_1 показані похибки вимірювання в деяких точках

У схемі T1 основним джерелом неточності вимірювання є нерівномірність освітлення робочого поля, яка пов'язана з декількома причинами: з гауссовим розподілом інтенсивності висвітлює пучка, з похибками виготовлення зонних пластинок і неточністю настройки схеми. Похибка знаходження δ в експериментах можна визначити графічно [22, с.1096]. На рис. 2.17 зображено графік залежності δ (I), що визначається формулою (2.10).

$$\cos \delta(x', y') = \frac{2I(x', y') - I_{\max}(x', y') - I_{\min}(x', y')}{I_{\max}(x', y') - I_{\min}(x', y')}, \quad (2.10)$$

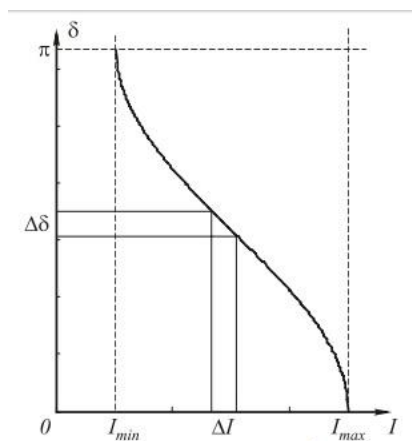


Рис. 2.17 Графік до оцінки похибки $\Delta\delta_{T1}$: графік залежності δ (I_1)

З графіка легко бачити, що якщо похибка визначення $I(x', y')$ становить 20%, то середня похибка знаходження δ дорівнює $\Delta\delta_{T1} \approx 0,6$ рад (0,3 рад і 0,15 рад для 10 і 5% відповідно), що відповідає неоднорідності оптичної товщини $0,1 \lambda$ ($0,05 \lambda$ і $0,025 \lambda$ для 10 і 5% відповідно). Враховуючи, що схема T1 призначена для візуалізації, а не вимірювання величини оптичної неоднорідності, то знайдена величина похибки $\Delta\delta_{T1}$ визначає чутливість схеми, а саме: неоднорідності оптичної товщини менше $\Delta\delta_{T1}$ не можуть бути візуалізовані за допомогою цієї схеми [22, с.1097].

У схемі T2 основним джерелом похибки є неточності у виготовленні ЗП і настройки схеми, внаслідок чого інтерференційні смуги виявляються викривлені навіть за відсутності зразка. Зв'язок між помилкою визначення δ і r_N впливає з (2.11) [15, с.1097]:

$$dn(r'_N) = \frac{\delta'}{kL} = \frac{\lambda(r_N'^2 - r_N^2)}{2L\tilde{r}_0^2}, \quad (2.11)$$

$$\Delta\delta_{T2} = \frac{2\pi r_N \Delta r_N}{\tilde{r}_0^2} = \pi \frac{\Delta r_N}{dr_N}, \quad (2.12)$$

де Δr_N -помилка визначення r_N , dr_N -відстань між сусідніми екстремумами. Тобто $\Delta\delta_{T2}$ прямо пропорційна відношенню помилки визначення координати екстремуму до ширини смуги, яка залежить як від викривлення інтерференційної смуги, так і від власне помилки вимірювання координати екстремуму. Проведемо оцінку для свідомо значних похибок. Середнє відхилення смуги від прямої в 20% від відстані між сусідніми екстремумами дає внесок в $\Delta\delta_{T2} \approx 0,6$ рад або $0,1 \lambda$. Якщо середня неточність визначення координати екстремуму складе близько 10% від ширини смуги, то відповідний внесок $\Delta\delta_{T2} \approx 0,3$ рад або $0,05 \lambda$. І повна похибка визначення δ дорівнює $0,7$ рад ($0,11 \lambda$) [22, с.1098].

У схемі T3 виникає додаткова помилка в зв'язку з неточністю виставлення клина, яка призводить до непаралельності інтерференційних смуг і зон ЗП. Ця неточність породжує лінійно наростаючу по x' помилку $\Delta\delta_{T3}$. Правильне конструктивне рішення інтерферометра дозволяє

виключити цю помилку. Похибка вимірювання, пов'язана з неточністю визначення координати екстремуму, становить 0,3 рад ($0,05 \lambda$) [22, с.1099].

Отже, експериментальне дослідження за оптичними схемами проводилося на експериментальній установці, яка складається з He-Ne лазера ($\lambda=0,6328$ мкм), коліматора, блоку зонних пластинок, вузла фільтрації, екрану і цифрового фотоапарата.

РОЗДІЛ 3 ДИФРАКЦІЙНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТР В ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ФІЗИКИ

3.1 Система навчального фізичного експерименту в шкільному курсі фізики

У сучасній освітній практиці, в середній школі, фізичний експеримент є ключовим елементом цілісного навчального процесу. Він органічно поєднує теоретичні знання з практичним дослідженням фізичних явищ і процесів. Навчальний фізичний експеримент, розглядаючись як дидактична категорія, є невід'ємною складовою методики викладання фізики.

Аналіз навчального фізичного експерименту як педагогічного феномену дозволяє визначити наступні основні компоненти: об'єкт дослідження, інструментарій для експериментального вивчення фізичних явищ (технічні засоби), діяльність викладача, спрямована на організацію та проведення експерименту, а також активність учнів, пов'язана не лише з набуттям практичних навичок, але й з розвитком їхнього критичного мислення, інтелектуальних здібностей та досвіду дослідницької роботи [2, с.187].

