

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛАВРІНЕНКО Ю. В.

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ

Частина 2

"Електроніка"

Конспект лекцій

Одеса
Одеський державний екологічний університет
2017

ББК 32.84
Л 13
УДК 621.37

Рекомендовано методичною радою Одеського державного екологічного університету Міністерства освіти і науки України як конспект лекцій (протокол № 7 від 25. 05. 2017 р.)

Лавриненко Ю. В.

Основи електротехніки та електроніки. Частина 2. Електроніка: конспект лекцій. Одеса, ОДЕКУ, 2017. 92 с.

У конспекті лекцій подається короткий огляд утворення переходів напівпровідник-напівпровідник і метал-напівпровідник і їх властивості. Описані будова і принцип дії різних напівпровідникових приладів на основі одного і декількох р-п переходів і подані їх параметри і характеристики. Окремий розділ присвячений видам мікросхем і технології їх виробництва.

Як застосування схемотехніки розглядається робота за принциповими схемами одно і двонапівперіодних випрямлячів, електронних ключів і підсилювачів різних сигналів, короткий огляд сучасних засобів відображення інформації, наводиться принцип дії, достоїнства і недоліки такого виду.

Цей конспект лекцій призначений для студентів 2-го курсу денної та заочної форми навчання за спеціальністю "Комп'ютерні науки".

ISBN 978-966-186-007-9

© Лавріненко Ю. В., 2017

© Одеський державний екологічний університет, 2020

ЗМІСТ

	ПЕРЕДМОВА.....	6
1	ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВІ І МЕТАЛОНАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕХОДИ.....	7
1.1	Рух електронів в електричних і магнітних полях.....	7
1.1.1	Рух електронів в прискорюючому електричному полі.....	7
1.1.2	Рух електрона в гальмувальному електричному полі.....	8
1.1.3	Рух електрона в поперечному електричному полі.....	9
1.1.4	Рух електрона в магнітних полях.....	9
1.2	Зонована енергетична діаграма	10
1.3	Електропровідність напівпровідників.....	11
1.3.1	Власна провідність напівпровідників.....	11
1.3.2	Домішкова провідність провідників.....	12
1.3.3	Дрейфовий і дифузійний струми в напівпровідниках.....	13
1.4	Електронно-дірковий ($p-n$) перехід.....	14
1.4.1	Утворення електронно-діркового переходу.....	14
1.4.2	Пряме і зворотне вмикання $p-n$ переходу.....	15
1.4.3	Властивості $p-n$ переходу.....	16
1.5	Перехід Шотки.....	20
1.5.1	Утворення переходу Шотки.....	20
1.5.2	Пряме і зворотне вмикання діодів Шотки.....	21
1.6	Деякі ефекти напівпровідника.....	21
1.6.1	Тунельний ефект.....	21
1.6.2	Ефект Ганна.....	23
1.6.3	Ефект Холла.....	24
	Контрольні запитання.....	24
2	НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ.....	26
2.1	Будова і основні параметри напівпровідникових діодів.....	26
2.1.1	Конструкція напівпровідникових діодів.....	26
2.1.2	Вольтамперна характеристика й основні параметри напівпровідникових діодів.....	27
2.2	Випрямні діоди.....	28
2.2.1	Загальна характеристика випрямних діодів.....	28
2.2.2	Схеми випрямлячів.....	29
2.2.3	Електричні фільтри на виході випрямлячів.....	32
	Контрольні запитання	33

3	НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ $p-n$ ПЕРЕХОДІВ.....	34
3.1	Стабілітрони.....	34
3.2	Варикапи	36
3.3	Фотодіоди	37
3.4	Світлодіоди	39
3.5	Оптрони.....	40
	Контрольні запитання.....	41
4	ТРАНЗИСТОРИ.....	42
4.1	Біполярні транзистори.....	42
4.1.1	Будова біполярних транзисторів.....	42
4.1.2	Принцип дії біполярних транзисторів.....	43
4.1.3	Схеми вмикання біполярних транзисторів.....	45
4.1.4	Статичні характеристики біполярного транзистора.....	48
4.1.5	Динамічний режим роботи транзистора.....	50
4.1.6	Ключовий режим роботи транзистора.....	53
4.1.7	Еквівалентна схема транзистора.....	54
4.1.8	Представлення транзистора активним чотириполюсником.....	54
4.1.9	Система h -параметрів і їх фізичний сенс.....	55
4.1.10	Температурна властивість транзисторів.....	57
4.1.11	Частотна властивість транзисторів.....	57
4.1.12	Фототранзистори.....	58
4.2	Польові транзистори	59
4.2.1	Будова і принцип дії польових транзисторів з керуючим $p-n$ переходом.....	59
4.2.2	Характеристики польових транзисторів.....	61
4.2.3	Основні параметри польових транзисторів	62
4.2.4	Польові транзистори з ізольованим затвором	62
4.2.5	Польові транзистори для репрограмуючого запам'ятовуючого пристрою.....	65
4.3	Тиристори	67
4.3.1	Основні параметри тиристорів.....	67
4.3.2	Будова і принцип дії динисторів	67
4.3.3	Триністори	69
4.3.4	Поняття про симістори	70
	Контрольні запитання.....	71
5	ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ.....	72
5.1	Класифікація інтегральних мікросхем	72
5.2	Елементи і компоненти гібридних інформаційних систем.....	72

5.3	Елементи і компоненти напівпровідникових інтегральних мікросхем	73
5.4	Характеристики цифрових інтегральних мікросхем.....	74
5.5	Параметрів цифрових інтегральних мікросхем.....	75
5.6	Основні типи логіки	76
5.7	Логічні елементи на польових транзисторах МЕТАЛ ОКИСУ НІТРАТ-СТРУКТУРИ.....	76
5.7.1	Електронні ключі на МЕТАЛ ОКИСУ НІТРАТ-ТРАНЗИСТОР	76
5.7.2	Комплементарна МЕТАЛ ОКИСУ НІТРАТ- пара (КОМПЛІМЕНТАРНА МЕТАЛ ОКИСУ НАПІВПРОВІДНИК)	77
	Контрольні запитання	78
6	БУДОВА ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ.....	79
6.1	Індикатори	79
6.1.1	Світлодіодні індикатори	79
6.1.2	Вакуумні електролюмінесцентні індикатори	80
6.1.3	Рідкокристалічні індикатори	81
6.2	Екрани	82
6.2.1	Електронно-променеві трубки з електростатичним керуванням	82
6.2.2	Електронно-променеві трубки з електромагнітним керуванням.....	85
6.2.3	Кінескопи.....	87
6.3	Поняття про дисплеї	88
6.3.1	Плазмові панелі.....	89
6.3.2	Світлодіодні панелі	89
6.3.3	Рідкокристалічні панелі.....	89
	Контрольні запитання.....	90
	ЛІТЕРАТУРА.....	91

ПЕРЕДМОВА

Конспект лекцій "Електроніка" є другою частиною конспекту лекцій з дисципліни "Електротехніка і електроніка" і призначений для студентів факультету комп'ютерних наук денної і заочної форми навчання.

У конспекті лекцій розглянуті питання утворення переходів на напівпровідник-напівпровідник і метал-напівпровідник і їх властивості. Описані будова і принцип дії різних напівпровідникових приладів на основі одного і декількох *p-n* переходів і подані їх параметри і характеристики. Окремий розділ присвячений видам мікросхем і технології їх виробництва.

Як застосування схемотехніки розглядається робота за принциповими схемами одно і двонапівперіодних випрямлячів, електронних ключів і підсилювачів різних сигналів.

У конспекті лекцій представлений короткий огляд сучасних засобів відображення інформації, наводиться принцип дії, переваги і недоліки такого виду.

Конспект лекцій може бути корисний і студентам інших факультетів при написанні рефератів, курсових і дипломних робіт, оскільки напівпровідникова електроніка нині глибоко проникла в усі галузі науки і техніки.

Конспект лекцій становиться з шести розділів, містить 102 рисунки, і п'ять найменувань літератури.

1 ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВІ І МЕТАЛОНАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕХОДИ [1]

1.1 Рух електронів в електричних і магнітних полях

Перш ніж вивчати процеси, що протікають в електронно-дірковому і металонапівпровідниковому переходах розглянемо траєкторії руху електрона при дії на нього прискорюючого і сповільнюючого електричних полів, а також поперечного електричного і магнітного полів.

1.1.1 Рух електронів в прискорюючому електричному полі

Розглянемо однорідне електричне поле з напругою

$$E = U/d,$$

де U - діюча різниця потенціалів;
 d - відстань між пластинами (рис.1.1).

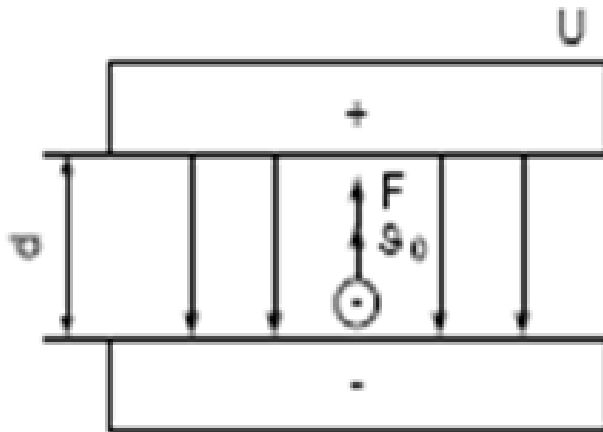


Рисунок 1.1 - Електрон в прискорюючому електричному полі

На одиничний позитивний заряд, поміщений в електричне поле, діє сила, яка чисельно дорівнює напрузі цього поля, тобто $F=E$ - для одиничного позитивного заряду, тоді для електрона

$$F = -eE.$$

Знак мінус показує, що сила діюча на електрон, спрямована проти лінії напруги електричного поля. Під дією цієї сили електрон рухається рівноприскорено і набирає максимальну швидкість у кінці шляху. Поле, лінії напруги якого спрямовані назустріч вектору початкової швидкості електрона V_0 , називається прискорюючим електричним полем.

Визначимо максимальну швидкість електрона. Робота з перемещення електрона з однієї точки поля в іншу дорівнює отвору заряду електрона на різницю потенціалів між цими точками

$$A = -e \cdot U.$$

Ця робота витрачається на надання електрону кінетичної енергії

$$W_k = m \frac{(V - V_0)^2}{2},$$

де V_0 - початкова швидкість електрона.

Вважатимемо, що $V_0 = 0$, тоді робота буде дорівнювати $A = W_k$. Після перетворення отримаємо:

$$e \cdot U = \frac{mV^2}{2} \text{ і } V = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Оскільки заряд електрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл і маса $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг константи, то в результаті після підстановки отримаємо

$$V = 600 \sqrt{U} \text{ [м/с].}$$

З цієї формули видно, що кінцева швидкість електрона в електричному полі визначається тільки величиною напруги між двома точками поля.

1.1.2 Рух електрона в гальмувальному електричному полі

Електричне поле, лінії напруженост якого співпадають за напрямком з вектором початкової швидкості електрона, називається призупиненим електричним полем (рис.1.2). Під дією сили F електрон рухатиметься рівносповільнено, в якійсь точці поля він зупиниться і почне рухатися у зворотному напрямі.

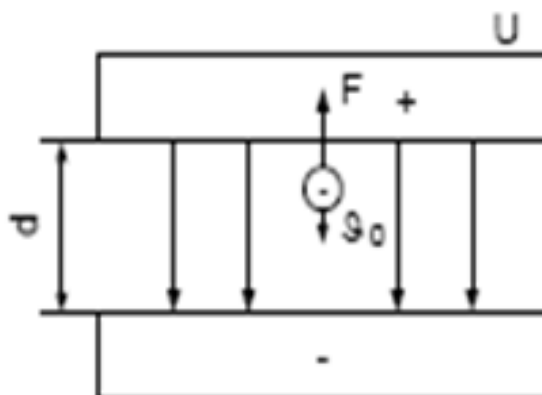


Рисунок 1.2- Електрон в гальмувальному електричному полі

1.1.3 Рух електрона в поперечному електричному полі

Поперечним електричним полем називається поле, лінії напруженості якого перпендикулярні вектору початкової швидкості електрона (рис. 1.3)

За рахунок дії сили F виникає вертикальна складова швидкості електрона, яка весь час збільшуватиметься. Початкова швидкість V_0 залишається постійною, внаслідок чого траєкторія руху електрона буде параболою. Після вильоту електрона за межі дії поля далі він рухатиметься по дотичній прямій (рис. 1.3).

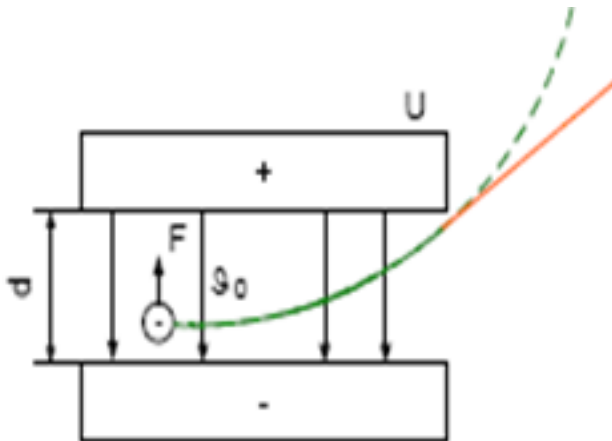


Рисунок 1.3 Електрон в поперечному електричному полі

1.1.4 Рух електрона в магнітних полях

На електрон, який рухається в магнітному полі, діє сила Лоренца, яка визначена виразом

$$F = B \cdot e \cdot V_0 \cdot \sin \alpha,$$

де B - магнітна індукція діючого поля;

e - заряд електрона;

α - кут між напрямом вектора швидкості електрона і магнітними силовими лініями.

При $\alpha = 90^\circ$ отримаємо $\sin \alpha = 1$. В результаті при $\alpha = 90^\circ$ траєкторія буде дугою кола (рис. 1.3). Коли $\alpha \neq 90^\circ$, вектор швидкості електрона можна розкласти на дві складові - поперечну і подовжну відносно напрямку магнітних силових ліній (рис. 1.4б). Під дією поперечної складової електрон рухатиметься по колу, а під дією подовжньої складової - рухатиметься поступово. В результаті траєкторія буде представляти собою спіраль (рис. 1.4а).

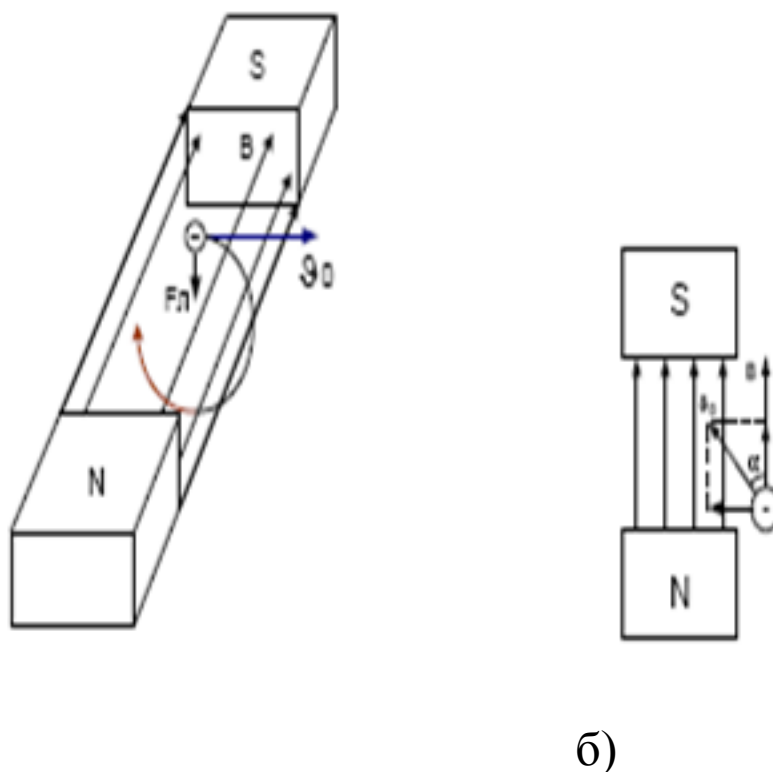


Рисунок 1.4 - Траєкторії руху електрона в магнітному полі

1.2 Зонована енергетична діаграма

Процеси, які призводять до утворення електронно-діркового і металонапівпровідникового переходів неможливо пояснити без розгляду будови речовини і оболонок атомів, що складаються з шарів, на яких знаходяться електрони з різними енергіями. Основну роль відіграє зовнішня оболонка. Наявність електронів, їх кількість і енергія визначають властивості речовини стосовно до електричного струму.

У провідників велика кількість вільних електронів, у діелектриків валентні електрони утримуються ковалентними зв'язками, у напівпровідників структура як у діелектриків, але ковалентні зв'язки значно слабкіші. Досить порівняно невелика кількість енергії, що отримується із зовнішнього середовища (температура, освітленість, сильне електричне поле) щоб електрони напівпровідника розірвали ковалентні зв'язки і стали вільними. Діапазон енергій, в якому лежить енергія електрона, що утримується ковалентним зв'язком, називається зоною валентності або валентною зоною.

Діапазон енергій, в якому знаходиться енергія електрона, що розірвав ковалентний зв'язок і став вільним, називається зоною провідності.

Графічне зображення цих енергетичних зон називається зонованою енергетичною діаграмою (рис. 1.5).

На рис. 1.5 показані енергетичні діаграми для діелектриків, провідників і напівпровідників відповідно. Як видно з рисунків, відмінність полягає в ширині забороненої зони, яка у діелектриків набагато більша, чим і пояснюються їх електричні властивості. Для того, щоб електрон зміг розірвати ковалентний зв'язок і стати вільним, він повинен отримати зовнішню енергію, більшу за ширину забороненої зони.



Рисунок 1.5 - Енергетичні зони

1.3 Електропровідність напівпровідників

Струм - це рух зарядів. У напівпровіднику він може виникати за рахунок: власної провідності напівпровідника, домішкової провідності напівпровідника або бути дрейфовим і дифузійним струмом в напівпровіднику.

1.3.1 Власна провідність напівпровідників

Власним напівпровідником, або ж напівпровідником *i*-типу називається ідеально хімічно чистий напівпровідник з однорідними кристалічними ґратами. Як правило, атоми напівпровідників (Ge -германій, Si - кремній) чотирьох валентні. У кристалічних ґратах вони пов'язані ковалентними зв'язками. Схематично кристалічних ґрати напівпровідника на площині можуть визначатись таким чином (рис. 1.6)

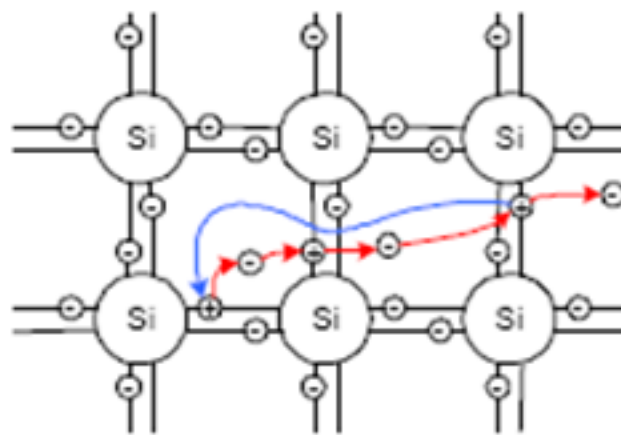


Рисунок 1.6 - Кристалічні ґрати напівпровідника

Якщо електрон за рахунок якогось зовнішнього джерела отримав енергію, більшу ніж ширина забороненої зони, він розриває ковалентний зв'язок і стає вільний. На його місці утворюється вакансія, яка має позитивний заряд, рівний за величиною заряду електрона, вона називається *діркою*.

В напівпровідниках *i* - типу концентрація електронів n_i дорівнює концентрації дірок p_i , тобто $n_i = p_i$.

Процес утворення пари зарядів-електрон і дірка - називається **генерацією**

заряду.

Вільний електрон може займати місце дірки, відновлюючи ковалентний зв'язок і при цьому випромінюючи надлишок енергії. Такий процес називається **рекомбінацією зарядів**. В процесі рекомбінації і генерації зарядів дірка як би рухається у зворотний бік від напрямку руху електронів, тому дірку заведено вважати рухливим позитивним носієм заряду.

Дірки і вільні електрони, що утворюються в результаті генерації носіїв заряду, називаються власними носіями заряду, а *провідність напівпровідника за рахунок власних носіїв заряду називається власною провідністю провідника*.

1.3.2 Домішкова провідність провідників

Оскільки у напівпровідників і -типу провідність істотно залежить від зовнішніх умов, в напівпровідникових приладах застосовуються домішкові напівпровідники.

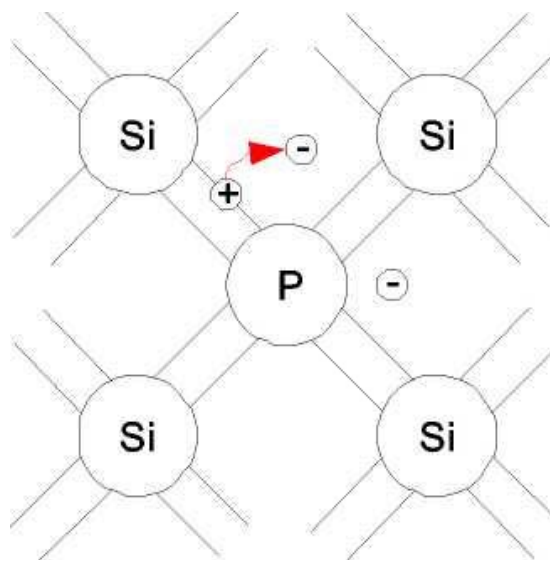


Рисунок 1.7 - Отримання напівпровідника *n* -типу

Якщо в напівпровідник ввести п'ятивалентну домішку (рис. 1.7), тоді чотиривалентні електрони можуть встановлювати ковалентні зв'язки з атомами напівпровідника, а п'ятий електрон залишається вільний. За рахунок цього концентрація вільних електронів перевищуватиме концентрацію дірок. Домішка, за рахунок якої концентрація електронів підвищується ($n_i > p_i$), називається *донорною* домішкою. Напівпровідник, у якого $n_i > p_i$, називається напівпровідником з електронним типом провідності, або *напівпровідником *n* - типу*.

У напівпровіднику *n* -типу електрони називаються основними носіями заряду, а дірки-неосновні носії заряду.

