

## ВСТУП

Роль електронних пристроїв особливо зростає сьогодні у зв'язку з широким застосуванням мікропроцесорної техніки для обробки інформаційних сигналів і силових напівпровідникових приладів для перетворення електричної енергії.

Матеріал конспекту скомпонований так, що кожний наступний розділ є логічним продовженням попереднього. У результаті вивчення курсу студенти засвоюють принципи функціонування, вибору, практичної реалізації пристроїв і систем комп'ютерної електроніки різного призначення, методи їх аналізу та розрахунку за заданими статичними й динамічними параметрами.

За результатами навчання студент має знати:

- принципи побудови та функціонування основних пристроїв аналогової і цифрової електроніки;
- принципи вибору методів аналізу і розрахунку електронних ланок різних пристроїв із заданими характеристиками.

Студент також має уміти:

- розрахувати, промодельовати та узагальнити динамічні показники електронних пристроїв;
- виконати розрахунки різних електронних ланок пристроїв;
- розробити структурні та принципові схеми.

Курс забезпечується попереднім вивченням таких основних дисциплін: математика, дискретна математика, фізика, теорія електричних та магнітних кіл. Зі свого боку вивчення курсу забезпечує засвоєння студентами багатьох наступних дисциплін бакалаврського циклу навчання, оскільки в ньому розглядаються електронні елементи та пристрої, які є основою сучасних комп'ютерних інтегрованих систем.

## 1 ПРЕДМЕТ ТА ЗАВДАННЯ КУРСУ

### 1.1 Основні визначення

**Електроніка у загальному** – це галузь діяльності людини з вивчення та застосування поведінки електронів у різних матеріалах, середовищах, пристроях та системах.

**Електроніка в більш вузькому розумінні** – наука (або навіть мистецтво) побудови різних за функціональним призначенням електронних та електричних схем і пристроїв. Функції, які має виконувати дана електронна схема, визначають способи її технічної реалізації та особливості побудови. Приклади: промислова автоматика, силова електроніка, енергетична електроніка, радіотехніка, відеотехніка і т.д.

**Комп'ютер**, це електронний *пристрій* для реалізації довільних *алгоритмів* обробки, передачі та збереження *інформації*. Тому з точки зору *електроніки*: комп'ютер – дуже складна єдина електрична та *електронна система*.

**Предмет курсу** – не комп'ютери, а принципи функціонування окремих найпростіших електронних схем і схемних елементів, із яких побудовано комп'ютер і які виконують різні функції.

**Схемний елемент** – електричний або електронний прилад або цілий вузол, який виконує певну функцію з обробки сигналів і призначений для об'єднання з іншими схемними елементами за відповідними правилами.

## 1.2 Загальна характеристика систем комп'ютерної електроніки

Всі системи, які розглядаються в комп'ютерній електроніці, можна умовно розділити на **дві групи**. До першої з них належать електронні системи **енергетичної електроніки**, які забезпечують отримання, перетворення, збереження та використання електричної енергії в комп'ютерній системі. Друга група включає в себе **електронні інформаційні системи**, які виконують функції отримання, передачі, збереження, обробки та використання інформації за допомогою електричних сигналів.

У сучасних електронних системах використовуються дискретні елементи двох видів: **прості компоненти та мікросхеми** різного ступеня інтеграції.

Елементи першого виду застосовують передусім у силових ланцюгах інформаційних систем, які найменш складні за будовою, розсіюють більшу кількість теплоти, мають більші габарити. Використовують їх також у електронних ланцюгах для погодження між собою окремих мікросхем, коригування характеристик деяких пристроїв і мікросхем та у випадках, коли застосування мікросхем з тих чи інших причин недоцільне.

Сфери використання елементів другого виду, тобто мікросхем, безупинно розширюються. Такі елементи виконують дедалі складніші функції, вміщують все більшу кількість окремих електронних компонентів. Вершиною сучасного розвитку даних елементів електроніки є створення в одному корпусі (на одному кристалі) закінчених складних інформаційних приладів у вигляді спеціалізованих мікропроцесорів та промислових контролерів, використання яких забезпечує новий етап у розвитку всіх галузей техніки.

Для спрощення вивчення та аналізу пристроїв комп'ютерної електроніки їх розбивають на ряд окремих електронних пристроїв та елементів: блок живлення, системна плата, пам'ять, процесор, інтерфейси та інше. У даному курсі ми будемо використовувати ще більш детальніший поділ великих пристроїв на **окремі блоки, вузли і каскади**. Наприклад, підсилювач, ключ, логічний елемент, шифратор, випрямляч, фільтр та інше. Такий підхід обумовлений тим, що незалежно від ступеня складності мікросхем і численних функцій, які вони реалізують, основу їх структури складають базові елементарні блоки. Фізичні принципи й особливості роботи таких блоків простіше та ефективніше виявляються при аналізі та моделюванні, у порівнянні з аналізом всієї мікросхеми. Це сприяє глибшому сприйняттю принципів побудови електронних пристроїв різного ступеня складності, дозволяє ефективніше і повніше використовувати їх якості, спрощує процес налаштування і пошук несправностей.

Більшість схемотехнічних рішень комп'ютерної електроніки є спільними для всієї сучасної електроніки. Це й не дивно, адже в основі їх конструювання лежать такі активні аналогові функціональні елементи, як **транзистори**. У загальному електронні пристрої умовно поділяють на **аналогові** (безперервної дії) та **дискретні** (переривчастої дії). Дискретні елементи, у свою чергу, поділяють на імпульсні та цифрові.

Технічно компонентною основою сучасної комп'ютерної електроніки є **цифрові мікросхеми** різного ступеня інтеграції та різного функціонального призначення. Однак повністю витіснити аналогову техніку цифрова не зможе. Першою причиною цього є те, що люба цифрова мікросхема реалізується саме на аналогових елементах. Тому для розуміння роботи комп'ютерної електроніки слід бути ознайомленим і з основними принципами роботи **найпростіших аналогових елементів електронних схем**. Основними аналоговими елементами сучасної електроніки є різні напівпровідникові прилади та пасивні компоненти. Друга ж причина полягає в тому, що фізичні процеси, від яких електронна підсистема отримує інформацію та якими керує в системах автоматики і керування, мають аналогову природу. Тому в комп'ютерній електроніці важливу роль відіграють процеси перетворення аналогових неперервних процесів у дискретні та навпаки. Такі перетворення виконують спеціальні електронні елементи: **аналого-цифрові (АЦП)** та **цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП)**.

## 2 ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД І ФУНДАМЕНТАЛЬНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОНІКИ

### 2.1 Фундаментальні поняття електрики та електроніки

Сучасна електрика та електроніка будуються на чотирьох фундаментальних базисах.

1. Одним із фундаментальних понять сучасної фізики і першим базисом електроніки є поняття **електричного заряду**. Воно визначає важливу особливість нашого всесвіту. Ця особливість полягає в тому, що весь наш **матеріальний світ побудований із трьох елементарних частинок**. Цими частинками є: **електрон, протон та нейтрон**. Основні їхні фундаментальні властивості такі:

- **маса**, яка наближено рівна для електрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, для протона  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг і для нейтрона  $m_n = 1,7 \cdot 10^{-27}$  кг;
- **електричний заряд**, наближено рівний для електрона  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, для протона  $e = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл і для нейтрона  $e = 0$ ;
- **спін** для всіх трьох частинок рівний  $s = 1/2$ .

Як бачимо, дві з трьох елементарних частинок мають особливу властивість - наявність у них електричного заряду, який може бути **позитивним або негативним**. Саме ця властивість елементарних частинок і визначає перший базис електрики та електроніки, назви яких й пішли від назви однієї із негативно заряджених частинок - електрона.

2. Другий фундаментальний базис слідує із характеру побудови **атомів** нашого світу. Кожен атом складається із **ядра**, яке містить **кілька протонів та нейтронів**,

та **системи електронів**, які розміщуються навколо ядра на можливих для даного атома **електронних оболонках** (на рис.1.1 наведено дуже спрощену модель атома).

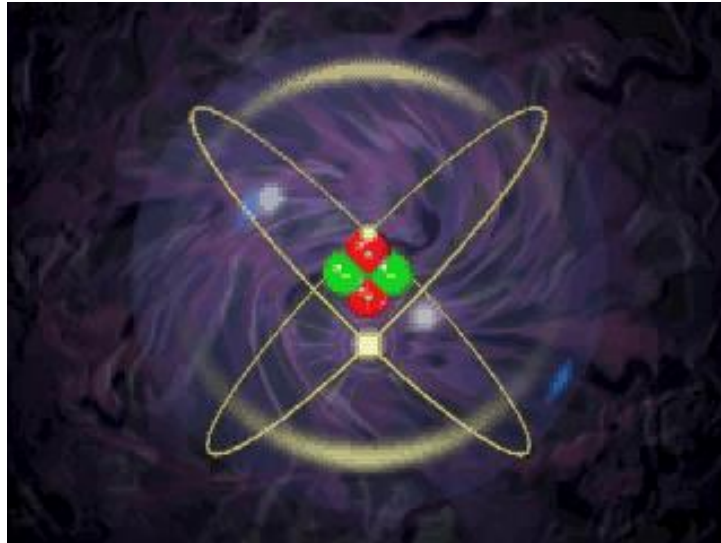


Рисунок 2.1 - Спрощена модель будови атомів (нанести назви нуклонів, ядра і оболонки)

Важливим у будові атомів є те, що розмір ядра складає  $\sim 10^{-15}$  м, а розміри електронних оболонок, де розміщуються електрони, більші  $10^{-10}$  м. Тобто, **практично весь простір в атомі наданий електронам** (рис.2.1), тоді як розміри ядра в ньому можна не брати до уваги при розгляді задач електроніки. Крім того, із-за великої різниці мас електронів та протонів і нейтронів **практично вся маса атома зосереджена в ядрі** (рис.2.1). Саме до таких геометричних параметрів будови атомів призводять кількісні величини трьох вказаних вище фундаментальних властивостей-параметрів елементарних частинок та параметрів різних взаємодій між цими частинками (ядерних, електромагнітних та гравітаційних).

Оскільки всі речовини нашого світу складаються із атомів, то практично весь простір у них наданий електронам. При цьому **електрони інтенсивно переміщуються по цьому атомному простору**. Практично ж **безрозмірні ядра можна вважати нерухомими**. У результаті в електроніці **всі процеси зумовлені рухомими негативними зарядженими частинками - електронами**, а позитивно заряджені протони та нейтральні нейтрони, зосереджені в ядрах, безпосередньої участі в електронних процесах не беруть.

Другий фундаментальний базис електрики й електроніки полягає в можливості вільного переміщення електронів у просторі в середині речовин.

3. Експерименти показують, що **між зарядженими частинками діють певні сили або взаємодії**. При цьому (рис.2.2):

- частинки із однойменними зарядами відштовхуються між собою;
- частинки із різнойменними зарядами притягуються між собою.

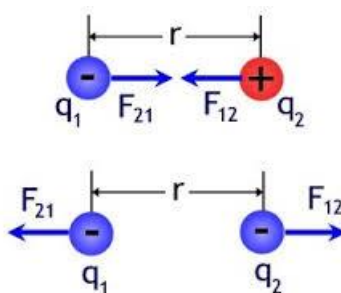


Рисунок 2.2 - Сили взаємодії між зарядженими частинками залежать від величини і знаку їхніх зарядів  $q_1$  і  $q_2$  та відстані між ними  $r$  (згадайте закон Кулона)

При дослідженні взаємодії електричних зарядів виникає важливе запитання: як механічні сили передаються від однієї зарядженої частинки до другої через простір без контакту між самими частинками.

Перед тим, як дати відповідь на поставлені запитання, розглянемо простий приклад. Абонент звичайної провідної телефонної мережі набирає з одного міста номер іншого міста. Після з'єднання абонентів зміст розмови у вигляді електричного сигналу передається, наприклад, на відстань  $L \approx 1000$  км між цими містами. Розглянемо два варіанти передачі сигналу.

*Перший варіант.* Сигнал передається електронами один від одного за рахунок їх направленої руху по металевих провідниках від міста до міста: Відомо, що швидкість вільних електронів у провідниках телефонної ліній при передачі сигналів не перевищує  $v = 10$  км/с. Розрахуємо час проходження сигналу у цьому випадку.

$$t = L/v \approx 1000 \text{ км}/10 \text{ км/с} = 10 \text{ с.}$$

Отже, якби «носіями» сигналу у провідниках були б саме електрони, то при передачі інформації між абонентами існувала б затримка в часі в десятки секунд навіть для відносно невеликих відстаней! На практиці цього не спостерігається. Останнє свідчить про те, що не безпосередня взаємодія (відштовхування чи притягання) окремих вільних електронів між собою у провідниках зумовлює передачу інформації у телефонних лініях зв'язку. Такий висновок слідує і з багатьох інших закономірностей, які описують експериментальні результати досліджень взаємодії між зарядженими тілами.

*Другий варіант.* Із розрахунків слідує, що із взаємодією зарядів і передачею сигналів пов'язаний якийсь інший матеріальний носій, який здатний значно швидше поширюватися у просторі. Дійсно, наявні на сьогодні численні експериментальні факти свідчать, що для розуміння виникнення і передавання сил, діючих між зарядами, необхідно припустити наявність між зарядами деякого фізичного посередника, виконуючого цю взаємодію. Цей посередник отримав назву «**електромагнітне поле**». Його особливістю є те, що воно **поширюється у просторі зі швидкістю світла  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с.**

Розрахуємо час проходження телефонного сигналу між містами в цьому випадку. Відповідно, сигнал появляється в одному місті, створюючи тут електромагнітне поле. Воно поширюється по провідниках зі швидкістю світла до іншого міста і створює там відповідний сигнал. Тоді час розповсюдження сигналу:

$$t = L/c \approx 1000 \text{ км}/300000 \text{ км/с} \approx 3,3 \text{ мс.}$$

Такий результат вже відповідає реальності. Тому третім базисом електрики та електроніки є існування у нашому матеріальному світі особливого виду матерії - електромагнітних полів.

4. Четвертим базисом електроніки є ще одна унікальність нашого світу - він наповнений інформацією або знаннями про все, що нас оточує. І **основне завдання сучасної електроніки - це створювати різні пристрої для виконання різноманітних операцій з інформацією.**

Із останнього слідує головна відмінність між електрикою та електронікою. **Електрика – розділ науки та галузь практичної діяльності людини, які пов’язані із застосуванням електронних процесів для виробництва, передачі, розподілу та використанням електричної енергії. Електроніка - розділ науки та галузь практичної діяльності людини, які пов’язані з використанням електронних процесів для виконання різних операцій з інформацією або сигналами.** Таким чином, обидва ці розділи ґрунтуються на однакових електронних процесах. Але терміни електрика та електричний відносяться до всіх тих елементів і систем, які «працюють» з електричною енергією. Терміни ж електроніка та електронний охоплює ті елементи і системи, які «працюють» із сигналами та інформацією.

## 2.2 Електромагнітне поле та електромагнітні хвилі

Досліди з передачі сигналів показують, що коли в будь-якому місті простору з’являється носій електричного заряду, то довкола цього заряду з’явиться і електричне поле. Таким чином, **навколо кожного зарядженого тіла у просторі існує своє електричне поле.** Любий новий заряд, поміщений в це поле, не спотворює його, а лише додає до нього своє електричне поле. **Основна властивість електричного поля полягає в тому, що на любе заряджене тіло, розміщене у цьому полі, діє відповідна сила.** Величина та напрям дії даної сили  $\vec{F}$  визначаються основною характеристикою електричного поля – його напруженістю  $\vec{E}$ . При цьому

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}, \quad (2.1)$$

де  $q$  – величина електричного заряду із врахуванням його знаку.

Відзначимо, що у електроніці умовно прийнято позначати електричні величини постійних (незмінних) процесів великими літерами, а величини змінних у часі електричних процесів – малими літерами.

За визначенням, напруженість електричного поля є векторною величиною. При цьому умовно вважають, що **напрямок вектора напруженості завжди направлений від позитивних зарядів до негативних (рис.2.3).** Тому, якщо в електричне поле поміщено тіло з негативним зарядом, то напрям дії сили буде протилежний напрямку вектора напруженості цього поля.

Електричне поле, як правило, пов’язують з нерухомими зарядами. При їх русі у просторі виникає ще один вид матерії, який називають **магнітним полем.** Електричне та магнітне поля тісно пов’язані між собою, можуть перетворюватись одне в одне і є лиш частковими випадками загального єдиного поля, яке називають **електромагнітним.** Таке загальне поле одночасно має в собі і електричне поле, і

магнітне. У багатьох фізичних явищах одну із складових цього поля можна не враховувати. Тоді до уваги беруть лише або електричну складову електромагнітного поля (електричне поле), або магнітну складову (магнітне поле).

**Властивості електромагнітного поля як матеріального об'єкта:**

- виникає при появі у просторі зарядженого тіла;
- поширюється навколо заряду по всьому простору до безкінечності;
- з'являється, розповсюджується і зникає зі швидкістю світла;
- має певну енергію;
- проявляється по силовій дії на поміщені в це поле заряди.

Таким чином, електромагнітне поле не є абстрактним поняттям, введеним для опису електричних і магнітних взаємодій, а представляє собою реальний фізичний об'єкт, який володіє відміченими вище основними властивостями.

Електромагнітне поле з певними властивостями може існувати вже незалежно від зарядів, які його породили. Зокрема, **змінне електромагнітне поле має здатність самостійно розповсюджуватися у просторі у вигляді електромагнітних хвиль** – періодичної зміни (коливань) величини електричного та магнітного поля.. **Швидкість розповсюдження таких електромагнітних хвиль у вакуумі є постійною:  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с.** Частота  $f$  таких коливань в електроніці може змінюватися в дуже широкому діапазоні. При цьому найвищим частотам відповідає світловий діапазон, оскільки світло теж є електромагнітною хвилею. Ще одним параметром електромагнітної хвилі є її **довжина:  $\lambda = c/f$ .**

## 2.3 Електрично заряджені тіла. Два види заряду. Кулон

Таким чином, основою поняття електричного заряду є фундаментальна характеристика елементарних частинок. Атоми різних хімічних елементів складаються із даних частинок, які містять як позитивні (протони ядер), так і негативні (електрони) заряди. **У звичайному стані сумарний негативний заряд електронів кожного атома рівний позитивному заряду ядра (кількість електронів атома рівна кількості протонів в його ядрі).** Оскільки всі матеріальні тіла складаються із даних атомів, то у звичайних умовах у матеріальних тілах величини зарядів різних знаків однакові і говорять що вони взаємно скомпенсовані. Такі тіла називають незарядженими або електрично нейтральними.

Дослід з електризації показує, що в деяких фізичних явищах певна кількість електронів може переходити від одного тіла до іншого. У таких тілах елементарних частинок з електричним зарядом одного знаку може стати більше, ніж елементарних частинок із зарядом протилежного знаку. Тоді говорять, що **відбувається порушення умови електричної нейтральності тіл, і що на тілах появляється не скомпенсований електричний заряд.**

Якщо в тілі електронів на електронних оболонках більше, ніж протонів в ядрах, то говорять, що таке **тіло має надлишок електронів і його називають негативно зарядженим.** У таких тілах надлишок електронів утворився за рахунок їхнього переходу з іншого тіла. Якщо ж у тілі електронів менше ніж протонів (**є надлишок протонів в ядрах**), то тіло називають **позитивно зарядженим.**



Недостача електронів утворилася за рахунок того, що частина електронів вийшла з цього тіла. У результаті певна кількість атомів даного тіла перетворилася на позитивно заряджені іони, які й створюють сумарний позитивний заряд цього тіла.

Для вимірювання величини заряду в системі СІ використовують таку одиницю заряду як **кулон** (позначають Кл). При розміщенні двох тіл із зарядами в 1 Кл на відстані в 1 м, вони взаємодіють між собою із силою в 10 Н.

## 2.4 Носії заряду в електроніці. Вільні та зв'язані носії заряду

**Матеріальне тіло будь-якої природи, яке несе на собі певний не скомпенсований електричний заряд, називають носієм заряду.** Прикладами носіїв електричного заряду є електрон, протон, позитрон, іони, заряджені кластери (частинки речовини розмірами в десятки чи сотні атомів), заряджені кульки, протонні зорі і т.д.

У сучасній електриці та електроніці поняття носія заряду вживають у більш вузькому смислі і називають так лише заряджені об'єкти, які забезпечують протікання різних електричних явищ в різноманітних середовищах. Основними із них є електрони та іони. Електрон - це розглянута вище елементарна частинка. Іон - це атом, від якого забрали або добавили один чи кілька електронів.

Для зручності опису в деяких матеріалах (переважно напівпровідники) формально вводять особливий носій позитивного заряду – **дірки**. Вони не є реальними об'єктами, а лише позначають ті області в атомах речовини, де електрони можуть перебувати, але на даний час відсутні (виникає пусте від електрона місце – дірка).

У русі носіїв заряду в речовинах існує два важливі для електроніки випадки:

- носії, які тісно зв'язані із ядрами атомів і не можуть переміщуватись у просторі на віддалі суттєво більші атомних, називають **зв'язаними** (рис. 2.4).

- носії, які здатні переміщуватися у просторі на віддалі значно більші розмірів атомів, називають **вільними** (рис. 2.4).

У більшості матеріалів та приладів електроніки вільними носіями є лише електрони. Іони в системах електроніки зв'язані між собою у кристалічну решітку речовин і, у більшості випадків, не можуть бути вільними.