Сучасна система фізичного експерименту включає в себе різноманітні форми роботи [5, с.145]: 1) демонстраційні експерименти, 2) фронтальні лабораторні роботи, експерименти та спостереження, 3) фізичний практикум, 4) позаурочні експерименти та спостереження.

Важливою тенденцією розвитку навчального фізичного експерименту є інтеграція сучасних технічних засобів у навчальний процес середньої школи. Прилади, такі як осцилографи, відеомагнітофони, комп'ютери, гетеродинні спектроаналізатори, стандартні прилади для вимірювання низьких, високих та надвисоких частот, а також лазери, стали необхідним обладнанням фізичних кабінетів університетів та середніх шкіл. У демонстраційних експериментах все частіше використовуються осцилографічні методи для фіксації різних функціональних залежностей явищ, що вивчаються.

Дедалі ширше в фізичному експерименті використовуються досягнення лазерних технологій. Застосування газових лазерів у навчальному фізичному експерименті обґрунтовано їхніми важливими характеристиками, такими як значна потужність, висока монохроматичність та когерентність випромінювання. Це дозволяє ефективно відтворювати відомі експерименти та проводити нові дослідження, які неможливо здійснити з використанням традиційних джерел світла [6, с.62].

У навчальних експериментах, присвячених дослідженню різноманітних хвильових процесів, спостерігається тенденція до використання штучно створених середовищ замість природних, що стало можливим завдяки прогресу в техніці надвисоких частот.

Застосування сучасних науково-технічних засобів у фізичному експерименті відкриває можливості для проведення складних експериментів, а також для точного вимірювання фундаментальних фізичних констант.

Сучасні телевізійні та відеомагнітофонні технології набувають все більшого поширення в демонстраційних експериментах, забезпечуючи чудову видимість навіть дрібних об'єктів для широкої аудиторії спостерігачів.

Модернізація наявного обладнання та розробка нових приладів на основі передових наукових і технічних досягнень є ключовою тенденцією в розвитку навчального фізичного експерименту.

Комп'ютерне моделювання оптичних явищ стає дедалі популярнішим, оскільки дозволяє досліджувати багато фізичних явищ і процесів без використання складних лабораторних установок. Завдяки динаміці та кольоровій візуалізації, матеріал засвоюється надзвичайно ефективно. Навчальні програми демонструють учням широкі можливості комп'ютерів і формують навички роботи з сучасною технікою [3, с.59].

Програмно-педагогічні засоби (ППЗ) особливо корисні для вивчення складних розділів хвильової оптики. Комп'ютерне моделювання неочевидних оптичних явищ у цьому розділі фізики робить їх більш наочними і дозволяє

учням зрозуміти взаємозв'язок між різними оптичними параметрами, що характеризують дане явище, шляхом їх цілеспрямованої зміни [7, с.217].

Таким чином, сучасний фізичний експеримент включає: 1) демонстраційні досліди, 2) фронтальні лабораторні роботи, досліди та спостереження, 3) фізичний практикум, 4) позакласні досліди та спостереження.

Використання сучасних технічних засобів у навчальному процесі середньої школи є провідною тенденцією в розвитку навчального фізичного експерименту.

Комп'ютерне моделювання оптичних явищ набуває все більшої популярності, оскільки воно надає можливість вивчати багато фізичних явищ і процесів без необхідності використання складних лабораторних установок.

3.2 Комп'ютеризація навчального експерименту при вивченні явищ інтерференції та дифракції світла

Застосування інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) в освітньому процесі відбувається за двома основними напрямками. Перший підхід передбачає створення автоматизованих навчальних систем, які певною мірою імітують діяльність викладача. Другий напрямок зосереджений на моделюванні різноманітних процесів і явищ, що дозволяє вивчати закони природи на якісно новому рівні та більш ефективно розвивати творчий потенціал учнів.

Модель виступає однією з ключових форм представлення та трансформації інформації. Існують різні підходи до класифікації моделей. Один із варіантів класифікації представлено на рис. 3.1.



Рис. 3.1 Класифікація моделей [4, с.4]

Комп'ютерні моделі, що базуються на імітації, відображають певні аспекти фізичної реальності, спрощуючи її, але зберігаючи при цьому найважливіші характеристики досліджуваного явища чи процесу. Це дозволяє постійно вдосконалювати модель, зіставляючи її з результатами реальних експериментів, відмовлятися від первинних спрощень, що ідеалізують вихідні умови, та переходити до аналізу більш складних ситуацій, які враховують максимально повно та точно різноманіття матеріальних зв'язків, у які залучене явище, що вивчається.

Більшість програмних продуктів, присвячених хвильовій оптиці, належать до категорій моделюючих і демонстраційних.

Таким чином, одним із шляхів удосконалення навчального фізичного експерименту з хвильової оптики є використання імітаційного комп'ютерного моделювання явищ, що є одним з важливих сучасних напрямків у навчанні фізики.

У методиці викладання фізики виділяють такі види програмно-педагогічних засобів (ППЗ) [1, с.75]: а) інструментальні, б) моделюючі, в) демонстраційні, г) тренажери. У нашому дослідженні ми пропонуємо демонстраційно-моделюючі ППЗ.