При введенні тривалентних домішок (рис. 1.8) три її валентних електрони відновлюють ковалентний зв'язок з атомами напівпровідника, а четвертий ковалентний зв'язок є не встановленим, тобто має місце дірка. В результаті цього концентрація дірок буде більшою за концентрацію електронів.

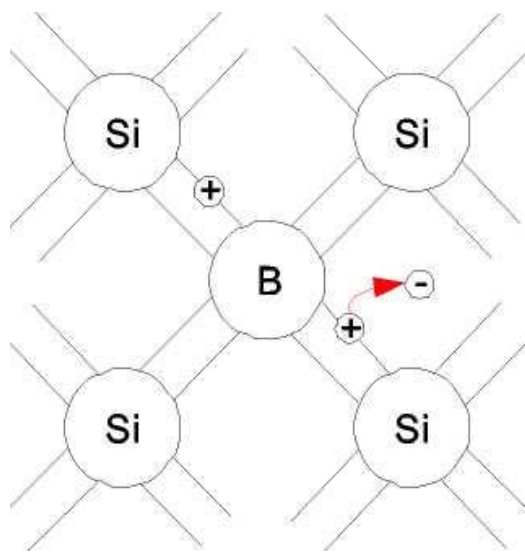


Рисунок 1.8 - Отримання напівпровідника *p*-типу

Домішка, при якій концентрація дірок збільшується ($p_i > n_i$), називається *акцепторною* домішкою.

Напівпровідник, у якого $p_i > n_i$, називається напівпровідником з дірковим типом провідності, або *напівпровідником p -типу*. У напівпровіднику p -типу дірки є основними носіями заряду, а електрони - неосновними носіями заряду. Реальна кількість домішок в напівпровіднику становить приблизно 10^{15} атомів в 1 см^3 .

1.3.3 Дрейфовий і дифузійний струми в напівпровідниках

Дрейфовий струм в напівпровіднику - це струм, що виникає за рахунок прикладеного електричного поля. При цьому електрони рухаються назустріч лініям напруженості поля, а дірки - в напрямі ліній напруженості поля.

Дифузійний струм - це струм, що виникає через нерівномірну концентрацію носіїв заряду в кристалі $n_2 > n_1$ і $n_2 - n_1 = \Delta n$ (рис. 1.9).

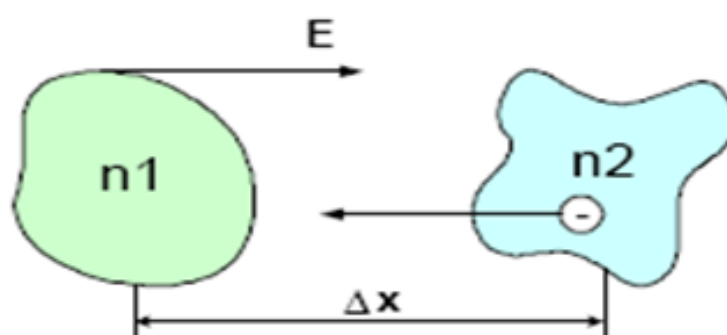


Рисунок 1.9 - Виникнення дифузійного струму

Відношення $\frac{\Delta n}{\Delta x} = \text{grad } n$ - це градієнт нерівномірності концентрації електронів. Аналогічно для дірок $\frac{\Delta p}{\Delta x} = \text{grad } p$ - градієнт нерівномірності концентрації дірок.

Величина дифузійного струму буде визначатися градієнтом нерівномірності і складатиме:

$$I_{n\text{диф}} = e \cdot D_n \cdot \text{grad } n, I_{p\text{диф}} = e \cdot D_p \cdot \text{grad } p,$$

де D_p і D_n - коефіцієнти дифузії дірок і електронів відповідно.

1.4. Електронно-дірковий (p - n) перехід

1.4.1 Утворення електронно-діркового переходу

Якщо в кристалі напівпровідника створити дві області одну n -типу, а іншу p -типу, тоді на межі між ними утворюється так званий p - n перехід. Зважаючи на нерівномірну концентрацію носіїв на межі розділу p -типу і n -типу напівпровідника, виникає дифузійний струм, за рахунок якого електрони з n -області переходять в p -область, а на їхньому місці залишаються некомпенсовані заряди позитивних іонів донорної домішки. Електрони, що приходять в p -область, рекомбінують з дірками, і виникають некомпенсовані заряди негативних іонів акцепторної домішки (рис. 1.10).

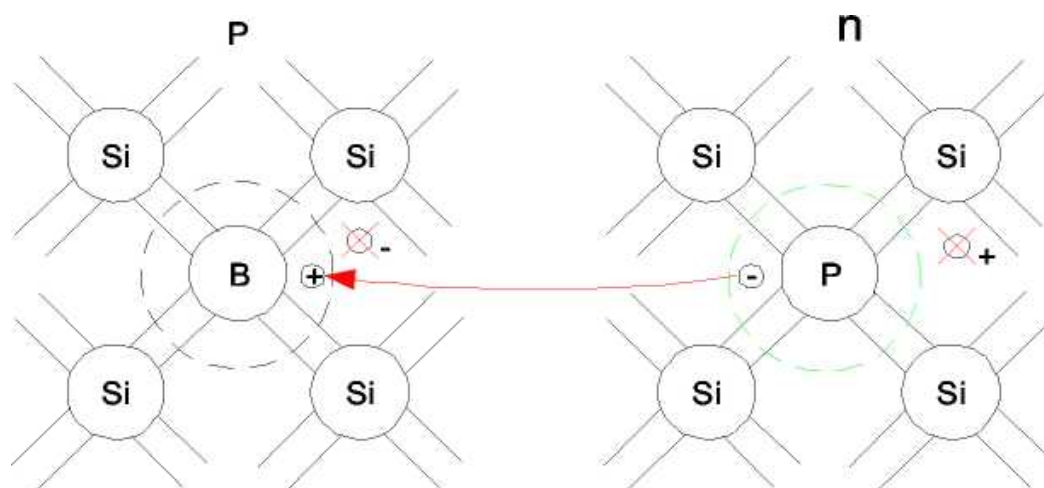


Рисунок 1.10 - Первинний рух носіїв струму

Ширина p - n переходу - десяті частки мікрона. На межі розділу виникає внутрішнє електричне поле p - n переходу, яке буде призупиненням для основних носіїв заряду і їх відкидатиме від межі розділу.

Для неосновних носіїв заряду поле буде прискорюючим і переноситиме їх в область, де вони будуть основними. Максимум напруги електричного поля - на межі розділу.

Розподіл потенціалу по ширині на НАПІВПРОВІДНИКА називається потенційною діаграмою (рис. 1.11).

Різниця потенціалів на p - n переході називається контактною різницею потенціалів або потенційним бар'єром. Для того, щоб основний носій заряду зміг здолати p - n перехід, його енергія має бути достатньою для подолання потенційного бар'єра.

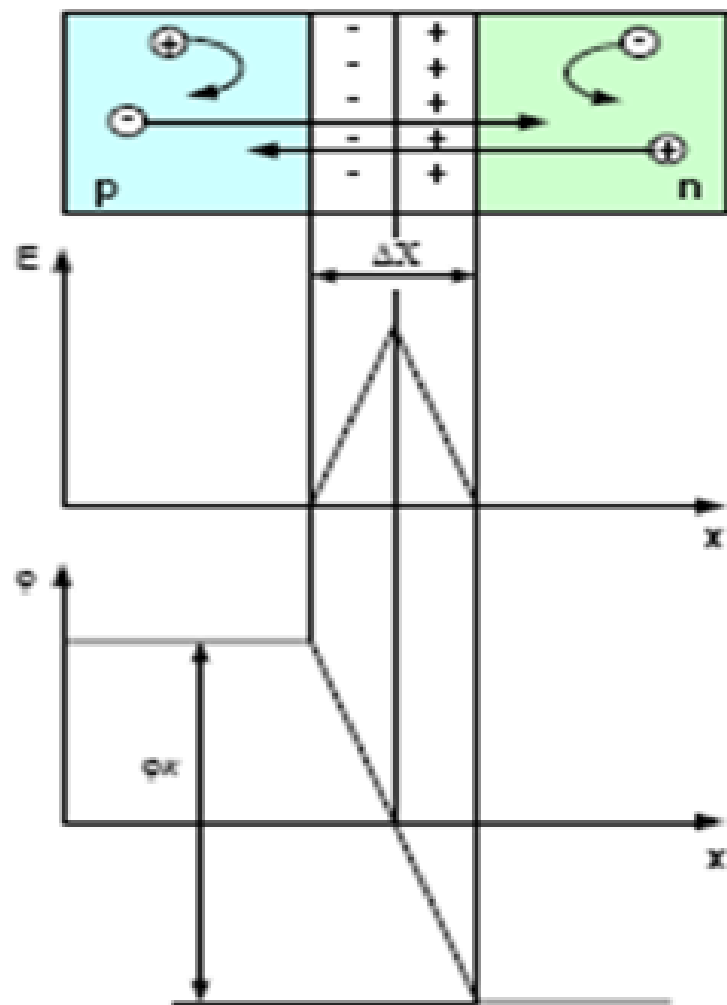


Рисунок 1.11 - Потенційна діаграма p - n переходу

1.4.2 Пряме і зворотнє вмикання p - n переходу

Прикладемо зовнішню напругу плюсом до p -області (рис. 1.12а). Зовнішнє електричне поле направлено назустріч внутрішньому полю p - n переходу, що призводить до зменшення потенційного бар'єру. Основні носії зарядів легко зможуть здолати потенційний бар'єр

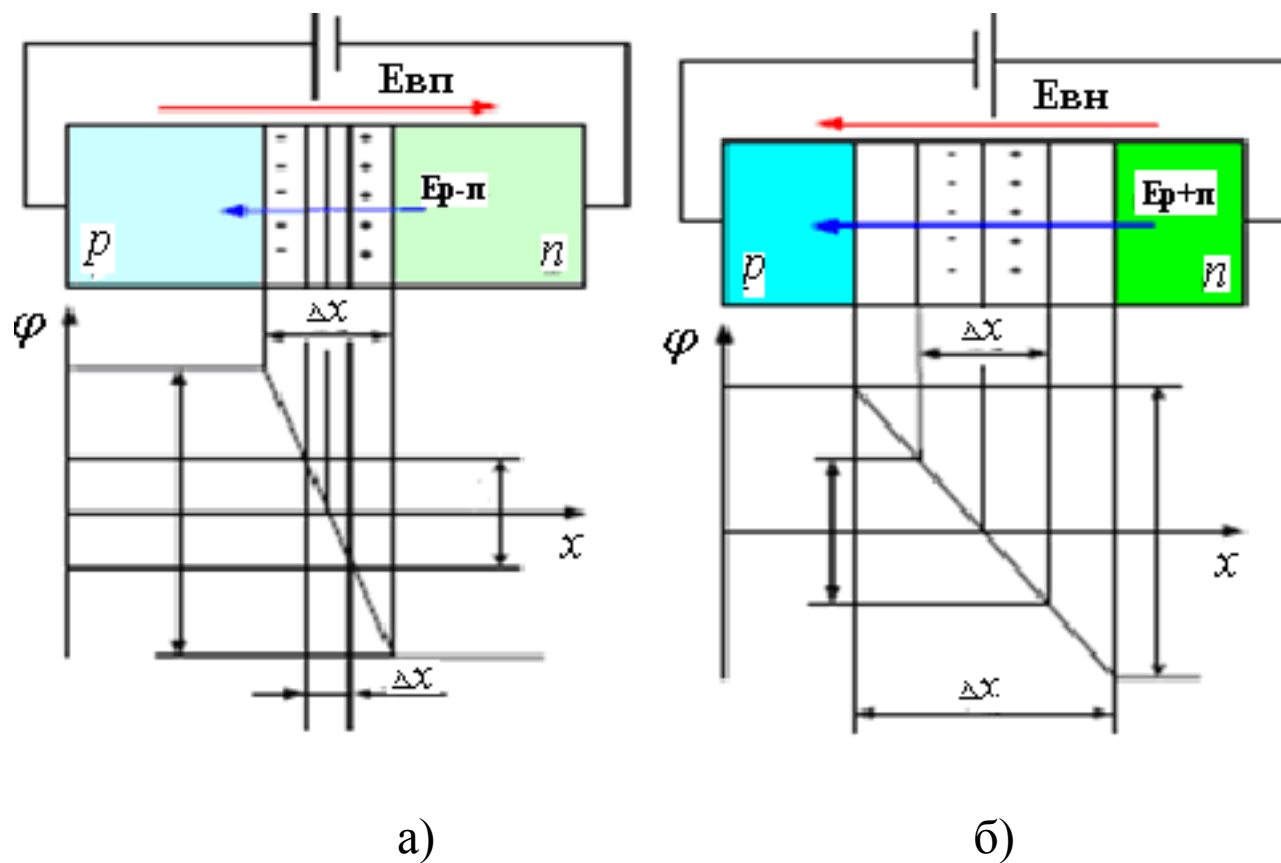


Рисунок 1.12 - Пряме і зворотнє вмикання p - n переходу

Тому через p - n перехід протікатиме порівняно великий струм, зумовлений основними носіями заряду.

Таке вмикання p n переходу називається прямим, і струм через p - n перехід, зумовлений основними носіями заряду, також називається прямим струмом. Вважається, що при прямому включенні p - n перехід відкритий.

Якщо підключити зовнішню напругу мінусом на p -область (рис 1.12б), а плюсом на n -область, тоді виникає зовнішнє електричне поле, лінії напруги якого співпадають з внутрішнім полем p - n переходу. В результаті це приведе до збільшення потенціального бар'єру і ширини p - n переходу. Основні носії заряду не зможуть подолати p - n перехід, і вважається, що p - n перехід закритий. Обидва поля - і внутрішнє і зовнішнє - є прискорюючими для неосновних носіїв заряду, тому неосновні носії заряду проходять через p - n перехід, утворюючи дуже маленький струм, який називається оберненим струмом. Таке вмикання p - n переходу також називається зворотнім.

1.4.3 Властивості p - n переходу

До основних властивостей p - n переходу відносяться:

- властивість односторонньої провідності;
- температурні властивості p - n переходу;
- частотні властивості p - n переходу;
- пробій p - n переходу.

Властивість односторонньої провідності p - n переходу зручно розглянути на вольтамперній характеристиці. Вольтамперною характеристикою (ВАХ) називається графічно виражена залежність величини що протікає через p - n перехід струму від величини прикладної напруги $I=f(U)$. Вважатимемо пряму напругу позитивною, зворотню - негативною. Струм через p - n перехід може бути визначений таким чином:

$$I = I_0 \left(\exp \left\{ \frac{e' \cdot U}{kT} \right\} - 1 \right),$$

де I_0 - струм, зумовлений проходженням власних носіїв заряду;

$\exp$ - основа натурального логарифма;

e' - заряд електрона;

T - температура в градусах Кельвіна;

U - напруга, прикладена до p - n переходу;

k - постійна Больцмана.

Позначимо $C=e'/kT=const$, оскільки всі складові є постійними величинами. Тоді величина прямого струму буде визначатися таким чином:

$$I = I_0 (\exp \{ c \cdot U \} - 1).$$

При прямому включенні переходу (плюс джерела приєднаний до p -області) співмножник буде значно більший від одиниці

$$\exp\{c \cdot U\} \gg 1.$$

Тоді остаточно отримаємо:

$$I_0 \exp\{c \cdot U\},$$

тобто при прямому включенні збільшення напруги призводить до швидкого зростання струму за експоненціальним законом.

При подачі негативної напруги на p -область (зворотне вмикання) співмножник буде значно менший від одиниці

$$\exp\{-c \cdot U\} \ll 1.$$

І величина зворотного струму визначатиметься виразом

$$I = -I_0,$$

тобто буде у багато разів менший від прямого струму. Графічно це можна предстаити за допомогою вольт-амперної характеристики (ВАХ), представленої на рис. 1.13

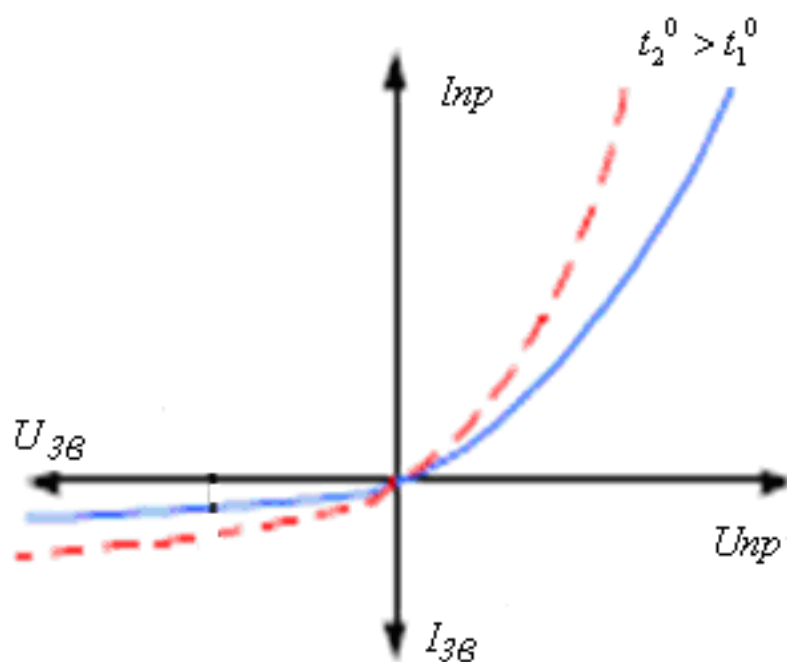


Рисунок – 1.13 ВАХ p - n переходу

Оскільки величина зворотного струму у багато разів менша, ніж прямого, тоді зворотним струмом можна нехтувати і вважати, що p - n перехід проводить струм лише в один бік.

Температурна властивість p - n переходу показує, як змінюється робота p - n переходу при зміні температури кристала. На p - n перехід значною мірою

впливає нагрів, і в дуже малій мірі - охолодження. При збільшенні температури збільшується термогенерація носіїв заряду, що призводить до збільшення як прямого, так і зворотнього струму (рис. 1.13 пунктирна лінія). Зростання зворотнього струму є дуже шкідливим явищем, оскільки $p-n$ перехід при певній температурі може втратити властивість односторонньої провідності

Частотні властивості $p-n$ переходу показують, як працює $p-n$ перехід при подачі на нього змінної напруги високої частоти. Частотні властивості $p-n$ переходу визначаються двома видами місткості переходу.

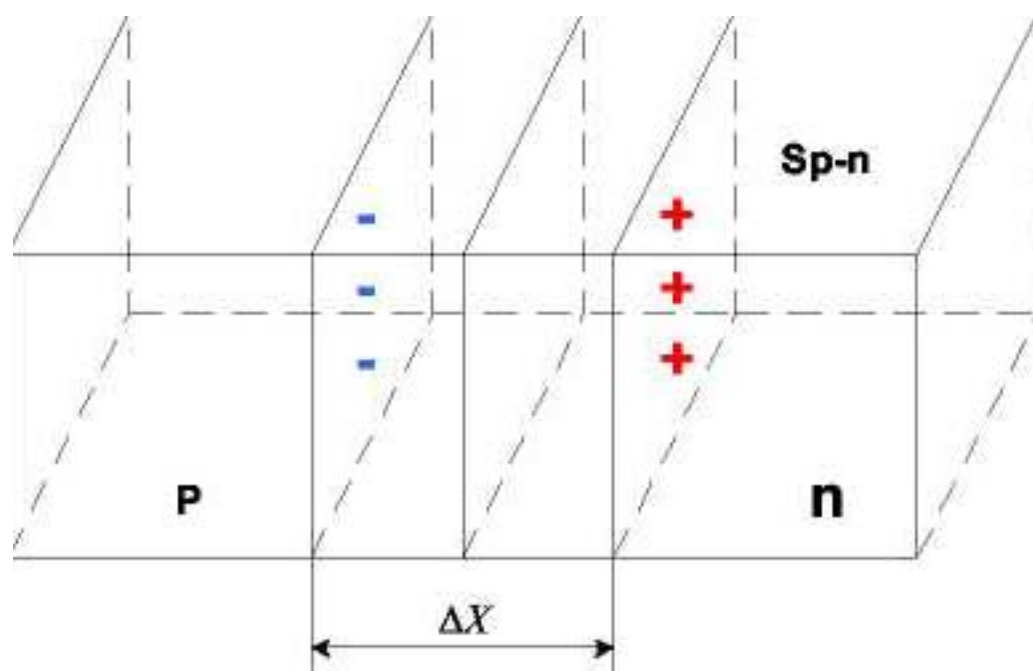


Рисунок 1.14 - Утворення бар'єрної місткості

Перший вид місткості - це місткість, обумовлена нерухомими зарядами іонів донорної і акцепторної домішки. Вона називається зарядною, або бар'єрною місткістю. Її величина визначається за формулою

$$C_{бар} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

де $S = S_{p-n}$ - площа переходу (рис. 1.14);

$d = \Delta x$ - товщина переходу (рис. 1.14);

ϵ_0 - діелектрична постійна вакууму;

ϵ - діелектрична постійна матеріалу напівпровідника.

Другий тип місткості - це дифузійна місткість обумовлена дифузією рухливих носіїв заряду через $p-n$ перехід при прямому включенні. Її величина визначається виразом

$$C_{диф} = Q / U,$$

де Q - заряд, що протікає через перехід;

U - напруга прикладена до переходу в прямому напрямку.

На високій частоті перехід можна представити еквівалентною схемою (рис. 1.15). Ємність $C_i = C_{бар} + C_{диф}$ утворена бар'єрною і дифузійною місткостями

p - n переходу, опір R_i є внутрішнім опором p - n переходу. При прямому включенні R_i та становить одиниці -десятки Ом, а при зворотньому включенні (закритий перехід) досягає одиниць - десятків МОм.

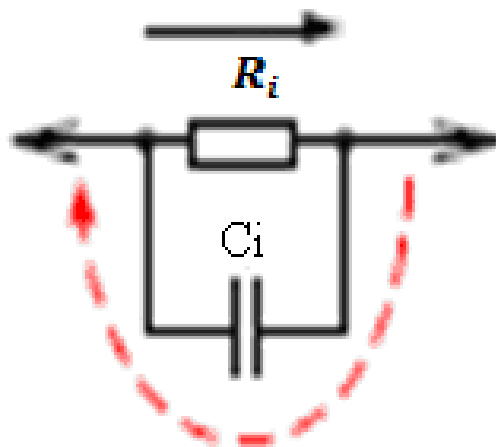


Рисунок 1.15 - Еквівалентна схема p - n переходу

Повний комплексний опір переходу дорівнює

$$Z = R_i + X_i,$$

де $X_i = -\frac{1}{\omega C_i}$ реактивний опір місткості, залежне від частоти.