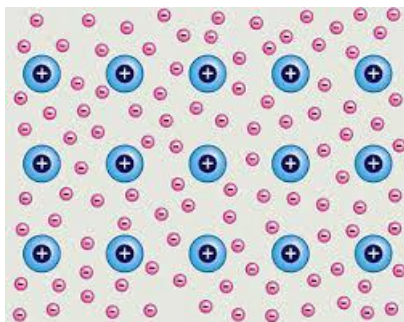


Рисунок 2.4 - Схема атомної будови металів із вільними (рожеві) та зв'язаними (сині області) носіями заряду



### **Завдання для самостійної роботи.**

**Завдання 2.1.** Що є носієм інформації у Wi-Fi каналах зв'язку? З якою швидкістю поширюється такий носій у просторі?. Який приблизно інтервал часу між моментами передачі сигналу космічним центром керування та отриманням цього сигналу штучним супутником Землі?

*Підказки. Згадайте або дізнайтеся, що таке Wi-Fi, та що таке електромагнітна хвиля. Що таке штучний супутник Землі та яка його траєкторія руху? Як відбувається зв'язок зі штучними супутниками та іншими космічними об'єктами?*

**Завдання 2.2.** Яка неточність допущена у формулі (2.1) щодо прийнятих в електроніці умовних позначень.

**Завдання 2.3.** Покажіть на рисунку 2.4 двохмірної кристалічної решітки металу, де знаходяться зв'язані та вільні електрони. Які грубі фізичні помилки допущені на наведеному зображенні?

*Підказки. Згадайте, що таке іонний остов атомів в кристалічних решітках. Як зв'язана концентрація вільних електронів із концентрацією атомів в металах?*

**Завдання 2.4.** Спробуйте зобразити на рисунку в масштабі спрощену модель атома водню, використовуючи умовні розміри ядра ( $10^{-15}$  м), електрона ( $10^{-15}$  м) та радіуса орбіти електрона ( $10^{-10}$  м). Якого розміру аркуш паперу потрібен для цього? Чим заповнений простір у середині такого атома? Чи характерні отримані властивості й для інших атомів нашого матеріального світу?

## **ЗСТОРОННІ СИЛИ ТА ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА**

### **3.1 Сторонні сили. Розділення зарядів**

Вся електрика та електроніка полягає у **керуванні рухом вільних носіїв заряду**. Для здійснення таких процесів застосовують саме електромагнітні поля. Тому в основі електроніки й електрики лежать процеси створення необхідних електромагнітних полів і, особливо, електричних полів.

Ми вже вияснили, що електричні поля створюються зарядженими тілами. Однак, стабільних довготривалих природних джерел великої кількості вільних носіїв заряду в земних умовах не існує. Відповідно, не існує й природних земних джерел тривало діючих електричних полів. Тому на сьогодні основою одержання електричних полів для електроніки є використання сторонніх сил різної неелектричної природи. Такі сили називають електрорушійними силами (ЕРС). Тому електрорушійними називають ті сили, які у певних пристроях (**рис.3.1**) проводять розділення зарядів протилежного знаку, створюючи на одній клемі цих пристроїв надлишок негативного заряду (надлишок електронів), а на

другій клемі – рівний за величиною надлишок позитивного заряду (недостачу електронів). Самі ж такі пристрої для розділення зарядів називають джерелами ЕРС. Джерела ЕРС створюють умови для виникнення електричного струму у пристроях електроніки та надають енергію для такого руху.

Для розділення зарядів обов'язково необхідна наявність певних **початкових природних джерел електричного або магнітного поля**. На сьогодні в якості природного джерела магнітного поля використовують **магнітні матеріали**. У якості ж природних електричних полів застосовують поля, які виникають при тісному контакті між собою двох різних речовин (це джерела термо ЕРС).

### **3.2 Первинні та вторинні джерела ЕРС. Вольт**

Ті джерела ЕРС, які для розділення зарядів використовують різні сили (або енергії) неелектричної природи, називають **первинними джерелами ЕРС**. Основними такими пристроями є: **генератори** (використовують для розділення зарядів механічну енергію), **сонячні батареї** (перетворюють сонячну енергію), **термоелектричні елементи** (перетворюють теплову енергію). До **умовно первинних джерел ЕРС** належать **гальванічні елементи та акумулятори** (використовують хімічні взаємодії для накопичення електричних зарядів на своїх клемках).

Розділення та накопичення зарядів різного знаку на двох полюсах джерел ЕРС означає формування в цих джерелах певної кількості електричної енергії. Тому говорять, що **джерела ЕРС є джерелами електричної енергії**. При цьому **первинні джерела ЕРС забезпечують перетворення інших видів енергії в електричну**.

Крім перерахованих вище первинних джерел ЕРС у сучасній електроніці більш широко використовують **вторинні джерела ЕРС**. Це такі джерела, які **перетворюють електричну енергію одного виду у електричну енергію іншого виду або у енергію необхідного нам сигналу**.

Таким чином, джерела ЕРС мають **дві клемки (або два полюси)**. На одній своїй клемі джерело формує й постійно підтримує надлишок електронів (і відповідно не скомпенсований негативний заряд) за рахунок їх переміщення від другої своєї клемки, де таким чином створюється не скомпенсований позитивний заряд позитивно заряджених іонів. Саме таке розділення зарядів створює у джерелі запас електричної енергії.

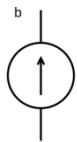
Основним параметром джерел ЕРС є **величина цієї (ЕРС), яка показує, яку роботу може виконати джерело (або яку енергію використовує джерело), переміщуючи 1 Кл електричного заряду від однієї своєї клемки до іншої**. Вимірюють величину ЕРС у вольтах. При цьому одному вольту відповідає така ЕРС джерела, яка при переміщенні по замкнутому електричному колу заряду 1 Кл використовує для цього енергію 1 Дж. Величину ЕРС позначатимемо літерою ***E***.

### **3.4 Джерела сигналів та джерела живлення**

**Якщо джерело ЕРС забезпечує електронну систему лише енергією, то воно називається джерелом живлення.** Ця енергія використовується для забезпечення руху електронів по необхідних елементах електронної схеми. Прикладами джерел живлення є акумулятор, електричний блок живлення комп'ютера або мобільного телефону. **Якщо ж джерело ЕРС забезпечує електронну систему необхідним для нас сигналом, то його називають – джерелом сигналу або генератором сигналу.** Наприклад, генератор гармонічних сигналів, генератор імпульсних сигналів, генератор цифрових сигналів, тактовий генератор тощо.

У більшості літературних джерел з електроніки використовується основне умовне позначення для ідеальних джерел постійної ЕРС, яке наведене на рис. 3.2. Стрілка показує на позитивну клему джерела ЕРС.

Зображення схемних умовних позначень всіх елементів електрики та електроніки строго регламентуються відповідними державними та міжнародними стандартами. Тому при використанні таких позначень у даному посібника ми будемо максимально дотримуватись положень даних документів. Зокрема, для наведеного на рис.3.2 схемного позначення діаметр кола рівний 12 мм (допускається 10 мм). Товщина ліній від 0,2 мм до 0,3 мм. Довжина лінії стрілки - 7 мм, а самої стрілки - 3 мм.



**Рисунок 3.2 - Схемне позначення джерел ЕРС**

Схемні позначення основних компонентів комп'ютерної електроніки наведені в додатку А даного посібника.

### **3.5 Основні типи джерел живлення комп'ютерної електроніки**

Основними типами джерел живлення сучасної комп'ютерної електроніки є такі.

1. Мережі змінного струму.
2. Перетворювачі ЕРС змінного струму в ЕРС постійного струму, наприклад, блоки живлення, «зарядки».
3. Перетворювачі ЕРС постійного струму в ЕРС постійного струму. Їх часто ще називають DC-DC-перетворювачами.
4. Хімічні джерела, до яких відносять гальванічні елементи, гальванічні батареї та акумулятори.
5. Конденсаторні накоплювачі енергії або іоністори.
6. Термоелектричні перетворювачі.
7. Фотоелектричні перетворювачі або сонячні батареї.
8. Інші джерела-перетворювачі енергії (від телефонної лінії; концентратори енергії електромагнітних випромінювань або енергії акустичних хвиль тощо).

### **Завдання для самостійної роботи.**

**Завдання 3.1.** Поясніть відмінності акумулятора мопеда від акумулятора мобільного телефону, які мають однакову величину ЕРС, рівну 6 В. Чому ці акумулятори так сильно відрізняються розмірами?

*Підказки. Згадайте визначення величини ЕРС.*

**Завдання 3.2.** Опишіть процеси, які протікають при явищі електризації двох тіл тертям у термінах електронів та іонів. Чи можна за допомогою такого явища створити джерело живлення для електроніки? Обґрунтуйте свою відповідь.

## 4 ПОНЯТТЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА СИГНАЛІВ

### 4.1 Основні визначення

**Інформація** - це суб'єктивне відчуття співвідношень між реальними об'єктами нашого світу.

Сама по собі інформація – це одна із базових властивостей нашого Всесвіту, таких як тривимірність, розвиток у часі від минулого через теперішній до майбутнього та інші. Основна риса інформації полягає в тому, що вона є нематеріальною властивістю нашого Всесвіту. Вона не має маси, не переносить матеріальну енергію, не відчувається нашими органами відчуттів. Для нас інформація пов'язана лише зі свідомістю людини і основною формою її прояву є різні поняття в нашій свідомості.

Первинна інформація у нашому матеріальному світі закладена лише в живих організмах, у діяльності яких вона відіграє надзвичайну роль. Звідки насінника рослини знає, коли їй проростати; звідки вона знає, що корінь слід пускати вниз у землю, а стебло – вгору до Сонця; звідки вона знає, що вона є зерниною пшениці, а не соняшника? Вона знає про це тому, що в ній закладена інформація про все це.

**Знання** - основна форма прояву інформації в діяльності людини. Таким чином знання - це певна частка інформації про той або інший об'єкт нашого світу. Тому, за самим простим визначенням – інформація, це знання когось про щось у нашому світі. Відповідно поняття "інформація" та "знання" дуже близькі.

У нашому матеріальному світі людина володіє незначною частиною інформації Всесвіту у вигляді всіма набутими людством знаннями. Тварини володіють мінімумом інформації Всесвіту та незначними набутими знаннями.

При цьому знання, як і інформація, є нематеріальним проявом властивостей нашого світу.

**Повідомлення** – інформація, перенесена на певний матеріальний носій.

**Носій інформації** - будь-який матеріальний об'єкт, параметри якого змінюються відповідно до змісту накладеної на нього інформації.

Основні носії інформації та їх параметри в комп'ютерній електроніці та комп'ютерних системах.

1. Електричне поле (різниця потенціалів, напруга). Такі носії забезпечують обробку інформації в усіх електронних компонентах комп'ютерів, збереження

інформації у флеш-пам'яті, передачу інформації в електричних та оптичних каналах зв'язку.

2. Магнітний матеріал (напруженість магнітного поля). Ці носії переважно використовують для збереження інформації на магнітних дисках та магнітних стрічках.

3. Оптичний матеріал (оптичне відбивання чи пропускання). Такі носії застосовують для збереження інформації на оптичних дисках.

**Дані** - певним чином представлена інформація на певному матеріальному носії для використання людиною або технічними пристроями та системами.

**Сигнал** – матеріальний процес, який забезпечує проведення різноманітних операцій з інформацією.

Існує постійний обмін інформацією між різними об'єктами нашого світу. Такий обмін інформацією в нашому світі проходить за допомогою матеріальних носіїв. Двома основними матеріальними формами передачі інформації є саме повідомлення та сигнали. У випадку спілкування людей обмін інформацією проходить переважно за допомогою повідомлень. У технічних системах такий обмін відбувається переважно за допомогою сигналів.

**Модуляція** – процес накладання інформації на носій з метою формування сигналу. Зворотній процес називається **демодуляцією**.

Приклад: я подивився у вікно і побачив, що погода хмарна. У моєму мозку виникла і зберігається нематеріальна інформація про сьогоднішню погоду у вигляді одного поняття: «хмарно». Але щоб передати цю нематеріальну інформацію або ці знання іншим людям, я вже маю використати відповідне матеріальне повідомлення. Зокрема, я можу надіслати це повідомлення вам звуками «хмарно». При цьому я здійснюю модуляцію коливань повітря своїми голосовими зв'язками, тим самим накладаючи на ці коливання інформацію. Теж повідомлення я можу написати на дошці «хмарно». Цим самим я накладаю свої нематеріальні знання на матеріальний носій-дошку, здійснюючи модуляцію її кольору крейдою.

У процесі передачі сигналів (або інформації) беруть участь три об'єкти:

- **джерело сигналів** (інформації);
- **канал (або лінія)** передачі сигналів (інформації);
- **приймач сигналу** (інформації).

Сигнали є корисними процесами, які несуть неспотворену інформацію. Одночасно влюбій електронній системі діють шуми та завади. Це такі матеріальні процеси, які спотворюють та руйнують інформацію.

**Шуми** - це електричні процеси, які, як правило, виникають у самій електронній системі.

**Завади** - це електричні процеси, які привносяться в дану електронну систему від оточуючих сторонніх об'єктів.

Основний метод більшості дій з інформацією людиною зв'язаний з використанням певної людської мови (внутрішньої, усної, писемної). Сама **мова** є сукупність знаків та правил побудови мовних сигналів.

Важливе завдання при «спілкуванні» людини з технічними системами полягає в перетворенні людських мовних повідомлень та сигналів в електричні і навпаки. Такі процеси називають **кодуванням та декодуванням**.

Перетворення людських мовних повідомлень в електричні сигнали здійснюються не напряму, а за допомогою математичних «посередників». Основою для них є **двійкова система числення**.

Головні етапи перетворення мовних повідомлень та сигналів в електричні та навпаки.

1. Кожний знак мови замінюється математичним **двійковим кодом** відповідно із встановленими **кодовими таблицями**. У результаті кожному знаку людської мови відповідає певна **кодова комбінація** двійкових цифр. Наприклад, літері А відповідає кодова комбінація 10110010. Кількість цифр  $n$  у кодовій комбінації називають **розрядністю коду**. Зокрема, наведений код для літери А є 8-розрядний, тобто він має 8 двійкових розрядів.

2. Всі чисельні величини, які підлягають інформаційній обробці, виражаються у двійковій системі числення.

3. Сформоване повідомлення у вигляді послідовності двійкових кодових комбінацій перетворюють в електричний цифровий сигнал. Для цього, наприклад, значенню кожної цифри «0» двійкового коду кладуть у відповідність імпульс напруги малої величини. Значенню ж кожної цифри «1» двійкового коду кладуть у відповідність імпульс напруги великої величини.

## 4.2 Носії сигналів та сигнали комп'ютерних систем

В різних областях діяльності людини для отримання, передачі, і обробки інформації використовуються різні матеріальні носії повідомлень, а відповідно і інформації. Такі носії можуть бути самими різними: папір (для тексту або малюнку), феромагнітна плівка, лазерний диск, механічні коливання пружного середовища, електричний струм, електромагнітні хвилі і багато інших. Всі можливі носії повідомлень, параметри яких змінюються відповідно до змісту повідомлень, називають сигналами в широкому сенсі слова. У вузькому сенсі слова в електроніці під сигналами розуміють лише коливання струму або напруги та електромагнітні хвилі, які поширюються в певному середовищі чи в просторі і несуть певне повідомлення. Надалі поняття сигнал ми будемо розуміти лише у вузькому сенсі, оскільки сам такі сигнали характерні для електронних інформаційних систем.

Технічні електронні інформаційні системи використовують три основні види електричних сигналів: аналогові, імпульсні, та цифрові (рис.4.1).

Аналогові електричні сигнали – це неперервні зміни електричної напруги з часом. Назва аналоговий походить від того, що такі сигнали часто є **аналогами** реального процесу в нашому матеріальному світі, наприклад, неперервної зміни температури протягом доби. Пристрої електроніки, які виконують різні операції з такими сигналами, називають аналоговими пристроями.

Імпульсні (або дискретні) електричні сигнали – це зміни електричної напруги у вигляді окремих дискретних імпульсів, форма та амплітуда яких може бути різною.

Цифрові сигнали, це імпульсні сигнали, у яких амплітуда імпульсів може приймати обмежені значення в чітко визначених межах. Форма ідеальних імпульсів

цифрових сигналів завжди прямокутна. При цьому цифровим сигналам завжди можна поставити у відповідність математичний двійковий код.

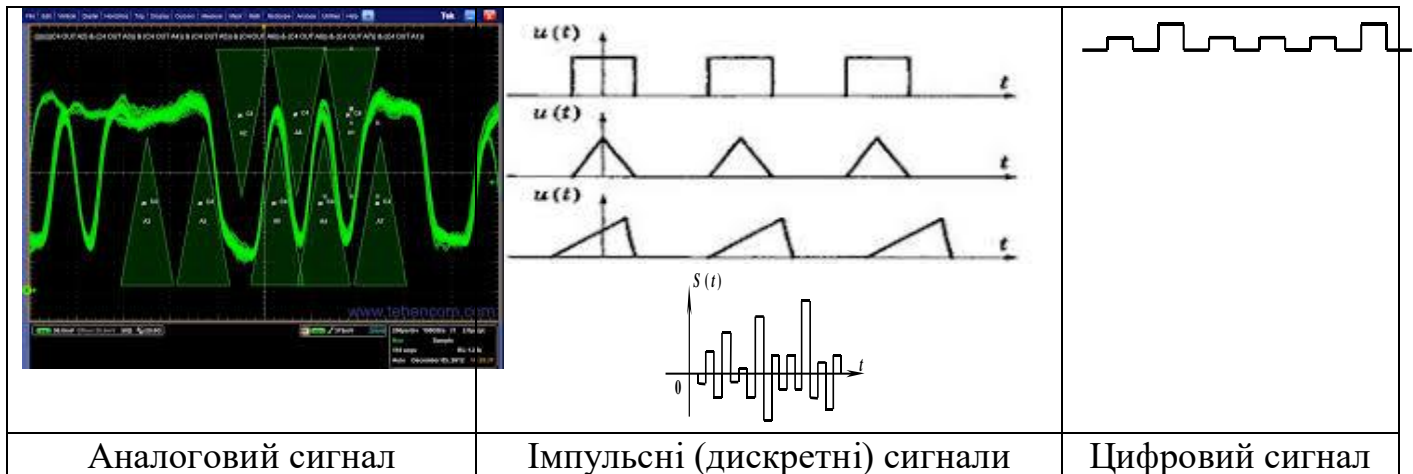


Рисунок 4.1 - Осцилограми (форми) різних сигналів

### 4.3 Переваги цифрових сигналів – основа комп'ютерних системи

Для визначення переваг цифрових сигналів, порівняємо їх із двома іншими основними типами сигналів

Аналогові	Імпульсні	Цифрові
Точність відображення інформації		
Дуже виска	З точністю до величини кроку квантування при дискретизації інформації	
	Крок обмежується роздільною здатністю імпульсних пристроїв	Крок обмежується максимальною розрядністю кодових комбінацій
Точність виконання функцій та операцій перетворення інформації		
Досить обмежена за рахунок сильного впливу зовнішніх умов, шумів та завад	Значно вища стійкість до впливу зовнішніх умов, шумів та завад	Максимальна точність виконання операцій
Швидкодія		
Максимальна швидкодія, оскільки безпосередньо обробляють інформацію	При однаковій елементній базі поступаються аналоговим пристроям. При спеціалізованій елементній базі зрівнюються з ними.	За рахунок надвисоких тактових частот та багатоканальних сучасних систем швидкодія порівняна з аналоговими системами
Завадостійкість		
Низька	Середня	Максимально можлива
Уніфікація		
Дуже низька, оскільки для	Середня	Висока за рахунок



кожної функції потрібна своя мікросхема. Самі мікросхеми кожного типу можуть будуватися на різних принципах		використання лише кількох базових логічних елементів, побудованих на одному типі транзисторів
<b>Використання спеціалізованих мікросхем</b>		
При використанні мікросхем доводиться вводити багато навісних елементів (резистори, конденсатори та інше) зовнішньої комутації	Кількість зовнішніх навісних елементів невелика	Навісних елементів дуже мало
<b>Збереження інформації</b>		
Вимагають створення спеціальних пристроїв зберігання інформації		Є широкий набір простих пристроїв постійної та динамічної пам'яті
<b>Масогабаритні показники</b>		
Великі	Середні	Малі габарити й маса
<b>Надійність</b>		
Низька	Середні	Висока
<b>Вартість</b>		
Висока	Середня	Низька
<b>Основні галузі застосування</b>		
Радіо, телебачення, зв'язок, вимірювальна техніка, побудова техніка. Витісняється все більше цифровою технікою.	Телебачення, радіолокація, релейні системи керування, джерела живлення. Найменш поширені.	Найбільш широке застосування у всіх галузях.

#### 4.4 Форми представлення сигналів

Представленням сигналу (або носія) називається його вираження в певній формі, зручній для сприйняття людиною при вивченні та дослідженні сигналів. Будь-яке представлення є абстракцією або моделлю, при якій багато особливостей реального процесу не враховується. Наприклад, у більшості випадків представлення сигналів мають нескінченну тривалість і енергію, у той час як реальні сигнали завжди мають обмежену тривалість і обмежену енергію. Це обумовлено тим, що представлення обмеженого в часі реального сигналу є набагато складнішим.

Основними представленнями сигналів є.

1. Реальне зображення сигналу у просторово-часовому представленні. Прикладом є спостереження оптичної моди в опто-волоконних системах зв'язку та обробки інформації (рис.4.2).