При вивченні явища інтерференції світла, вчителі спираються на вже знайомі учням особливості інтерференції механічних (звукових) і електромагнітних хвиль. Учні вже знають, що стабільну інтерференційну

картину створюють когерентні джерела. Тут акцентується увага на тому, що для хвиль від цих джерел характерна стабільність частот і збереження в часі різниці фаз коливань. Просторова когерентність у шкільному курсі зазвичай не розглядається.

Використання імітаційного моделювання або імітаційного експерименту дає можливість вивчати досліди з дзеркалами Френеля і дзеркалом Ллойда навіть у шкільних умовах, оскільки в середній школі їх застосування ускладнене через технічні труднощі.

З цією метою нами розроблено ППЗ "Засоби спостереження інтерференції світла". Мовою Pascal написані програми, що моделюють досліди: а) з дзеркалами Френеля, б) з біпризмою Френеля, в) з дзеркалом Ллойда, г) спостереження інтерференції від двох когерентних джерел.

Зміст і методика застосування.

В процесі роботи з ППЗ в учнів формуються такі знання і вміння:

Знання про інтерференцію світла: а) умови максимумів і мінімумів при інтерференції світла, б) умови, за яких спостерігається інтерференція світла, в) розподіл енергії світлової хвилі при інтерференції світла, г) засоби спостереження інтерференції світла.

Вміння аналізувати графіки розподілу інтенсивності при інтерференції світла в залежності від початкових умов.

Робота з ППЗ може проводитися як фронтально в умовах комп'ютерного класу, так і вчителем за наявності лише одного комп'ютера. ППЗ також може бути використано індивідуально для самостійної роботи учнів.

Програмне забезпечення складається з чотирьох основних розділів:

У першому розділі учні отримують базові знання про явище інтерференції світла.

Другий розділ присвячений детальному розгляду експерименту з використанням дзеркал Френеля.

У третьому розділі аналізується дослід з біпризмою Френеля.

Четвертий розділ знайомить з експериментом із дзеркалом Ллойда.

Функціональність програми передбачає: а) можливість повторного відтворення симуляції з попередньо заданими параметрами, б) запуск симуляції з новими вхідними даними (параметрами), в) можливість переходу до контрольних питань за ініціативою учнів, у випадку використання ППЗ для самостійного навчання.

Контрольні питання, початкові параметри та графіки побудовані таким чином, щоб перевірити здатність учнів встановлювати відповідність між фізичними параметрами та відповідними їм графічними представленнями.

Протокол роботи автоматично реєструє кількість правильних відповідей і кількість помилок, допущених учнем при відповіді на контрольні запитання.

Надалі буде наведено опис окремих кадрів програми. Кадр 1 – візуальне представлення початкового екрану (рис. 3.2).

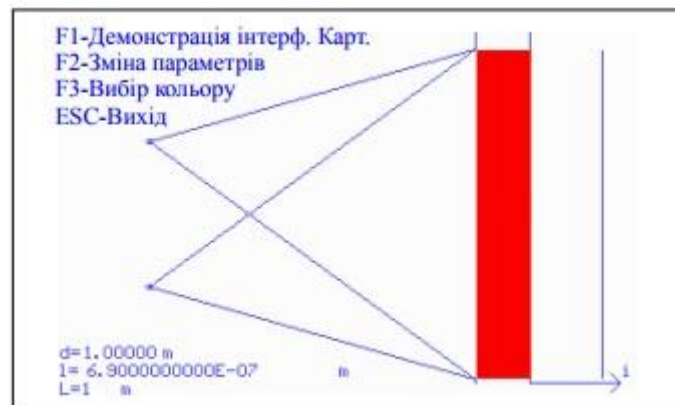


Рис. 3.2 Інтерференція двох когерентних хвиль

Початковий кадр програми візуалізує інтерференцію двох когерентних циліндричних світлових хвиль, які випромінюються з джерел S1 та S2, що представлені у вигляді вузьких щілин, схожих на паралельні тонкі нитки, що випромінюють світло. Кадр розділено на три основні зони:

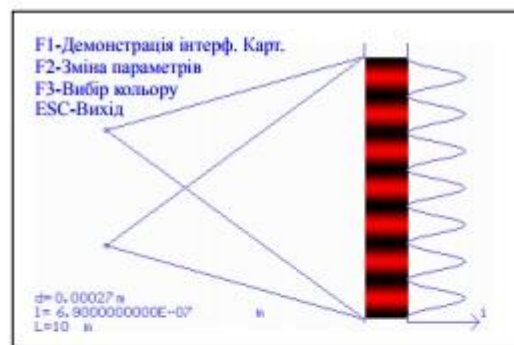
У верхній частині розташовані функціональні клавіші для зміни параметрів симуляції (верхнє меню), які користувач може змінювати на власний розсуд.

Центральна частина екрану відведена під безпосередню імітацію експерименту.