Якщо на p - n перехід подавати змінну напругу, тоді опір місткості p - n переходу зменшуватиметься з збільшенням частоти, і при деяких великих частотах ємкісний опір може порівнятися з внутрішнім опором p - n переходу при прямому включенні. В цьому випадку при зворотньому включенні через цю місткість потече досить великий зворотний струм, і p - n перехід втратить властивість односторонньої провідності.

Таким чином, чим менша величина місткості p - n переходу, тим на вищих частотах він може працювати.

На частотні властивості основний вплив чинить бар'єрна місткість, та дифузійна місткість має місце при прямому включенні, коли внутрішній опір p - n переходу і так замало.

Пробій p - n переходу. При збільшенні зворотної напруги, прикладеного до переходу, обраний струм ($I_{обр} = -I_o$) повільно збільшується. При цьому збільшується енергія електричного поля і стає достатньою для генерації носіїв заряду. Це призводить до сильного збільшення зворотнього струму. Явище сильного збільшення зворотнього струму при певній зворотній напрузі називається *електричним пробоем* p - n переходу. На рис. 1.16 електричний пробій показаний в вигляді суцільної лінії, що падає, в третьому квадранті.

Електричний пробій - **це обернений пробій**, який при зменшенні зворотної напруги p - n перехід відновлює властивість односторонньої провідності

Якщо зворотню напругу збільшити ще більше, тоді напівпровідник сильно нагріється за рахунок теплової дії струму і p - n перехід руйнується. Таке явище називається *тепловим пробоем* p - n переходу (пунктирна лінія на рис.1.16). Тепловий пробій неункнути

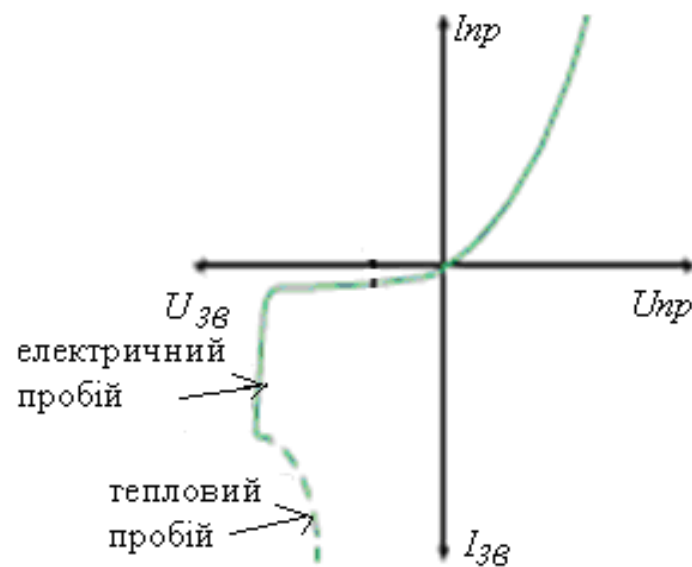


Рисунок 1.16 - Види пробою p - n переходу

1.5 Перехід Шотки

1.5.1 Утворення переходу Шотки

Перехід Шотки виникає на межі розділу металу і напівпровідника n -типу, причому метал повинен мати роботу виходу електрона більшу, ніж напівпровідник

$$A_{мет} > A_{np},$$

При контакті двох матеріалів з різною роботою виходу електронів *електрони переходять з матеріала з меншою роботою виходу в матеріал з більшою роботою виходу, і ні за яких умов - навпаки.*

Електрони з примежового шару напівпровідника переходять в метал, а на їхньому місці залишаються некомпенсовані позитивні заряди іонів донорної домішки (рис. 1.17). У металі велика кількість вільних електронів, а отже, на межі метал-напівпровідник виникає електричне поле і потенційний бар'єр. Поле яке виникло буде таким, що гальмує електрони напівпровідника і відкидатиме їх від межі розділу.

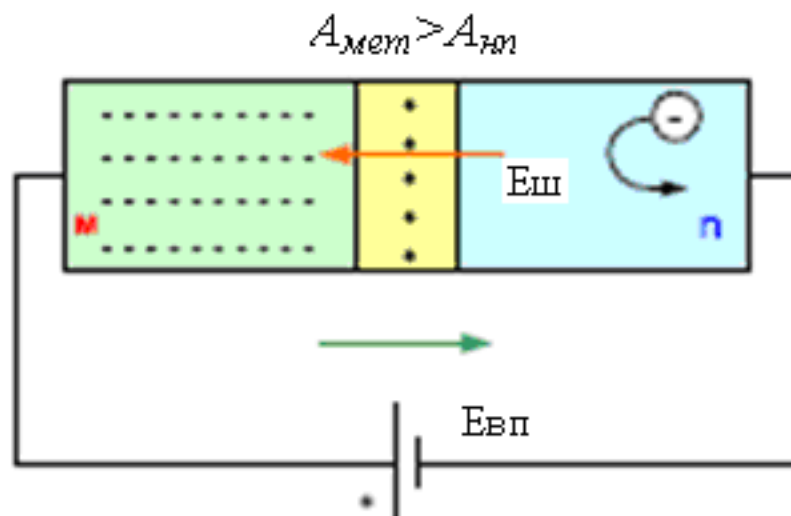


Рисунок 1.17 Перехід Шотки

Межа розділу металу і напівпровідника з шаром позитивних зарядів іонів донорної домішки називається переходом Шотки (відкритий в 1934 році).

1.5.2 Пряме і зворотне вмикання діодів Шотки

Якщо прикласти зовнішню напругу плюсом на метал, а мінусом на напівпровідник, виникає зовнішнє електричне поле, спрямоване назустріч полю переходу Шотки. Це зовнішнє поле компенсує поле переходу Шотки і буде прискорюючим для електронів напівпровідника. Електрони переходитимуть з напівпровідника в метал, утворюючи порівняно великий прямий струм. Таке вмикання називається прямим.

При подачі мінуса на метал, а плюса на напівпровідник виникає зовнішнє електричне поле, співнапрям з полем переходу Шотки. Обидва ці поля будуть такими, що призупиняють для електронів напівпровідника, і відкидатимуть їх від межі розділу. Обидва ці поля будуть прискорюючими для електронів металу, але вони через кордон розділу не пройдуть, оскільки у метала більша робота виходу електрона. Таке вмикання переходу Шотки називається зворотнім.

Зворотний струм через перехід Шотки буде повністю відсутній, оскільки в металі не існує неосновних носіїв зарядів.

Перевагами переходу Шотки є:

- відсутність зворотного струму, оскільки в металі немає неосновних носіїв;
- перехід Шотки може працювати на НВЧ, оскільки носіями є електрони, а вони рухливіші порівняно з дірками;
- висока швидка дія при перемиканні з прямого стану в зворотний і навпаки, оскільки відсутній процес розсмоктування носіїв при зміні полярності прикладеної напруги.

Недоліком діодів Шотки є їх відносно висока вартість, оскільки з технологічних міркувань як метал зазвичай застосовують золото.

1.6 Деякі ефекти напівпровідника

Окрім утворення *p-n* переходу напівпровідники можуть проявляти інші ефекти. Основними, такими, що знаходять найбільше практичне застосування, є: тунельний ефект, ефект Ганна, ефект Холла.

1.6.1 Тунельний ефект

Тунельний ефект (відкритий в 1958 році в Японії) прос в *p-n* переході у вироджених напівпровідниках. Вироджений напівпровідник - це напівпровідник з дуже високою концентрацією донорної або акцепторної домішки (концентрація - 10^{24} атомів домішки на 1 куб. см напівпровідника, для порівняння в звичайних напівпровідниках - 10^{15} , а в металах - 10^{28}). У

вироджених напівпровідниках дуже тонкий p - n перехід: його ширина становить соті частки мікрона, через що напруга внутрішнього поля p - n переходу становить $E_{p-n} \sim 10^8$, що обумовлює дуже високий потенційний бар'єр. Основні носії заряду не можуть здолати цей потенційний бар'єр, але за рахунок малої його ширини, як би механічно, пробивають в нім тунелі, через які проходять інші носії зарядів.

Отже, властивість односторонньої провідності на p - n переході при тунельному ефекті відсутній, а струм через p - n перехід матиме три складові:

$$I = I_{m.np} - I_{m.zv} + I_{np},$$

де $I_{m.np}$ - прямий тунельний струм, за рахунок проходження зарядів через тунелі при прямому включенні;

$I_{m.zv}$ - зворотний тунельний струм, такий же, як і прямий, але при зворотному включенні;

I_{np} - прямий струм провідності, зумовлений носіями заряду, що долають потенційний бар'єр при відносно високій прямій напрузі.

Вольтамперна характеристика (ВАХ) p - n переходу при тунельному ефекті матиме вигляд, зображений на рис. 1.18. Ділянка ОА є експоненціальною кривою прямого струму через p - n перехід, напруги прикладеної, що зростає під дією, в прямому напрямі. На ділянці АВ прямої тунений струм зменшується за рахунок зниження потенційного бар'єру і в точці В він стає рівним нулю, а струм провідності трохи зростає. За рахунок цього загальний струм на ділянці АВ зменшується. Особливістю тунельного ефекту є те, що на ділянці АВ характеристики має місце негативний динамічний опір.

Величина динамічного опору визначається за формулою $R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_e - U_a}{I_e - I_a}$

виходить негативною.

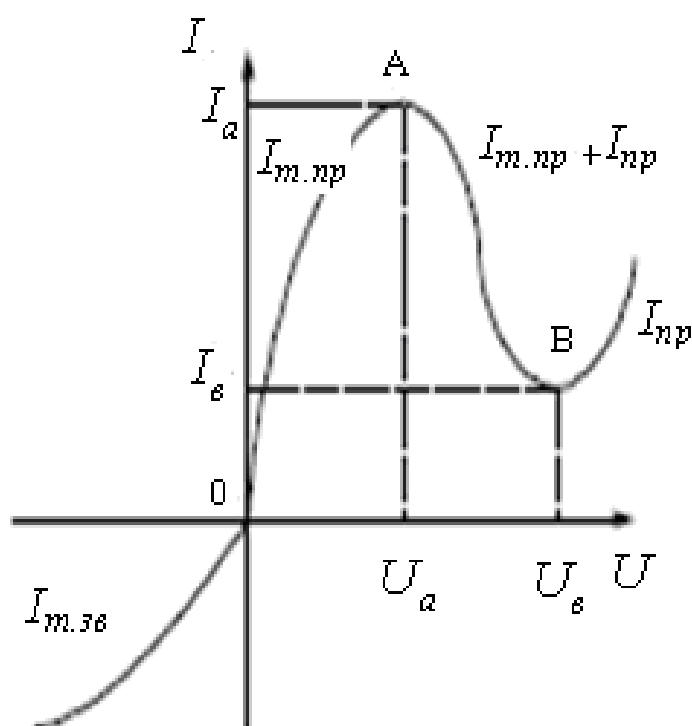


Рисунок 1.18 - ВАХ тунельного діода

Тунельні діоди, що мають тунельний ефект ВАХ, що забезпечує ділянку, що падає, застосовуються в схемах генераторів гармонійних коливань НВЧ і як малопотужні безконтактні швидкодіючі перемикаючі пристрої.

1.6.2. Ефект Ганна

Ефект Ганна проє в напівпровідниках *n*-типу провідності без *p-n* переходу, що перебувають під впливом сильних електричних полів. Розглянемо ВАХ діода Ганна, представлену на рис. 1.19.

Ділянка ОА - лінійна ділянка, на якій ґрунтується закон Ома.

Ділянка АВ виникає при порівняно великій напрузі електричного поля, яке призводить до зменшення рухливості електронів (рухливість носіїв, в даному випадку електронів показує, як легко вони проходять крізь кристалічну решітку провідника) за рахунок збільшення амплітуд коливання атомів у вузлах кристалічної решітки. В результаті зростання струму сповільнюється.

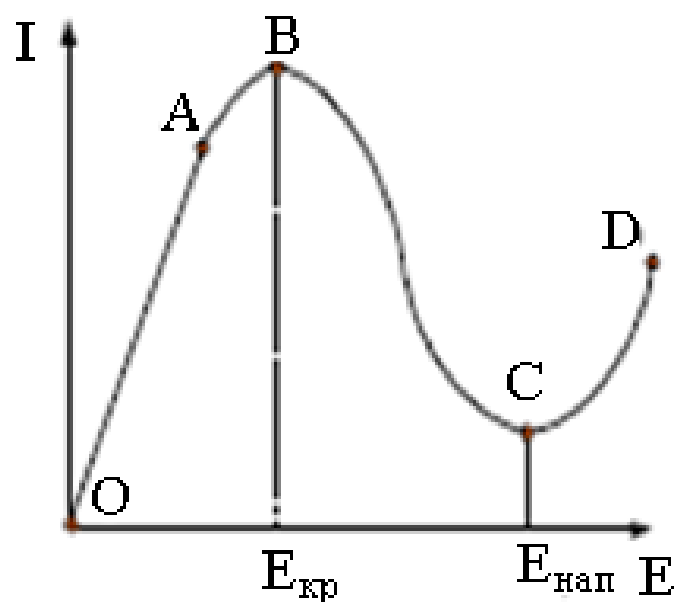


Рисунок 1.19 - ВАХ діода Ганна

Ділянка ВС характеризується ще сильнішим зменшенням рухливості електронів, що призводить до ще більшого зменшення струму.

Ділянка CD - при дуже великій напрузі значно збільшується генерація носіїв зарядів і, хоча рухливість електронів зменшується, струм зростає за рахунок збільшення кількості зарядів.

Суть ефекту Ганна полягає в тому, що якщо в напівпровіднику створити напруженість електричного поля, велику $E_{кр}$, але меншу $E_{нап}$, тобто робочу точку вивести на ділянку ВС характеристики, тоді в напівпровіднику виникне негативний динамічний опір (аналогічно як при тунельному ефекті), який дозволяє генерувати електричні коливання надвисокої частоти (НВЧ).

Ефект Ганна застосовується в діодах Ганна, які використовуються як малопотужні генератори НВЧ.

1.6.3. Ефект Холла

Ефект Холла проявляється в напівпровідниках n -типу провідності з струмом, що протікають через них, і поміщеними в магнітне поле і полягає в появі електро рухома сила (ЕРС) Холла.

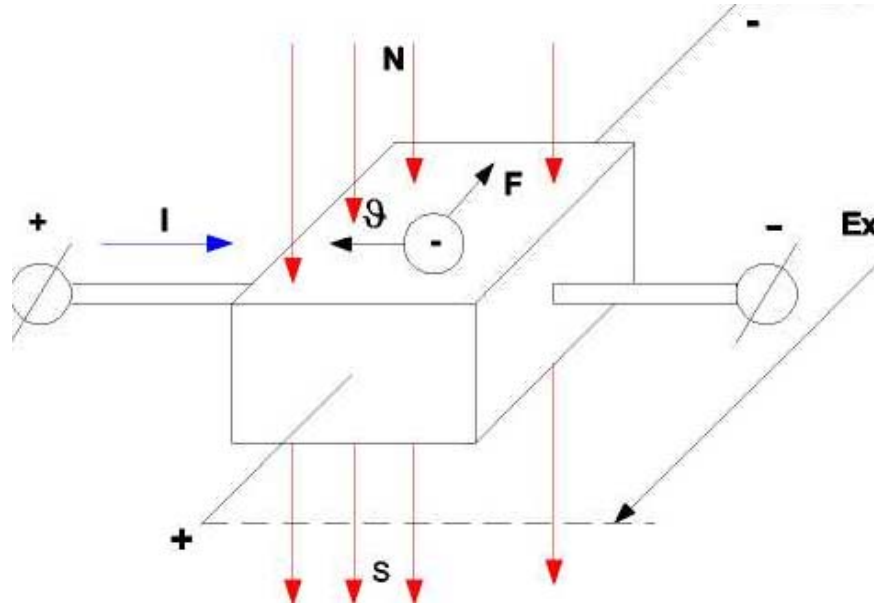


Рисунок 1.20 Утворення ЕРС Холла

На рухомі електрони в наНАПІВПРОВІДНИКУ діятиме сила Лоренца F , під дією якою електрони відхилятимуться до далекого краю пластинки (рис. 1.20), отже, там буде згущування електронів (негативний потенціал), а біля переднього краю утворюється недолік їх (позитивний потенціал). Тому між цими краями виникне різниця потенціалів, яка і називається ЕРС Холла. Ефект Холла застосовується в магнітометричних датчиках.

На основі цих датчиків створюються різні вимірювальні прилади що дозволяють, наприклад, вимірювати струми в колах постійного струму без контактним способом.

Контрольні запитання

1. Як рухається електрон під дією прискорюючого електричного поля?
2. Як рухається електрон під дією гальмуючого електричного поля?
3. Яка буде траєкторія електрона в зоні дії поперечного електричного поля?
4. Яка буде траєкторія електрона в зоні дії магнітного поля?
5. Що таке зонувана енергетична діаграма?
6. Чим характеризується заборонена зона?
7. Чим характеризується зона провідності?
8. Чим характеризується валентна зона?
9. Чим зумовлена провідність напівпровідників?
10. Як утворюється напівпровідник p -типу?
11. Як виходить напівпровідник p -типу?
12. Як виходить напівпровідник n -типу?
13. Як виходить напівпровідник p - n перехід?

14. Властивості p - n переходу при прямому включенні.
15. Властивості p - n переходу при зворотному включенні.
16. Пояснити ВАХ p - n переходу.
17. Властивості p - n переходу.
18. Види пробою p - n переходу.
19. Як утворюється і які властивості має діод Шотки?
20. У чому полягає ефект Ганна?
21. У чому полягає ефект Холла?
22. У чому полягає тунельний ефект?

2 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ [2,3]

2.1 Будова і основні параметри напівпровідникових діодів

2.1.1 Конструкція напівпровідникових діодів

Основою площинних і точкових діодів являється кристал напівпровідника n -типу провідності, який називається базою. База припаюється до металевої пластинки, яка називається кристалотримачем. Для площинного діода на базу накладається матеріал акцепторної домішки і у вакуумній печі при високій температурі (близько $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) відбувається дифузія акцепторної домішки в базу діода, внаслідок чого утворюється область p -типу провідності. Плоский, що утворився, p - n перехід (звідси назва) має відносно велику площу. Умовне графічне зображення діода має вигляд представлений на рис. 2.1 Висновок від p -області називається анодом, а вивід від n -області - катодом.

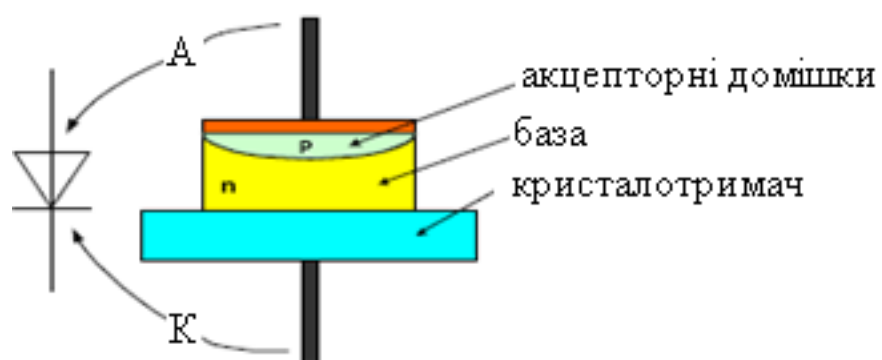


Рисунок 2.1 - Конструкція площинного діода

Велика площа p - n переходу площинних діодів дозволяє їм працювати при великих прямих струмах, але за рахунок великої бар'єрної місткості вони будуть низькочастотними.

Для зменшення бар'єрної місткості, тобто для підвищення допустимих робочих частот використовують точкові діоди (рис. 2.2), які отримують. До бази точкового діода підводять вольфрамовий провід, легований атомами акцепторної домішки, і через неї пропускають імпульси струму силою до 1 А . У точці розігрівання атоми акцепторні домішки переходять в базу, утворюючи p -область (рис. 2.2б). В результаті утворюється p - n перехід дуже малої площі і, відповідно, з малою бар'єрною місткістю. За рахунок цього точкові діоди є високочастотними, але можуть працювати лише на малих прямих струмах (десятки міліампер).

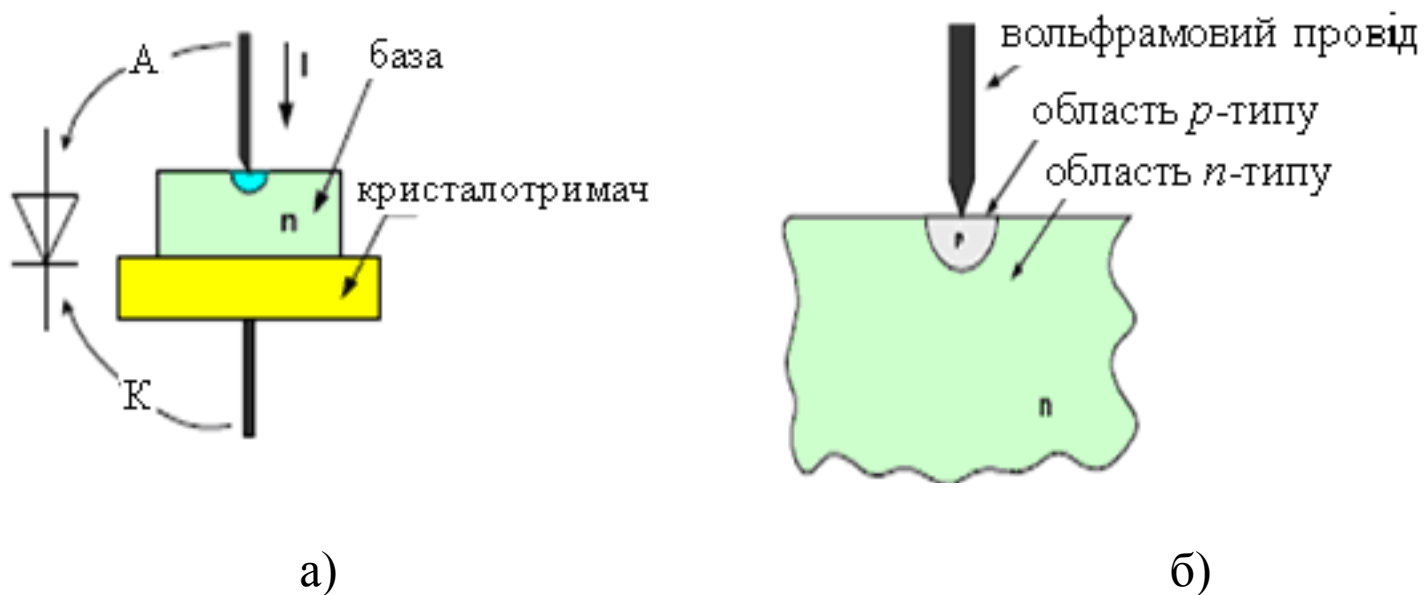


Рисунок 2.2 - Конструкції точкових діодів:
а – площинний діод; б- точковий діод

Для отримання діодів здатних працювати на високих частотах при досить великих струмах використовують мікросплавні технології. Перехід отримують шляхом сплаву мікрокристалів напівпровідників p - і n - типу провідності. За своїм характером мікросплавні діоди будуть площинні, за своїми параметрами - точкові.