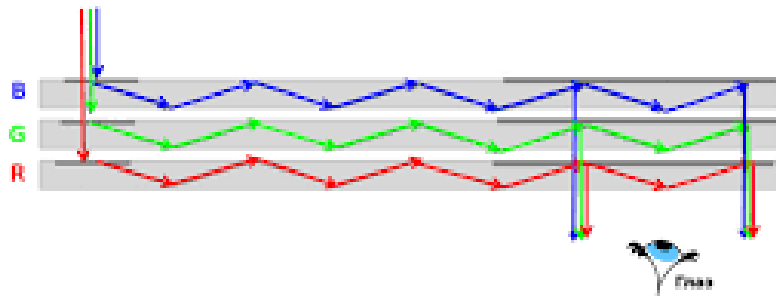


Рисунок 4.2 - Спостереження оптичних мод в оптичному волокні

2. Часове представлення у вигляді математичного аналітичного виразу – функції сигналу. Таке представлення застосовують для детального теоретичного вивчення сигналів. Наприклад математична функція  $S(t) = S_0 \exp(-t)$  визначає миттєві значення сигналу в будь-який момент часу  $t$ . У більшості випадків значення функції  $S(t)$  вимірюється у вольтах або амперах.

3. Часове графічне представлення або осцилограма сигналу (рис.4.1). Осцилограми сигналів часто знімають на різних ділянках електронних схем при їх експериментальних дослідженнях.

4. Частотне представлення або спектр сигналу. У даному представленні сигнал задають як математичну суму ряду спеціальних функцій (як правило, гармонічних). При цьому величини частот окремих членів цього ряду лежать у певному інтервалі (діапазоні)  $F$ , який називають шириною спектрального діапазону. Для дослідження частотних представлень сигналів використовують спеціальні прилади – аналізатори спектру.

#### 4.5 Еталонні сигнали в комп'ютерній електроніці

У процесі досліджень різних електронних систем часто використовують еталонні або пробні сигнали.

Найбільш вживаними еталонними сигналами є:

1. Гармонічний сигнал - змінний електричний процес, який математично описується у виді гармонічних коливань (за законом синуса або косинуса):  $S(t) = S_0 \sin(\omega t + \varphi_0)$ .

Параметри гармонічного носія:  $S_0$  - амплітуда;  $\nu$  – частота або період  $T = 1/\nu$ ;  $\omega = 2\pi\nu$  – кругова частота;  $\varphi_0$  – початкова фаза;  $\varphi(t) = (\omega t + \varphi_0)$  - загальна фаза. Всі ці величини є параметрами гармонічного носія, які можуть бути використані для формування сигналу.

2. Сигнал включення  $\sigma(t)$  (одиничний скачок).  $\sigma(t) = 0$  при  $t < 0$  і  $\sigma(t) = 1$  при  $t \geq 0$  (рис.4.3а). Еквівалентним є і сигнал виключення із спадаючою «ступенькою».

3. Лінійно наростаючий сигнал:  $S(t) = 0$  при  $t < 0$  і  $S(t) = at$  при  $t \geq 0$  (рис.4.3б).

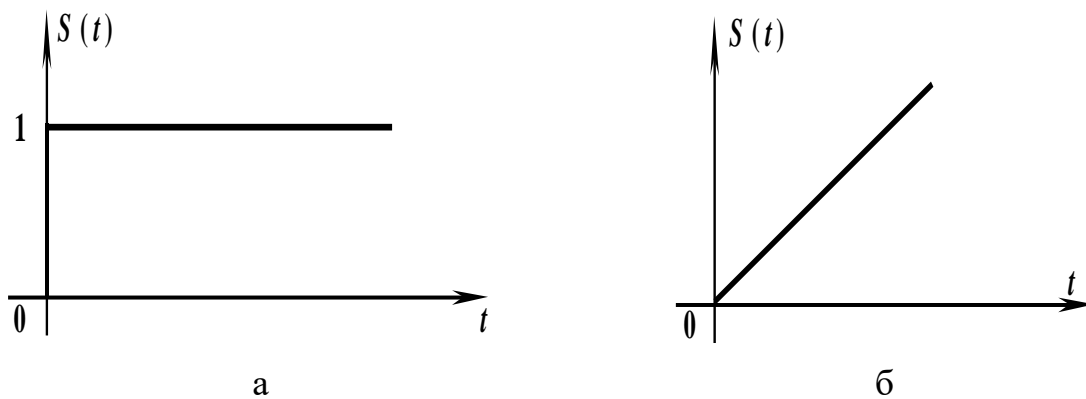


Рисунок 4.3 - Осцилограми сигналу включення (а) та наростаючого сигналу (б)

4. Імпульс у вигляді дельта-функції (імпульс Дірака)  $S(t) = \delta(t - t_0) = 0$  при  $t \neq t_0$  і  $S(t) = \delta(t - t_0) = \infty$  при  $t = t_0$ . Крім того, при заданні такого сигналу, потрібно обов'язково враховувати умову нормування дельта-функції  $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1$ .

5. Плоска гармонічна електромагнітна хвиля інтенсивністю  $I$  з періодом  $T$ , довжиною хвилі  $\lambda$  та швидкістю її поширення  $c$ . При цьому  $\lambda = cT$ .

#### 4.6 Імпульсні цифрові носії сигналів як основа комп'ютерної електроніки

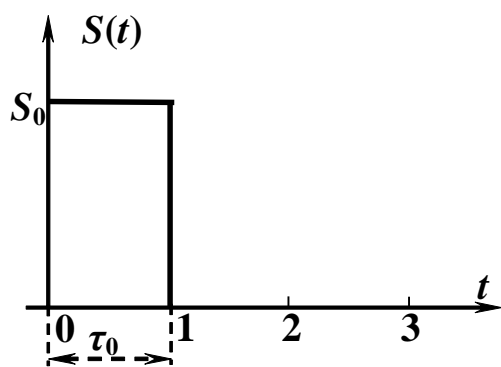
Основою таких сигналів є одиночний прямокутний імпульс струму або напруги (рис.4.4), який математично задається функцією форми імпульсу  $S(t) = \begin{cases} S_0 : 0 \leq t \leq \tau_0; \\ 0 : t < 0, t > \tau_0 \end{cases}$ . Функція форми імпульсу визначає всі його властивості.

Найбільш вживаною є функція прямокутної форми одиночного імпульсу. Основними параметрами даного імпульсу є його амплітуда  $S_0$  і тривалість  $\tau_0$ .

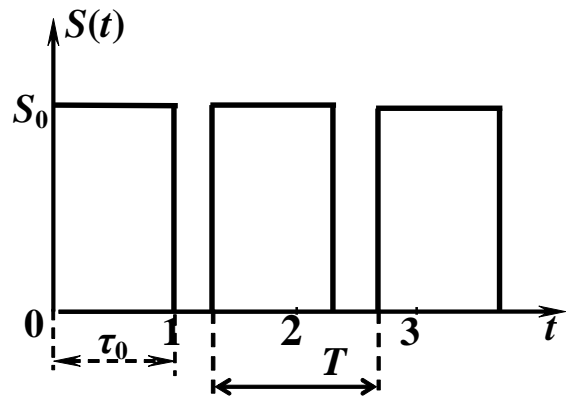
Більш складні імпульсні носії являють собою слідувачі один за одним одиночні прямокутні імпульси з періодом слідування  $T$ . Такі сигнали описуються функцією  $S(t) = \begin{cases} S_0 : (0 \pm nT) \leq t \leq (\tau_0 \pm nT); \\ 0 : (\tau_0 \pm nT) < t < \pm(n+1)T \end{cases}$ , де  $n = 0, 1, 2, \dots$  (рис.4.4).

Іноді в якості імпульсних носіїв використовують і імпульси іншої форми, наприклад трикутної чи трапецевидної. Такі носії описуються такими ж параметрами, як і прямокутні імпульси.

Важливими параметрами імпульсних сигналів є також частота їх слідування  $\nu = 1/T$  та шпаруватість  $\Delta = (T - \tau_0)/T$ . Величина  $\Delta$  змінюється у граничних межах від нуля (випадок відсутності імпульсного сигналу) до одиниці (імпульсний сигнал у вигляді періодичної послідовності імпульсів Дірака).



а



б

Рисунок 4.4 - Осцилограми носіїв сигналів у вигляді одиночного імпульсу (а) та у вигляді періодичної послідовності імпульсів з періодом слідування  $T$  (б)

До розглянутих вище величин слід додати ще кілька загальних параметрів цифрових сигналів.

Тривалість всього сигналу  $\tau$ .

Перевищення сигналу над завадою  $D = 10\log(P_{\text{сг}}/P_{\text{зв}})$ , де  $P_{\text{сг}}$  – середня потужність сигналу,  $P_{\text{зв}}$  – середня потужність завади.

Добуток трьох параметрів сигналу  $\tau$ ,  $F$  і  $D$  називають об'ємом сигналу  $V = \tau FD$ .

### Завдання для самостійної роботи.

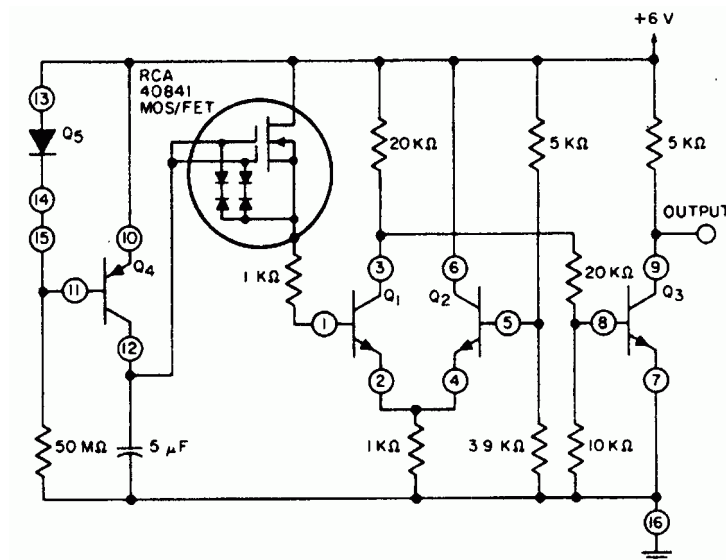
## 5 ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОННІ КОЛА

### 5.1 Електронні елементи або компоненти та електронні кола

**Електронний елемент (схемний елемент) або компонент** – електричний або електронний **прилад чи деталь**, який виконує певну функцію з обробки електричного струму або сигналів і призначений для **об'єднання з іншими** схемними елементами.

Окремі електронні компоненти з'єднують між собою за строго визначеними правилами в замкнуті ланцюжки, які називають електричними або **електронними колами**. Окремі частини таких з'єднань називають **ділянками електронних кіл**.

Приклад електричних кіл, ділянок кіл та електронних компонент сучасної електроніки наведено на **рис.** Завершений пристрій із електронних компонентів, які з'єднані між собою певним чином у єдину систему, яка призначена для виконання заданих операцій над сигналами, називають **електронною схемою**. Зокрема, наведена на рис. електронна схема описує генератор імпульсних сигналів. Тобто, функцією цієї схеми є генерація окремих прямокутних електричних імпульсів.



## 5.2 Друкована плата

Поеднання окремих компонентів електронної схеми між собою здійснюється на певній несучій основі, наприклад на тонкій пластині діелектрика, виготовленій за певною технологією. Таку пластину називають **друкованою платою**. Крім того, компоненти схеми знаходяться в певному оточуючому середовищі (як правило, **повітря**). Властивості несучої основи та оточуючого середовища суттєво впливають на експлуатаційні параметри та характеристики електронних схем, зокрема на максимальні робочі напруги, діелектричні втрати, рівень завадостійкості, стійкість до механічних навантажень та вібрацій, тепловіддача, тощо. Крім того, зі зміною властивостей оточуючого середовища змінюються і характеристики самої електронної схеми. Всі такі дії оточуючого середовища на електронну схему враховуються шляхом встановлення **граничних експлуатаційних умов, в межах яких схема може працювати тривалий час і забезпечувати при цьому задані параметри вихідного сигналу**. Основними із таких експлуатаційних умов для переважної більшості електронних схем є:

- тип кліматичного виконання (наприклад, для роботи в приміщеннях чизовні);
- діапазон робочих температур;
- діапазон вологості оточуючого повітря;
- механічні навантаження при вібраціях і прискореннях.

## 5.3 З'єднувальні провідники та шини

Поеднання окремих компонент між собою в електронну схему здійснюється **з'єднувальними провідниками**. Вони забезпечують такі основні функції:

- електричне з'єднання відповідних виводів окремих компонент між собою;
- передачу сигналів між окремими компонентами схеми;
- передачу потужності джерела живлення компонентам схеми.

Якщо до одного і того ж провідника підключають багато електронних компонент схеми, то його називають шиною.

Для хорошої роботи електронної схеми з'єднувальні провідники і шини мають задовольняти ряд умов. Основна із них – це **низьке значення опору**. В ідеальному випадку у процесі аналізу електронних схем він **вважається рівним нулю**. Дана умова забезпечує безперешкодне протікання вільних носіїв заряду по провідниках. Для того, щоб реальні з'єднувальні провідники та шини наближалися до цієї умови, вони мають мати такі параметри:

- площа їх поперечного перерізу повинна відповідати тій сумарній величині зарядів, які переміщуються в даному провіднику;
- електромагнітним випромінюванням від провідників та шин в усьому діапазоні робочих частот електронної схеми можна нехтувати;
- довжина з'єднання компонент провідниками має бути мінімальною.

## 5.4 Шина живлення та загальна шина

На рисунку можна бачити ще один можливий **варіант позначення джерела живлення** на кресленнях електронних кіл. Разом із цим позначенням пов'язані два важливі елементи електронних схем.

1. Загальний для всієї схеми провідник, через який подається енергія живлення до всіх компонентів схеми, називається **шиною живлення**. На рис. він розміщений зверху схеми і під'єднує ЕРС +6 В до необхідних кіл схеми.

2. **Загальна шина** - це спільний для всієї схеми провідник, на якому електричний потенціал вважається рівним 0 В. На схемах ця шина позначається, як правило, спеціальними значками "корпус" або "заземлення". На рис. він розміщений знизу схеми. Відносно загальної шини на схему подається живлення. Крім того, ця шина є однією із клем для вхідних та вихідних сигналів, з якими працює дана схема. Зокрема, на рис. вихідний сигнал "output" утворюється між позначеною цим словом клемою та загальною шиною.

## 5.5 Джерела енергії та навантаження в схемах

Переважна більшість електронних схем не може працювати без відповідного джерела живлення. Дані джерела виконують **три основні функції**: 1. Забезпечують встановлення робочих режимів різних компонентів електронної схеми. 2. Передають свою енергію сигналам, з якими працює електронна схема. 3. Компенсують втрати електричної енергії в усіх компонентах електронної схеми.

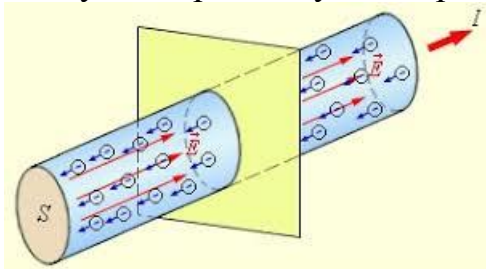
Більшість сучасних електронних схем використовують для своєї роботи джерела живлення із постійною ЕРС (гальванічні елементи і батареї, акумулятори, блоки живлення постійним струмом).

Таким чином, джерела живлення є постачальниками електричної енергії, яка необхідна для роботи всіх компонентів електронної схеми. Тому всі компоненти електронної схеми є споживачами електричної енергії від джерела живлення. Любий такий компонент, який споживає електричну енергію, **називають навантаженням**.

## 5.6 Найпростіше замкнене електричне коло

Найпростіше замкнене електричне коло (рис.) містить у собі джерело енергії (наприклад, джерело живлення у вигляді акумулятора) та певний споживач цієї енергії - навантаження (наприклад, електричну лампочку), сполучені між собою провідниками.

Оскільки в джерелах живлення на клеммах формуються електричні заряди протилежних знаків, то в замкненому колі електрони від клем, де є їх надлишок, починають переміщатися по провідниках і через навантаження до клем, де є недостача електронів. У результаті в замкненому електричному колі виникає направлене (від однієї клем до іншої) переміщення електричних зарядів (як правило, електронів) (рис.). Таке явище направленого впорядкованого переміщення вільних носіїв заряду називають електричним струмом. Тому говорять, що у замкненому електричному колі протікає електричний струм.



## 5.7 Густина та сила струму. Напрямок струму

Основними кількісними характеристиками електричного струму є сила струму  $\vec{I}$  та його густина  $\vec{j}$ . Ці величини є векторами (так, як і механічна сила), оскільки сам електричний струм є направленим переміщенням зарядів, тобто має напрям. Сила струму задає величину електричного заряду, який переносять його носії (електрони) за одиницю часу через всю площину поперечного перерізу провідника площею  $S$ . (рис.). Густина ж струму рівна величині заряду, який проходив би за одиницю часу через площину поперечного перерізу цього провідника одиничної площі. Очевидно, що  $\vec{I} = \vec{j} \cdot S$ . Слід чітко розділяти два поняття: "електричний струм" та "сила струму". Перше позначає саме явище направленого переміщення носіїв заряду. А друге характеризує інтенсивність такого переміщення, тобто вказує на кількість тих зарядів, які протікають по електричному колу.

Оскільки сила та густина струму є векторними величинами, то для них слід вказувати і напрямки. За напрям струму (а відповідно і напрям векторів  $\vec{I}$  та  $\vec{j}$ ) прийнято брати напрям руху позитивно заряджених носіїв заряду, тобто напрям - протилежний напрямку руху електронів в електричному колі. У результаті при аналізі електричних кіл вважають, що в них струм тече від позитивного полюса джерела ЕРС до негативного. Усередині ж джерела ЕРС струм тече навпаки від негативного електрода до позитивного.

Величина сили струму в системі СІ вимірюється в амперах (А), а густина струму в А/м<sup>2</sup>. Зокрема, сила струму в 1 А відповідає такому випадку, коли за 1



секунду через всю площину поперечного перерізу провідника з площею  $S$  проходить сумарний заряд, рівний 1 Кл.

### 5.8 Умови виникнення електричного струму

Виходячи з приведеного визначення електричного струму слідує, що його виникнення можливе при одночасному виконанні **двох основних умов**:

1. Необхідна **наявність вільних носіїв зарядів** у всіх компонентах електронної схеми. Для існування реальних струмів в сучасній електроніці кількісним критерієм є концентрація вільних носіїв  $n > 10^{13}$  носіїв/см<sup>3</sup>. Для матеріалів електроніки це відповідає присутності більше одного вільного електрона приблизно на один мільярд атомів.

2. Створено або існують необхідні **джерела ЕРС**, які стимулюють і підтримують направлене переміщення вільних носіїв заряду по електричному колу.

### 5.9 Електричний опір електронних компонентів. Напруга

Для протікання електричного струму по електричному колу джерело живлення постійно надає електронам свою енергію. Ці електрони проходять через електронні компоненти-навантаження. Кожне навантаження чинить певну **протидію** руху електронів по ньому. Властивість такої протидії електронного компонента називають **електричним опором**. Величину цього опору зазвичай позначають як  $R$ .

Таким чином, при протіканні електричного струму енергія джерела живлення витрачається носіями на подолання опору компонентів електричної схеми. Енергія електричного струму, яка витрачається при його протіканні через будь-яке навантаження називається **напругою** (або спадом напруги) на навантаженні. Важливо відмітити, що напруга на навантаженні з'являється лише тоді, коли через це навантаження протікає електричний струм.

Одиницею вимірювання напруги в системі СІ є 1 В.

### 5.10 Три види матеріалів електроніки. Провідники, напівпровідники, діелектрики

Матеріальною основою сучасної електроніки є тверді тіла. Для нас важливим є основний критерій поділу матеріалів на вказані три класи – їх здатність проводити електричний струм. Вже перші досліди з електрикою дали змогу розділити всі тверді тіла на два великі класи:

- хороші провідники струму – метали;
- погані провідники струму – діелектрики (ізолятори).

Пізніше було виявлено велику групу речовин, які займають проміжне положення по своїй здатності проводити електричний струм. Цю групу речовин було названо напівпровідниками.

## 6 НАПІВПРОВІДНИКИ – ОСНОВА СУЧАСНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

### 6.1 Кристалічна ґратка та вільні носії заряду власних напівпровідників

**Напівпровідники - це матеріали**, електрична провідність яких може змінюватися в дуже широких межах у залежності від умов їх синтезу та при дії на них різних зовнішніх чинників.

Провідність напівпровідників зумовлюється **двома типами вільних носіїв: електронами та дірками**.

Будова кристалічної ґратки напівпровідників відповідає матеріалам із ковалентним типом хімічних зв'язків між атомами. На рис.4.3 та 4.4, як приклад, приведено двохмірну модель кристалічної ґратки типового напівпровідника Si без домішок. Такі напівпровідники називаються власними (або нелегованими). Зокрема кожен атом кремнію містить 14 електронів: 2 електрони розміщуються на  $1s$  оболонці, 2 – на  $2s$  оболонці, 6 – на  $2p$  оболонці, 2 – на  $3s$  оболонці і 2 – на  $3p$  оболонці. У цих кристалічних ґратках взаємодія атомів проходить таким чином, що електрони зовнішніх  $3s$  та  $3p$  оболонок кожного атома за рахунок гібридизації утворюють чотири еліптичні гібридні  $sp$ -орбіталі, на кожній із яких, згідно із принципом Паулі, може розміщуватися по два електрони із протилежними спінами (рис.4.3). При утворенні кристалічної ґратки кожен її атом немовби доповнює свою зовнішню гібридну  $sp$ -оболонку до 8 електронів, що відповідає повному заповненню енергетичних рівнів у валентній зоні. Для послідувочої ж зони провідності, сформованої  $3d$ -станами атомів не лишається жодного електрона і її енергетичні рівні лишаються повністю незаповненими.