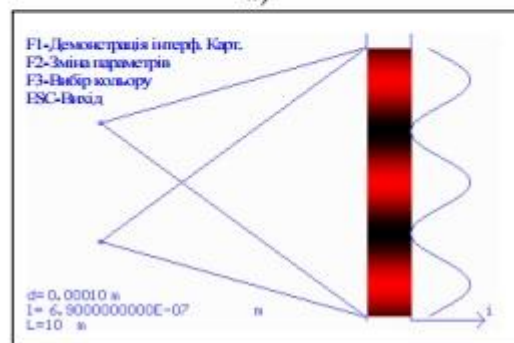
У правій частині кадру відображається поле інтерференції та графік, що показує залежність інтенсивності (I) від координати (x) в монохроматичному світлі. Різні елементи фону та графічні об'єкти виділені різними кольорами для кращої візуалізації.

В нижній частині екрану розташоване меню з параметрами, що регулюються, включаючи: довжину хвилі (λ), відстань між джерелами (d), відстань до екрану (l), а також відстань між інтерференційними смугами (Δx).

Наступним етапом є аналіз розподілу інтенсивності інтерферуючих хвиль. При натисканні клавіші «F1» на екрані з'являється кадр 2.



а)



б)

Рис 3.3. Інтерференція світла при зміні параметра d

Візуалізація, що демонструється у кадрі II (рис. 3.4), відображає розподіл інтенсивності світла окремо. Структура кадру поділена на дві зони: у верхній частині представлено вхідні параметри симуляції, а в центральній частині відображається графік розподілу інтенсивності інтерферуючих хвиль.

Для поліпшення сприйняття інформації, фон і графічні елементи виділені різними кольорами.

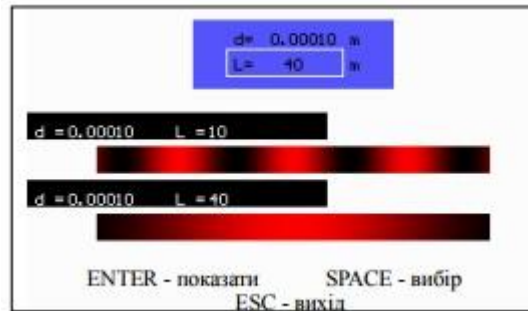


Рис. 3.4. Розподіл інтенсивності світла при інтерференції хвиль

На екрані, у кадрі III (рис. 2.5), відтворено симуляцію експерименту з біпризмою Френеля. Структурно кадр поділено на три області: верхня область містить позначення регульованих параметрів, центральна область відображає інтерактивну імітацію експерименту, а права область візуалізує картину інтерференційного поля.

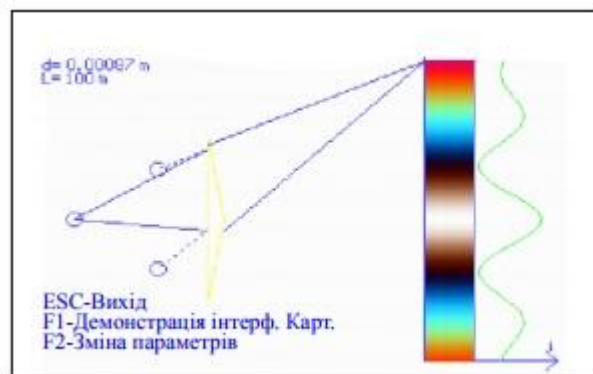


Рис. 3.5. Дослід з біпризмою Френеля (біле світло)

Інтерфейс програми надає доступ до наступних параметрів: довжина хвилі випромінювання (λ), відстань між когерентними джерелами (d), відстань від точкового джерела світла до спільної грані біпризми (a), відстань від цієї ж грані біпризми до екрану спостереження (b), сумарна відстань від джерел світла до екрану ($l = a + b$), а також кут заломлення матеріалу призми (θ). Завдяки можливості змінювати всі ці параметри в режимі реального часу, викладач може наочно продемонструвати учням вплив кожного з них на формування інтерференційної картини.

Кадр IV – картинка на екрані (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Дослід із дзеркалами Френеля

Кадр V відтворює симуляцію експерименту з використанням дзеркал Френеля та структурно складається з трьох основних блоків. У правій частині екрану відображаються наступні параметри: довжина хвилі випромінювання (λ), відстань між уявними когерентними джерелами (d) та відстань від уявних джерел до екрану спостереження (l).

Кадр, представлений на рис. 3.7, демонструє явище інтерференції при використанні білого світла. У цьому випадку інтерференційні смуги (максимуми) забарвлюються в різні кольори спектру. Фіолетова смуга знаходиться найближче до центральної частини інтерференційної картини, тоді як червона смуга розташована найбільш віддалено від центру. Центральна смуга залишається білою.

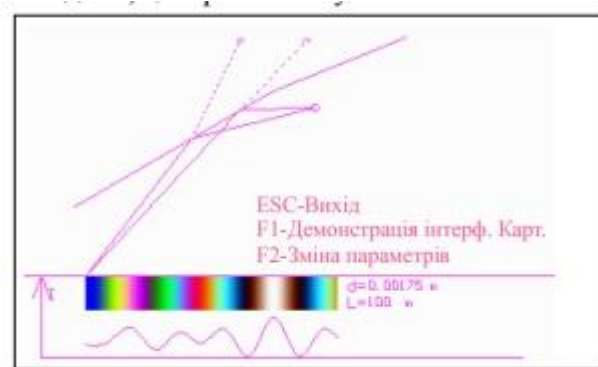


Рис. 3.7 Дослід із дзеркалами Френеля (біле світло)

На екрані, у кадрі V (рис. 3.8), візуалізовано графік розподілу інтенсивності світла, отриманий в результаті експерименту з дзеркалами Френеля.