2.1.2 Вольтамперна характеристика і основні параметри напівпровідникових діодів

Вольтамперна характеристика реального діода представлена на рис. 2.3. Вона по суті є ВАХ p - n переходу (рис. 1.13), але проходить нижче, ніж у ідеального p - n переходу. Це пояснюється впливом омичного опору реальної бази.

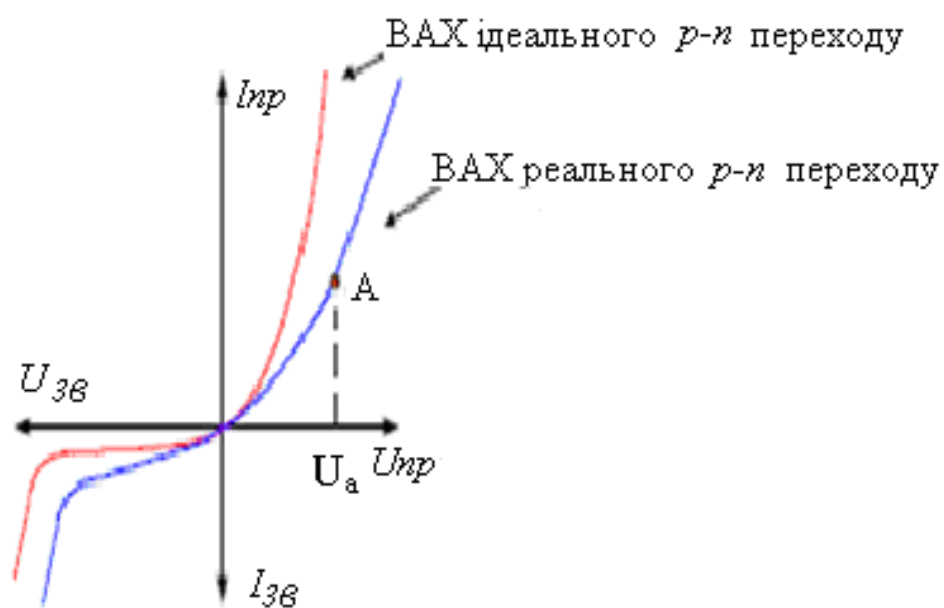


Рисунок 2.3 ВАХ напівпровідникового діода

Ділянка ВАХ після точки А буде прямою лінією, оскільки при напрузі U_a потенційний бар'єр зникає повністю компенсуючись зовнішнім полем.

Крива зворотного струму ВАХ має більший нахил, оскільки за рахунок зростання зворотної напруги збільшується генерація власних носіїв заряду, т. е. збільшується струм.

Параметри напівпровідникових діодів визначають їх можливість за тривалий термін безвідмовно працювати в різних електричних схемах. Величини робочих значень напруги і струмів ніколи не повинні перевищувати максимально допустимі значення, що призводяться в довідниках, і зазвичай складають не більше 60-80 % від максимальних. Це робиться для того, щоб діоди зберігали працездатність при підвищенні температури довкілля.

Параметри напівпровідникових діодів зручно розглянути використовуючи ВАХ реального напівпровідникового діода.

Основними параметрами напівпровідникових діодів є (рис. 2.4):

$I_{np.max}$ -максимально допустимий прямий струм через діод;

$U_{np.max}$ - пряме падіння напруги на діоді при максимальному прямому струмі $I_{np.max}$;

$U_{зв.max}$ - максимально допустима зворотня напруга;

$I_{зв.max}$ -зворотний струм при максимально допустимій зворотної напруги;

$R_{пр} = U_{np.max} / I_{np.max}$ - прямий статичний опір діода при заданій прямій напрузі;

$R_{зв} = U_{зв.max} / I_{зв.max}$ - зворотний статичний опір діода при заданій зворотній напрузі.

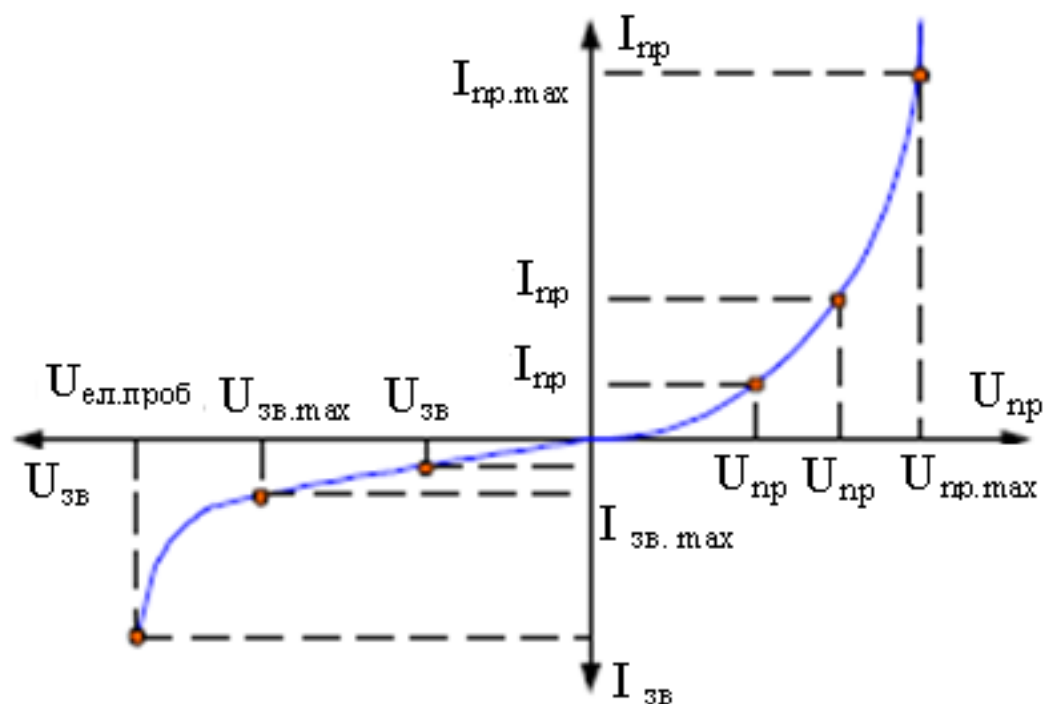


Рисунок 2.4 - Основні параметри напівпровідникового діода

2.2 Випрямні діоди

2.2.1 Загальна характеристика випрямних діодів

Випрямним діодом називається напівпровідниковий діод, призначений для перетворення змінного струму в постійних силових колах, тобто в джерелах електричного живлення. Випрямні діоди завжди плоскі, вони

можуть бути германієві або кремнієві. Германієві діоди кращі за кремнієві тим, що мають менш пряме зменшення напруги.

В свою чергу, кремнієві діоди перевершують германієві по діапазону робочих температур, максимально допустимою зворотною напругою, а також мають менший зворотний струм.

Якщо потрібно випрямлений струм більше максимально допустимого прямого струму наявних діодів, тоді в цьому випадку допускається паралельне вмикання діодів (рис. 2.5). В цьому випадку обов'язково мають бути підключені послідовно з кожним діодом додаткові опори $R_{доб}$ величиною від одиниць до десятків Ом. Цим досягається вирівнювання струму в кожній з гілок.

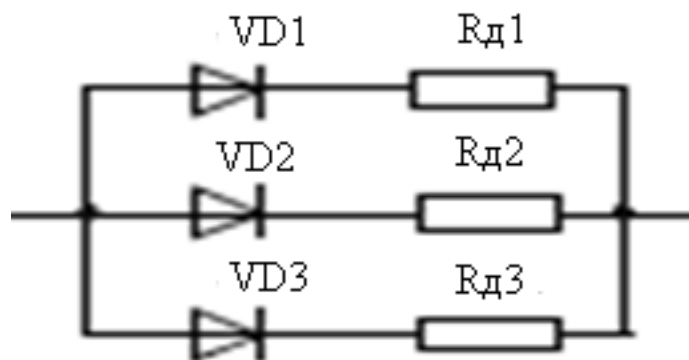


Рисунок 2.5 - Паралельне вмикання вентилів

Якщо потрібно максимальну напругу в колі перевершуюча максимально допустима зворотна напруга діода, тоді в цьому випадку допускається послідовне вмикання діодів (рис. 2.6).

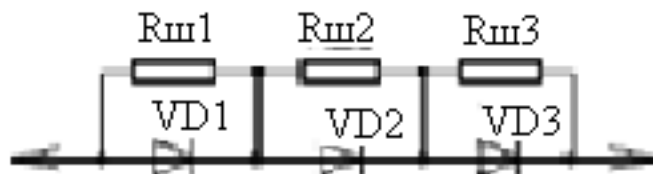


Рисунок 2.6 - Послідовне вмикання вентилів

Шунтуючі опори величиною декілька сотень кОм включають паралельно кожному діоду для вирівнювання падіння зворотної напруги на кожному з них, оскільки зворотний опір у кожного діода може бути різним.

2.2.2. Схеми випрямлячів

Схеми випрямлячів можуть бути як одно- і двоперіодні. Відповідно включаються напівпровідникові діоди.

Якщо узяти один діод (рис. 2.7), тоді струм в напрузі протікатиме за однонапівперіодний вхідний струму, тому такі випрямлячі називається однонапівперіодним. Його недолік - малий ККД, але перевагою є простота і дешевизна.

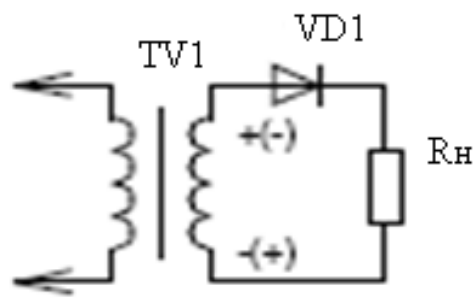


Рисунок 2.7 -Однонапівперіодний випрямляч

Розглянемо роботу однонапівперіодного випрямляча з використанням ВАХ напівпровідникового діода і епюр вхідної і вихідної напруги, представлених на рис. 2.8

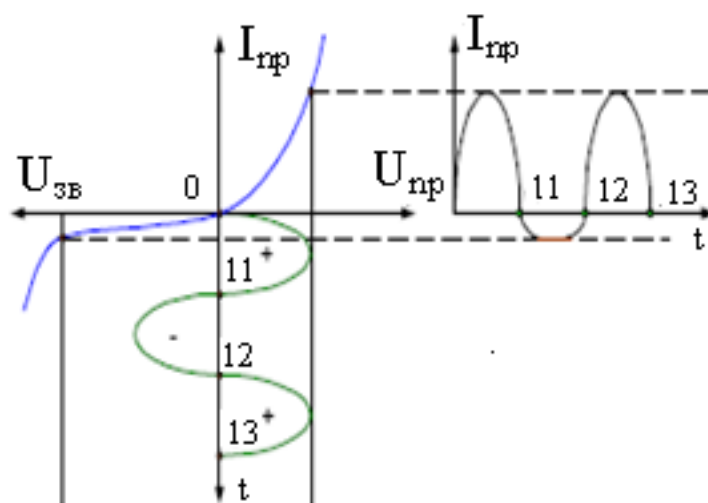


Рисунок 2.8 Епюри для однонапівперіодного випрямляча

При вступі позитивної півхвилі вхідної напруги (нижня епюра) на анод діода VD1 його $p-n$ перехід відкривається (внутрішній опір малий) і вона практично без втрат проходить на вихід (правляча епюра).

При вступі негативної півхвилі на анод діода VD1 його перехід закривається (внутрішній опір дуже великий) і на вихід проходить напруга пропорційна зворотньому струму $p-n$ переходу. Таким чином, на опір навантаження R_n виділятимуться лише позитивні півхвилі вхідної напруги. Для слабкострумівих кіл цього буває досить. Проте, при побудові потужних джерел однонапівперіодні випрямлячі не використовуються зважаючи на їх низький к.п.д. ($<50\%$). В цьому випадку застосовуються двохнапівперіодні випрямлячі.

Розглянемо роботу найбільш поширеної мостової схеми двохнапівперіодного випрямляча (схема Гретца) схема якого представлена на рис. 2.9, а епюри, які пояснюють роботу на рис. 2.10.

Протягом позитивного напівперіоду вхідної напруги $U_a(+)$ діоди VD1 і VD4 відкриті, а VD2 і VD3 - закриті. Струм протікатиме шляхом: верхня гілка (+), анод-катод діода VD1, навантаження, анод-катод діода VD4, нижня гілка (-).

Протягом негативного напівперіоду напруги U_a діоди VD1 і VD4 закриваються, а діоди VD2 і VD3 відкривають. Струм протікатиме від (+),

нижня гілка, анод-катод діода VD3, напруга, анод-катод діода VD2, верхня гілка (-).

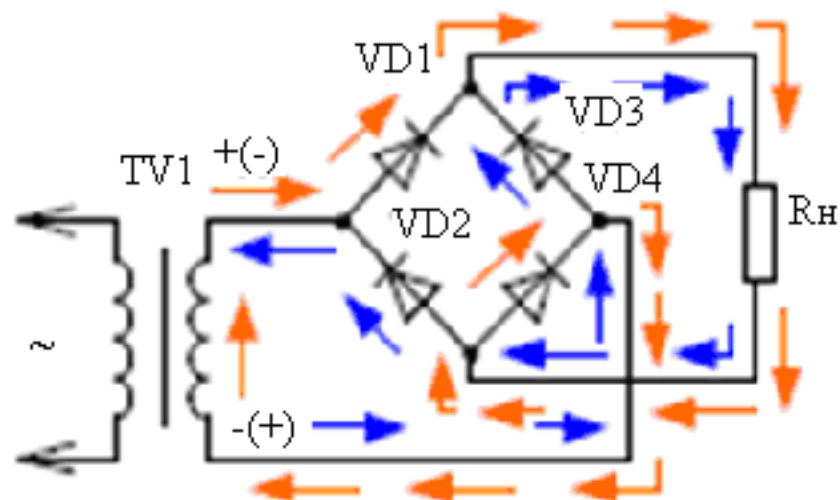


Рисунок 2.9 - Схема двонапівперіодного випрямляча

Тому струм через навантаження протікатиме в одному і тому ж напрямку що і за двонапівперіодами. Тому ця схема випрямляча називається двохнапівперіодною.

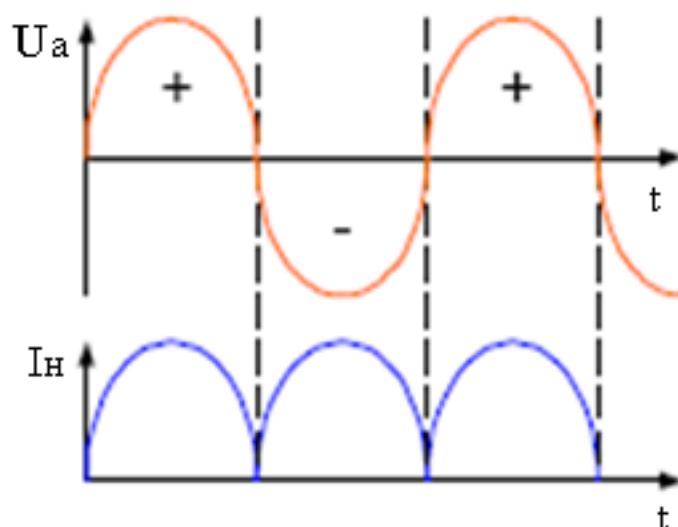


Рисунок 2.10 Епюри двонапівперіодного випрямляча

Можливі й інші варіанти схем двонапівперіодного випрямляча, наприклад, у випадку якщо знижувальний трансформатор має середню точку, тобто вивід від середини вторинної обмотки, то двонапівперіодний випрямляч може виконуватись за двотактною схемою на двох діодах (рис. 2.11). В цьому випадку половинки обмоток трансформатора, виходять включена протифаза по відношенню до навантаження і використовуються по черзі. Проте принцип двонапівперіодного випрямлення залишається незмінним і струм через навантаження протікає лише в одному напрямку. Епюри будуть такими, як і для схеми, представленої на рис. 2.9.

Використання схем випрямлячів, представлених на рис.2.9 і рис.2.11, визначається, в першу чергу, конструктивними міркуваннями, а з електричної точки зору вони практично однакові.

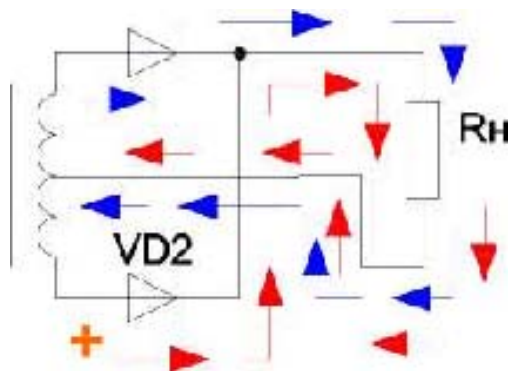


Рисунок 2.11 Схема двохтактного двохнапівперіодного випрямляча

2.2.3 Електричні фільтри на виході випрямлячів

Змінний струм, що пройшов через діоди випрямляча стає однонаправленим-пульсуючим. Його величина змінюється від нуля до амплітудного значення з подвоєною вхідною частотою.

Використовувати такий пульсуючий струм для живлення апаратури не можна.

Його необхідно "згладити". Це виконується за допомогою фільтрів нижніх частот (ФНЧ), що підключаються на виході випрямляча перед навантаженням. Існують різні схеми ФНЧ (рис.2.12.).

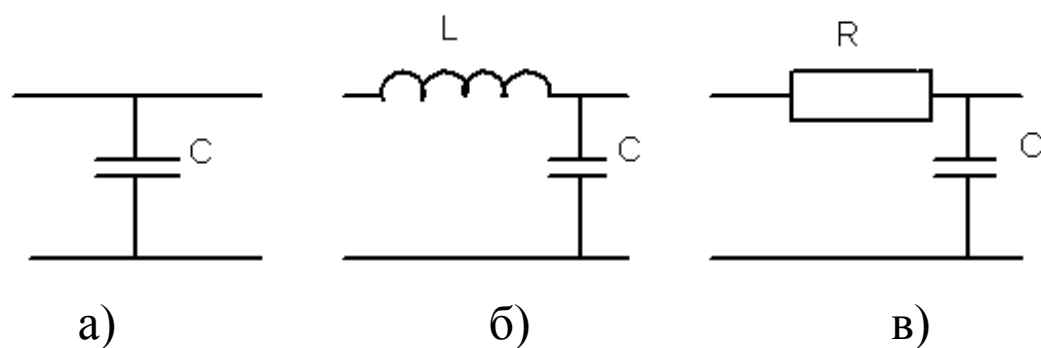


Рисунок 2.12 Схеми ФНЧ: а – місткості; б – LC; в - RC

Нині найбільшого поширення набули фільтри місткостей. Епюри напруги на виході такого фільтра представлені на рис.2.13

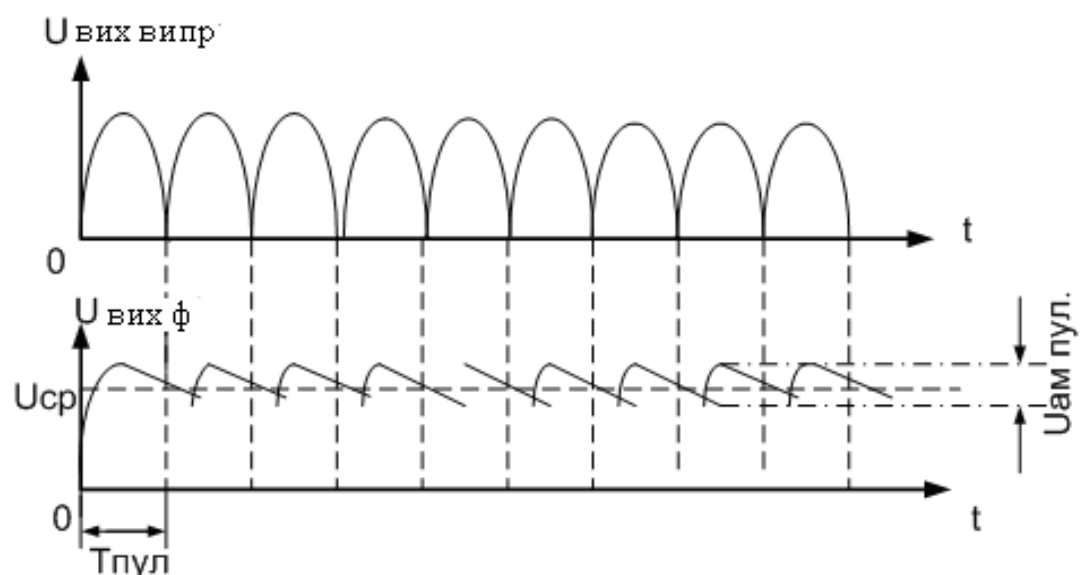


Рисунок 2.13 - Епюри напруги на виході фільтра місткості

Вихідна напруга, хоч і в значно меншій мірі, зберігає викиди, звані пульсації. Величина пульсацій вимірюється у вольтах. Ефективність ФНЧ характеризується коефіцієнтом пульсацій, який знаходиться як відношення величини пульсацій, - $U_{\text{п}}$ до середнього рівня вихідної напруги ФНЧ - $U_{\text{сер}}$ помножене на 100%.

$$K_{\text{п}} = U_{\text{п}} / U_{\text{сер}} \cdot 100\%.$$

Для нормльної роботи сучасної апаратури потрібно $K_{\text{п}} = (10^{-2} - 10^{-4})\%$. Таке значення коефіцієнта пульсацій досягається використанням конденсаторів ємністю $C = (10^3 - 10^5)$ мкФ.