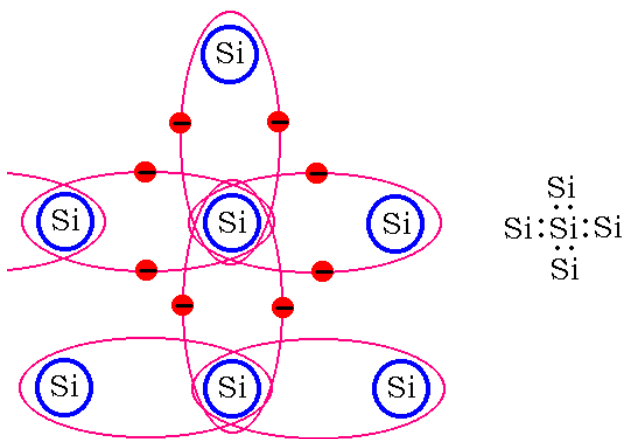


Рис.4.3. Схема формування спільних орбіт між атомами в кристалічній ґратці Si

Спільні орбіти, які зв'язують між собою атоми в кристалічних ґратках Si, утворюють так звані ковалентні хімічні зв'язки. При температурах, близьких до абсолютного нуля, всі електрони зв'язані з атомами і в напівпровідниках немає вільних носіїв заряду. Відповідно, при низьких температурах поведінка власних напівпровідників є типово діелектричною.

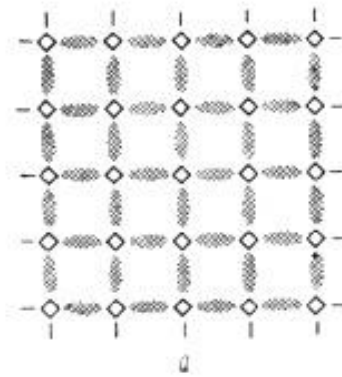
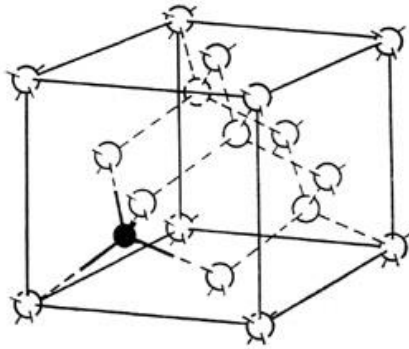


Рис.4.4. Реальна кристалічна гратка Si та її модель

У енергетичному спектрі нелегованого кремнію є дві зони, енергетичні рівні яких дозволені для розміщення на них електронів: нижня – валентна зона та верхня – зона провідності. Між цими двома дозволеними зонами лишається заборонена зона (зона енергетичних рівнів, на яких електрони розміщуватися не можуть) із шириною  $\Delta E_g = 1,15$  еВ (в германію  $\Delta E_g = 0,74$  еВ). У цілому ж, до класу напівпровідників відносять матеріали, які мають зонну будову енергетичного спектру, приведену на рис.4.5, і в яких умовно ширина забороненої зони  $0 < \Delta E_g < 2$  еВ. Ширина забороненої зони власних напівпровідників є їх важливим параметром, який у значній мірі визначає багато їх властивостей.

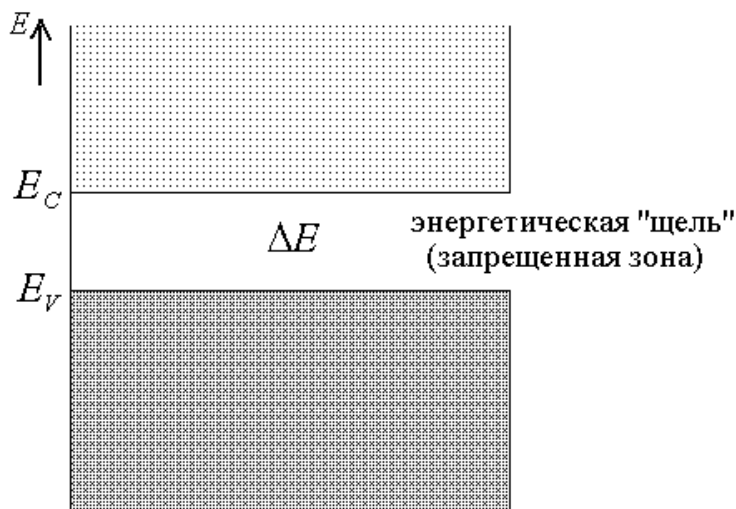


Рис.4.5. Зонний енергетичний спектр власних напівпровідників та діелектриків

У власних напівпровідниках при низьких температурах вся валентна зона заповнена електронами, а зона провідності повністю пуста. Тому у кристалічній гратці даних матеріалів практично нема вільних електронів.

При температурах 300 – 400 К частина електронів валентної зони за рахунок теплової енергії може переходити у зону провідності. У результаті у кристалічній гратці власних напівпровідників у таких умовах певна кількість електронів покидає свої орбіталі біля атомів і такі електрони стають вільними. Одночасно на орбіталах, з яких «вийшли» електрони, лішаються незайняті місця, які називають дірками. Таким чином, при кімнатних температурах у власних напівпровідниках є певна

концентрація  $n_0$  вільних електронів та вільних дірок  $p_0$ . При цьому виконується закон  $n_0 = p_0$ . Але величина цих концентрацій для кремнію, у залежності від ступеня очистки складає  $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . При таких концентраціях вільних носіїв заряду матеріал кремнію є дуже слабо провідним і його швидше можна вважати діелектриком. Тому власні напівпровідники у електроніці практично не використовуються.

## **6.2 Кристалічна ґратка та зонний енергетичний спектр легованих напівпровідників**

Напівпровідникові матеріали в електроніці використовують не в чистому вигляді, а після їх легування, тобто контрольованого введення в базову кристалічну ґратку фіксованої кількості атомів інших хімічних елементів – домішок. Додавання малої кількості інших атомів в ідеальну кристалічну ґратку робить різкі зміни в його електричних властивостях. Тому при виробництві напівпровідників легування полягає в інтенсивному введенні домішок у власний напівпровідник з метою змін його електричних властивостей. Легований матеріал відносять до невласних (або домішкових) напівпровідників, якщо кількість домішок невелика. Напівпровідник, легований до такого високого рівня, що він діє вже більше як провідник, відносять до вироджених напівпровідників.

Процес легування проводять шляхом нанесення деякої кількості легуючого матеріалу на поверхню кремнію (рис.). Після цей зразок відпалюють у вакуумі при високих температурах. У результаті атоми домішки проникають в кремнієвий кристал і ми отримуємо легований напівпровідник. Кремній може бути легований двома найбільш важливими матеріалами: бором і фосфором. Іншими матеріалами є також алюміній, індій, миш'як і сурма.

## **6.3 Легування n-типу**

Для прикладу розглянемо введення в ідеальну ґратку кремнію атомів сурми (або іншого елементу 5 групи таблиці Менделєєва). Ці атоми мають на зовнішній оболонці п'ять електронів. Чотири із них беруть участь у створенні ковалентних зв'язків при ув'язуванні атома Sb у кристалічну ґратку Si, а п'ятий електрон лишається надлишковим (рис.4.7). Особливістю цього електрона є те, що він набагато слабкіше зв'язаний із своїм атомом. І при наданні йому незначної теплової енергії він легко відривається від свого атома і стає вільним. Домішкові атоми, які здатні легко віддавати свої електрони у напівпровіднику називають донорними домішками, або донорами.

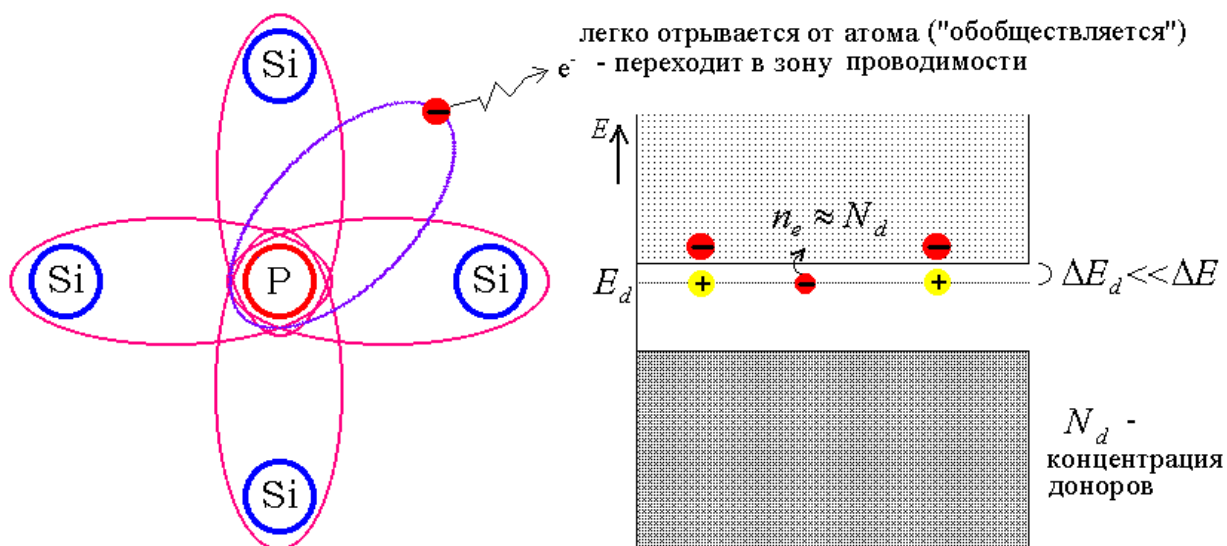


Рис.4.7. Двовимірна модель кристалічної ґратки та зонний енергетичний спектр електронів напівпровідника з донорними домішками

Домішки порушують у локальних місцях строгу періодичність кристалічної ґратки і зумовлюють появу на енергетичному спектрі додаткових рівнів. При цьому концентрація домішок має бути настільки малою, щоб практично не змінювати структуру вихідної кристалічної ґратки. В більшості випадків концентрацію домішки обмежують величиною  $\sim 0,01\%$ . Тобто, навіть у сильно легованому напівпровіднику на один атом домішки припадає більше 1000 атомів основної речовини.

Процеси в напівпровідниках з донорними домішками описуються своєю зонною будовою енергетичного спектру (рис.4.8). Оскільки структура кристалічної ґратки практично не змінилася, то основа такого зонного спектру відповідає власному напівпровіднику. Введенню у ґратку донорних домішок на зонному спектрі відповідає поява енергетичних рівнів  $E_D$ , які розміщені в забороненій зоні досить близько до дна зони провідності. Відповідно, кількість енергетичних рівнів  $E_D$  рівна кількості атомів домішки у зразку. На цих енергетичних рівнях  $E_D$  і розміщуються “п’яті”, особливі, слабо зв’язані електрони атомів сурми. Глибина залягання донорних рівнів відносно дна зони провідності для кристалів германію складає  $\sim 0,01$  еВ; а для кристалів кремнію  $\sim 0,05$  еВ. Такого типу домішкові напівпровідники називають донорними або напівпровідниками *n*-типу.

## 6.4 Легування р-типу

Розглянемо тепер інший випадок, коли кремній легують атомами бору (або іншими елементами 3 групи таблиці Менделєєва). Зовнішня електронна оболонка цих елементів має лише три електрони. І всі вони ідуть на утворення ковалентних хімічних зв’язків з атомами базової ґратки (рис.4.9). Але в такому випадку один ковалентний зв’язок між цими атомами лишається незаповненим, оскільки в атома галію не хватає четвертого електрона для формування “нормальної” четвертої спільної валентної орбіти. Такі місця називають дірками, а домішкові атоми, які у

напівпровіднику створюють дані дірки називають акцепторними домішками або акцепторами. Самі ж домішкові напівпровідники даного типу називають акцепторними або напівпровідниками *p*-типу.

Зонна модель енергетичного спектру напівпровідників з акцепторними домішками приведена також на рис.4.9. Введенню акцепторів на ній відповідає поява енергетичних рівнів  $E_A$ , розміщених поблизу стелі валентної зони. Глибина залягання акцепторних домішок відносно стелі валентної зони  $\Delta E_A \approx 0,05 - 0,1$  еВ.

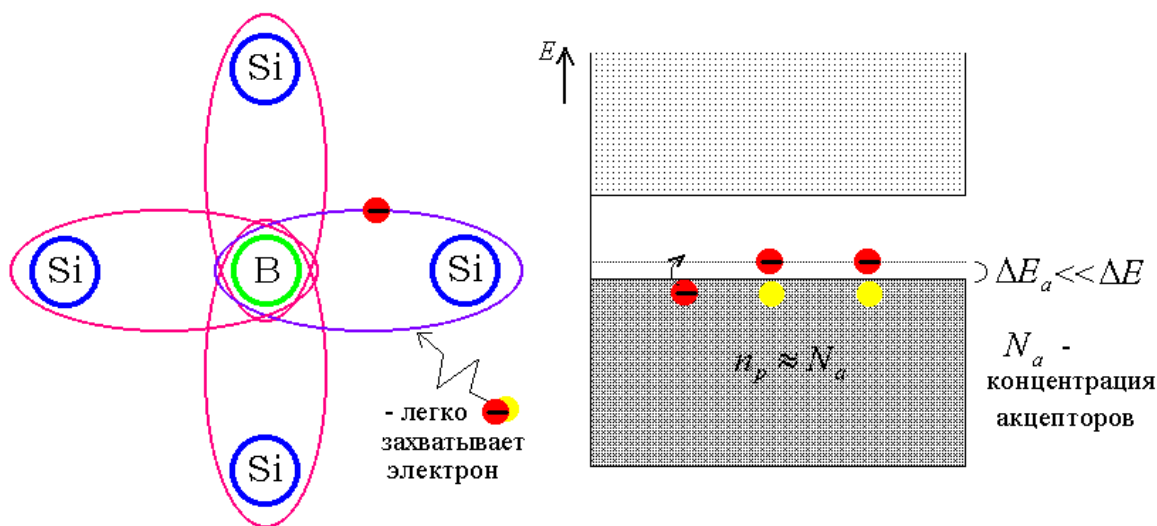


Рис.4.9. Двовимірна модель кристалічної ґратки напівпровідника з акцепторними домішками

## 6.5 Вільні носії заряду та властивості легованих напівпровідників

Вільні носії заряду у легованих напівпровідниках утворюються за двома механізмами. Перший – це ті, які виникають внаслідок порушення валентних зв'язків, у напівпровідниках можуть також бути і носії заряду, поява яких пов'язана з наявністю домішкових атомів. Як уже відмічалось, при незначному тепловому збудженні електрони донорів легко відриваються від домішкових атомів і стають здатними переміщуватися по всій кристалічній ґратці.

На відміну від власного напівпровідника, поява вільного електрона в нашому легованому напівпровіднику не зумовлює одночасної появи в ньому і дірки. Це зумовлено тим, що відрив електрона від атому Sb перетворює його в позитивний іон, який не є вільним, а нерозривно ув'язаний у кристалічну ґратку. Тому, про процес генерації вільного електрона тут доречно говорити як про іонізацію домішкового атома.

Збільшуючи вміст домішкових атомів Sb, ми можемо інтенсивно збільшувати концентрацію вільних електронів у напівпровіднику, суттєво не збільшуючи при цьому кількість дірок. Якщо концентрація електронів у багато разів перевищуватиме концентрацію дірок, то можна вважати, що в такому напівпровіднику струм, в основному, зумовлюється електронами. В цьому випадку вважають, що електрони є основними носіями заряду, а дірки – неосновними.

Отже, введення донорних домішок у кристалічну ґратку забезпечує електронну провідність напівпровідника. Напівпровідники, в яких основними носіями заряду є електрони, називаються напівпровідниками з електронною електропровідністю, або електронними напівпровідниками, або напівпровідниками *n*-типу.

Так само змінюється ситуація і при невеликому тепловому збудженні кристалічної ґратки з акцепторними домішками. В такому випадку стає можливим рух електронів по валентних спільних орбіталях. Коли електрон із одного з сусідніх заповнених ковалентних зв'язків Si–Si переходить на незаповнений зв'язок Si–Ga (рис.4.9), то атом Ga отримує додатковий зайвий електрон і перетворюється в негативний заряджений іон, а в напівпровіднику з'являється вільний носій заряду – дірка. Вводячи достатню кількість акцепторних домішок, ми можемо отримати напівпровідник, в якого основними носіями заряду будуть дірки, а неосновними – електрони.

Отже, акцепторні домішки, приймаючи валентні електрони, спричиняють у напівпровіднику діркову електропровідність. Напівпровідники ж, в яких основними носіями заряду є дірки, називають дірковими напівпровідниками, напівпровідниками з дірковою електропровідністю, або напівпровідниками *p*-типу.

На енергетичних діаграмах утворення електронів або дірок провідності домішкових напівпровідників позначають відповідними стрілками (ри.4.8 та 4.10). При цьому в напівпровідниках *n*-типу в зоні провідності з'являються вільні електрони, а в напівпровідниках *p*-типу у валентній зоні утворюються вільні енергетичні рівні для дірок, по яких вони мають змогу вільно рухатися, забезпечуючи хорошу електропровідність. Кількість енергії  $\Delta E_D$  (або  $\Delta E_A$ ), яка потрібна для реалізації таких процесів у домішкових напівпровідниках, називають енергією активації домішок.

Слід підкреслити, що в будь-якому напівпровіднику одночасно існують носії заряду обох типів: і електрони і дірки. Але при кімнатній температурі у власних напівпровідниках концентрація електронів рівна концентрації дірок і по величині це складає порядку  $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . В той же час у домішкових напівпровідниках при таких умовах стають іонізованими практично всі атоми легуючих домішок. Відповідно, при кімнатних температурах, при яких працюють електронні прилади і системи, концентрація основних носіїв визначається лише концентрацією легуючих домішок і може складати  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а концентрація неосновних носіїв лишається на рівні, характерному для власного напівпровідника, тобто  $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

## 7 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

### 7.1 Загальна характеристика напівпровідникових діодів (diodes)

Напівпровідниковим діодом називають електронний прилад, виконаний на мікрокристалі напівпровідника у якого спеціальними технологічними методами створено дві області із двома типами провідності (*n*- та *p*-типу). У результаті між цими областями формується так званий *p-n* перехід (*p-n-junction*), який і визначає



особливості функціонування діода. Умовна конструкція та назви елементів діода наведені на (рис.).

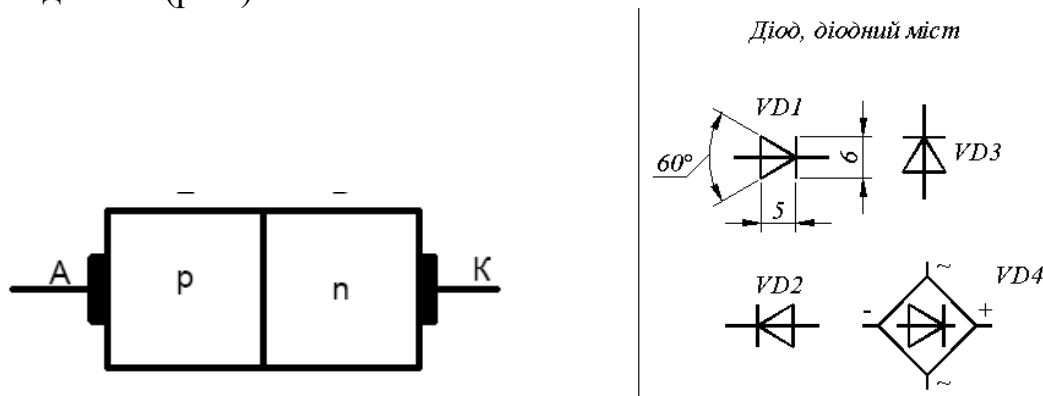


Рис. Конструкція (А – анод (**anod**), К – катод (**catod**)) та схемні позначення напівпровідникових (**electrical schematic symbols**) діодів

Діоди мають два типи підключення джерел ЕРС (**electric driving force**). 1. Пряме включення, (**forward bias**) коли плюс джерела ЕРС під'єднаний до анода, а мінус до катода. 2. Зворотнє (або запірне) (**reverse bias**) включення, коли полюси джерела ЕРС поміняти місцями..

Особливості функціонування та основні параметри діодів визначаються їх ВАХ (**current-voltage characteristic**) (рис). Важливими параметрами діодів є мінімальна пряма напруга (**minimal direct voltage**)  $E_0$ , та зворотній струм (**reverse current**)  $I_0$ . Для різних типів діодів  $E_0 = 0,2 - 0,6$  В, а зворотний струм  $I_0$  складає мікроампери і менше.