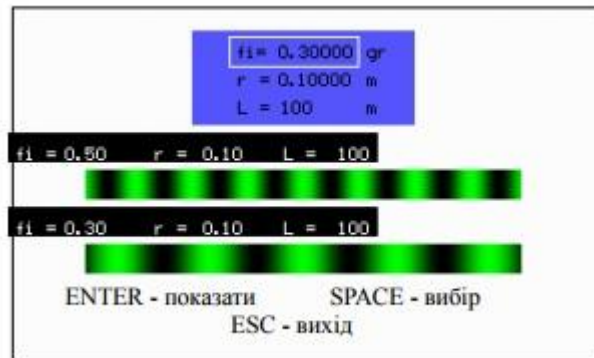


Рис. 3.8. Картини розподілу інтенсивності світла у досліді із дзеркалами Френеля

Кадр VI (рис. 3.9) відтворює симуляцію експерименту з дзеркалом Ллойда. Структура кадру поділена на три основні області. У верхній частині розташоване меню з функціональними клавішами. У нижній частині знаходиться меню, що дозволяє налаштовувати наступні параметри: довжину хвилі випромінювання (λ), відстань між реальним джерелом світла та його уявним відображенням (d), а також відстань від джерел світла до екрану спостереження (L). Центральну частину екрану займає безпосередньо симуляція досліду з дзеркалом Ллойда, а в правій частині відображається візуалізація інтерференційного поля.

В експерименті з дзеркалом Ллойда використовується лише одне реальне точкове джерело світла та його уявне відображення, проте, незважаючи на це, на екрані спостерігається інтерференційна картина, аналогічна тій, що виникає при використанні дзеркал або біпризми Френеля.

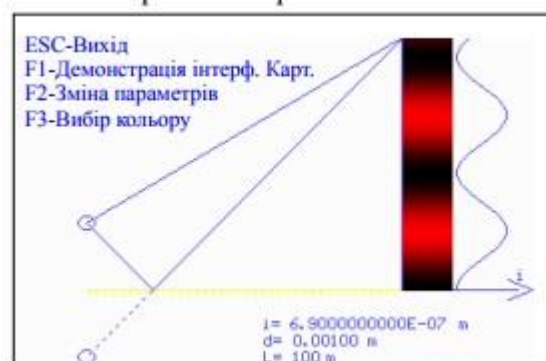


Рис. 3.9. Дослід із дзеркалом Ллойда

На екрані, у кадрі VII (рис. 3.10), представлено графік розподілу інтенсивності світла, що виникає внаслідок інтерференції білого світла в експерименті з дзеркалом Ллойда. Кадр структуровано на дві області: у нижній частині розташоване меню, що містить перелічені вище вхідні параметри, а в центральній частині візуалізується сам експеримент.

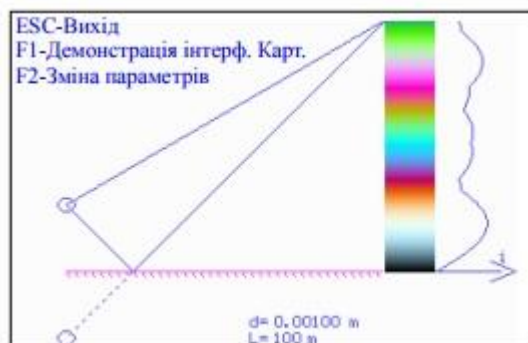


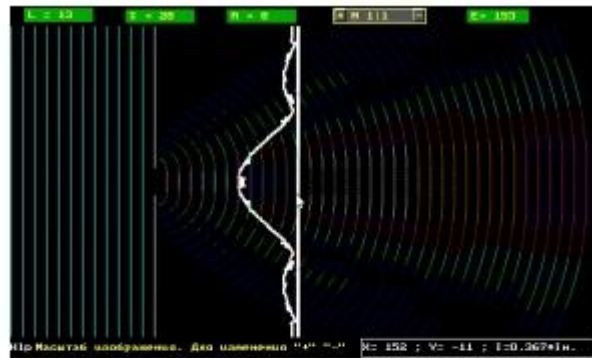
Рис. 3.10. Дослід із дзеркалом Ллойда (біле світло)

Розуміння фундаментальних аспектів теорії дифракції представляє собою певний виклик як для учнів, так і для викладачів фізики. Раніше чинні програми з фізики для середньої школи не надавали вчителям чітких методичних рекомендацій щодо вивчення дифракційних явищ на основі теоретичного підґрунтя, обмежуючись лише ознайомленням із цими явищами через демонстраційний експеримент.

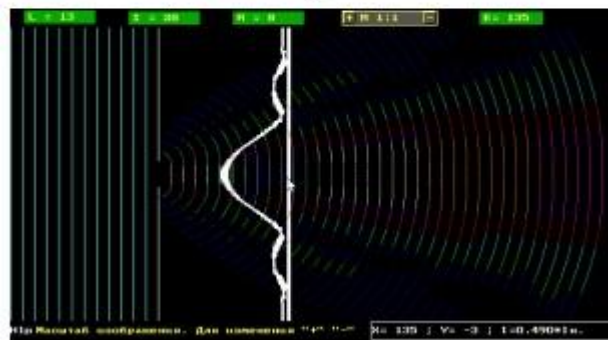
З використанням мови програмування Pascal було розроблено програмне забезпечення, що дозволяє моделювати ключові випадки спостереження дифракції світла. До них належать: I. Дифракція Френеля: дифракція на одиночній щілині, дифракція на перешкоді, а також дифракція на півплощині. II. Дифракція Фраунгофера: дифракція на щілині, експеримент Юнга та дифракційні ґратки. III. Дифракційні ґратки: дослідження роздільної здатності, дифракція білого світла та практичне застосування дифракційних ґраток.