Контрольні запитання

1. Пояснити конструкцію площинного напівпровідникового діода.
2. Пояснити конструкцію точкового напівпровідникового діода.
3. Пояснити ВАХ напівпровідникового діода.
4. Пояснити роботу однонапівперіодного випрямляча.
5. Пояснити роботу двонапівперіодного мостового випрямляча.
6. Пояснити роботу двонапівперіодного двотактного випрямляча.

3 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПРИЛАДИ НА ОСНОВІ ОДНОГО $p-n$ ПЕРЕХОДІВ [4,5]

3.1 Стабілітрони

Стабілітроном називається одноперехідний напівпровідниковий прилад, призначений для стабілізації величини постійної напруги. Стабілізація - підтримка якогось вихідного рівня незмінним при зміні входної напруги або величини навантаження. По конструкції стабілітрони завжди площинні і кремнієві. Принцип дії стабілітрона заснований на тому, що на його вольтамперній характеристиці на зворотний гілці є ділянка, на якій напруга практично не залежить від величини протікаючого струму.

Такою ділянкою ВАХ (рис. 3.1) є ділянка електричного пробою, яка за рахунок легуючих добавок в напівпровідник може бути досить широкою. При цьому струм через стабілітрон змінюватиметься у великому діапазоні, не призводячи до теплового (безповоротного) пробою.

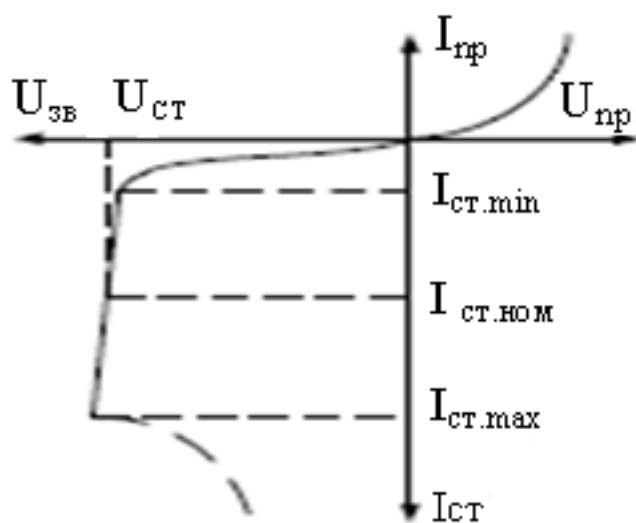


Рисунок 3.1 - ВАХ кремнієвого стабілітрона

На рис.3.2 представлена принципова схема параметричного стабілізатора. Умовне графічне зображення стабілітрона відповідає вигляду елементу VD1 на рис. 3.2. Оскільки ділянка електричного пробою - це зворотна напруга, тоді стабілітрон включається в схему зворотнім вмиканням (рис. 2.11). Резистор R_0 задає початковий струм через стабілітрон так, щоб величина струму була близька до середнього значення між $I_{ст.min}$ до $I_{ст.max}$. Таке значення струму називається номінальним струмом стабілізації - $I_{ст.ном}$.

При зменшенні входної напруги струм через стабілітрон і падіння напруги на R_0 зменшується (робоча точка рухається по кривій рис.3.1 вгору), а напруга на стабілітроні і напруга залишиться постійною, виходячи з вольтамперної характеристики. При збільшенні входної напруги струм через стабілітрон і U_{R_0} збільшується (робоча точка рухається по кривій рис.3.2 вниз), а напруга на

навантаженні все одно залишається постійною і дорівнює напрузі стабілізації - U_{BX} .

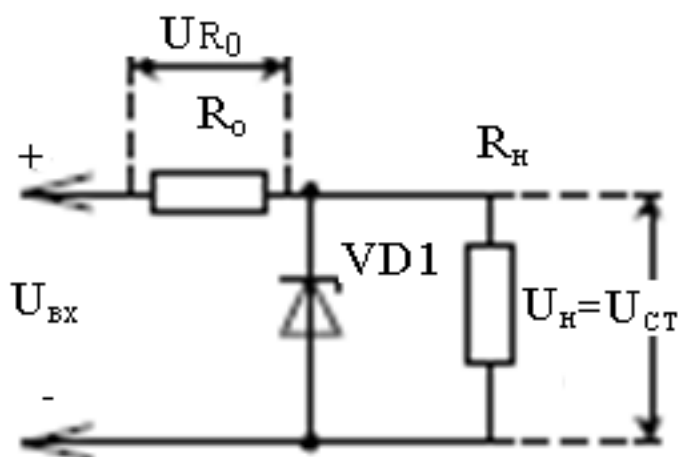


Рисунок 3.2 - Принципова схема параметричного стабілізатора

Таким чином, стабілітрон підтримує постійність напруги при зміні струму через нього від R_H до $I_{CT, max}$.

Основні параметри стабілітронів(рис. 3.3):

U_{CT} – номінальна напруга стабілізації;

$I_{CT, min}$ до $I_{CT, max}$ - мінімальний і максимальний струм стабілізації;

$I_{CT, ном}$ - номінальний струм стабілізації;

ΔU_{CT} - допустима зміна напруги стабілізації;

$r_d = U_{CT} / I_{CT, ном}$ - диференціальний опір на ділянці стабілізації;

a_t - температурний коефіцієнт стабілізації.

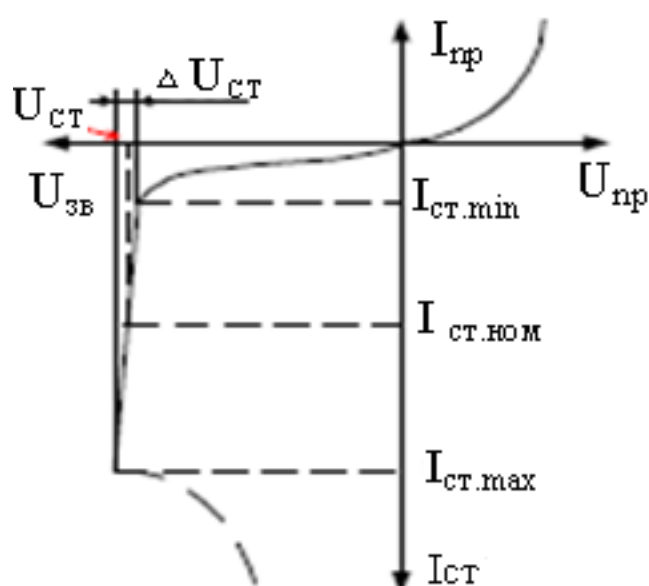


Рисунок 3.3 - ВАХ кремнієвого стабілітрона

Окрім стабілітронів для стабілізації малих величин (до декількох вольт) напруги розроблені стабістори.

У відмінності від стабілітронів, що працюють на зворотний гілці ВАХ, стабістори використовують пряму гілку ВАХ (рис.3.4). Тому в схему (рис.3.2) вони включаються в пряму включенні.

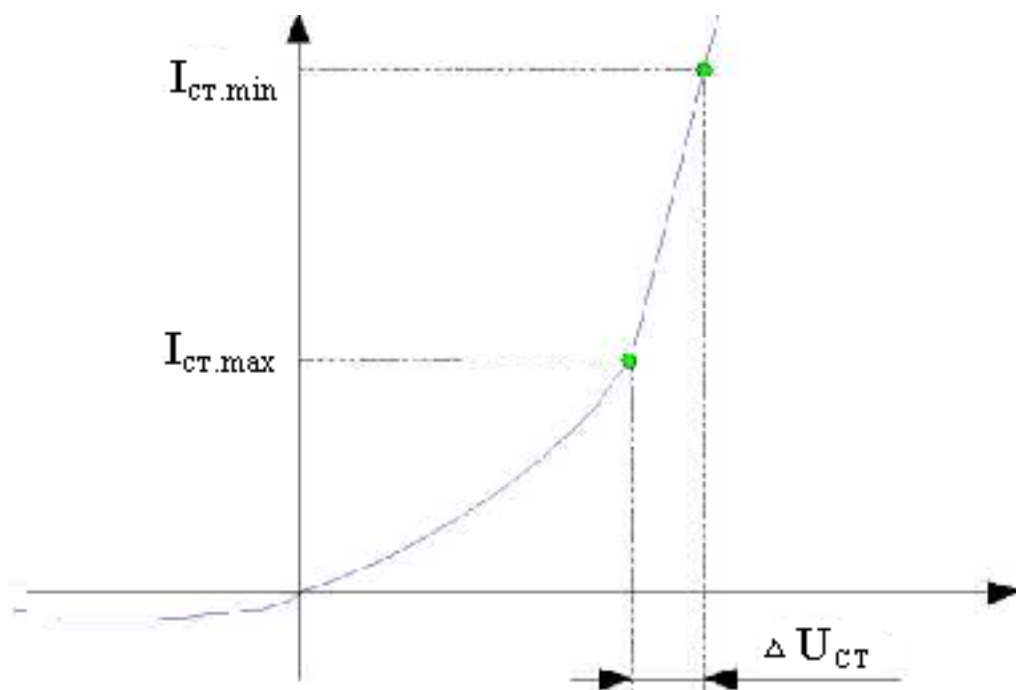


Рисунок 3.4 - ВАХ стабістора

3.2 Варикапи

Варикапом називається одноперехідний напівпровідниковий прилад, у якого як основний параметр використовується бар'єрна місткість p - n переходу, величина якої варіюється при зміні зворотної напруги. Отже, варикап застосовується як конденсатор змінної місткості, керований напругою. Умовне графічне зображення варикапа представлено на рис. 3.5.

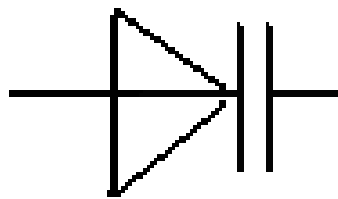


Рисунок 3.5 - Умовне графічне зображення варикапа

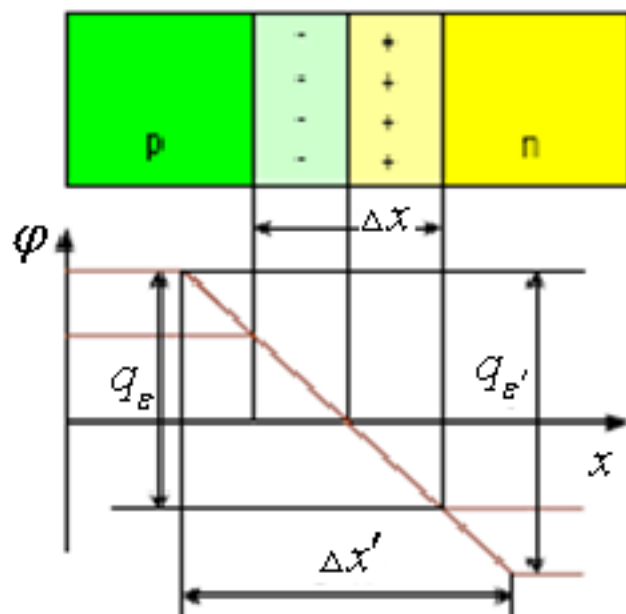


Рисунок 3.6 - Принцип дії варикапа

Перехід можна представити як плоский конденсатор місткість якого визначається виразом

$$C_{p-n} = \epsilon S / \Delta x,$$

де ϵ - діелектрична постійна напівпровідникового матеріалу;

S - площа переходу;

Δx - ширина потенційного (бар'єрного) шару.

Принцип дії базується на тому, що до $p-n$ переходу прикласти зворотну напругу, тоді ширина потенціального бар'єру збільшується. Чим більша величина прикладеної напруги, тим ширший потенційний бар'єр Δx (рис.3.6), тим менша бар'єрна місткість.

Графік залежності величини бар'єрної місткості від прикладеної зворотної напруги представлений на рис.3.7 і має вигляд гіперболи.



Рисунок 3.7 - Залежність величини бар'єрної місткості від прикладеної зворотної напруги

Варикапи використовуються для електронного налаштування коливальних контурів в електронних схемах.

Основними параметрами варикапів є:

C_{max} , C_{min} , $C_{ном}$ - максимальне, мінімальне і номінальне значення місткості варикапа;

$k = C_{max} / C_{min}$ - коефіцієнт перекриття тобто відношення максимальної місткості до мінімальної.

U_{max} - максимальна управляюча напруга варикапа.

3.3 Фотодіоди

Фотодіодом називається фотогальванічний приймач випромінювання без внутрішнього посилення, світлочутливим елементом якого є структура $p-n$ переходу напівпровідникового діода. Умовне графічне позначення має вигляд, представлений на рис.3.8.

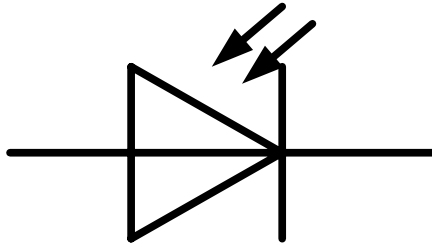


Рисунок 3.8 Умовне графічне позначення фотодіода

Принцип дії фотодіода. При опроміненні на НАПІВПРОВІДНИКА світловим потоком Φ , що представляє з себе потік квантів світла, за рахунок їх взаємодії з атомами кристалічної решітки зростає фотогенерація власних носіїв зарядів (рис. 3.9), що призводить до збільшення в рівній мірі кількості як основних, так і неосновних носіїв зарядів. Проте фотогенерація значною мірою буде помітна на тлі зворотного струму, оскільки на основних носіїв зарядів значно менше, ніж основних i , відповідно, зворотний струм менше ніж прямий.

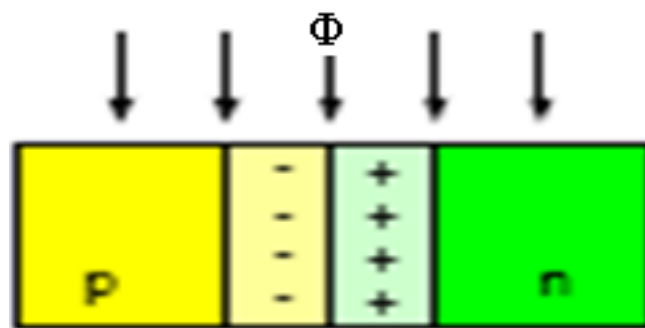


Рисунок 3.9 - Структура фотодіода

Вольтамперная характеристика фотодіода представлена на рис.3.10. Збільшення струму за рахунок фотогенерації приводить до сповзання зворотної гілки ВАХ діода (рис. 3.10)

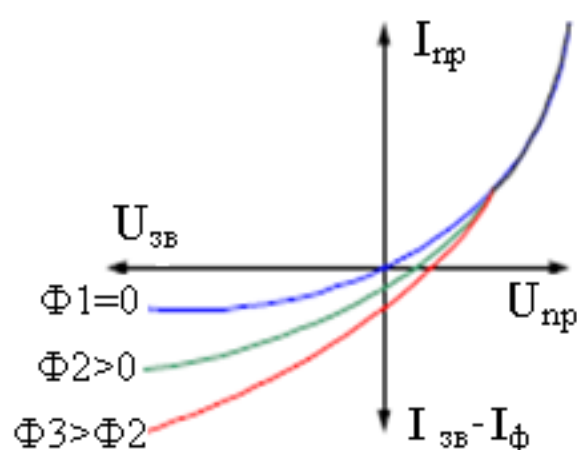


Рисунок 3.10 - ВАХ фотодіода

Залежність фотоструму фотодіода I_{Φ} від світлового потоку Φ показана на рис. 3.11. Як видно з рисунка характеристика практично лінійна.

Основними параметрами фотодіодів є:

I_T - темновий струм, тобто струм через фотодіод за відсутності світлового потоку при заданій робочій напрузі;

$S = I_{\phi}/\Phi$ - інтегральна чутливість - це відношення фотоструму до світлового потоку;

$U_{\text{раб}}$ - робоча напруга - це зворотня напруга, що подається на фотодіод, при якому всі параметри фотодіода будуть оптимальними.



Рисунок 3.11 - Залежність фотоструму фотодіода від світлового потоку

3.4 Світлодіоди

Світлодіодом називається одноперехідний напівпровідниковий прилад, в якому відбувається безпосереднє перетворення електричної енергії в енергію світлового випромінювання. Умовне графічне позначення має вигляд представлений на рис.3.12

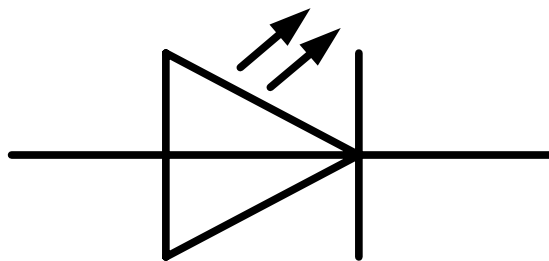


Рисунок 3.12 - Умовне графічне позначення світлодіода

Принцип дії світлодіода. При прямому включенні основні носії заряду переходять через p - n перехід і там рекомбінують. Рекомбінація пов'язана з виділенням енергії. Для більшості напівпровідникових матеріалів це енергія теплова. Проте, для деяких типів напівпровідників на основі арсеніду галію і ряду інших ширина забороненої зони ΔW досить велика, і при цьому довжина хвилі λ випромінювання лежить у видимій частині спектру

$$\lambda = \frac{h}{\Delta W},$$

де h - енергія виходу.

Основними характеристиками світлодіодів є:

- характеристика яскравості, тобто залежність потужності випромінювання від прямого струму $P_u = f(I_{np})$, представлена на рис. 3.13а;

- спектральна характеристика - це залежність потужності випромінювання від довжини хвилі $P_u=f(\lambda)$, представлена на рис. 3.13 б.

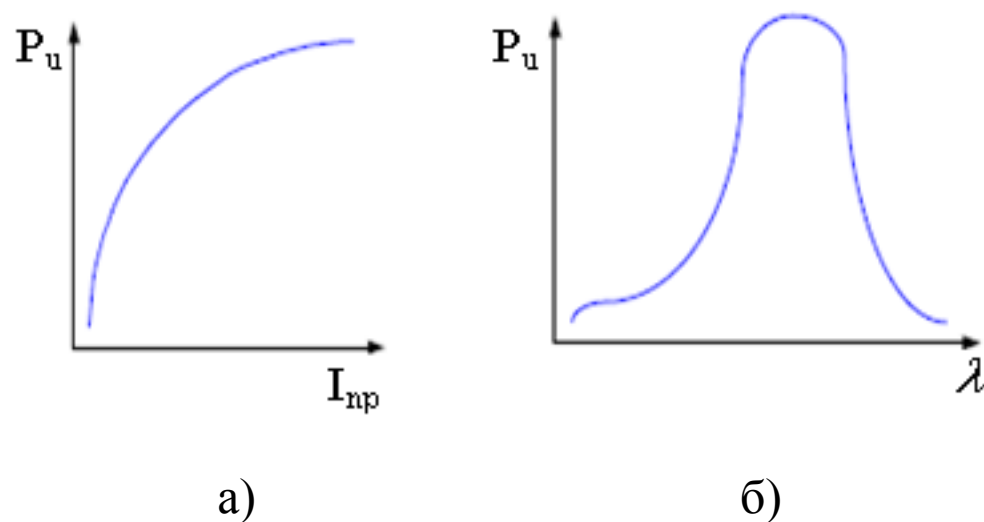


Рисунок 3.13 - Характеристики світлодіода:

- а - залежність потужності випромінювання від прямого струму $P_u=f(I_{np})$;
 б - залежність потужності випромінювання від довжини хвилі $P_u=f(\lambda)$

Основні параметри світлодіодів:

V_{max} - яскравість світіння при максимальному прямому струмі;

$P_{u.max}$ - повна потужність випромінювання P_{max} .

3.5 Оптрони

Оптроном, або оптоелектронною парою називається Будова, що становиться з світлодіода і фотодіода, які мають оптичний зв'язок між собою.

Оптрони призначені для передачі інформації (сигналу) без гальванічної (безпосередньому електричному зв'язку) між входними і вихідними колами.

Фотоприймачем може служити фоторезистор, фотодіод, фототранзистор, тиристор. Умовні графічні позначення різних типів оптронів представлені на рис.3.14

Принцип дії оптрона наступний. При подачі на вхід логічного нуля (немає електрчної напруги) струм через світлодіод не протікає, світлодіод не світиться, і фотоприймач матиме великий опір (більше декількох МОм), так званий темновий.

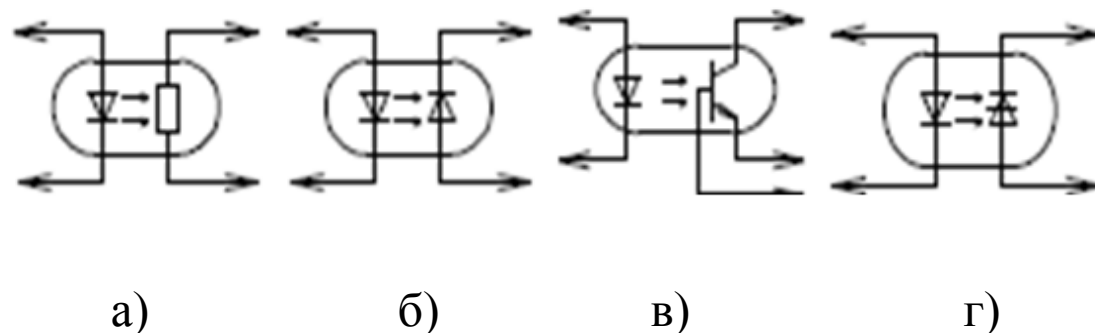


Рисунок 3.14 - Види оптронів:

- а –резистори; б - діоди; в – транзисторни; г - динистори

В цьому випадку струм через нього практично відсутній. При подачі на вхід логічної одиниці (напруга) протікає через світлодіод, і струм починає випромінювати світло і опір фотоприймача різко зменшується до величини декількох сотень Ом, а струм, відповідно, зростає.

У разі, коли приймачем світла служать напівпровідникові структури на основі *p-n* переходів за відсутності випромінювання світлодіода (логічний нуль) перехід закритий і струм практично не пропускає. При передачі логічної одиниці світлодіод починає випромінювати, кванти світла створюватимуть додаткові носії зарядів, а отже струм через приймач збільшуватиметься.

Контрольні запитання

1. Що таке стабілітрон і які його основні характеристики?
2. Що таке варикап і які його основні характеристики?
3. Що таке фотодіод і які його основні характеристики?
4. Що таке світлодіод і які його основні характеристики?
5. Що таке оптрон і які бувають оптрони?