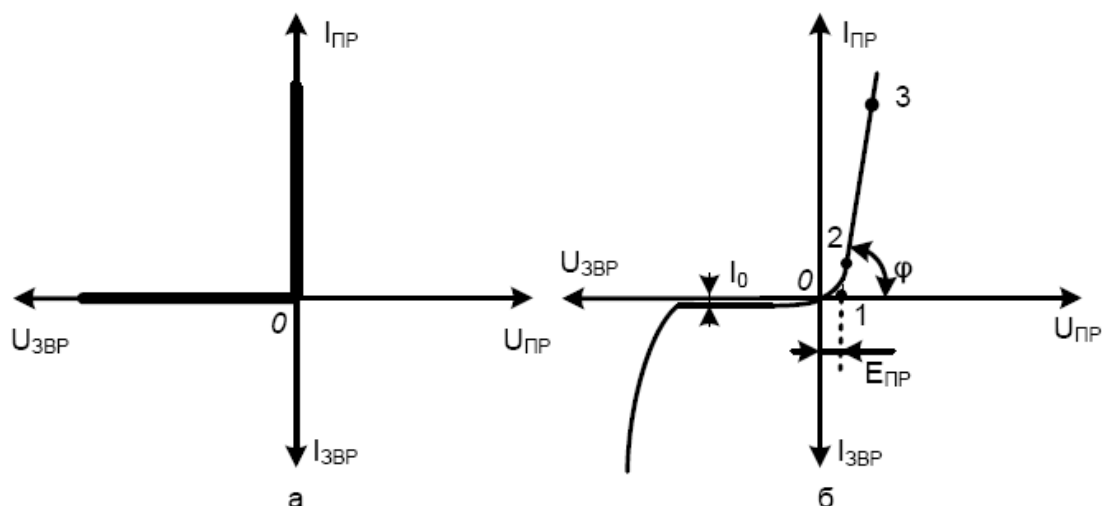


Рис. Узагальнена ВАХ: а – ідеального; б – реального діода

Відповідно з ВАХ діод пропускає струм при прикладанні до його електродів напруги у прямому включенні і не пропускає струм при прикладанні до електродів напруги у зворотньому (запірному) напрямку.

Напівпровідникові діоди (НД) широко застосовуються на всіх напрямках сучасної комп'ютерної електроніки при вирішенні різних питань схемотехніки. Малі

габаритні розміри і маса, висока швидкодія і надійність, низька вартість дозволяють застосовувати їх практично у будь-яких сучасних електронних вузлах.

НД класифікуються за рядом ознак, найважливіші з яких: призначення; конструктивно-технологічні особливості; вид початкового напівпровідникового матеріалу.

На рисунку 5 показані умовні графічні позначення різних за призначенням типів діодів на електричних схемах: а - випрямних, імпульсних, ВЧ- і НВЧ- діодів; б - стабілітронів; в - двосторонніх стабілітронів; г - тунельних діодів; д - обернених діодів; е - варикапів; ж - фотодіодів; з - світлодіодів. Нижче ми коротко опишемо основні відмінності діодів різних типів.

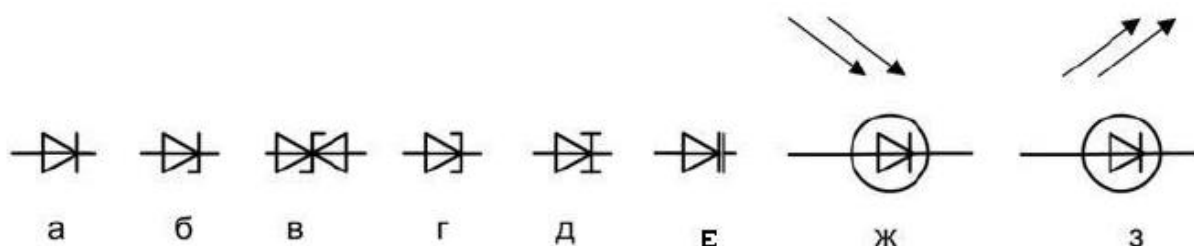


Рис. Позначення НД на електричних схемах

За конструктивно-технологічними особливостями сучасні діоди поділяють на площинні і точкові; за типом початкового матеріалу - на германієві, кремнієві, арсенід-галієві, карбід-кремнієві, антимонід-індієві та інші.

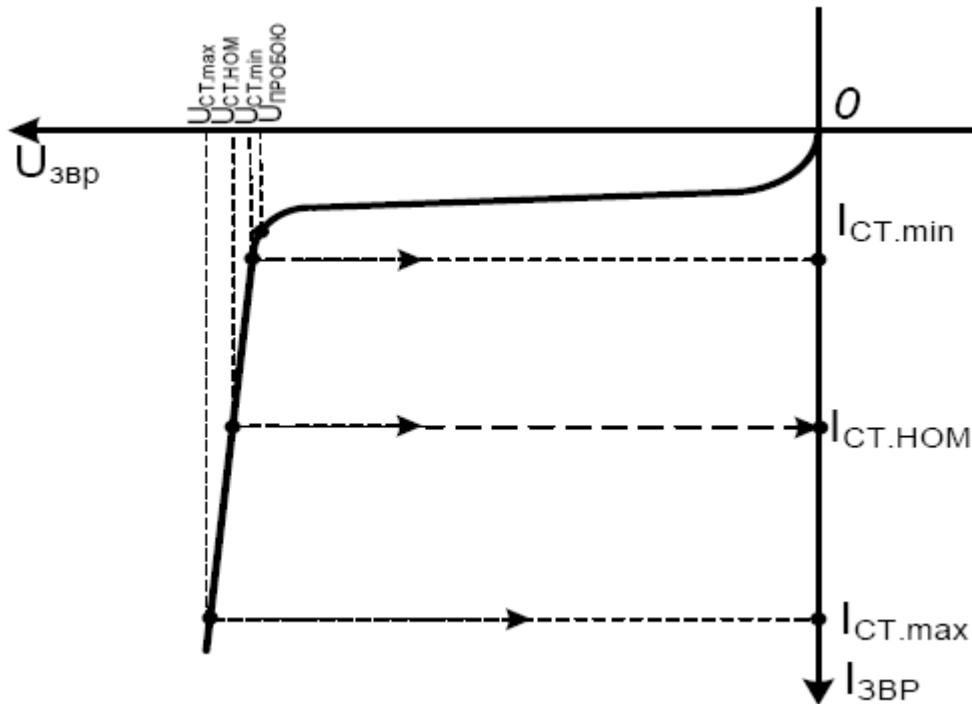
Умове позначення (маркування) діодів включає чотири елементи: перший – (цифра або буква) позначає початковий матеріал напівпровідника: 1 або Г - Германій, 2 або К - Кремній; 3 або А – Арсенід галію і т. ін.; другий (буква) характеризує клас або групу діодів: Д - випрямні, універсальні (високочастотні) і імпульсні, А - надвисокочастотні, З - стабілітрони, В - варикапи, І - тунельні, Ц - випрямні стовпи і блоки, Ф - фотодіоди, Л - світлодіоди; третій (тризначний номер) - указує на групу застосування (вибирають за довідником); четвертий елемент – великі літери алфавіту А, Б, В і т. ін. (до всіх діодів) - указує на різновид діода даного типу. Наприклад, КС147А - кремнієвий стабілітрон малої потужності, різновид типу А.

## 7.2 Напівпровідникові стабілітрони та стабістори

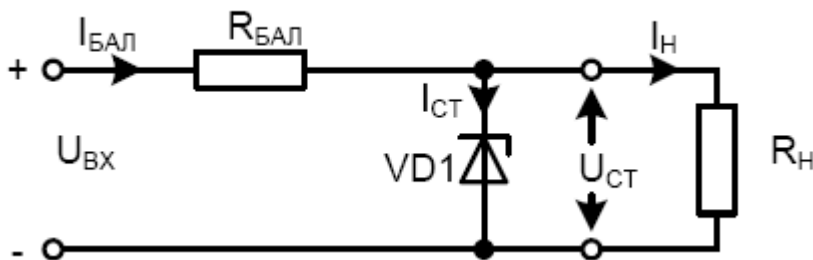
Напівпровідниковим стабілітроном називають напівпровідниковий діод, напруга на якому при запіргному включенні в області електричного пробою мало залежить від струму. Робочою ділянкою ВАХ стабілітронів є область пробою р-п переходу (рис.).

Величина зворотного струму у стані пробою у стабілітроні може підтримуватися і відтворюватися протягом десятків - сотень тисяч годин. При виготовленні стабілітронів використовується переважно кремній. Це викликано тим, що зворотні струми р-п переходів на основі кремнію невеликі і мало залежать від температури.

У якості стабілітронів з напругою стабілізації близько 3...5 В застосовуються діоди з низькоомного (високолегованого домішками) матеріалу, у р-п переході якого виникає тунельний електричний пробій (такі діоди ще називають діодами Зенера). У стабілітронів з напругою стабілізації більше 7 В (виготовляються з більш високоомних матеріалів) виникає лавинний електричний пробій. У діапазоні напруг 5...7 В пробій викликаний взаємодією тунельного і лавинного механізмів.



На рис. показана схема включення стабілітрона в електричні кола.



Слід ще раз звернути увагу на те, що робочим є зворотне включення стабілітрона в електричне коло. До основних електричних параметрів стабілітронів відносяться: номінальна напруга стабілізації (падіння напруги на стабілітроні в області стабілізації при номінальному значенні струму; мінімально допустимий постійний струм стабілізації; максимально допустимий постійний струм стабілізації; номінальний струм стабілізації. Інші параметри є такими ж, як і для випрямних діодів. Але диференційний опір стабілітрона визначається у робочій точці на зворотній ділянці ВАХ. Ця величина характеризує ступінь стабільності напруги стабілізації приладу. До критичних параметрів стабілітрона слід віднести напругу пробою - зворотна напруга, перевищення якої приводить до різкого збільшення диференціальної провідності р-п- переходу і його незворотнього пробою.

Стабілітрони часто використовуються для стабілізації напруги джерел живлення, а також для фіксації рівнів напруги у схемних елементах (ЦАП, АЦП, ОП). Тому друга назва стабілітронів - опорні діоди.

Стабілізацію низьковольтної напруги у межах 0,3...1В можна отримати при використанні прямої гілки ВАХ кремнієвих діодів, які називають стабісторами. Стабісторам притаманний від'ємний температурний коефіцієнт опору, тобто напруга на стабісторі при незмінному струмі зменшується зі збільшенням температури. Через це стабістори використовують для температурної компенсації стабілітронів з додатним температурним коефіцієнтом опору.

Існують також двосторонні (симетричні, двоанодні) стабілітрони або діоди Зінера, які мають симетричну ВАХ щодо вісі струмів (рис.). У цьому випадку напруга стабілізації у прямому напрямку дорівнює напрузі стабілізації у зворотному напрямі. У порівнянні зі звичайними стабілітронами двоанодні стабілітрони мають досить низьку регламентовану напругу пробою і можуть підтримувати цю напругу на постійному рівні при значній зміні величини зворотного струму. Двоанодні стабілітрони забезпечують стабілізацію і обмеження двополярних напруг.

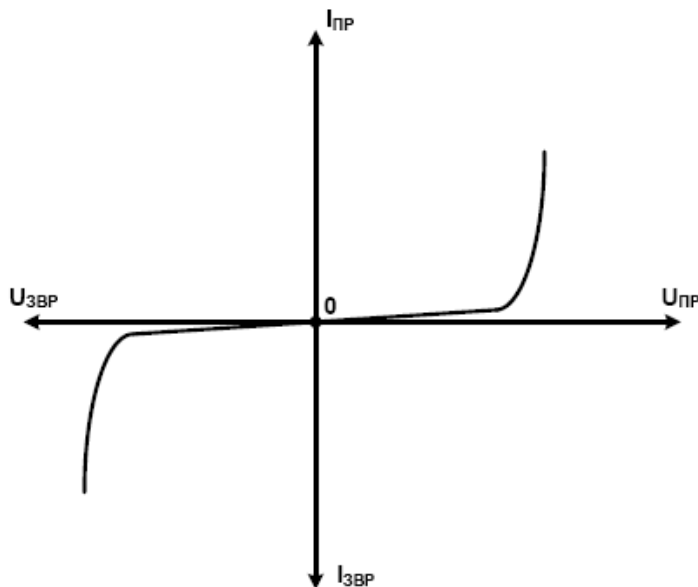


Рисунок 20 – ВАХ двоанодного стабілітрона

### 7.3 Випрямні діоди

Випрямні діоди - це напівпровідникові діоди, що призначені для перетворення змінного струму у постійний у обмеженому діапазоні частот (50 Гц...100 кГц). Ці діоди також широко використовуються у схемах керування і комутації, для обмеження паразитних викидів напруги у ланцюгах з індуктивними елементами, як елементи розв'язки у електричних ланцюгах і т. ін.

an electrical device that converts an alternating current into a direct one by allowing a current to flow through it in one direction only.

У даний час у якості випрямних діодів широко використовуються кремнієві площинні діоди, що мають значно менші зворотні струми і велику зворотну напругу

у порівнянні з германієвими. Недолік кремнієвих діодів – трохи більше пряме падіння напруги, чим на германієвих.

У основі роботи випрямних діодів лежить властивість односторонньої провідності р-п переходу, яка полягає у тому, що останній добре проводить струм (має малий опір) при прямому включенні і практично не проводить струм (має дуже високий опір) при зворотному включенні. Сказане відображає приведена вище ВАХ діодів, яка характерна не тільки для випрямних, але й інших типів діодів. На ВАХ, як правило, виділюють пряму робочу область, зворотню робочу область, область керованого пробію та область некерованого пробію.

Схема включення випрямних діодів в електричних колах показана на рис.

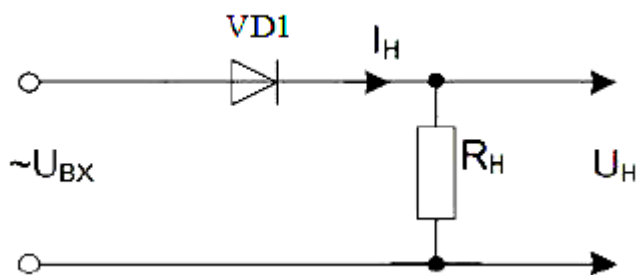


Рис. Схема включення випрямних діодів в електричних колах

Робочою ділянкою ВАХ випрямних діодів є лінійна (омічна) ділянка при прямому включенні (рис.). Нахил характеристики на цій ділянці визначається опором базової області, оскільки р-п перехід практично не впливає на цей опір.

До основних параметрів, що характеризують роботу випрямних діодів відносяться:

середнє значення прямого струму;

середнє значення прямої напруги;

постійний зворотний струм;

диференціальний (динамічний) опір, який визначається на робочій ділянці

ВАХ діода і дорівнює  $\frac{1}{\text{ctg}\varphi}$ :

$$R_{\text{диф}} = \frac{\partial U_{\text{пр}}}{\partial I} \approx \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}}$$

Важливими також є й інші параметри:

діапазон робочих частот, у межах якого струм діода не зменшується нижче заданої величини;

ємність р-п переходу;

коефіцієнт випрямлення, який оцінює випрямні властивості діода.

$$K_{\text{випр}} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{збр}}} = \frac{R_{\text{збр}}}{R_{\text{пр}}}.$$

Параметри граничних режимів експлуатації випрямних діодів є:

максимально допустимий прямий струм діода;

максимально допустима постійна зворотна напруга, яку тривало витримує діод без порушення його нормальної роботи (береться на 20% менше напруги пробою;

максимальна допустима температура корпусу;

максимальна допустима потужність діода, що розсіюється.

За останнім параметром випрямні діоди підрозділяються на діоди малої ( $I_{np} \leq 0,3 \text{ A}$ ), середньої ( $0,3 \text{ A} < I_{np} \leq 10 \text{ A}$ ) і великої ( $I_{np} > 10 \text{ A}$ ) потужності.

## 7.4 Високочастотні і надвисокочастотні діоди

ВЧ діоди є більш універсальними, ніж випрямні, тому їх і називають універсальними. Вони можуть працювати у випрямлячах змінного струму, а також у модуляторах, детекторах, різних перетворювачах електричних сигналів у широкому діапазоні частот (до сотень мегагерц). Їх недоліком у порівнянні з випрямними діодами є нижча потужність випрямленого струму.

Конструктивно ВЧ діоди ранніх розробок містять точковий (а не площинний) р-п перехід і називаються точковими. У даний час широко застосовуються також мікросплавні високочастотні напівпровідникові діоди з площинними р-п переходами дуже малих розмірів. У порівнянні з точковими, такі ВЧ діоди мають великі допустимі струми, кращі характеристики при зворотному включенні.

Пряма гілка ВАХ ВЧ діодів не відрізняється від ВАХ випрямних діодів. А у зворотній області є деякі відмінності. Зворотний струм має менше значення, ніж у випрямних діодів через малу площу р-п переходу. Але тут відсутня ділянка насичення і зворотний струм рівномірно зростає. Значення постійних прямих струмів точкових діодів не перевищує 50 мА, значення допустимої зворотної напруги - 150 В. У мікросплавних діодів ці параметри трохи вищі. Основним параметром ВЧ-діодів є їх бар'єрна ємність. Чим вона менша, тим ширшим є частотний діапазон діода. Інші параметри ВЧ- і НВЧ- діодів такі самі, як і у випрямних діодів.

За діапазоном частот ВЧ- і НВЧ- діоди діляться на три групи: до 100 МГц; від 100 МГц до 1000 МГц; більше 1000 МГц.

## 7.5 Імпульсні діоди

Це різновид високочастотних діодів, призначених для використання як ключові елементи у швидкодіючих імпульсних схемах. Відмінність полягає лише у динаміці роботи імпульсних діодів, конструкція яких забезпечує хороше зберігання форми коротких імпульсів, які проходять у колах з такими діодами.

Імпульсні діоди призначені для роботи у імпульсних схемах із часом переключення  $\leq 1 \text{ мс}$ . В них вжиті спеціальні заходи для зниження паразитних ємностей та скорочення часу життя неосновних носіїв. На рис. наведена схема включення імпульсного діода у електричні кола.

Під час подачі прямої напруги діод відкритий і через нього протікає певний прямий струм. Розглянемо часову діаграму роботи діода при подачі на його вхід

імпульсної напруги (рис.). При подачі зворотної напруги діод закривається не відразу. В перший момент після стрибка протікає великий струм. Цей струм зумовлений наявністю об'ємного заряду неосновних носіїв у базі діода, які накопичуються у ній під час протікання прямого струму. Чим більший був цей струм, тим більшим буде стрибок зворотнього струму. Через деякий час у результаті рекомбінації об'ємний заряд неосновних носіїв розсмоктується та встановлюються невеликий струм зворотний струм та високий зворотний опір діода.

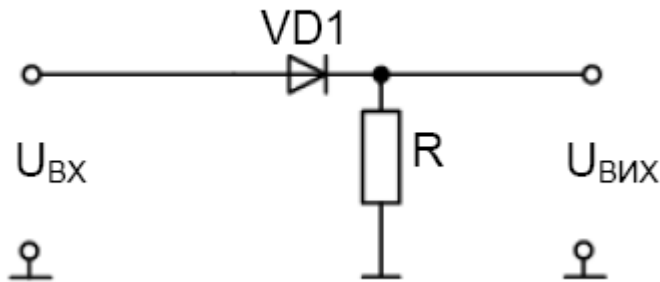


Рис. Схема включення імпульсного діода у електричний ланцюг

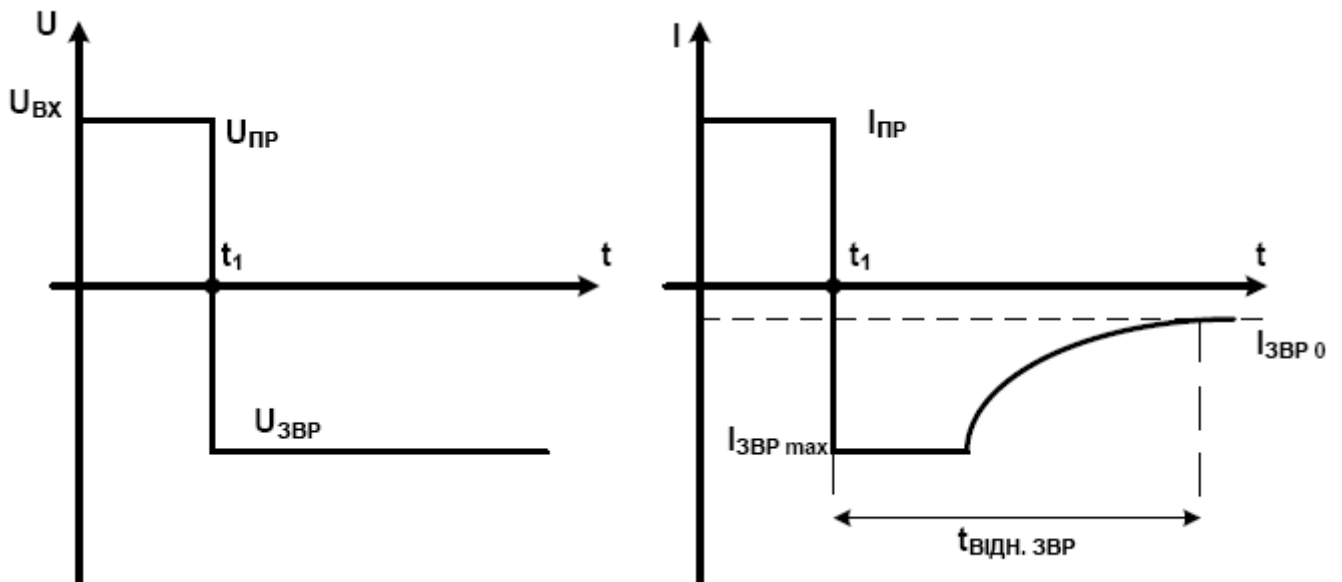


Рис. Часові діаграми роботи імпульсного діода

Інтервал часу між переключенням напруги на діоді з прямої на зворотну та моментом, коли зворотний струм досягне сталого значення називається часом відновлення зворотного опору (або струму).

## 7.6 Тунельні та обернені діоди

Тунельним називається напівпровідниковий діод, у якому використовується тунельний механізм перенесення носіїв заряду через р-n-перехід і у ВАХ якого є ділянка від'ємного диференціального опору (рис.). Тунельні діоди виготовляють з германію і арсеніду галію із високою концентрацією домішок (вироджені напівпровідники). Це дозволяє отримати дуже вузький р-n перехід. На відміну від розглянутих раніше діодів у таких переходах виникають умови для вільного тунельного проходження електронів через потенційний бар'єр (тунельний ефект).