На рис. 3.11, а зображено картину поширення хвильового фронту при дифракції на щілині, ширина якої становить $S=28$ умовних одиниць. При достатньо великому значенні хвильового параметра ($p=1.6$ при $E=153$, $L=13$) на екрані чітко візуалізуються дифракційні максимуми. Натомість, при

малому значенні хвильового параметра ($p=0.21$ при $E=135$) розподіл інтенсивності хвильового поля за щілиною лише незначно відрізняється від розподілу, що відповідає законам геометричної оптики (рис. 3.11, б). (Тут $E=r$; L – довжина хвилі; всі величини виражено в умовних одиницях вимірювання).



а)



б)

Рис. 3.11. Дифракція світла на щілині

Для ілюстрації вивчення дифракції на довгій прямій щілині ефективно використовувати наочні комп'ютерні моделі. Завдяки комп'ютерній симуляції учні мають можливість спостерігати наступну картину: плоский хвильовий фронт, що поширюється в просторі, досягає довгої щілини. Після проходження крізь щілину хвильовий фронт трансформується у систему концентричних кіл, створюючи візуальне враження, ніби кругові хвилі виходять з країв щілини. Також, позаду щілини, розташовується екран, на якому відображається графік розподілу інтенсивності хвилі в площині спостереження (рис. 3.12).

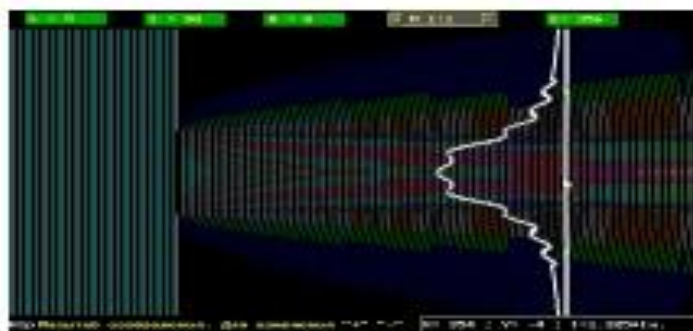


Рис. 3.12. Дифракція світла на щілині при параметрах $L=50$, $S=60$ (відносних одиниць)

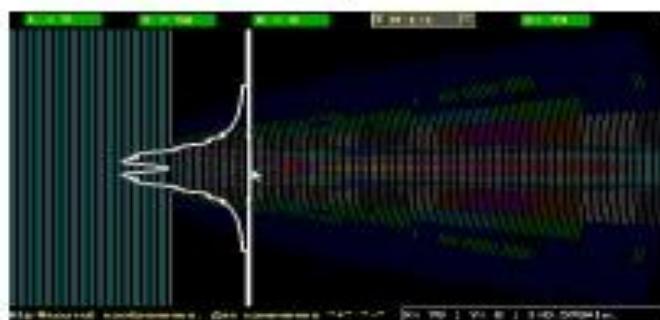
Вигляд інтерференційної картини, що формується на екрані внаслідок дифракції, залежить від ряду факторів, включаючи довжину падаючої хвилі, відстань до точки спостереження та розміри щілини. Всі ці параметри є вхідними даними та можуть змінюватися в процесі моделювання. Важливо відзначити, що одиниці виміру всіх параметрів є відносними, що робить можливим використання розроблених імітаційних моделей для демонстрації хвильових процесів різної природи, зокрема, механічних та електромагнітних хвиль різних діапазонів.

З рисунку 3.13, г стає очевидним, що подальше зменшення ширини щілини призводить до ефекту, діаметрально протилежного тому, що можна було б передбачити на основі законів геометричної оптики. У повній відповідності з формулою розподілу інтенсивності в дифракційній картині Фраунгофера від щілини, освітлена область не лише не звужується, але й, навпаки, швидко розширюється.

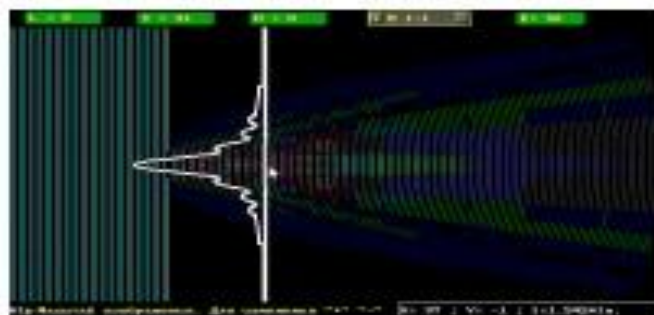
На імітованих інтерференційних картинах, отриманих на екрані комп'ютера (рис. 3.14), чітко спостерігається пляма Пуассона. Крім того, ці моделі дозволяють вивчати тонку структуру хвильового поля, що виникає в цьому явищі.