4 ТРАНЗИСТОРИ [1,3]

Транзистором називається напівпровідниковий перетворюючий прилад, що має два p - n переходу (менше трьох виводів) і здатний посилювати сигнал. Загальна класифікація транзисторів утворюється за такими ознаками:

- за матеріалом напівпровідника - зазвичай германієві або кремнієві;
- за принципом дії транзистори підрозділяються на біполярні і польові (уніполярні);
- за частотними властивостями - низькочастотні, з робочою частотою до 3 МГц;
- середньочастотні з робочою частотою від 3 до 30 МГц ;
- високочастотні з робочою частотою від 30 до 300 МГц;
- зверхвисокочастотні з робочою частотою більше 300 МГц.

4.1 Біполярні транзистори

Біполярні транзистори у свою чергу за типом провідності областей розділяються з прямою провідністю (p - n - p - структура) і з зворотною провідністю (n - p - n - структура), хоча принцип дії обох типів однаковий.

4.1.1 Будова біполярних транзисторів

Основою біполярного транзистора є кристал напівпровідника p -типу або n -типу провідності, який також як і вивід від нього називається базою. За допомогою процедури дифузії домішки або шляхом сплаву з двох сторін від бази утворюються області з протилежним типом провідності, ніж база (рис.4.1)

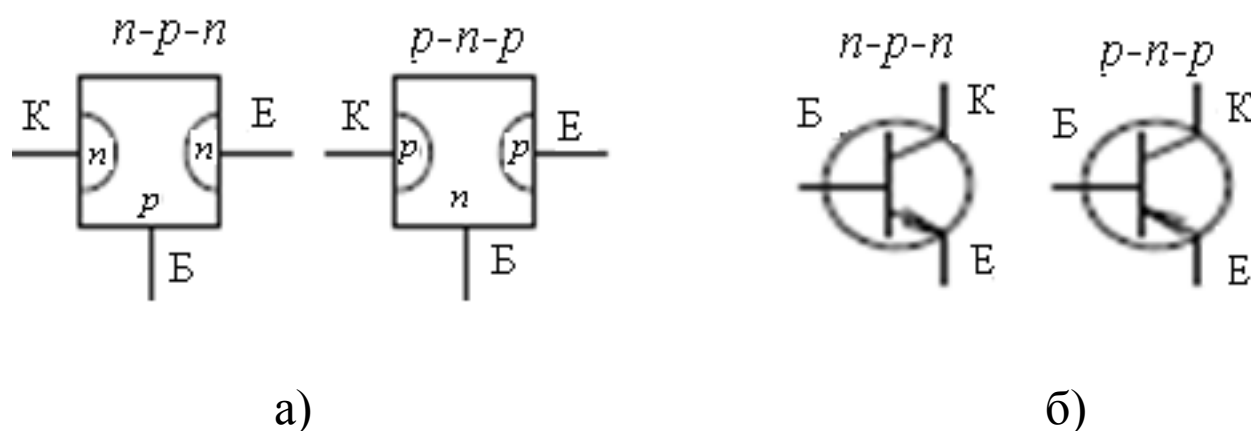


Рисунок 4.1 Структура і умовні графічні позначення біполярних транзисторів:

а – емітер і колектор; б – УДО біполярних транзисторів обох типів провідності

Область, що має меншу площу p - n переходу, і вивід від неї називають емітером, на рис. 4.1 а він показаний з права. Область, що має велику площу p - n переходу, і вивід від неї називають колектором, на рис. 4.1 а він показаний

ліворуч. УДО біполярних транзисторів обох типів провідності показаний на рис. 4.1б.

Введення домішок утворює два переходи. Відповідно p - n перехід між колектором і базою називають колекторним переходом і вивід від нього - колектором, а між емітером і базою - емітерним переходом і вивід від нього - емітером (рис.4.1 а).

Стрілка в умовному графічному позначенні транзистора (рис.4.1б) наноситься на виведенні емітера і показує напрям струму, що протікає через транзистор. Основною особливістю пристрою біполярних транзисторів, що забезпечує їх роботу, є нерівномірність концентрації основних носіїв струму в емітері, базі і колекторі. У емітері концентрація носіїв заряду максимальна. У колекторі - дещо менше, ніж в емітері. У базі - на багато разів менше, ніж в емітері і колекторі. На рис.4.2 за допомогою діаграми показано співвідношення концентрації домішок в різних областях.

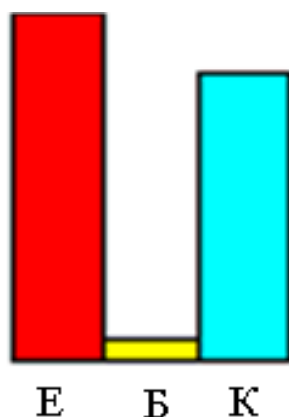


Рисунок 4.2 - Концентрація основних носіїв в областях транзистора

4.1.2 Принцип дії біполярних транзисторів

Розглянемо принцип дії біполярного транзистора на прикладі транзистора з n - p - n типом провідності, як найбільш поширеною нині.

При роботі транзистора в підсилювальному режимі емітерний перехід відкритий, а колекторний - закритий. Це досягається дійсним вмиканням джерел живлення, показаному на рис.4.3. Плюс джерела E_k прикладений до колектора, а мінус джерела E_e до емітеру.

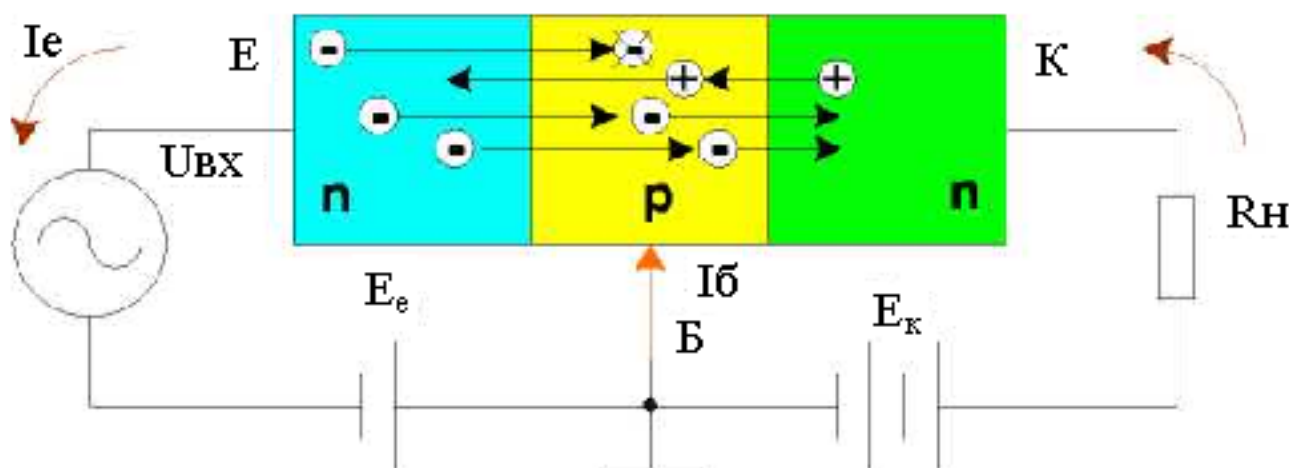


Рисунок 4.3 - Принцип дії біполярного транзистора

Оскільки емітерний перехід відкритий, то через нього протікатиме струм емітера, зумовлений інжекцією, тобто переходом електронів з емітера в базу і переходом дірок з бази в емітер. Інкжецією зарядів називається перехід носіїв зарядів з області, де вони були основними в область, де вони стають неосновними. Послідовно, струм емітера матиме дві складові - електронна і діркова. Ефективність емітера оцінюється коефіцієнтом інжекції:

$$\gamma = \frac{I_{e.n}}{I_e},$$

де $I_{e.n}$ - частина струму емітера, викликана основними носіями (в даному випадку - електронами);

$$I_e = I_{e.n} + I_{e.p} - \text{повний струм емітера.}$$

В сучасних транзисторів $\gamma \geq 0,999$.

В базі електрони рекомбінують, а їх концентрація в базі поповнюється від плюсового полюса джерела E_e , за рахунок чого в колі бази протікатиме дуже малий струм. Основна маса електронів, що залишилися, не встигли рекомбінувати в базі, під прискореною дією поля закритого колекторного переходу, як неосновні носії будуть переходити в колектор, утворюючи струм колектора. Перехід носіїв зарядів з області, де вони були не основними, в область, де вони стають основними, називається екстракцією зарядів.

Ступінь рекомбінації носіїв зарядів в базі оцінюється коефіцієнтом переходу носіїв зарядів

$$\delta = \frac{I_{k.n}}{I_{e.n}},$$

де $I_{k.n}$ - частина струму колектора, обумовлена основними носіями (в даному випадку - електронами).

Таким чином, струм емітера має дві складові: струм бази - I_b і струм колектора I_k . Основне співвідношення струму в транзисторі:

$$I_e = I_k + I_b.$$

Якщо врахувати, що

$$\delta\gamma = \frac{I_{k.n}}{I_e} = \alpha,$$

тоді можна позначити α - коефіцієнт передачі струму транзистора або коефіцієнт посилення за струмом, тоді (помітимо, що завжди $\alpha < 1$)

$$I_k = \alpha \cdot I_e.$$

Дірки з колектора як неосновні носії зарядів переходитимуть в базу, утворюючи зворотний струм колектора який дорівнює

$$I_{\kappa-\bar{6}0} = I_{\kappa} - \alpha \cdot I_e.$$

Напруга в транзисторних схемах позначається двома індексами залежно від того, між якими виводами транзистора ця напруга вимірюється.

Оскільки струм і напруга в транзисторі, окрім постійної складової мають ще і змінну складову, тоді її можна представити як приріст постійної складової і при визначенні будь-яких параметрів схеми користуватися змінною складовою струму і напруги, або приростом постійної складової.

4.1.3 Схеми вмикання біполярних транзисторів

З трьох виводів транзистора на один подається вхідний сигнал, з другого - знімається вихідний сигнал, а третій вивід є загальним для вхідного і вихідного кола.

Схеми вмикання транзисторів дістали свою назву залежно від того, який з виводів транзисторів буде загальним для вхідного і вихідного кола.

Виділяють три схеми вмикання:

- схема включення з загальною базою (ЗБ);
- схема включення з загальним емітером (ЗЕ);
- схема включення з загальним колектором (ЗК).

Кожна з них має свої переваги і недоліки, які будуть розглянені далі.

Схема вмикання з загальною базою (рис.4.4). Для цієї схеми можна записати: $I_{\text{вх}} = I_e$; $U_{\text{вх}} = U_{\bar{6}-e}$; $I_{\text{вих}} = I_{\kappa}$; $U_{\text{вих}} = U_{\bar{6}-\kappa}$. Будь-яка схема вмикання транзистора характеризується двома основними показниками:

- коефіцієнт посилення по струму $I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}}$, для схеми ЗБ це буде

$$\alpha = I_{\kappa}/I_e < 1,$$

- вхідний опір $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$, для схеми ЗБ $R_{\text{вх.}\bar{6}} = U_{\bar{6}-e}/I_e$.

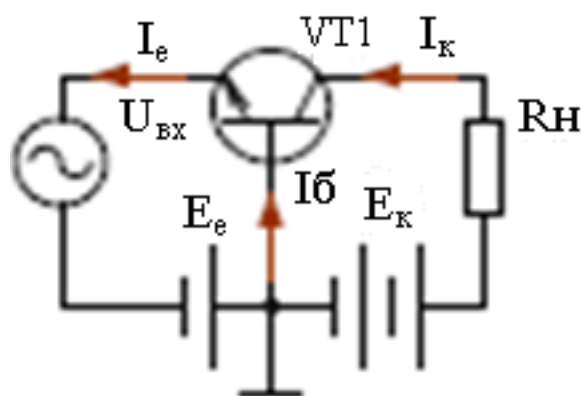


Рисунок 4.4 - Схема вмикання транзистора з загальною базою

Вхідний опір для схеми з загальною базою малий і становить десятки Ом, оскільки вхідне коло транзистора при цьому є відкритим емітерним переходом транзистора.

Недоліками схеми з загальною базою є:

- схема не посилює струм $\alpha < 1$;
- малий вхідний опір, чим шунтується попередній каскад;
- схема потребує для живлення два різні джерела напруги.

Переваги схеми ЗБ є - хороші температурні і, особливо, частотні властивості.

Схема вмикання з загальним емітером (ЗЕ). Ця схема, зображена на рис.4.5, є найбільш поширеною, оскільки вона дає найбільше посилення по потужності.

Для цієї схеми: $I_{ВХ} = I_б$; $U_{ВХ} = U_{б-е}$; $I_{ВІХ} = I_к$; $U_{ВІХ} = U_{к-е}$.

Коефіцієнт передачі струму $\beta = I_{ВІХ} / I_{ВХ} = I_к / I_б$, і для сучасних транзисторів залежно від потужності становить $\beta = 30-400$.

Вхідний опір схеми ЗЕ буде $R_{ВХ.Е} = U_{ВХ} / I_{ВХ} = U_{б-е} / I_б$ і для сучасних транзисторів залежно від потужності становить $R_{ВХ.Е} = (100-1000) \text{ Ом}$.

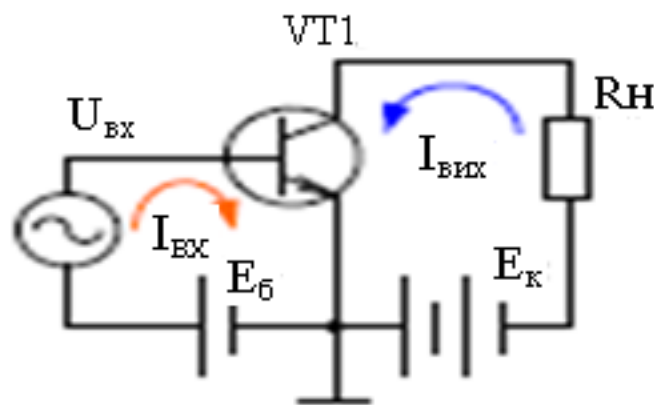


Рисунок 4.5 - Схема вмикання транзистора із загальним емітером

Коефіцієнтом посилення струму такого каскаду є відношення амплітуд (чи діючих значень) вихідного і вхідного змінного струму, тобто змінних складових струмів колектора - $I_к$ і струму бази - $I_б$.

$$\beta = K_I = I_к / I_б.$$

Оскільки струм колектора в десятки-сотні разів більше струму бази, тоді і коефіцієнт посилення струму становить десятки і сотні одиниць.

Коефіцієнт посилення каскада за напругою дорівнює відношенню амплітудних або діючих значень вихідного та вхідного перемінного струму. Вхідним являється зміна напруга б-е $U_{б-е}$, а вихідним - змінна напруга на резисторі напруги $R_н$ або, що теж саме, між колектором та емітером - $U_{к-е}$.

$$K_U = U_{к-е} / U_{б-е}.$$

Напруга база - емітер не перевищує десятих доль вольта, а вихідна напруга при достатньому опорі резистора навантаження і напруга джерела $E_к$ досягає одиниць, а в деяких випадках і десятки і сотні вольт. Тому коефіцієнт посилення каскаду за напругою має значення від десятків до декількох сотень.

Звідси витікає, що коефіцієнт посилення каскаду потужності, який дорівнює утворенню коефіцієнтів посилення за струмом і за напругою, буде рівним сотням, або тисячам, або навіть десяткам тисяч.

$$K_p = K_I K_U = P_{\text{вих}} / P_{\text{вх}}.$$

Цей коефіцієнт є відношенням вихідної потужності до вхідної. Кожна з цих потужностей визначається половиною утворених амплітуд відповідних струму і напруги.

Каскад за схемою 3Е при посиленні перевертає фазу напруги, тобто між вихідною і вхідною напругою є фазове зрушення 180° .

Перевагами схеми з загальним емітером є:

- великий коефіцієнт посилення струму;
- більше, ніж у схеми з загальною базою, вхідний опір;
- для живлення схеми потрібно два однополярні джерела, що дозволяє на практиці обходитися одним джерелом живлення.

Недоліки схеми 3Е: гірші, ніж у схеми з загальною базою, температурні і частотні властивості.

Але за рахунок переваг схема з 3Е застосовується найчастіше.

Схема вмикання з загальним колектором представлені на рис. 4.6.

Для цієї схеми можна записати: $I_{\text{вх}} = I_{\text{б}}$; $U_{\text{вх}} = U_{\text{б-е}}$; $I_{\text{вих}} = I_{\text{е}}$; $U_{\text{вих}} = U_{\text{к-е}}$.

Коефіцієнт посилення струму в цьому випадку визначатиметься виразом

$$\beta = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}} = I_{\text{е}} / I_{\text{б}} = (I_{\text{к}} + I_{\text{б}}) / I_{\text{б}} = \beta + 1,$$

і може досягати значення $\beta = 400$. Вхідний опір $R_{\text{вх}} = U_{\text{б-к}} / I_{\text{б-к}}$ лежить в межах 10-100 кОм

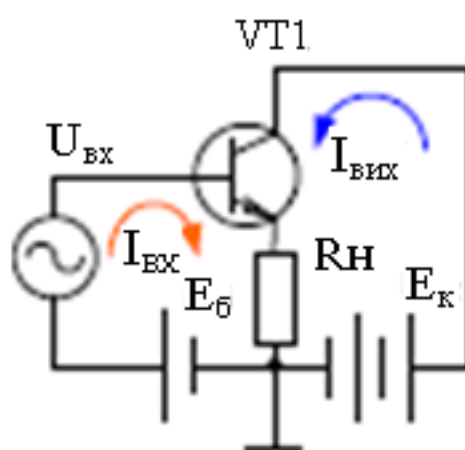


Рисунок 4.6 - Схема вмикання з загальним колектором

У схемі з 3К (рис. 4.6) колектор є загальною точкою входу і виходу, оскільки джерела живлення $E_{\text{б}}$ і $E_{\text{к}}$ завжди шунтовані конденсаторами великої місткості і для змінного струму можуть вважатися короткозамкнутими. Особливість цієї схеми в тому, що вхідна напруга повністю передається назад

на вхід, тобто дуже сильний негативний зворотний зв'язок. Бачимо, що вхідна напруга дорівнює сумі перемінного струму база - емітер $U_{б-е}$ і вихідної напруги.

Коефіцієнт посилення струму по каскаду з загальним колектором майже такий, як і в схемі з ЗЕ. Проте, на відміну від каскаду з ЗЕ коефіцієнт посилення напруги схеми з ЗК близький до одиниці, причому завжди менше.

Змінна напруга, подана на вхід транзистора, посилюється в десятки разів (так само, як і в схемі ЗЕ), але увесь каскад не дає посилення. Коефіцієнт посилення потужності дорівнює коефіцієнту посилення струму. Розглянувши полярність змінної напруги в схемі, можна встановити, що фазове зрушення між $U_{вих}$ і $U_{вх}$ немає. Значить, вихідна напруга співпадає за фазою з вхідним і майже дорівнює йому. Тобто, вихідна напруга повторює вхідне. Саме тому цей каскад зазвичай називають емітерним повторювачем.

Емітерним повторювачем називається резистор якщо навантаження ввімкнено в коло емітера і вихідна напругу знімається з емітера (відносно корпусу). Оскільки вхідне коло є закритим колекторним переходом, вхідний опір каскаду за схемою ЗК становить десятки кілоОм, що є важливою перевагою схеми.

Вихідний опір схеми з ЗК, навпаки, виходить порівняно невеликим, зазвичай сотні Ом. Переваги схеми з ЗК спонукають використовувати її для позгодження різних пристроїв по вхідному опору.

Недоліком схеми є те, що вона не посилює напругу - коефіцієнт посилення трохи менше одиниці.

4.1.4 . Статичні характеристики біполярного транзистора

Розглянемо статичні характеристики на прикладі транзистора, включеного за схемою з ЗЕ, якою найчастіше користуються на практиці. Статичні характеристики транзистора виходять при подачі на вхід (на базу) постійного вхідного сигналу (струму або напруги) при постійних значеннях іншої питомої напруги. Статичні характеристики будуються по точках, шляхом послідовної зміни вхідного сигналу з реєстрацією вихідного. Розглядають вхідні і вихідні статичні характеристики.

Для зняття статичних характеристик транзистора, включеного за схемою з ЗЕ, використовується схема, зображена на рис. 4.7.

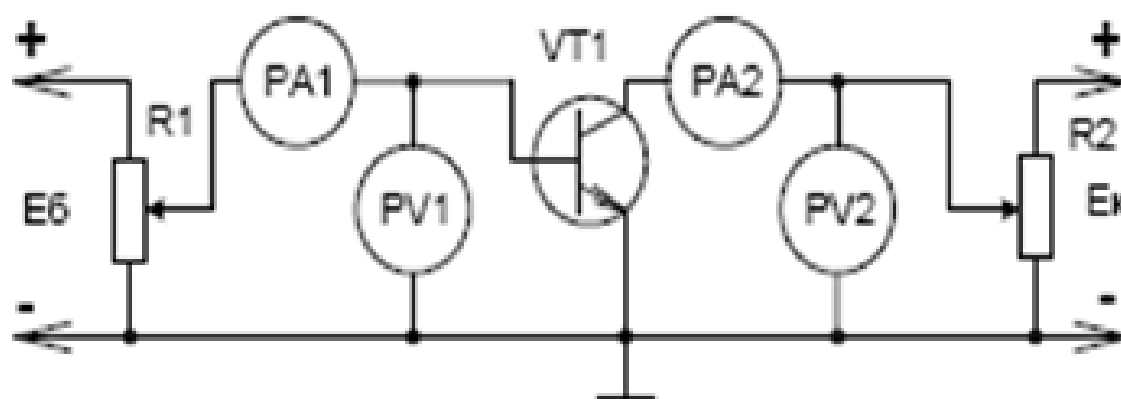


Рисунок 4.7 - Схема для зняття статичних характеристик транзистора

Вхідна статична характеристика це залежність вхідного струму від вхідної напруги при постійній вихідній напрузі

$$I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}}), \text{ при } U_{\text{вих}} = \text{const.}$$

Для даного випадку (схема з ЗЕ) це

$$I_{\text{б}} = f(U_{\text{б-е}}), \text{ при } U_{\text{к-е}} = \text{const.}$$

Вхідна характеристика представляє пряму гілку відкритого *p-n* переходу (рис. 4.8). Зазвичай вхідні характеристики знімають при двох вихідних напругах: нульовому і максимально допустимому. Всі інші криві лежать між ними.