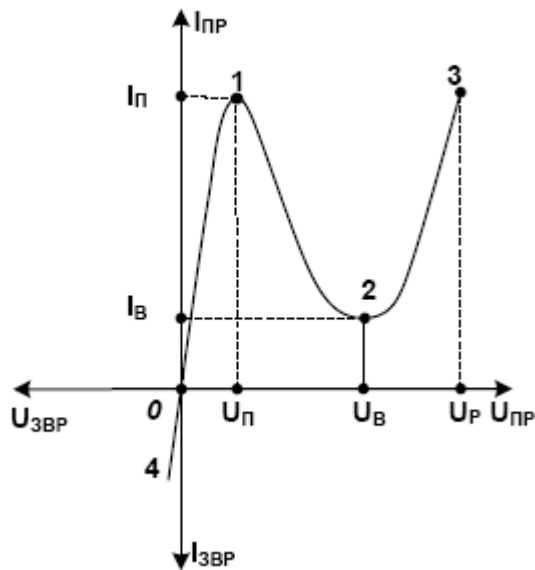


Рис. ВАХ тунельного діода

Тунельний ефект приводить до появи на прямій гілці ВАХ діода падаючої ділянки з від'ємним опором (рис.). Оскільки тунельний струм не пов'язаний з порівняно повільними процесами дифузії і дрейфу електронів, тунельний діод є практично безінерційними приладами. До переваг ТД слід також віднести: широкий інтервал робочих частот і температур; малу споживану потужність; високий допустимий експлуатаційний рівень радіації; можливість використання для підсилення електричних сигналів.

Основним недоліком тунельних діодів є низький діапазон робочих напруг і струмів.

До основних електричних параметрів тунельних діодів належать (рис.): піковий (максимальний) струм – максимальне значення прямого струму на першій зростаючій ділянці ВАХ; напруга піка – напруга, що відповідає піковому струму; струм впадини ВАХ; відношення пікового струму до струму впадини; напруга впадини; напруга розхилу – напруга, що відповідає піковому струму на другій зростаючій ділянці ВАХ; напруга переключення – різниця напруг між точками 3 та 1 ВАХ (рис.); диференціальний від'ємний опір на ділянці ВАХ, що спадає.

Робочим для тунельних діодів є пряме включення, яке ілюструє рисунок.

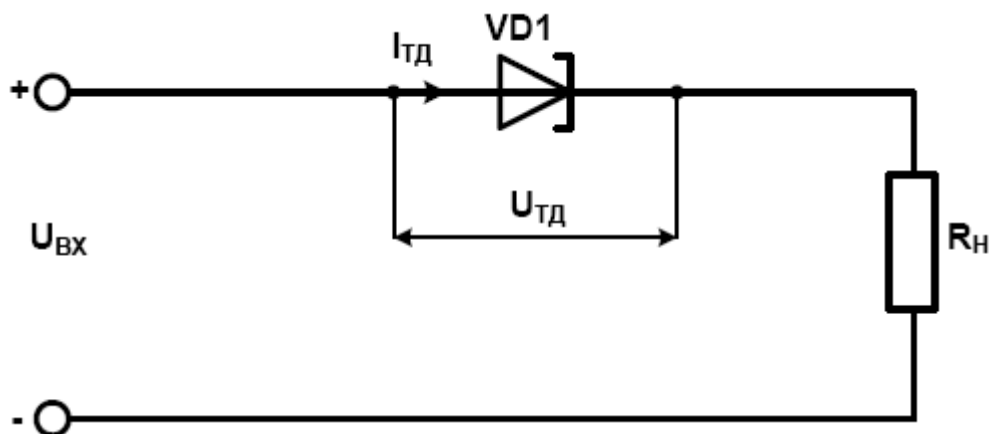


Рис. Схема включення тунельного діода в електричне коло

Тунельні діоди знаходять застосування у перемикачах (перемикальні діоди); підсилювачах (підсилювальні) і генераторах (генераторні). Внаслідок того, що тунельні діоди працюють при низькій робочій напрузі, вони потребують високостабільних джерел напруги живлення.

Несумісність технології виготовлення тунельних діодів із технологією виготовлення інтегральних схем перешкоджає їх широкому впровадженню в сучасну комп'ютерну апаратуру. Тому у даний час тунельні діоди знаходять обмежене застосування.

Різновидом тунельних діодів є обернені діоди, у яких максимум струму на прямій гілці ВАХ або незначний або повністю відсутній. У таких діодах при прямому зсуві р-п-переходу протікає дифузійний струм, як у звичайному діоді, а при зворотному - тунельний. ВАХ оберненого діода (рис.) є оберненою ВАХ звичайного випрямляючого діода. Провідність обернених діодів при зворотній напрузі вища, ніж при прямій у області малих напруг.

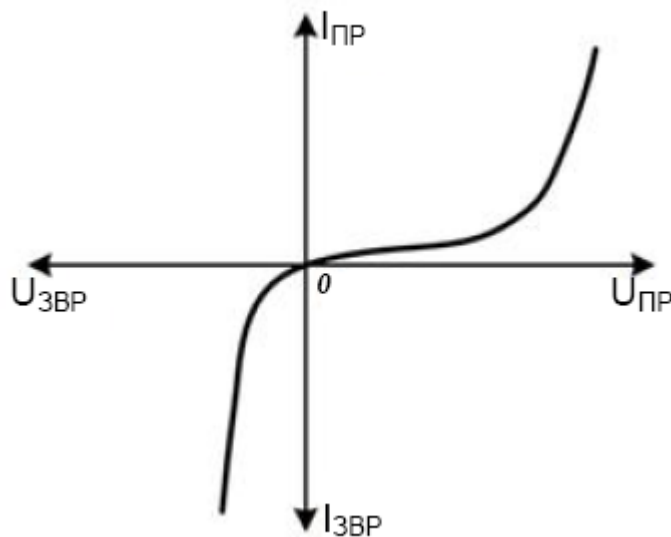


Рис. ВАХ оберненого діода

## 7.7 Варикапи

Варикапами називають напівпровідникові діоди, робота яких заснована на використанні залежності бар'єрної ємності р –п-переходу від величини прикладеної зворотної напруги. На відміну від звичайних конденсаторів змінної ємності, ємністю варикапів можна керувати дистанційно, змінюючи зворотну напругу на р-п-переході.

Варикапи мають низьку інерційність, високу добротність; низький рівень шумів на високих частотах; малі габаритні розміри, хорошу температурну стабільність, високу надійність. Вольт-фарадна характеристика варикапа показана на рисунку.

Мінімальна ємність  $C_{\min}$  визначається максимально допустимою зворотною напругою, яка не приводить до пробію р-п-переходу. Величина  $C_{\max}$  залежить від заданої вихідної напруги на варикапі.

До основних параметрів варикапів відносяться: номінальна ємність при певній номінальній напрузі; коефіцієнт перекриття за ємністю  $K_p = C_{\max} / C_{\min}$ ; добротність.

Зазвичай до варикапа прикладається невелика змінна напруга і постійна напруга зсуву. Їх сумарна величина може змінюватися від  $U_{\max}$  до  $U_{\min}$ . При цьому значення ємності для змінної складової напруги змінюється від  $C_{\max}$  до  $C_{\min}$ .

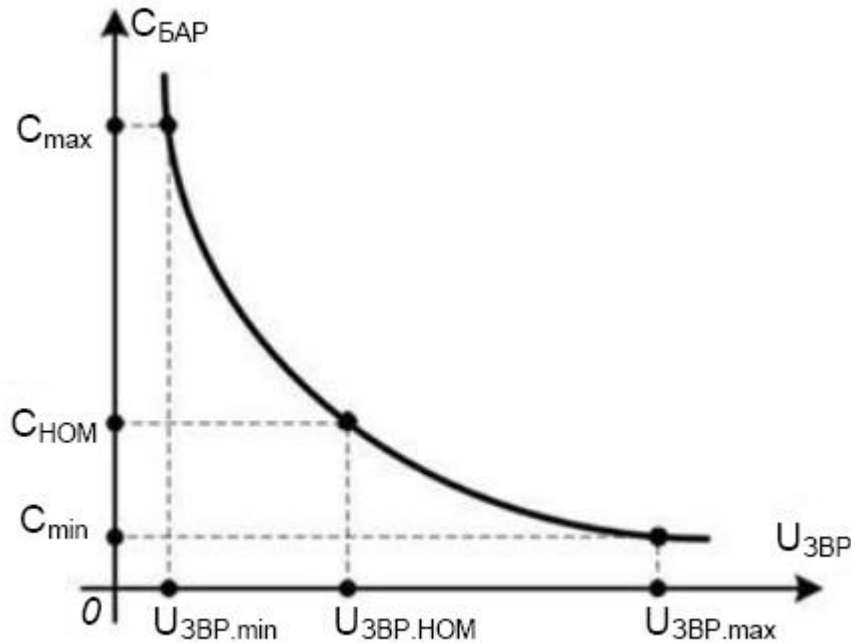


Рис. Вольт-фарадна характеристика варикапа

Варикапи широко застосовуються у різних схемах для автоматичного підстроювання (зміни) частоти; у параметричних підсилювачах і т. ін. Варикап, призначений для застосування у діапазоні НВЧ у параметричних підсилювачах, називається параметричним діодом.

## 8 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

### 8.1 Транзистори

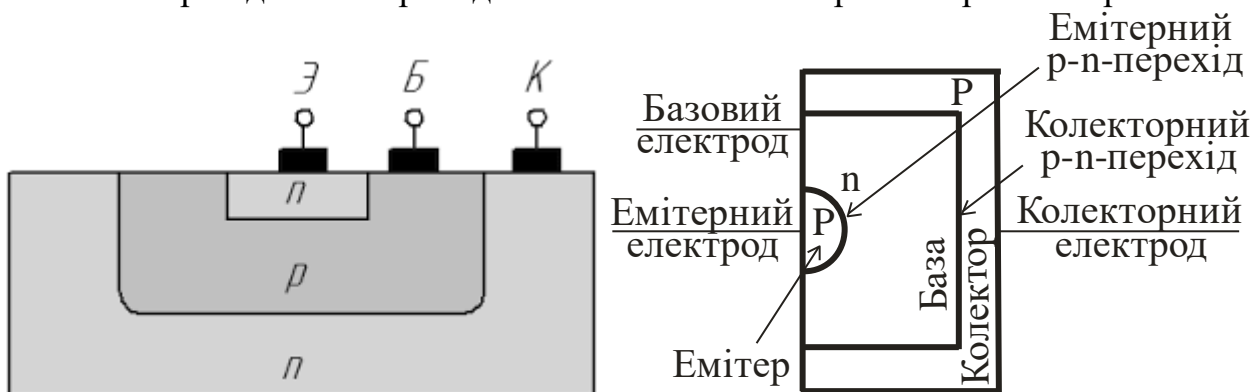
Більшість схемотехнічних рішень комп'ютерної електроніки є спільними для всієї сучасної електроніки. Це й не дивно, адже в основі їх конструювання лежать такі активні елементи, як транзистори. Дані елементи дозволяють здійснювати різні перетворення як аналогових, так і імпульсних та цифрових електричних сигналів.

Компонентною схемотехнічною основою комп'ютерної електроніки є цифрові мікросхеми різного ступеня інтеграції та різного функціонального призначення. Але люба цифрова мікросхема реалізується на аналогових елементах, основними із яких є транзистори. Тому для розуміння роботи комп'ютерної електроніки слід бути ознайомленим з основними принципами роботи різних транзисторів.

На сьогодні в комп'ютерній електроніці переважають мікросхеми із двома типами логічної побудови: транзисторно-транзисторної логіки та КМОН-логіки. Базою першого типу мікросхем є біполярні транзистори (БТ), а базою другого типу мікросхем – уніполярні або польові транзистори (ПТ).

## 8.2 Біполярні транзистори

Біполярний транзистор (БТ) - це напівпровідниковий пристрій, який виготовлений на одному кристалі. На сьогодні основним матеріалом для таких кристалів є легований кремній з певним типом провідності (n-тип або p-тип провідності). При виготовленні транзистора у кристалі за певною технологією створюють дві області з протилежним типом провідності (рис. – кристал p-типу, у якому створені дві області n-типу провідності). Сам кристал називають базою, а дві створені області – відповідно емітером та колектором. Таку структуру поміщають у пластиковий або металічний корпус. До всіх трьох областей під'єднують провідники, які виводять назовні корпусу транзистора і які служать для його включення в електронні схеми. Оскільки описаний транзистор складається із областей напівпровідника обох типів провідності, то в його роботі беруть участь носії заряду обох знаків (або обох полярностей – електрони та дірки), саме тому такі напівпровідникові прилади називаються біполярними транзисторами.



Із загальної конструкції біполярного транзистора слідує, що він має два p-n переходи. Тому для теоретичного аналізу електронних процесів у транзисторі використовують його спрощену схему (рис.). Внутрішня область, що розділяє p-n переходи П1 та П2 відповідає базі транзистора (Б). p-n перехід П1, який примикає до емітера, називають емітерним. Інший перехід П2 - колекторним. У залежності від типу провідності бази біполярні транзистори поділяють на два типи (рис.): p-n-p (база n-типу) та n-p-n (база p-типу).

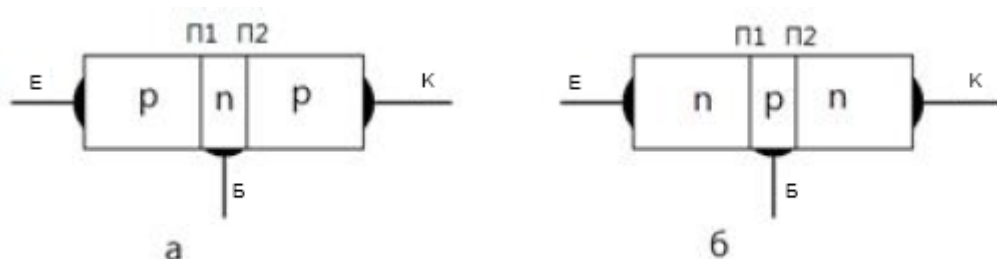


Рис. Спрощена схема біполярних транзисторів р-п-р (а) та п-р-п (б)

Призначення емітерної області полягає у введенні (інжектуванні або емісії) своїх носіїв у базу. Такі носії постачаються емітеру від зовнішньої ЕРС через емітерний електрод. Колектор витягує (збирає або екстракує) носії із бази під дією зовнішньої ЕРС, яка підключається до транзистора через колекторний електрод. Основою роботи біполярного транзистора є протікання електричного струму від бази до колектора. Прикладаючи до базового електроду різні зовнішні ЕРС можна керувати величиною цього струму, що лежить в основі роботи транзистора як підсилюючого та керуючого елемента різних електронних схем. Струмом же емітера ми можемо керувати величиною струму в колекторному колі.

Із проведеного аналізу також слідує, що при роботі біполярних транзисторів через його електроди і відповідні області обов'язково має протікати електричний струм. Тобто, керуючим фактором при функціонуванні біполярних транзисторів є саме електричний струм.

Умовні графічні позначення БТ на схемах електричних принципів показані на рис.

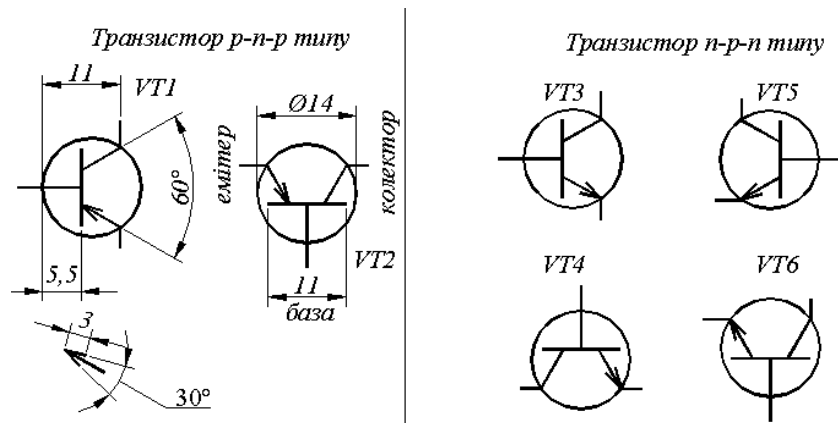


Рис. Позначення р-п-р та п-р-п БТ на електричних схемах

За напівпровідниковим матеріалом, що використовується, сучасні транзистори поділяються на: германієві, кремнієві та на арсеніді галію. У позначенні біполярних транзисторів за ДСТУ використовуються літери та цифри.

Перший елемент: Г або 1 - германій; К або 2 – кремній; 3 - GaAs.

Другий елемент: Т – біполярний транзистор; П – польовий транзистор.

Третій елемент: цифра від 1 до 9, яка визначає робочу область частот та потужність розсіювання транзистора.

Четвертий, п'ятий, та шостий елементи: цифри, які позначають порядковий номер розробки від 01 до 999.

Сьомий елемент: літери від А до Я - класифікація за параметрами транзисторів, виготовлених за єдиною технологією. На рис. наведений приклад позначення (маркування) біполярного транзистора.



Рис. Приклад маркування біполярного транзистора

Крім того, у позначеннях можуть використовуватися додаткові елементи, які позначають: С – транзисторна збірка, наприклад 2ТС622; 2Т399А-2 – безкорпусний транзистор із гнучкими виводами і т. ін.

Для маркування сучасних мініатюрних транзисторів використовують також різні елементи корпусу (зрізи, виступи, впадинки й інше) та кольорові смужки і крапки.

### 8.3 Схеми включення біполярних транзисторів

За своєю будовою біполярний транзистор має три електроди. У електричний ланцюг транзистор включають таким чином, що один із його електродів з'єднують із джерелом сигналів і цей електрод називають вхідним. Другий електрод служить для формування вихідного сигналу з транзистора і його називають вихідним. У ланцюг вхідного електрода включають джерело вхідного сигналу, а в ланцюг вихідного – споживач цього сигналу. Оскільки для подачі сигналу на транзистор та для його відведення необхідно по два провідники, то третій електрод роблять спільним щодо вхідного і вихідного сигналу. Залежно від того, який електрод транзистора вибирають за спільний, розрізняють три схеми включення транзисторів: із спільною базою (СБ), із спільним емітером (СЕ) та із спільним колектором (СК). Ці схеми для транзисторів р-п-р - типу показані на рис.

Для задання режимів роботи біполярного транзистора та для постачання його енергією до його електродів слід підключати також джерела живлення із постійною ЕРС. Порядок та полярність під'єднання цих джерел для транзисторів р-п-р-типу також показано на рис. (для транзисторів п-р-п-типу змінюються лише полярність напруг живлення).

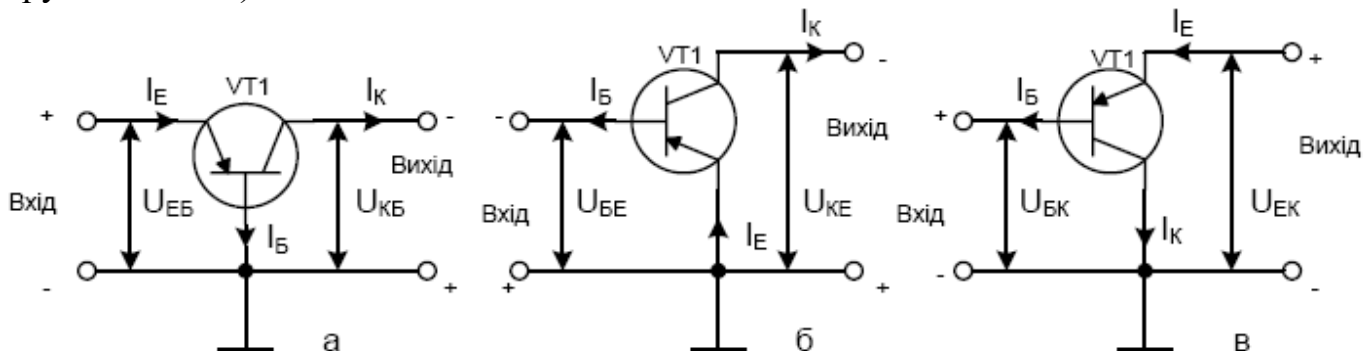


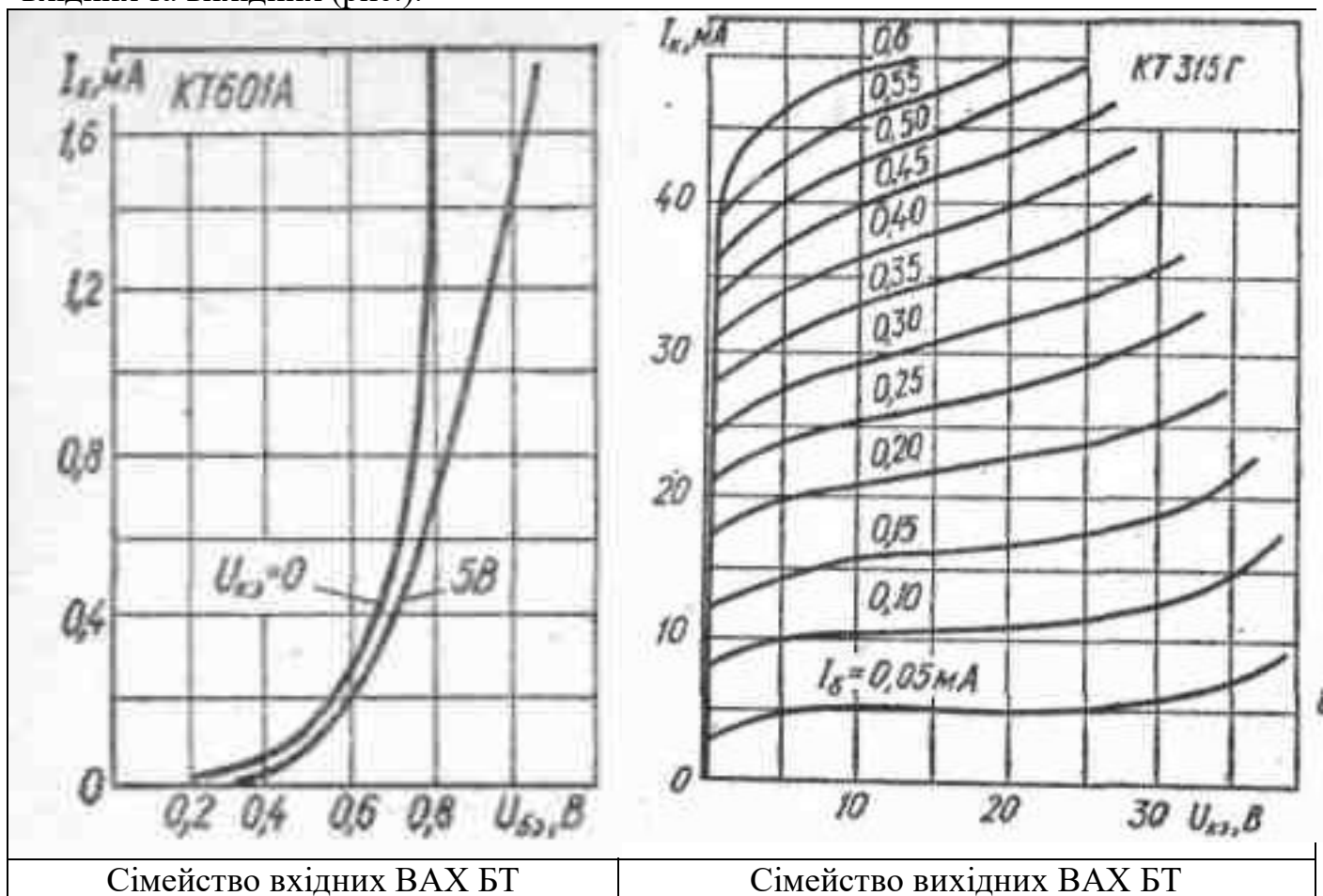
Рис. Схеми включення БТ: а – СБ; б – СЕ; в – СК

Слід пам'ятати, що в більшості транзисторних схем його емітерний перехід завжди включають у пряму напрямі, а колектор під'єднують до полюса джерела живлення із знаком, протилежним типу провідності колектора.