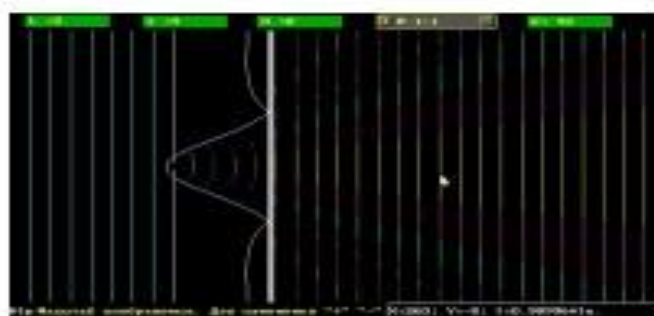
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.13 Дифракція світла на щілині: а) у площині щілини укладається велике число смугастих зон Френеля; б) півширина щілини містить дві зони Френеля; в) півширина щілини містить три зони Френеля; г) півширина щілини містить менш однієї зони Френеля.

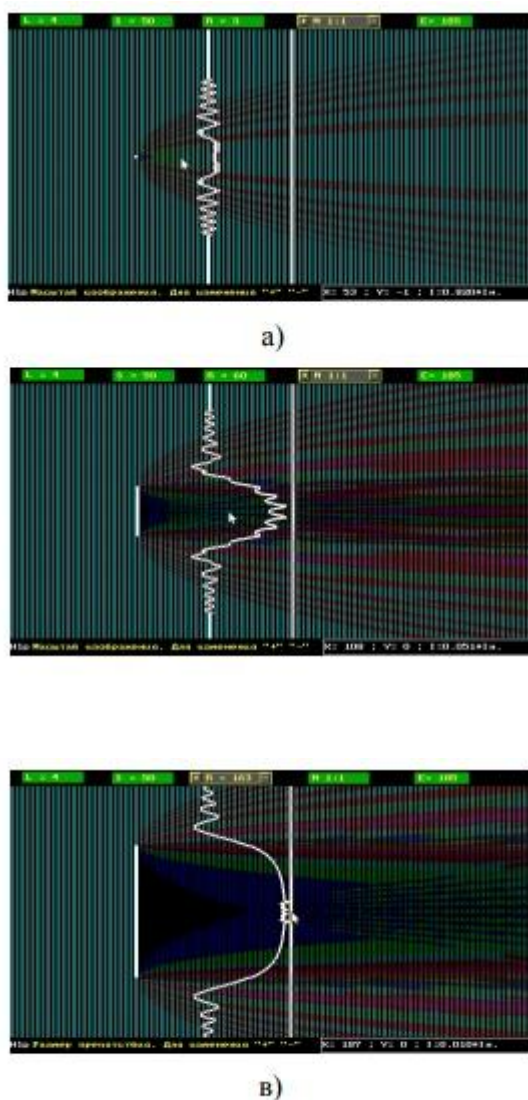


Рис. 3.14. Демонстрація плями Пуассона.

Отже, розроблене програмно-педагогічне забезпечення (ППЗ) складається з чотирьох модулів, що моделюють наступні явища: формування інтерференційного поля при взаємодії двох когерентних хвиль; експеримент з використанням дзеркал Френеля; експеримент з біпризмою Френеля; експеримент із дзеркалом Ллойда.

ППЗ дозволяє імітувати інтерференційні поля в кожному з експериментів з одночасним відображенням відповідних графіків інтенсивності хвилі, враховуючи значення фізичних величин, що задаються користувачем.

Пропонується використовувати дане ППЗ на уроках, присвячених вивченню явища інтерференції світла. Зокрема, доцільно демонструвати перший модуль програми у поєднанні з одним з трьох останніх. Також, можливо поєднувати імітаційні моделі з проведенням реальних фізичних експериментів.

Таким чином, запропоноване нами ППЗ володіє рядом важливих дидактичних і методичних переваг:

Впроваджено єдиний підхід до вивчення хвильових процесів, що характеризується наступними особливостями:

Можливість демонстрації хвильових процесів різної фізичної природи (механічні та електромагнітні хвилі різних діапазонів).

Забезпечення всебічного, глибокого та детального аналізу досліджуваного явища, включаючи візуалізацію хвильового поля в усій області поширення хвиль.

Можливість моделювання явищ дифракції Френеля та Фраунгофера, а також прямолінійного поширення світла (геометрична оптика як окремий випадок хвильової оптики) завдяки широкому діапазону варіацій параметрів поширення хвиль.

ППЗ підсилює наочність навчального процесу, враховуючи сучасне розуміння принципу наочності як поєднання предметно-образного та абстрактно-логічного впливу на учнів, та поєднує в собі елементи продуктивного та репродуктивного методів навчання.

ВИСНОВКИ

Використання сучасних технічних засобів у навчальному процесі середньої школи є провідною тенденцією в розвитку навчального фізичного експерименту. Сучасний фізичний експеримент включає: 1) демонстраційні досліди, 2) фронтальні лабораторні роботи, досліди та спостереження, 3) фізичний практикум, 4) позакласні досліди та спостереження.

Розроблене програмно-педагогічне забезпечення (ППЗ) складається з чотирьох модулів, що моделюють наступні явища: формування інтерференційного поля при взаємодії двох когерентних хвиль; експеримент з використанням дзеркал Френеля; експеримент з біпризмою Френеля; експеримент із дзеркалом Ллойда.