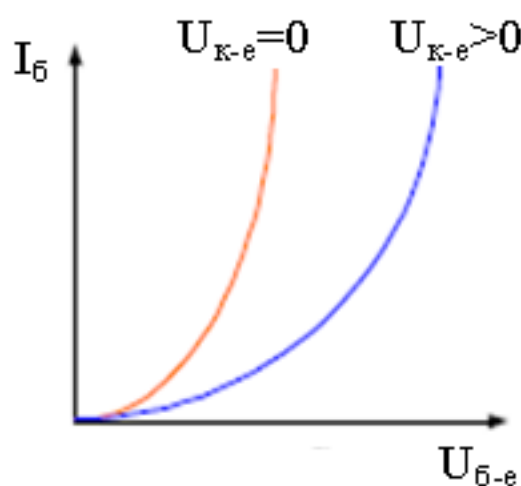


Рисунок 4.8 - Вхідна статична характеристика транзистора, включеного за схемою з ЗЕ

Вид характеристик можна пояснити таким чином: при збільшенні вихідної напруги $U_{\text{к-е}}$ носії швидше пролітають область бази і рекомбінують в колекторі, отже при цьому струм бази зменшується. Крива для максимального значення вихідної напруги проходить нижче (рис.4.8)

Вихідна статична характеристика. Це залежність вихідного струму від вихідної напруги при постійному вхідному струмі. Для схеми вмикання з ЗЕ це буде

$$I_{\text{к}} = f(U_{\text{к-е}}) \text{ при } I_{\text{б}} = \text{const.}$$

Часто знімають сімейство кривих для різних значень струму бази (рис.4.9).

З рисунка видно, що вихідні характеристики є прямими лініями, майже паралельні вісі напруги. Це пояснюється тим, що колекторний перехід закритий незалежно від величини напруги емітер-колектор, і струм колектора визначається лише кількістю носіїв заряду, які проходять з емітера через базу в

колектор, тобто струмом емітера. З збільшенням струму бази більша кількість носіїв інjektується в базу з емітера і, відповідно, струм колектора збільшується (характеристика зміщується у верх).

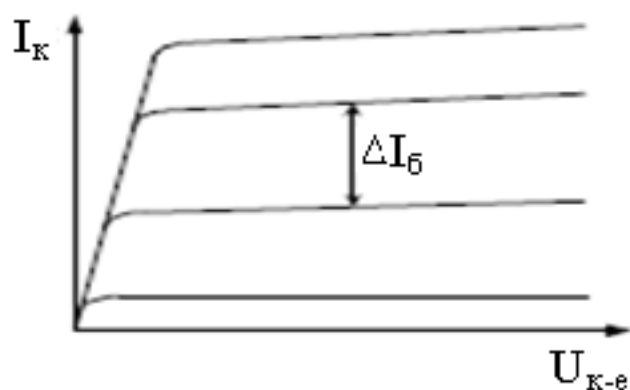


Рисунок 4.9 - Вихідні статичні характеристики транзистора включеного за схемою з ЗЕ

4.1.5 Динамічний режим роботи транзистора

На рис. 4.10 представлення принципова схема підсилюючого каскаду на транзисторі, включеному з ЗЕ. Робота підсилюючого каскаду з транзистором відбувається таким чином. Представимо транзистор змінним резистором R_0 , послідовно з яким включений опір навантаження R_K і джерело живлення E_K . Напруга джерела E_K ділиться між опором напруги R_K і внутрішнім опором транзистора R_0 , яке він надає постійному струму в колекторі.

Цей опір приблизно дорівнює опору колекторного переходу транзистора для постійного струму. Насправді до цього опору ще додаються невеликі опори емітерного переходу, а також n - p -областей, але ці опори можна не брати до уваги, оскільки вони порівняно малі.

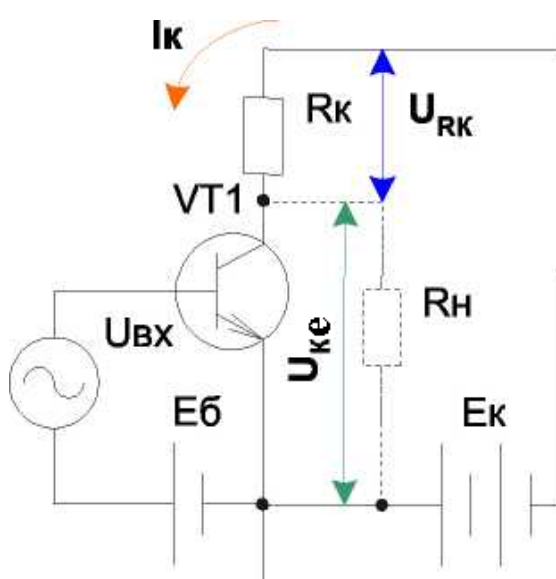


Рисунок 4.10 - Принципова схема підсилювального каскаду на транзисторі, включеному ЗЕ

Якщо у вхідне коло включається джерело сигналу, тоді при зміні його напруги змінюється струм бази (рис.4.8), а отже, і струм колектора (срис.4.9).

Це еквівалентно зміні опору колекторного переходу. Тоді напруга джерела E_K перерозподілятиметься між R_K і R_0 . При цьому змінна напруга на резисторі навантаження може бути отримана в десятки раз більше, ніж вхідна змінна напруга.

Зміни струму колектора майже дорівнюють зміні струму емітера і в багато разів більше зміни струму бази. Тому в даній схемі утворюється значне посилення струму і дуже велике посилення потужності. Посилена потужність є частиною потужності, що витрачається джерелом E_K .

Динамічним режимом роботи транзистора називається такий режим, при якому у вихідному колі (коло колектора) стоїть резистор напруги R_K , за рахунок якого зміна вихідного струму (струму колектора) або викликає зміну вихідної напруги (рис.4.10). В цьому випадку при зміні колекторного струму відбуватиметься перерозподіл напруги джерела E_K .

При закритому транзисторі (струм $I_K=0$) напруга на колекторі по відношенню до загального дроту буде максимальною і дорівнювати E_K , при повністю відкритому транзисторі ($I_K=I_{\max}$) - напруга на колекторі буде мінімальною і визначається виразом

$$U_{K-e} = E_K - I_K R_K.$$

Цей вираз, що описує пряму лінію, і є динамічна характеристика транзистора. Оскільки вихідна динамічна характеристика є прямою лінією, то для її побудови на вихідних статистичних характеристиках потрібно знайти дві точки.

Ці дві точки для побудови прямої знаходяться з початкових умов. Перша точка на осі абсцис виходить при $I_K=0$ чисельно дорівнює величині напруги джерела E_K . Друга точка на осі ординат розраховується для випадку $U_{K-e}=0$, тоді $I_K = E_K/R_K$.

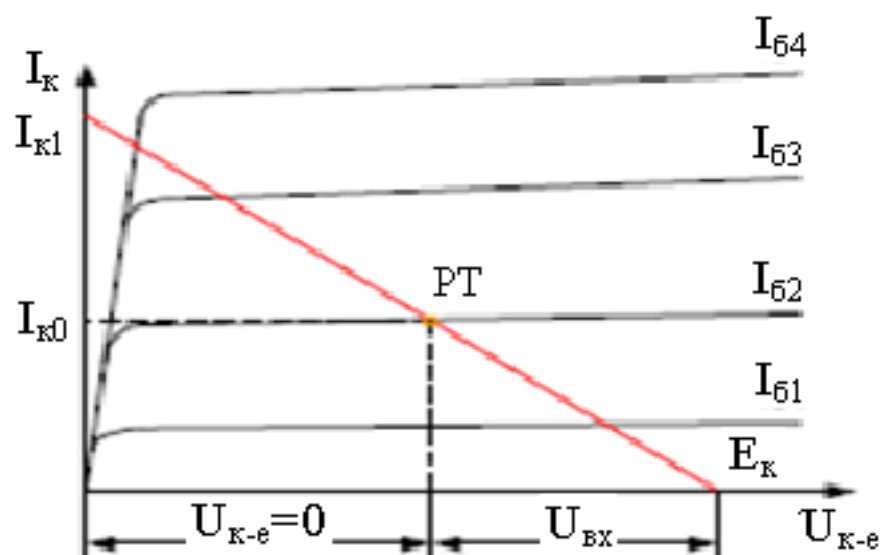


Рисунок 4.10 - Побудова динамічної характеристики

Вихідна динамічна характеристика дістала назву *напруга прямої*.

Поняття робочої точки. Точка перетину прямої напруги з однією з гілок вихідною статичною характеристикою для заданого струму бази називається робочою точкою транзистора. Робоча точка визначає режим роботи транзистора і дозволяє визначати початкові струми і напругу, в реально існуючій схемі.

В залежності від стану *p-n* переходів транзисторів розрізняють три види режимів його роботи: відсічення, насичення і лінійний.

Режим відсічення. Це режим, при якому обидва переходи транзистора (емітерний і колекторний) закрито. Струм бази в цьому випадку дорівнює нулю. Струм колектора буде рівний оберненому струму I_{k0} ($I_{k0} \ll I_k$). Рівняння динамічного режиму має вигляд:

$$U_{k-e} = E_k - I_{k0} \cdot R_k.$$

Робоча точка буде знаходитися внизу на межі області відсічення - I (синя область на рис.4.11). $I_{k0} \cdot R_k$ прагнучим до нуля, відповідно і $U_{k-e} \rightarrow E_k$.

Режим насичення - це режим, коли обидва переходи - і емітерний, і колекторний відкриті, в транзисторі відбувається вільний перехід носіїв зарядів, струм бази буде максимальний, струм колектора дорівнюватиме струму колектора насичення: $I_b \rightarrow I_{bmax}$; $I_k \rightarrow I_{k.нас}$. Напруга колектор-емітер, визначена динамічною характеристикою, дорівнює

$$U_{k-e} = E_k - I_{k.нас} \cdot R_n.$$

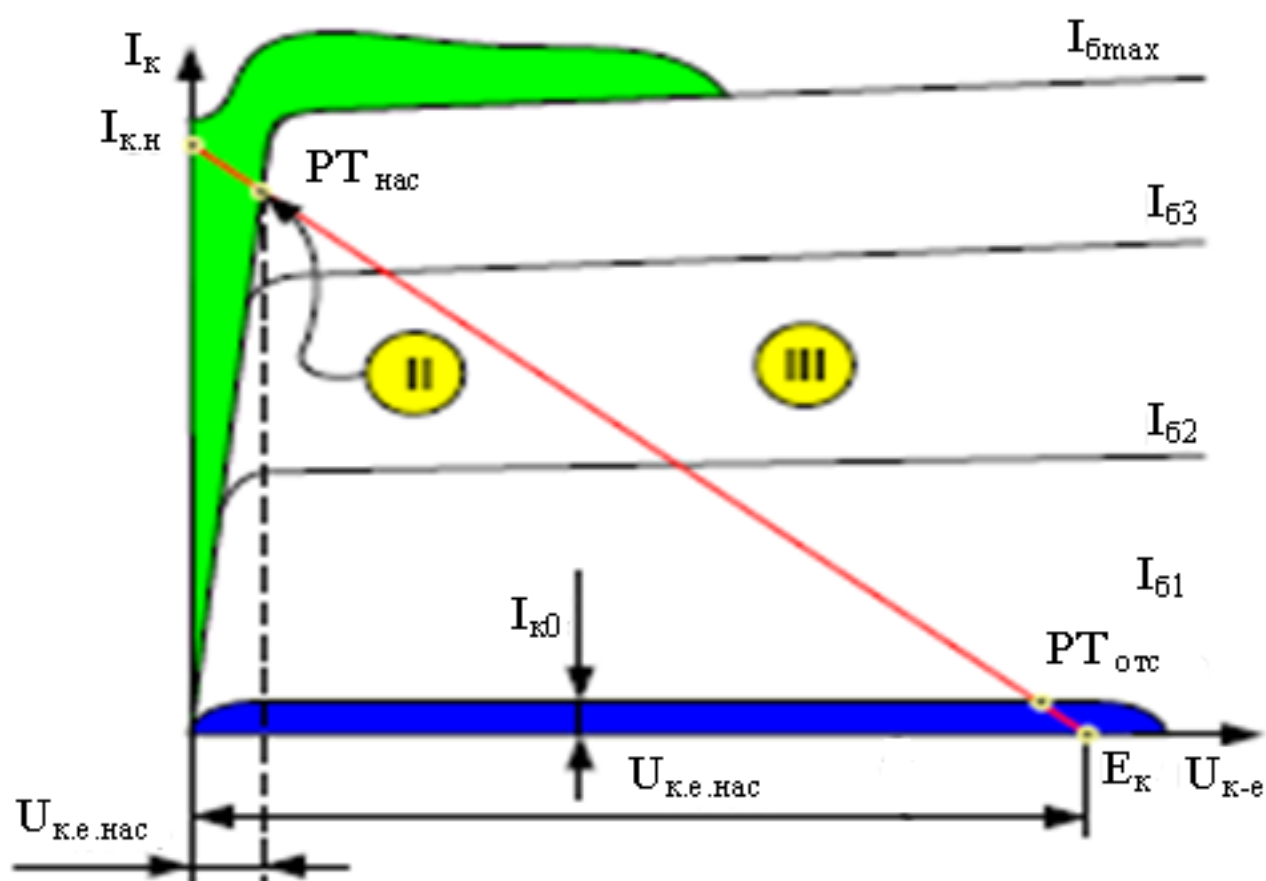


Рисунок 4.11 - Области режимів роботи транзистора

$I_{k.нас} \cdot R_n \rightarrow E_k$, а значить, $U_{k-e} \rightarrow 0$. Робоча точка знаходиться вгорі на межі області насичення - II (зелена область на рис.4.11).

Лінійний режим - це режим, при якому емітерний перехід відкритий, а колекторний закритий. У цьому режимі величини струмів бази і колектора і напруги колектор-емітер знаходяться в межах між максимальним і мінімальним значеннями:

$$I_{\text{б max}} > I_{\text{б}} > 0; I_{\text{к.нас}} > I_{\text{к}} > I_{\text{к0}}; E_{\text{к}} > U_{\text{к-е}} > U_{\text{к-е нас.}}$$

Робоча точка, рухаючись по прямій напруги, залишається в середині області III (незаштрихована область на рис.4.11).

4.1.6 Ключовий режим роботи транзистора

Ключовим режимом роботи транзистора називається такий режим, при якому робоча точка транзистора подібно скачку переходить з режиму відсічення (область I) в режим насичення (область III) і навпаки, минувши лінійний режим. Принципова схема електронного ключа, що забезпечує роботу транзистора в ключовому режимі показана на рис. 4.12. Вхідна напруга подається на базу через резистор $R_{\text{б}}$, який обмежує струм бази транзистора, щоб він не перевищував максимально допустимого значення і транзистор не вийшов з ладу.

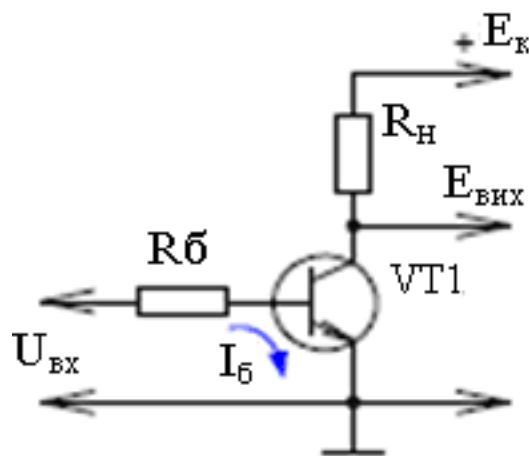


Рисунок 4.12 - Принципова схема електронного ключа

Розглянемо роботу електронного ключа, використовуючи епюри на рис.4.13. У проміжок часу від 0 до t_1 вхідна напруга і струм бази близькі до нуля, робоча точка транзистора знаходиться в області відсічення. Напруга $U_{\text{к-е}}$, що є вихідним буде близьке до $E_{\text{к}}$.

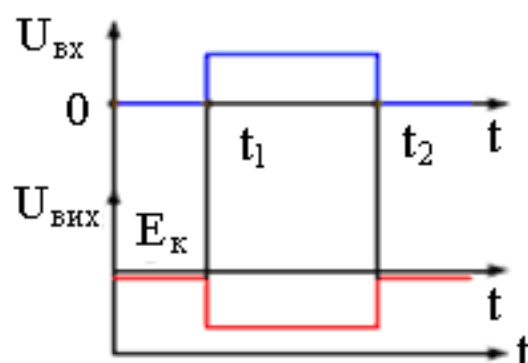


Рисунок 4.13 - Епюри напруги роботи електронного ключа

У момент часу t_1 вхідна напруга, послідовно струму бази, стрибком збільшуються до максимуму. Робоча точка транзистора стрибком перейде в область насичення. На проміжку часі від t_1 до t_2 вхідна напруга і струм бази транзистора залишаються максимальними, і транзистор знаходиться в режимі насичення. Через транзистор протікає максимальний колекторний струм і напруга на резисторі R_K буде мінімальним (по відношенню до загального дроту).

У момент часу t_2 , дія вхідної напруги закінчується і транзистор повертається в режим відсічення. Струм колектора і бази прагнуть до нуля.

Таким чином, електронний транзисторний ключ не лише пропускає або не пропускає вхідний сигнал на вихід, але і є інвертором, тобто змінює фазу сигналу на 180° .

4.1.7 Еквівалентна схема транзистора

Для мети аналізу і визначення параметрів транзистора використовується еквівалентна схема транзистора. В цьому випадку транзистор представляється як джерело струму (напруга) – βI_e і набір резисторів і місткостей які відповідають внутрішньому опору і ємності кристала транзистора. Розглянемо еквівалентну схему транзистора (рис.4.14), включеного за схемою з ЗЕ, як найбільш поширену.

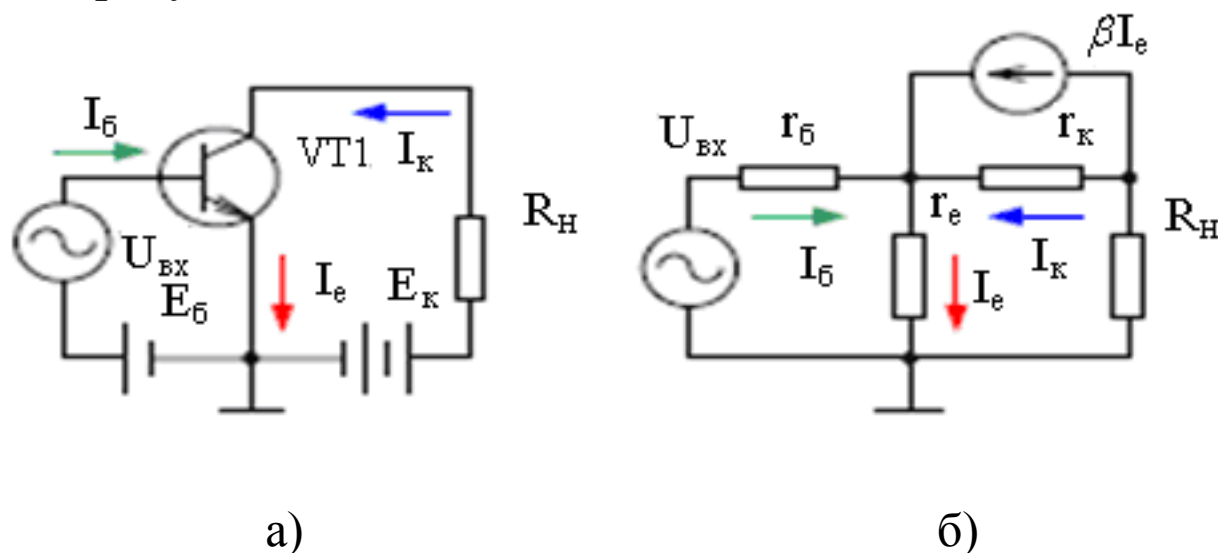


Рисунок 4.14 - Еквівалентні схеми транзистора:
а - з джерелами; б - без джерел електроживлення

На рисунку представлено два варіанти еквівалентної схеми: з джерелами (рис.4.14 а) і без джерел електроживлення (рис.4.14 б). Крім того, для спрощення не показані ємності, які через те що дуже малі (10 ...50 пФ) впливають лише на НВЧ. Резистори r_b , r_e , r_k це еквіваленти опорів областей кристала бази, емітера, колектора.

4.1.8 Представлення транзистора активним чотириполіусником

Будь-який транзистор незалежно від схеми вмикання має ряд параметрів, які можна розбити на дві групи:

- граничні параметри, тобто максимальні значення;
- параметри транзистора в режимі малого сигналу.

Ці параметри об'єднуються в декілька систем параметрів, які можна визначити, представивши транзистор у вигляді активного чотириполюсника. Чотириполюсником називається будь-який електричний Будова, що має два вхідних і два вихідних зажима.

Активним чотириполюсником називається чотириполюсник, що має у своєму складі джерело енергії (струму або напруги) і здатний посилювати потужність. Представлення транзистора у вигляді активного чотириполюсника бачимо на рис. 4.15.

Приємно позначити вхідний струм і напругу індексом "1", а вихідну індексом "2". Для транзисторів достатньо знати дві різні перемінні з чотирьох - U_1 , U_2 , I_1 , I_2 . Дві інші визначаються з статичних характеристик транзистора. Змінні, які відомі, або якими задаються, називаються незалежними змінними.

Дві інші змінні, які можна визначити, називаються залежними змінними. Залежно від того, які з змінних вибиратимуться у вигляді незалежних, можна отримати різні системи параметрів в режимі малого сигналу.