Найбільш поширеною є схема включення із СЕ, яка забезпечує найбільше підсилення потужності вхідного сигналу.

## 8.4 Статичні ВАХ біполярних транзисторів

Функціонування та більшість параметрів біполярних транзисторів визначаються двома сімействами його вольт-амперних характеристик (ВАХ): вхідних та вихідних (рис.).



## 8.5 Початкова робоча точка (точка спокою) БТ

Для виконання БТ необхідної функції з обробки сигналів необхідно правильно задати режим його роботи. Це здійснюється відповідним вибором положення початкової робочої точки  $P_0$  транзистора (або точки спокою) на координатній площині його вихідних ВАХ (рис.). Такий вибір автоматично задає і координати точки спокою на координатній площині вхідних ВАХ транзистора (рис.). Координати цих двох точок на осях струмів і напруг позначимо через  $I_{B0}$ ,  $U_{BE0}$ ,  $I_{C0}$ ,  $U_{CE0}$  (рис.).

Практично задання положення точки спокою у більшості випадків здійснюється за допомогою величини ЕРС джерела живлення та кількох резисторів,

які вводяться в кола електродів транзистора. Найпростіший приклад задання точки спокою транзистора за схемою із СЕ наведений на рис. Тут застосовані два резистори, ввімкнені відповідно в коло бази та колектора. Величина ЕРС джерела живлення зазвичай позначається на схемах як  $E_k$ .

За відомими законами Кіргофа для наведеної простої схеми отримуємо систему із двох незалежних рівнянь:

$$E_k = R_b \cdot I_{b0} + U_{be0},$$

$$E_k = R_k \cdot I_{k0} + U_{ke0}.$$

Отримана система рівнянь має три невідомих:  $E_k$ ,  $R_b$  та  $R_k$ . Одне із цих невідомих задає конструктор – це величина ЕРС джерела живлення  $E_k$ , а два інші ( $R_b$  та  $R_k$ ) визначаються із наведених вище рівнянь. Введення в реальну транзисторну схему елементів із номіналами  $E_k$ ,  $R_b$  та  $R_k$  і задає нам необхідне положення точки спокою у координатах  $I_{b0}$ ,  $U_{be0}$ ,  $I_{k0}$ ,  $U_{ke0}$ .

## 8.6 Динамічний режим роботи транзистора з навантаженням

Дослідження статичних ВАХ транзисторів та встановлення точки спокою здійснюється за відсутності споживача (опору навантаження) у вихідному ланцюзі. У практичних випадках вихідний ланцюг містить опір навантаження  $R_n$ . У цьому випадку говорять вже про динамічний режим роботи транзистора, при якому одночасно змінюються струми всіх електродів та всі напруги між ними.

Для найпростішого випадку споживач можна включити безпосередньо в колекторне коло замінивши ним резистор  $R_k$  (рис.). Таким чином, на наведеній схемі резистор  $R_k$  позначає саме навантаження, яке споживатиме оброблений цією електронною схемою сигнал. Тоді рівняння  $U_{ke} = E_k - R_k \cdot I_k$  визначає динаміку роботи транзистора при проходженні через схему сигналу.

Отримане рівняння визначає зв'язок між струмом колекторного кола і напругою між вихідними електродами транзистора за наявності споживача із активним опором  $R_k$ . Це рівняння і його графік називається динамічною характеристикою (або прямою навантаження) транзистора в електронній схемі. Графік даної характеристика будується на сім'ях статичних ВАХ при постійності параметрів всіх інших схемних елементів схеми (рис.). Зрозуміло, що цей графік проходить через точку спокою транзистора.

Змінюючи струм базового електроду, можна переміщати робочу точку по прямій навантаження. Тому саме струм кола бази є керуючим фактором у роботі схем на біполярних транзисторах.



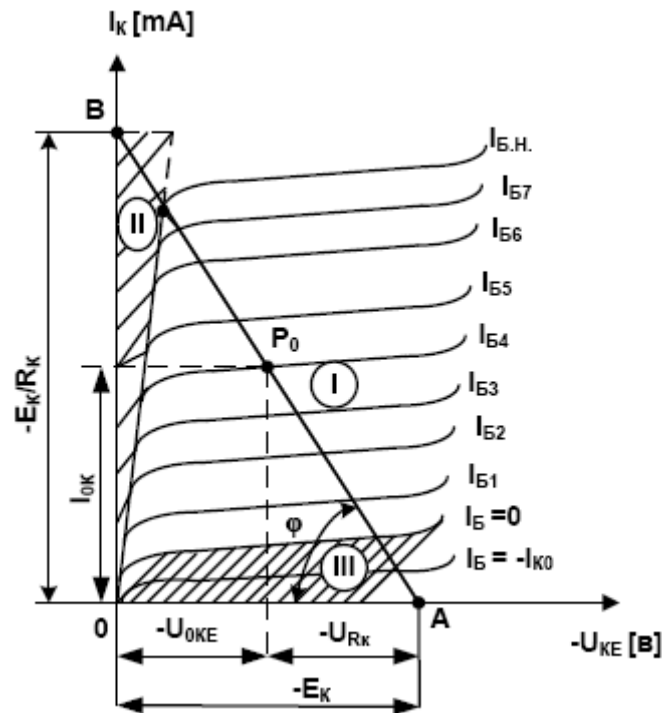


Рис. а – електрична схема включення із СЕ; б – вихідні статичні ВАХ та динамічна характеристика транзистора

## 8.7 Режими роботи транзистора

В залежності від положення початкової робочої точки  $P_0$ , існує три основні режими роботи біполярного транзистора: активний режим (лінійний, підсилюючий), режим насичення і режим відсічки. На рис. наведені три області характеристик транзистора, які відповідають цим режимам: *I*, *II* і *III*.

Область відсічки (*III*) розміщена знизу ВАХ і обмежена гілкою вихідних ВАХ з умовою  $I_B = 0$ . Ця область відповідає такому режиму роботи транзистора, коли обидва р-п- переходи транзистора закриті.

Область насичення (*I*) обмежена справа прямою лінією, з якої виходять всі гілки статичної вихідної ВАХ. Вона відповідає такому режиму, коли обидва р-п- переходи транзистора відкриті.

Активна область (*II*) лежить між областями відсічки і насичення та відповідає режиму роботи, коли емітерний перехід відкритий, а колекторний – закритий. У активному режимі точка спокою  $P_0$  транзистора знаходиться приблизно посередині ділянки прямої навантаження (рис.) і при роботі схеми робоча точка не виходить за межі ділянки (*II*).

У режимі ж насичення робоча точка знаходиться в області насичення, а у режимі відсічки - відповідно у області відсічки.

Активний режим транзистора є основним. Він використовується у більшості підсилювачів, генераторів і т. ін. Режими відсічки та насичення характерні для імпульсної роботи транзистора і використовується в імпульсних та цифрових пристроях.

Властивості біполярних транзисторів істотно залежать від температури. Підвищення температури насамперед збільшує зворотний струм насичення

колекторного переходу (початковий струм колектора  $I_{k0}$ ). Це приводить до зміни характеристик транзистора. Тому схеми на транзисторах містять елементи температурної стабілізації та температурної компенсації. При конструктивному виконанні транзисторних схем, які обробляють сигнали великої потужності, необхідно передбачити також заходи щодо відведення теплоти від транзистора.

## 9 УНІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ В КОМП'ЮТЕРНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА СХЕМОТЕХНІЦІ

### Поняття про польові транзистори

Ці напівпровідникові прилади є основою сучасної комп'ютерної схемотехніки. У кожній сучасній комп'ютерній мікросхемі міститься від десятків до мільярдів таких транзисторів.

Metal oxide semiconductor effect field transistor (MOSEF). МДН або МОН-транзистори

#### Історія.

1926 рік – ідея та теорія МДН-транзистора.

1947 - 1949 роки – теорія та реалізація біполярного транзистора.

1953 рік – реалізація польового транзистора з р-n-переходом.

1959 - 1960 роки – планарна технологія та реалізація МОН-транзистора.

1977 рік – перші застосування МОН-транзисторів для комп'ютерної техніки.

Польові транзистори (ПТ) - це один із видів напівпровідникових приладів. Його основним елементом є спеціально створений канал у напівпровідниковому кристалі з певним одним типом провідності (рис.). Усі електричні процеси в такому транзисторі зумовлені рухом носіїв заряду одного знаку (електронів або дирок) у даному каналі (рис.). Тому такі транзистори й називаються уніполярними.



Протікання струму у каналі забезпечує електричне поле, яке прикладається до кінців каналу. Таке поле називають поздовжнім. Для цього використовують два електроди: витоку та стоку. При цьому основні носії заряду каналу обов'язково мають рухатись від витоку до стоку.

Величиною струму через канал у ПТ керують електричним полем, яке прикладається в напрямку, перпендикулярному до каналу, і яке називають

**поперечним**. Саме тому такі транзистори називають польовими (керуються полем). Керуюче електричне поле подається на електрод ПТ, який називають **затвором**. У більшості ПТ керуюче поле подається відносно підкладки, до якої також приварюють спеціальний електрод, який так і називають - підкладка. Таким чином, **принцип дії ПТ** заснований на тому, що зміна напруженості поперечного електричного поля змінює провідність каналу, по якому проходить поздовжній струм каналу та вихідного кола. Нагадаємо, що керуванням струмом через БТ здійснюється інжекцією носіїв заряду, тобто керуючим фактором є струм (а не електричне поле).

Для виготовлення ПТ в основному використовуються кристали слаболегованого кремнію (Si), який має значно меншу провідність у порівнянні з германієм. Питомий опір такого кремнію приблизно рівний  $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

У електронних пристроях застосовуються **два різновиди ПТ**:

- із затвором у вигляді р-п переходу, який створений в каналі;
- із затвором повністю ізольованим від каналу (МДН- або МОН-транзистори).

Останній різновид ПТ, у свою чергу, ділиться на прилади із вбудованим каналом, та на прилади із індукованим каналом.

Крім того, залежно від провідності каналу польові транзистори діляться на ПТ із каналом р- або n-типу.

На рис. зображені умовні графічні позначення ПТ на схемах електричних принципів. Маркування аналогічне маркуванню біполярних транзисторів, за винятком того, що другий елемент маркування має букву П - польовий. На цих позначеннях стрілка показує на канал з n-типом провідності. Це аналогічно позначенням біполярних транзисторів, де стрілка показує на базу n-типу провідності.

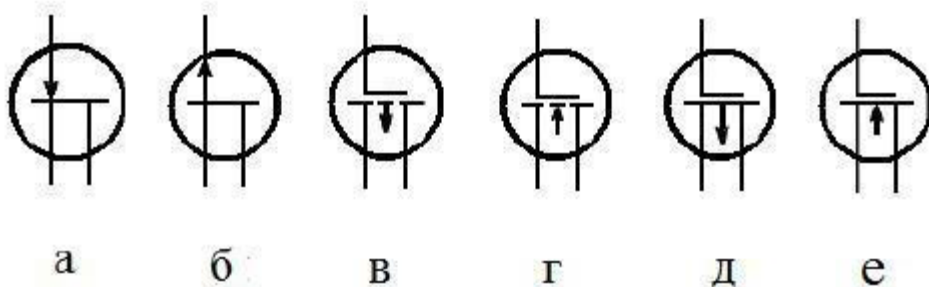


Рис. Позначення ПТ на електричних принципових схемах: а, б – з р-п переходами; в, г, д, е – МОН-типу

### Будова та підключення ПТ із затвором у вигляді р-п переходу

На рис. зображені структура і схеми включення ПТ із затвором у вигляді р-п переходу і каналом n-типу. Прилад складається із тонкої пластини кремнію із провідністю n-типу, що є каналом. До торців пластини під'єднанні два металеві контакти-електроди витоку і стоку.

Протилежні верхню і нижню грані пластини кремнію легують акцепторними домішками, які перетворює її поверхневі шари в області напівпровідника р-типу.

Таким чином у каналі утворюються  $p$ - $n$  переходи. До поверхневих легованих областей під'єднують спільний електрод затвору.

У електронних колах на електроди ПТ подаються відповідні ЕРС. При цьому мають виконуватися кілька правил:

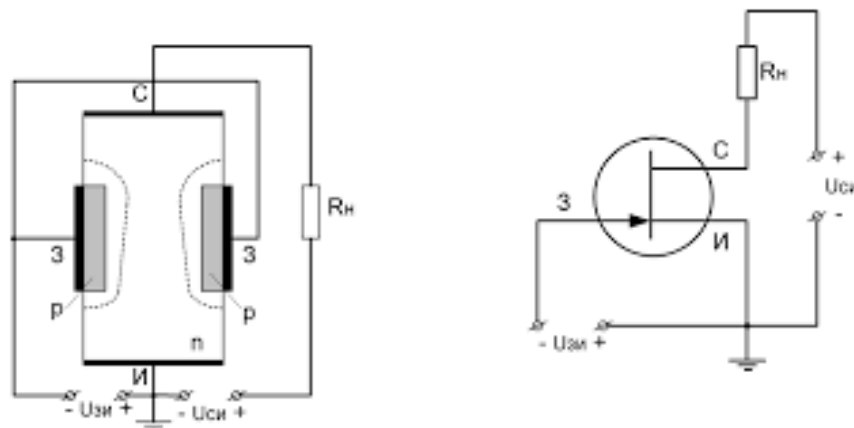


Рис. Спрощена структура та схема включення каналного ПТ із  $p$ - $n$  переходом

1. Найбільш поширена схема включення ПТ у електричні кола - схема із спільним витоком.

2. Між стоком і витоком підключають джерело живлення, яке часто позначають як  $E_c$  і споживач у вигляді опору навантаження  $R_n$ .

3. Полярності ЕРС  $E_c$  прикладається так, щоб основні носії каналу (у каналі  $n$ -типу це електрони) рухалися від витоку до стоку.

4. Рух цих носіїв зумовлює протікання в каналі струму  $I_c$ , а на кінцях каналу виникає напруга  $U_{св}$ .

5. На затвор подається керуючий сигнал із ЕРС  $E_z$ , у коло якої також часто вводять обмежувач резистор  $R_z$ .

6. Керуючий сигнал повинен мати заперну полярність для  $p$ - $n$  переходів. У результаті між затвором і витоком формується певна заперна напруга  $U_{зв}$ .

Пряма полярність напруги на затворі практично не впливає на роботу ПТ з  $p$ - $n$  переходом.

Аналогічними є будова і підключення ПТ із каналом  $p$ -типу.

### **ВАХ та принцип роботи польових транзисторів із затвором у вигляді $p$ - $n$ переходу**

Робота ПТ (рис.) заснована на зміні величини ширини, а відповідно і опору каналу під дією заперної напруги на затворі. Якщо напруга на затворі відсутня, то весь канал добре проводить електричний струм і його опір мінімальний. При збільшенні величини заперної напруги в каналі біля поверхневих шарів зменшується концентрація основних носіїв заряду (у каналі  $n$ -типу це електрони) і опір каналу зростає. Одночасно відбувається розширення  $p$ - $n$  переходів, що обумовлює зменшення площі поперечного перерізу каналу і, відповідно, його провідності. Такі

процеси ілюструють статичні стокова (вихідна) та стоко-затворна (або передавальна вхідна) ВАХ ПТ (рис.).

Стокові ВАХ для кожної фіксованої керуючої напруги  $U_{зв}$  мають дві ділянки. На першій ділянці відбувається досить різке наростання струму  $I_c$  через канал при рості напруги  $U_{св}$ . Після досягнення напругою між стоком та витком певної величини  $U_{св.нас}$ , яка називається напругою насичення, струм через канал практично перестає залежати від напруги  $U_{св}$ . Цим процесам відповідає друга - яскраво виражена ділянка насичення струму  $I_c$  вихідних ВАХ. У робочому режимі ПТ використовуються саме ці ділянки насичення вихідних характеристик. При дуже великих напругах  $U_{св}$  може відбутися пробій структури ПТ. Тому на практиці не слід перевищувати максимальні допустимі для даного типу транзисторів напруги  $U_{св}$ .

Чим вища керуюча запірна напруга на  $p-n$  переході, тим нижче по осі струмів  $I_c$  лежить відповідна гілка вихідних ВАХ. При досягненні запірною напругою величини напруги відсічки  $U_{зв.відс}$ , канал практично змикається (закривається) і його опір стає дуже великим. Відповідно, струм через канал зменшується практично до нуля.

Слід ще раз підкреслити, що ПТ із затвором у вигляді  $p-n$  переходу працює лише при напрузі на затворі лише одної - запірної полярності. Пряма полярність напруги на затворі практично не впливає на роботу каналу і ПТ.

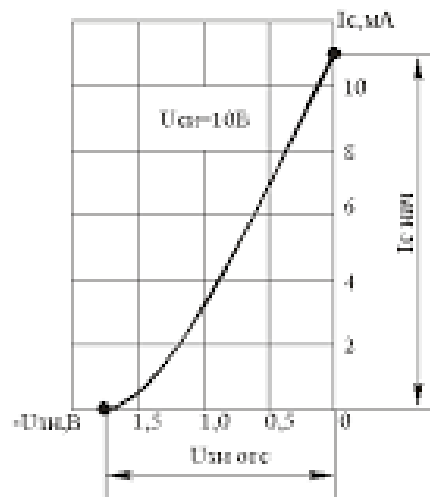
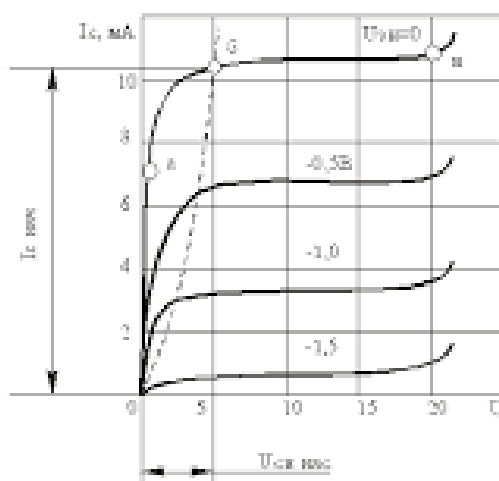
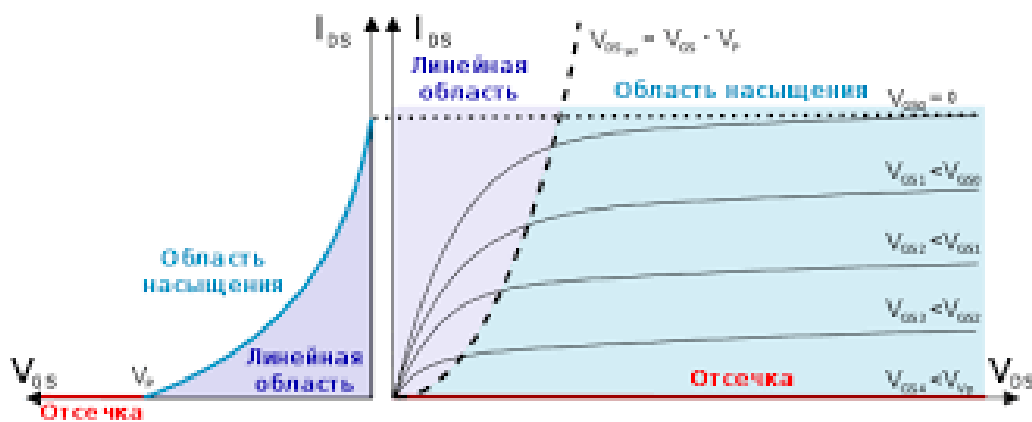


Рис. Схематичні та реальні статичні ВАХ ПТ із затвором у вигляді р-п переходу і каналом n-типу: а – вхідна витік-затворна ВАХ; б – вихідні ВАХ

### МОН польовий транзистор із вбудованим каналом та його підключення

Спрощена структура МОН ПТ із каналом n-типу, що вбудований, показана на рис. Вона містить **підкладку** (високоомну слаболеговану домішкою кремнієву пластинку із провідністю р-типу). У верхній частині підкладки створюється **легований тонкий поверхневий шар**, провідність якого протилежна провідності підкладки. Цей шар виконує функцію провідного каналу. Окисненням кремнію на поверхні пластини над каналом утворюється тонкий (0,2...0,3 мкм) **шар двоокису кремнію**  $\text{SiO}_2$ , який є діелектриком.