ППЗ дозволяє імітувати інтерференційні поля в кожному з експериментів з одночасним відображенням відповідних графіків інтенсивності хвилі, враховуючи значення фізичних величин, що задаються користувачем.

Пропонується використовувати дане ППЗ на уроках, присвячених вивченню явища інтерференції світла. Зокрема, доцільно демонструвати перший модуль програми у поєднанні з одним з трьох останніх. Також, можливо поєднувати імітаційні моделі з проведенням реальних фізичних експериментів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гайдучок Г.М., Нижник В.Г. Фронтальний експеримент з фізики в 7 - 11 класах середньої школи: Посіб. для вчителя. К., 2019. 175 с.
2. Гончаренко С.У. Фізика. 11 кл.: Проб. навч. пос. для шк. III ступ., гімназій і ліцеїв гуманіт. проф.: Пер. з укр. Реком. М-вом освіти України. К.: Освіта, 2015. 287 с.
3. Желюк О.М. Комп'ютерна техніка в навчальному курсі фізики: Теорія і практика. Рівне: РДПІ, 2014. 109 с.
4. Жук Ю.О. Використання засобів нових інформаційних технологій у навчальній дослідницькій діяльності // *Фізика та астрономія в школі*. 2017. № 1. С. 4-7.
5. Костюкевич Д.Я. Використання системи шкільного фізичного експерименту у побудові інтегрованої моделі процесу навчання: *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції (10-12 травня 2014 р.)*. Полтава, 2014. С. 145-146.
6. Садовий М. Про особливості демонстрації з інтерференції та дифракції світла / *Матеріали доповідей II міжвузівської науково-практичної конференції "Методичні особливості викладання фізики на сучасному етапі"*, частина I. Кіровоград, 2016. С. 62.
7. Сосницька Н.Л. Дидактичні вимоги до створення програмно-методичного забезпечення з фізики / Н.Л. Сосницька // *Наукові записки; серія: педагогічні науки*. Кропивницький: РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2019. Вип. № 60. Ч. 2. С. 217–222.
8. М. В. Цигика, А. А. Когутич, І. І. Стойка, О. О. Грабар. Інтерферометр на основі фоторефрактивного кристала Sn₂P₂S₆ модифікованого дифузиею Cu. // *Науковий вісник УжНУ, Серія Фізика*. 2017, т. 41, С.14-19.
9. Arrizon V., Sacher-de-la-Llave D. Common-path interferometry with one-dimensional periodic filters // *Optics Letters*. 2004. V. 29. N 2. P. 141–143.
10. Born M., Wolf E. // *Principles of Optics*, 7th ed. *Cambridge University Press*, 2002. P. 11.
11. Glass A. M. The photorefractive effect // *Optical Engineering*. 1978. T. 17. №. 5. С. 175-177.
12. Grabar, P. Mathey, M. Tsyhyka, G. Gadrét, I. Stoika. Dynamic Holographic Interferometry with Doped Sn₂P₂S₆ *Photorefractive Crystals*. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017, v. 867, p. 012027.

13. De Montmorillon L.-A., Delaye P., Launay J.-C., Roosen G. Novel theoretical aspects on photorefractive ultrasonic detection and implementation of a sensor with an optimum sensitivity // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82. P. 5913 – 5922.
 14. Delaye P., de Montmorillon L.-A., Roosen G. Transmission of time modulated optical signals through an absorbing photorefractive crystal // *Opt. Commun.* 1995. V.118. P.154 – 164.
 15. De Montmorillon L.-A., Biaggio I., Delaye P., Launay J. –C., Roosen G. Eye-safe large field of view homodyne detection using a photorefractive CdTe:V crystal // *Opt. Commun.* 1996. V.129. P.293 – 300.
 16. De Rossi S., Delaye P., Launay J. C., Roosen G. Implementation and comparative evaluation of various architectures of ultrasonic photorefractive sensors // *Opt. Mater.* 2001. V.18. P.45 – 48.
 17. Kohn V.G., Smirnova I.A., Snigireva I.I., Snigirev A.A. // *Crystallography Reports.* 2018. V. 63. P. 536.
 18. Lohmann A.W. An interferometer with zone plates as beam-splitter // *Opt. Acta.* 1985. V. 12. P. 1468–1469.
 19. Snigirev A., Snigireva I., Lyubomirskiy M. et al. // *Optics Express.* 2014. V. 22. P. 258.
 20. Solymar L., Webb D. J., Grunnet-Jepsen A. Physics and application of photorefractive materials, - Oxford University Press, 1996. 512 p.
 21. Sturman B. I., Podivilov E. V., Righofer K. H., Shamonina E., Kamenov V. P., Nippolainen E., Prokofiev V. V., Kamshilin A. A. Theory of photorefractive vectorial wave coupling in cubic crystals // *Phys. Rev. E.* 1999. V. 60. P. 3332-3352.
 22. Raymond N. Smart. Zone Plate Interferometer // *Applied Optics*, 1974. V. 13. N 5. P. 1093–1099.
 23. Temple D.A., Warde C. Anisotropic scattering in photorefractive crystals // *J. Opt. Soc. Am. B. (Opt.Phys).* 1986. Vol.3, No.2. P.337-341.
- .