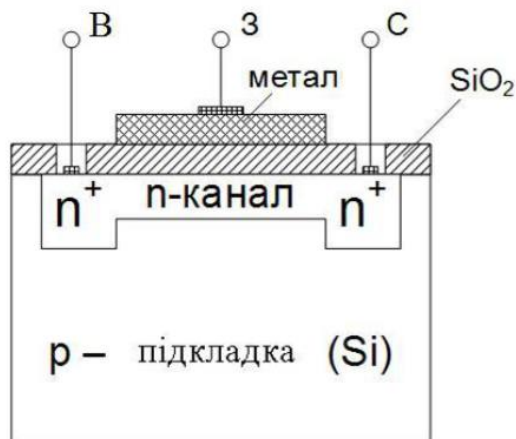
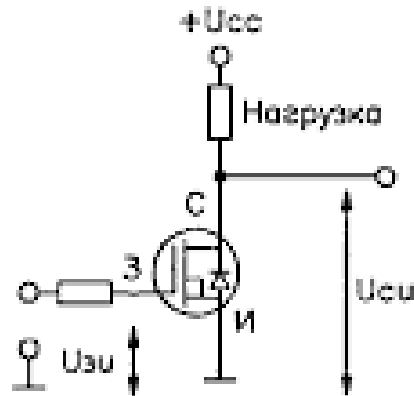


Рис. Спрощена структура МДН ПТ із каналом n-типу, що вбудований, та його ВАХ

Через **витравлені у шарі  $\text{SiO}_2$  отвори** на кінцях каналу створюються дві **сильнолеговані області** із високою провідністю того ж типу, що і провідність (у нашому випадку n-типу). До цих областей припаюють **зовнішні провідника витоку (В) і стоку (С)**. Над шаром двоокису кремнію між витоком і стоком наносять металевий шар, до якого припаюють **вивід затвору**. До підкладки теж припаюють **окремий провідник**, який у більшості електронних схем з'єднується із виводом витоку.

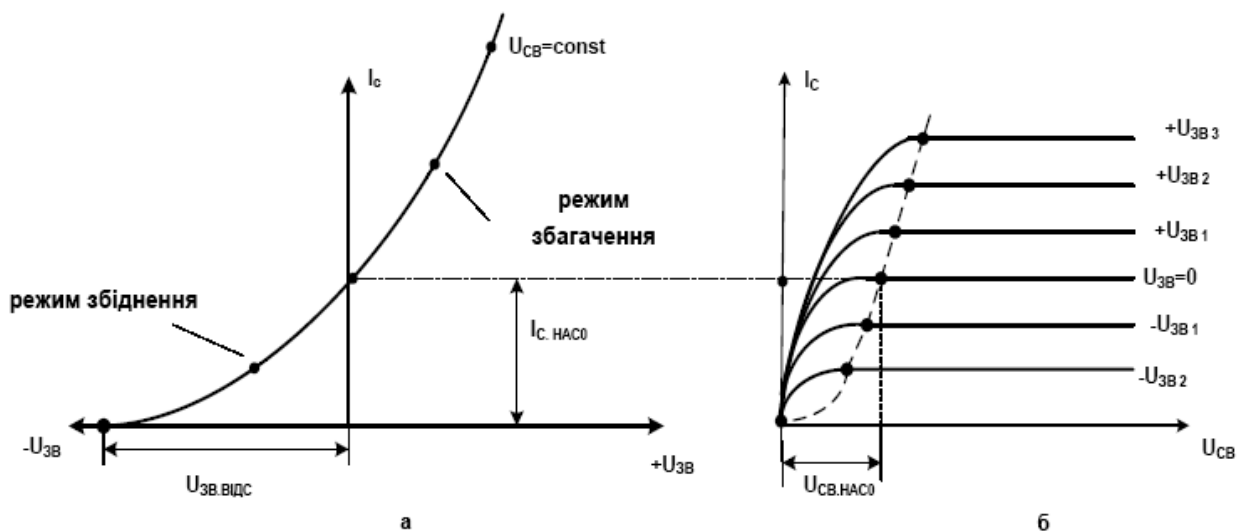
У електронні кола МОН ПТ із вбудованим каналом підключають за розглянутими вище правилами (рис.). Однак тут є одна особливість: на затвор по відношенню до витоку можна подавати сигнали з керуючою ЕРС обох полярностей.



При подачі на затвор прямої ЕРС (у нашому випадку на затворі буде позитивний полюс джерела ЕРС) поперечне електричне поле буде витягуватися із підкладки у канал додаткові основні носії (у нашому випадку це електрони). У результаті провідність каналу буде збільшуватися. Такі режими роботи ПТ називаються режимами збагачення. Описані процеси задають ВАХ МОН ПТ із вбудованим каналом (рис.).

При подачі на затвор запірної ЕРС (у нашому випадку на затворі буде негативний полюс джерела ЕРС) поперечне електричне поле буде виштовхувати із каналу у підкладку основні носії (у нашому випадку це електрони). Тому провідність каналу буде зменшуватися. Такі режими роботи ПТ називаються режимами збіднення (рис.).

При досягненні запірною керуючою напругою певної величини  $U_{зв.відс}$  практично всі основні носії каналу переходять у підкладку і струм каналу



наближається до нуля.

## МОН польовий транзистор із індукованим каналом

У МОН ПТ із індукованим каналом канал між областями витоку і стоку відсутній, оскільки при виготовленні транзистора він технологічно не створюється (рис.).

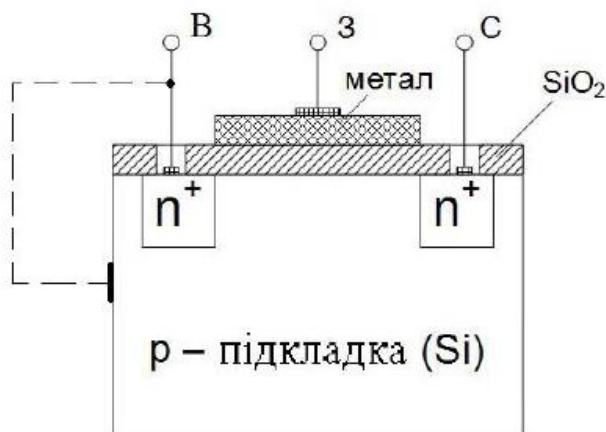


Рис. Спрощена структура МОН ПТ із індукованим каналом n-типу

Провідний канал (у нашому випадку n-типу) створюється керуючою ЕРС, яка прикладається між затвором та витоком. При цьому для МОН ПТ із індукованим каналом робочими є лише прямі керуючі напруги (у нашому випадку це позитивний полюс джерела ЕРС на затворі). Стоко-затворна і стокові ВАХ таких ПТ наведені на рис. Важливою особливістю роботи таких транзисторів є те, що при відсутності керуючої напруги канал є непровідним і через нього не протікає струм навіть при підключення джерела живлення до електричного кола стоку. Більше того, канал починає пропускати електричний струм лише при подачі керуючої напруги, більшої певного граничного значення  $U_{п}$  (на рис. позначена як  $U_{зв.пор.}$ ), яке називають пороговою напругою.

Принцип роботи МОН ПТ із індукованим каналом аналогічний ПТ із вбудованим каналом у режимі збагачення.

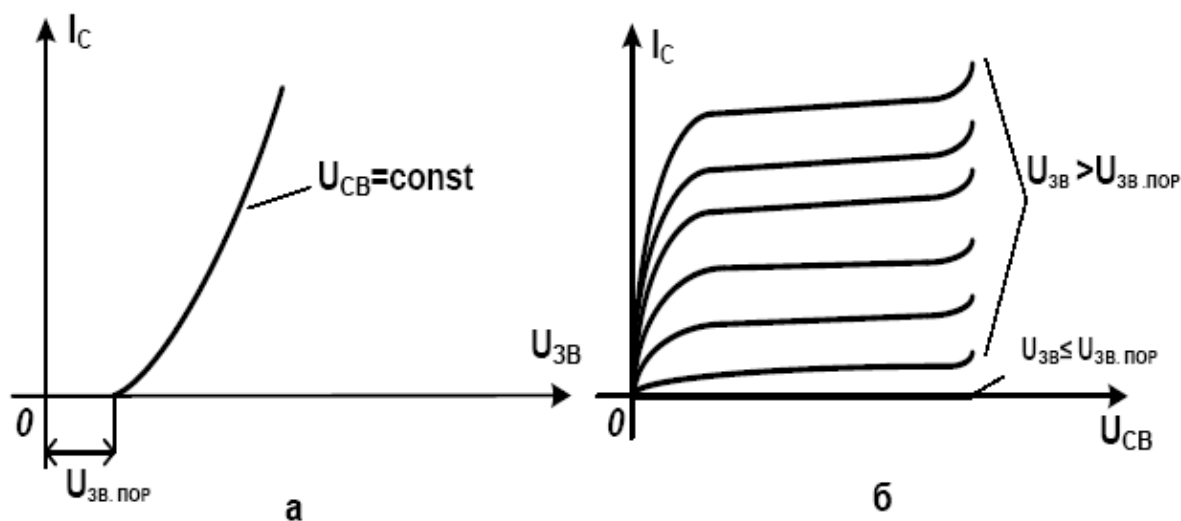


Рис. Статичні ВАХ МОН ПТ із індукованим n-каналом: а – входні; б – вихідні

### Основні параметри уніполярних транзисторів



Основними є кілька параметрів польових транзисторів.

### 1. Крутість передавальної характеристики в режимі насичення

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{3B}} \right|_{U_{CB}=\text{const}} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}} \right|_{U_{CB}=\text{const}}.$$

Даний параметр визначається з характеристики керування в режимі насичення (рис.2). Фізичне значення цього параметра полягає в тому, що він показує на скільки міліамперів змінюється струм стоку при зміні напруги на затворі на 1 В, якщо  $U_{CB} = \text{const}$ . Крутість характеризує підсилювальні властивості транзистора. Числові значення цього параметра становлять 0,5...30 мА/В.

### 2. Внутрішній вихідний опір транзистора

$$R_i = \left. \frac{dU_{CB}}{dI_C} \right|_{U_{3B}=\text{const}} = \left. \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \right|_{U_{3B}=\text{const}}.$$

Значення цього параметра визначається за однією з гілок вихідних ВАХ в області їх насичення (рис.1). Так як на цій ділянці струм стоку змінюється не сильно, то цей параметр має значення від сотень кілоомів до одиниць мегаомів.

### 3. Статичний коефіцієнт підсилення за напругою

$$\mu = \left. -\frac{dU_{CB}}{dU_{3B}} \right|_{I_C=\text{const}} \approx \left. -\frac{\Delta U_{CB}}{\Delta U_{3B}} \right|_{I_C=\text{const}}.$$

Цей коефіцієнт показує, наскільки сильніше на зміну струму стоку впливає зміна напруги на затворі, ніж зміна напруги на стоці. Цей коефіцієнт визначає можливості уніполярного транзистора для підсилення напруги. Найпростіше його можна розрахувати за співвідношенням  $\mu = R_i \cdot S$ . Типові значення статичного коефіцієнта підсилення за напругою рівні кільком сотень.

### 4. Вхідний опір

$$R_{BX} = \left. \frac{dU_{3B}}{dI_3} \right|_{U_{CB}=\text{const}} = \left. \frac{\Delta U_{3B}}{\Delta I_3} \right|_{U_{CB}=\text{const}}.$$

Цей параметр є диференціальним опором  $p$ - $n$ -переходу, зміщеного у зворотному напрямі. Він досягає значень  $10^6 \dots 10^9$  Ом і знаходиться із довідників.

## Основні властивості польових транзисторів

Основні властивості-переваги ПТ у порівнянні з біполярними:

низький рівень власних шумів;

висока економічність за рахунок низької споживаної потужності від джерела живлення, оскільки ПТ керуються не струмом, як БТ, а електричним полем;

висока стійкість до дії іонізуючого випромінювання і висока радіаційна стійкість;

значно простіша технологія виготовлення МОН ПТ при створенні інтегральних схем із великим ступенем інтеграції;

малі розміри.

Саме ці переваги зумовили перехід практично всієї сучасної електроніки на ПТ.

Основний практичний недолік МОН ПТ полягає у тому, що вони дуже легко виходять із ладу (пробиваються) при виникненні на затворі випадкових статичних електричних зарядів. Фізично це явище пояснюється тим, що затвор розміщується на дуже тонкому шарі діелектрика (товщиною менше 1 мкм), який виступає ізоляційним матеріалом між затвором та каналом. Ці елементи створюють «паразитний» конденсатор ємністю  $C$  між затвором та підкладкою із величиною  $C = 2 \dots 15$  пФ у залежності від серії мікросхеми. Тому навіть при невеликих накопичених зарядах на затворі чи підкладці, яким нікуди стікати, між цими елементами виникають статичні високі напруги, вищі пробивних напруг ізоляційного прошарку. (розрахунок)

### Загальні особливості уніполярних транзисторів

В основу дії уніполярних транзисторів покладено використання носіїв заряду тільки одного знаку: електронів або дірок. Це зв'язано з тим, що в цих транзисторах не використовується явище інжекції, яке є основою роботи біполярних транзисторів. Звідси слідує, що і принцип дії уніполярних транзисторів докорінно відрізняється від дії біполярних транзисторів, зокрема, вона ґрунтується на ефекті розширення  $p$ - $n$ -переходу, ввімкненого в запірному напрямку.

Іншою принциповою особливістю уніполярних транзисторів є те, що для керування вихідним струмом у них використовується вхідна напруга, в той час як у звичайному біполярному транзисторі з цією метою використовується вхідний струм.

### Правила роботи з МОН транзисторами

При роботі з МОН транзисторами необхідно дотримуватись деяких правил. По-перше, важливо знати по довідникових даних виробника максимальне значення напруги затвор-витік. Якщо ця напруга буде занадто великою, то тонка ізолююча плівка окислу зруйнується, і транзистор вийде з ладу. По-друге, ізолююча плівка досить чутлива до підвищення напруги і може бути пошкоджена статичним зарядом, що з'являється на выводах транзистора. Зокрема, такий заряд може перейти з пальців людини, яка працює з транзистором.

Для того щоб уникнути пошкоджень, МОН транзистори, як правило, поставляються із замкненими між собою выводами. Замикання може здійснюватися кількома методами: з'єднанням выводів провідниками; упакуванням транзистора в замикаюче кільце; впресуванням транзистора в провідну піну; з'єднанням декількох транзисторів разом; транспортуванням в антистатичних трубках; загортанням транзисторів у металеву фольгу.

МОН транзистори останніх розробок захищені за допомогою стабілітронів, включених у середині транзистора між затвором і витоком. Стабілітрони захищають структуру транзисторів від статичних розрядів та перехідних процесів і усувають необхідність використання зовнішніх замикаючих пристроїв.

При роботі з незахищеними МОН транзисторами слід дотримуватися наступних правил:

1. До впаювання в електронне коло виводи транзистора повинні бути з'єднані

разом (замкнені між собою).

2. Рука, якою ви будете брати транзистор, повинна бути заземлена за допомогою металевого браслета на зап'ясті.

3. Жало паяльника, яким ви працюєте, необхідно заземлити.

4. МОП транзистор ніколи не повинен вставлятися в електричне коло або видалятися з кола при включеному живленні.

1. Уніполярні напівпровідникові прилади (робота рухом носіїв заряду одного знаку). Порівняння із біполярними.
- 2.. Створення спеціального каналу шляхом легування шару високоомного (слабопровідного напівпровідника) певним типом домішок. Створюється необхідна провідність цього шару (рис.).
3. Протікання струму в каналі забезпечує електричне поле, яке прикладається до кінців каналу.
4. Величиною струму через канал у ПТ керують електричним полем, яке прикладається в напрямку, перпендикулярному до каналу.
5. Керуюче електричне поле подається на електрод ПП, який називають затвором.
6. Керування полягає у зміні провідності (або опору) каналу.
7. Порівняння із біполярним - керуванням здійснюється інжекцією носіїв заряду у базу - керуючим фактором є струм (а не електричне поле).
8. Для виготовлення ПТ в основному використовується слаболегований кремній (Si). Питомий опір біля  $10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .
9. У електронних пристроях застосовуються два різновиди ПТ:
  - із затвором у вигляді р-n переходу в каналі;
  - із затвором повністю ізольованим від каналу (МДН- або МОН-транзистори).
10. Залежно від провідності каналу польові транзистори діляться на ПТ із каналом р- або n-типу.
11. Умовні графічні позначення ПТ на схемах електричних принципів.
12. Маркування аналогічне маркуванню біполярних транзисторів, за винятком того, що другий елемент маркування має букву П - польовий.

1. Структура на рис. Створення р-n-переходу.
2. Канал, витік, стік, джерело ЕРС  $E_c$  (виконує роль джерела живлення), навантаження  $R_n$ .
3. Правило підключення  $E_c$ .
4. У каналі протікає струм  $I_c$ . На кінцях каналу виникає напруга  $U_{cv}$ .
5. На навантаженні виникає напруга  $U_n = I_c \cdot R_n \approx E_c - U_{cv}$ .
5. На затвор подається ЕРС  $E_{zv}$  (керуюча, оскільки керує шириною каналу, а відповідно і величиною струму у каналі).
6. Правило підключення  $E_{zv}$ .
7. У коло керуючої ЕРС часто вводять обмежуючий резистор  $R_z$ .
8. Між затвором і витіком формується певна запірна напруга  $U_{zv} \approx E_{zv}$ .

### **Статичні ВАХ транзистора з переходом.**

1. Робота каналу при  $E_{zv} = 0$  і при зміні  $E_c$ .
2. Описують такі процеси статичними стоковими ВАХ.
3. Кожна гілка відповідає своїй напрузі  $U_{zv}$  і має 2 ділянки.
4. На першій ділянці відбувається досить різке наростання струму  $I_c$  через канал при рості напруги  $U_{cv}$ .

5. Друга ділянка відповідає незмінності струму  $I_c$  при зміні напруги  $U_{св}$  і називається ділянкою насичення.

6. Точку переходу від однієї ділянки до другої називається точкою насичення. Ця точка має дві координати:  $U_n$  та  $I_n$ .

7. Робочою вважаються лише ділянка насичення гілки стокової ВАХ.

8. Напругу  $U_{св}$  можна збільшувати лише до певного граничного значення  $U_{свmax}$ . При вищих напругах відбувається руйнування каналу.

9. Прикладання певної запірної напруги  $U_{зв}$  до затвору зменшує концентрацію основних носіїв у каналі і його ширину. Це відповідає більш низькому розміщенню наступних гілок стокових ВАХ.

10. Кожній величині напруги  $U_{зв}$  відповідає своя гілка стокових ВАХ. Разом вони утворюють сімейство гілок стокових ВАХ.

11. При перевищенні напругу на затворі певного значення  $U_v$ , яке називають напругою відсічки, канал запирається і струм через нього стає рівним нулю.

12. Пряма поляристість напруги на затворі мало впливає на роботу каналу. Але при цьому різко зростає струм затвору.

### **МОН транзистори з вбудованим каналом.**

1. Канал створюється таким же чином, як і в приладах із  $p-n$ -переходом.

2. Окислення поверхневого шару при високих температурах – створюється тонкий шар діелектрика (окису кремнію  $SiO_2$ ).

3. Протравлення отворів та створення в них двох сильнолегованих областей, до яких приварюють виводи витоку та стоку.

4. На шар окислу наносять тонкий шар металу і приварюють затвор.

5. Приварюють електрод підкладки.

6. Правило подачі ЕРС  $E_c$  таке ж, як і для попереднього транзистора.

7. На затвор можна подавати як пряму ЕРС  $E_{зв}$  (робота транзистора в режимі збагачення каналу), так і зворотню ЕРС  $E_{зв}$  (робота транзистора в режимі збіднення).

### **МОН транзистори із індукованим каналом.**

1. Основний недолік транзисторів з переходом та вбудованим каналом.

2. Окислення поверхневого шару при високих температурах – створюється тонкий шар діелектрика (окису кремнію  $SiO_2$ ).

3. Протравлення отворів та створення в них двох сильнолегованих областей, до яких приварюють виводи витоку та стоку.

4. На шар окислу наносять тонкий шар металу і приварюють затвор.

5. Приварюють електрод підкладки.

6. Правило подачі ЕРС  $E_c$  таке ж, як і для попереднього транзистора.

7. На затвор можна подавати лише пряму ЕРС  $E_{зв}$ . Тобто, даний тип транзистор працює лише в режимі збагачення каналу.