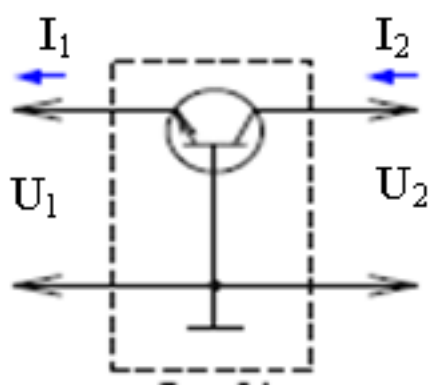


Рисунок 4.15 - Представлення транзистора як активного чотириполюсника

Варіанти систем параметрів представленні в табл.2.1

Таблиця 2.1 - Види систем параметрів

Незалежна змінна	I_1, I_2	U_1, U_2	I_1, U_2
Залежна змінна	U_1, U_2	I_1, I_2	I_2, U_1
Система	z	y	h

4.1.9 Система h -параметрів і їх фізичний сенс

Нині найбільше поширення для практичних цілей отримала система h -параметрів. В системі h -параметрів у вигляді незалежних змінних беруться вхідний струм I_1 і вихідна напруга U_2 . В цьому випадку залежні змінні вхідна напруга $U_1 = f(I_1, U_2)$ і вихідний струм $I_2 = f(I_1, U_2)$, тому цю систему ще називають гібридною системою. Повний диференціал функцій U_1 і I_2 дорівнює:

$$dU_1 = \frac{dU_1}{dI_1 dI_1} + \frac{dU_1}{dU_2 dU_2},$$

$$dI_2 = \frac{dI_2}{dI_1 dI_1} + \frac{dI_2}{dU_2 dU_2}.$$

Позначимо:

$$\frac{dI_2}{dI_1} = h_{11}; \quad \frac{dU_1}{dU_2} = h_{12}; \quad \frac{dI_2}{dI_1} = h_{21}; \quad \frac{dI_2}{dU_2} = h_{22}.$$

Тоді:

$$dU_1 = h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2, \quad dI_2 = h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2.$$

Далі, в режимі малого сигналу перейдемо від нескінченно малих приростів до dU_1 , dI_1 , dU_2 , dI_2 до амплітудних значень змінних що становлять такий самий струм і напругу. В результаті отримаємо:

$$U_{m1} = h_{11}I_{m1} + h_{12}U_{m2}, \quad I_{m2} = h_{21}I_{m1} + h_{22}U_{m2}.$$

В першому рівнянні цієї системи порівняємо $U_{m2} = 0$. Тоді

$$U_{m1} = h_{11}I_{m1},$$

де параметр $h_{11} = U_{m1}/I_{m1}$ - це вхідний опір транзистора при $U_{m2} = 0$, тобто при короткому замиканні у вихідному колі по змінному струму (конденсатором).

Далі, в першому рівнянні системи порівняємо $I_{m1} = 0$, отримаємо:

$$U_{m1} = h_{12}U_{m2},$$

де параметр $h_{12} = U_{m1}/U_{m2}$ - представляє собою коефіцієнт зворотнього зв'язку за напругою на холостому ходу у вхідному колі по змінному струму. Коефіцієнт зворотнього зв'язку показує міру впливу вихідної напруги на вхідне.

У другому рівнянні даної системи порівняємо $U_{m2} = 0$, отримаємо:

$$I_{m2} = h_{21}I_{m1},$$

де $h_{21} = I_{m2}/I_{m1}$ - коефіцієнт посилення струму транзистора, або коефіцієнт передачі струму при короткому замиканні вихідного кола по змінному струму.

Порівняємо в другому рівнянні системи $I_{m1} = 0$. Отримаємо:

$$I_{m2} = h_{22} U_{m2},$$

де $h_{22} = I_{m2}/U_{m2}$ - вихідна провідність при холостому ході у вхідному колі.

Значення гібридних параметрів можуть бути знайдені за статичними характеристиками транзистора. Величини h_{11} і h_{12} визначаються за вхідними характеристиками транзистора. Параметри h_{21} і h_{22} визначаються за вихідними характеристиками.

4.1.10 Температурна властивість транзисторів

Діапазон робочих температур транзистора визначається температурними властивостями $p-n$ переходу. При його нагріванні від кімнатної температури (25°C до 65°C) опір бази і закритого колекторного переходу зменшиться на 15 - 20 %. Особливо сильно нагрівання впливає на зворотний струм колектора $I_{ко}$. Він збільшується в два рази при збільшенні температури на кожні 10°C . Усе це впливає на характеристики транзистора і положення робочої точки (рис.4.16). Струм колектора збільшується, а напруга $U_{к-е}$ зменшується, що рівносильно відкриванню транзистора

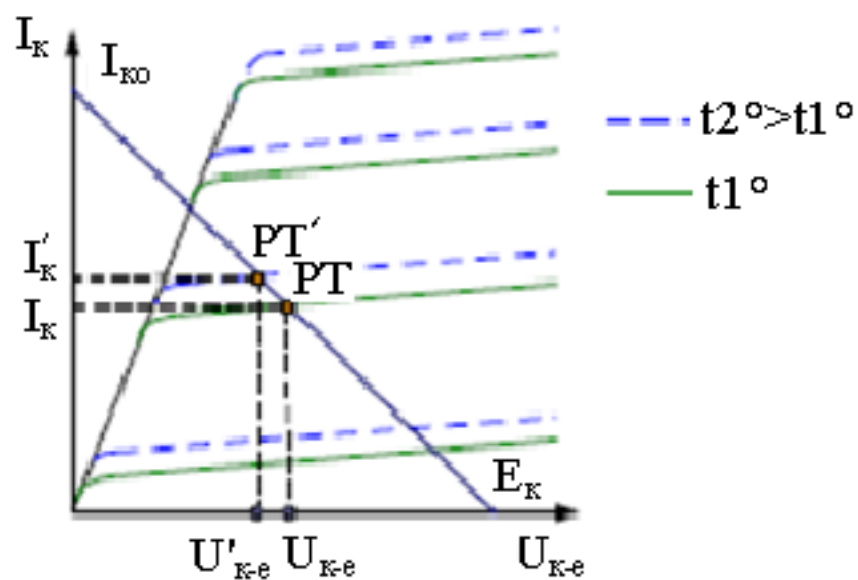


Рисунок 4.16 - Залежність статичних характеристик транзистора від температури

Таким чином, електронні пристрої в яких транзистори включені по схеми з загальним емітером вимагають спеціальних заходів для температурної стабілізації.

4.1.11 Частотна властивість транзисторів

Діапазон робочих частот транзистора визначається двома основними факторами:

- наявністю бар'єрних місткостей на $p-n$ переходу;
- виникненням різниці фаз між струмами емітера і колектора.

Вплив бар'єрних місткостей, особливо місткості колекторного переходу - C_k , оскільки вона більша за абсолютну величину і підключається паралельно великому опору (рис. 4.17) позначаються в зменшенні коефіцієнта передачі струму, тобто в погіршенні підсилювальних якостей транзистора. Це пояснюється тим, що ємності з збільшенням частоти зменшують свій реактивний опір і починає сильніше позначатися що їх шунтують дію.

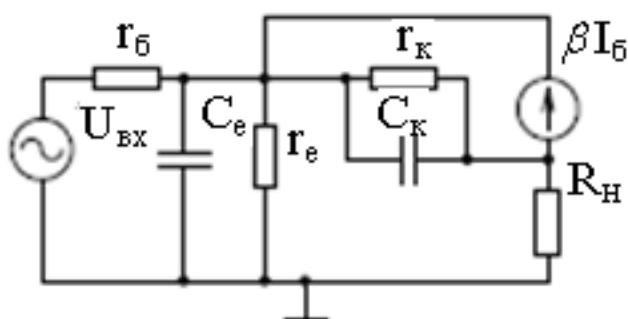


Рисунок 4.17 - Еквівалентна схема транзистора на високих частотах

Відставання по фазі струму колектора від струму емітера стає помітним, коли час проходження носіями області бази стає сумарним з періодом високочастотного вхідного сигналу. В результаті коефіцієнт передачі струму також падає.

Тому для оцінки частотних властивостей транзистора застосовується один з основних параметрів - гранична частота - $f_{гр}$. Граничною частотою називається така частота, на якій коефіцієнт посилення транзистора зменшується в $\sqrt{2}$ раз (класифікація транзисторів за частотою).

4.1.12 Фототранзистори

Фототранзистором називається фотогальванічний приймач світлового випромінювання, фоточутливий елемент якого є структурою транзистора, що забезпечує внутрішнє посилення (рис. 4.18 а).

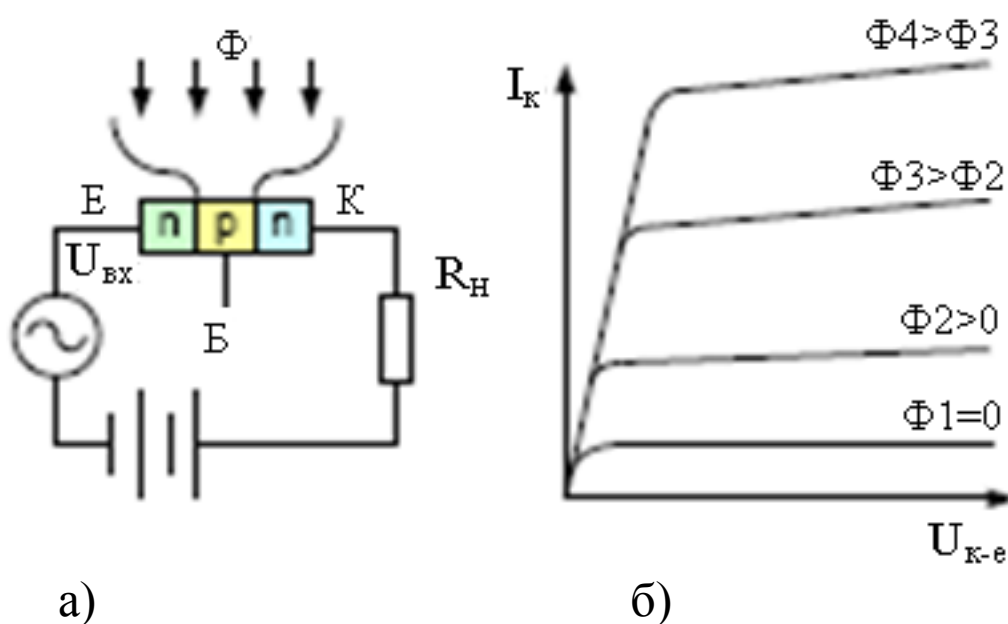


Рисунок 4.18 - Принцип дії фототранзистора і його статичні характеристики:
а - внутрішнє посилення; б - керування колекторним струмом

При попаданні на базу світлового потоку Φ в ній відбувається фотогенерація носіїв зарядів. Неосновні носії заряду йдуть в колектор через закритий колекторний перехід, а основні накопичуються в базі, підвищуючи тим самим відкриваючу дію емітерного переходу. Струм емітера, а отже, струм колектора зростає (рис.4.18б). Значить, керування колекторним струмом фототранзистора здійснюється струмом бази транзистора, який залежить від світлового потоку Φ .

4.2 Пільові транзистори

Пільовим транзистором називається напівпровідниковий прилад, в якому струм створюється лише основними носіями зарядів під дією подовжуючого електричного поля, а те, що управляє цим струмом здійснюється поперечним електричним полем, яке створюється напругою, прикладеною до електроду, що управляє.

4.2.1 Будова і принцип дії пільових транзисторів з керуючим p - n переходом

Визначення:

- виведення пільового транзистора, від якого витікають основні носії зарядів, називається *витоком* (позначається B);
 - виведення пільового транзистора, до якого стікають основні носії зарядів, називається *стоком* (позначається C);
 - виведення пільового транзистора, до якого прикладається управляюча напруга, що створює поперечне електричне поле називається *затвором* (позначається Z).
 - ділянка кристала напівпровідника, по якому рухаються основні носії зарядів, між витоком і стоком, називається *каналом пільового транзистора*.
- Тому пільові транзистори підрозділяються на транзистори (рис.4.19).

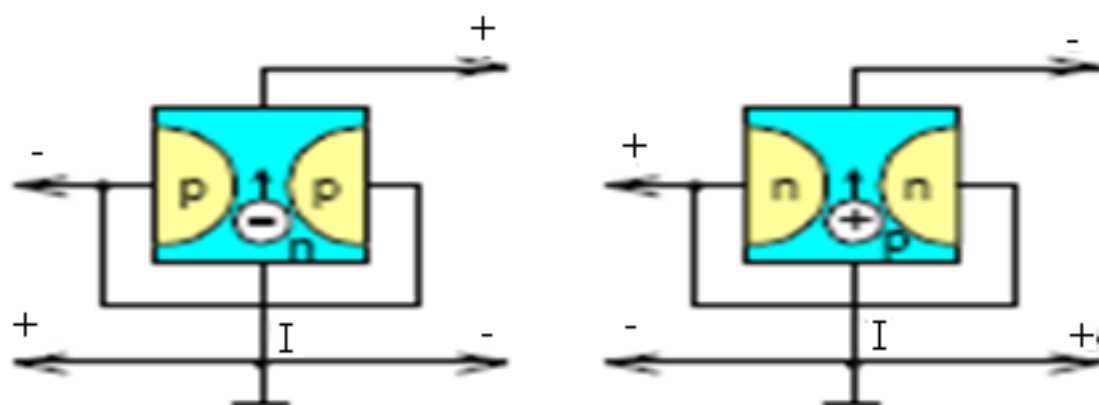


Рисунок 4.19 - Структура пільового транзистора:
а - канал n –типу; б - канал p -типу

Умовне графічне позначення (УГП) пільового транзистора зображено на рис 4.20.

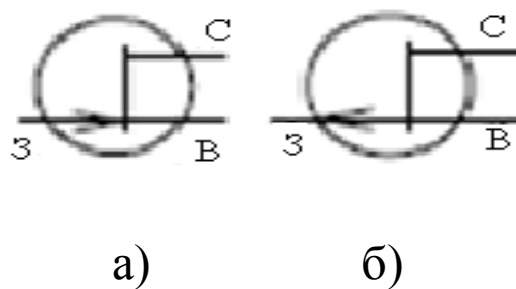


Рисунок 4.20 - Умовне графічне позначення польових транзисторів:
а - канал n –типу; б - канал p -типу

Принцип дії розглянемо на прикладі транзистора з каналом n -типу (рис.4.21)

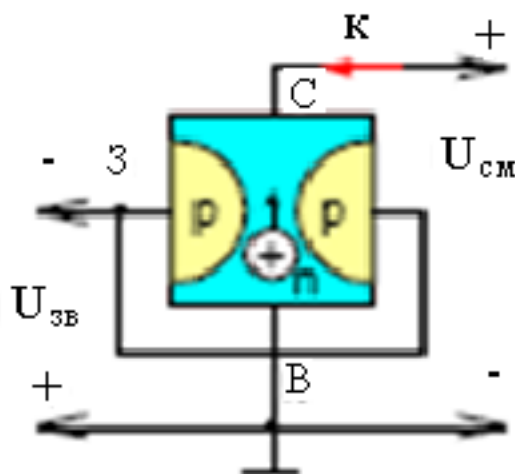


Рисунок 4.21 - Принцип дії польового транзистора з керуючим p - n переходом

У наПІВПРОВІДНИКУ n - типу шляхом дифузії або інжекції створюються p - n переходи, між якими залишається ділянка початкового матеріалу, яка і слугуватиме каналом. Виходи від p - областей цих переходів з'єднуються разом і вони утворюють затвор. На затвор завжди подається закриваюча напруга. Напруга між стоком і витокom створює подовжнє електричне поле, за рахунок якого через канал рухаються основні носії зарядів, створюючи струм стоку - I_c .

Якщо напруга відсутня на затворі $U_{з-в}=0$ p - n перехід закритий власним внутрішнім полем, ширина їх мінімальна, а ширина каналу максимальна і тому струм стоку буде максимальним $I_{сmax}$.

При збільшенні замикаючої напруги на затворі ширина p - n переходів збільшується, а ширина каналу і струм стоку зменшуються. При досить великій напрузі на затворі ширина p - n переходів може збільшуватися настільки, що вони зійдуться, закривши канал, і струм стоку стане рівним нулю.

Напруга на затворі, при якому струм стоку дорівнює нулю, називається напругою відсічення.

Таким чином, польовий транзистор є керованим напівпровідниковим приладом, оскільки, змінюючи напругу на затворі, можна зменшувати струм стоку і тому заведено говорити, що польові транзистори з керуючими p - n переходами працюють лише в режимі збіднення каналу.

4.2.2 Характеристики польових транзисторів

До основних характеристик відносяться:

- стокзатворна характеристика;
- стокова характеристика.

Стокзатворна характеристика - це залежність струму стоку I_c від напруги на затворі U_m транзисторів: $I_c=f(U_c)$, представлена на рис.4.22а. Вона симетрична відносно осі ординат. Справа крива для напівпровідника p -типу, де основні носії дірки, а ліворуч - для напівпровідника n -типу, де основні носії електрони. Як видно з характеристики, з збільшенням напруги на затворі за абсолютною величиною, струм стоку зменшується. Це пояснюється зростанням товщини бар'єрного шару p - n переходу.

Стокова характеристика - це залежність струму стоку - I_c від напруги між стоком і витком - U_{c-b} при постійній напрузі на затворі $U_{зв1}$ (4.22 б). $I_c=f(U_{cb})$ при $U_{з-в}=const$.

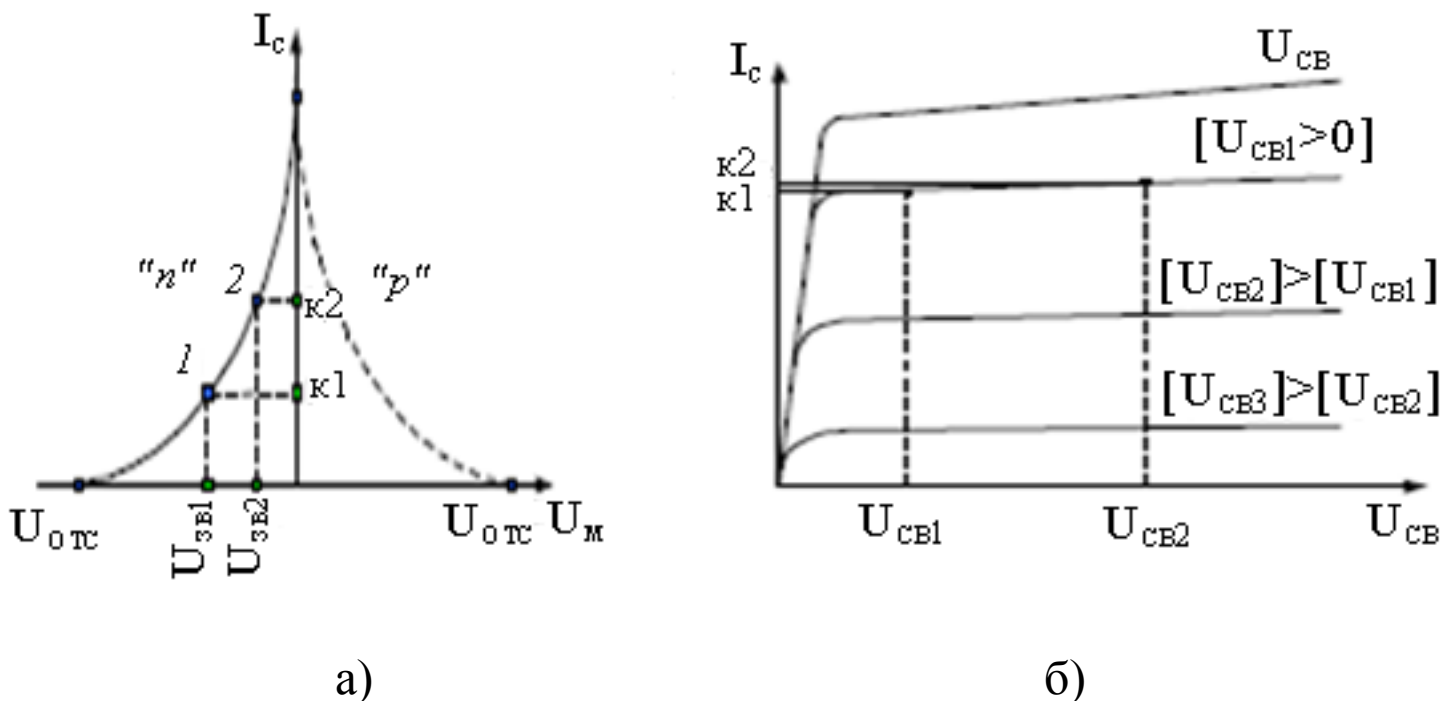


Рисунок 4.22 - Стокзатворна і стокова статичні характеристики польового транзистора:

- а - залежність струму стоку I_c від напруги на затворі U_m транзисторів;
- б - залежність струму стоку I_c від напруги між стоком і витком - U_{cb}

Стокова характеристика за своїм виглядом і фізичним сенсом аналогічна вихідній характеристиці біполярного транзистора, описаній раніше. На ній можна побудувати навантажуючу пряму (динамічну характеристику) за виразом

$$U_{c-b} = E_c - I_c R_c,$$

і визначити положення робочої точки.

4.2.3 Основні параметри польових транзисторів

Основними параметрами польових транзисторів є:

1. Напруга відсічення - напруга на затворі відносно витоку при якому транзистор закривається.

2. Крутизна стокзатворної характеристики. Вона показує, на скільки міліампер зміниться струм стоку при зміні напруги на затворі на 1В.

$$S = \Delta I_c / \Delta U_{3-B},$$

де ΔI_c - приріст струму стоку, дорівнює $\Delta I_c = I_{c2} - I_{c1}$;

ΔU_{3-B} - приріст напруги на затворі відносно витоку, дорівнює $\Delta U_{3-B} = U_{3-B2} - U_{3-B1}$.

3. Внутрішній опір (чи вихідне) польового транзистора. Відношення приросту напруги на стоці до приросту струму стоку для вибраної робочої точки, тобто при постійній напруги на затворі

$$R_{\text{вих}} = \Delta U_{3-B} / \Delta I_c, \text{ при } U_{3-B} = \text{const.}$$

4. Вхідний опір. Відношення приросту напруги на затворі (вхідної напруги) до приросту струму затвора

$$R_{\text{вх}} = \Delta U_{3-B}.$$

Оскільки на затвор подається лише замикаюча напруга, тоді струм затвора буде зворотнім струмом закритого *p-n* переходу і буде дуже малий. Величина вхідного опору $R_{\text{вх}}$ буде дуже велика і може досягати 10^9 Ом, що є дуже позитивною якістю польового транзистора. Завдяки цій якості він практично не чинить впливу на кола до яких він підключається. Заведено говорити, що польовий транзистор на відміну від біполярного управляється напругою.

4.2.4 Польові транзисторів з ізолюваним затвором

Ці прилади мають затвор у вигляді металевої плівки, яка ізолювана від напівпровідника шаром діелектрика. Як діелектрик зазвичай застосовується окисел кремнію. Тому польові транзистори з ізолюваним затвором ще називають МОН або МДП. Абревіатура МОН розшифровується як метал - оксид - напівпровідник, відповідно МДП розшифровується як метал - діелектрик - напівпровідник. МОН - транзистори можуть бути двох видів:

- транзистори з вбудованим каналом;
- транзистори з індукційним каналом.

Польовий транзистор з вбудованим каналом. Умовне графічне позначення наведене на рис.4.23. Основою такого транзистора є кристал кремнію *p*- або *n*-типу провідність. (рис.4.24).

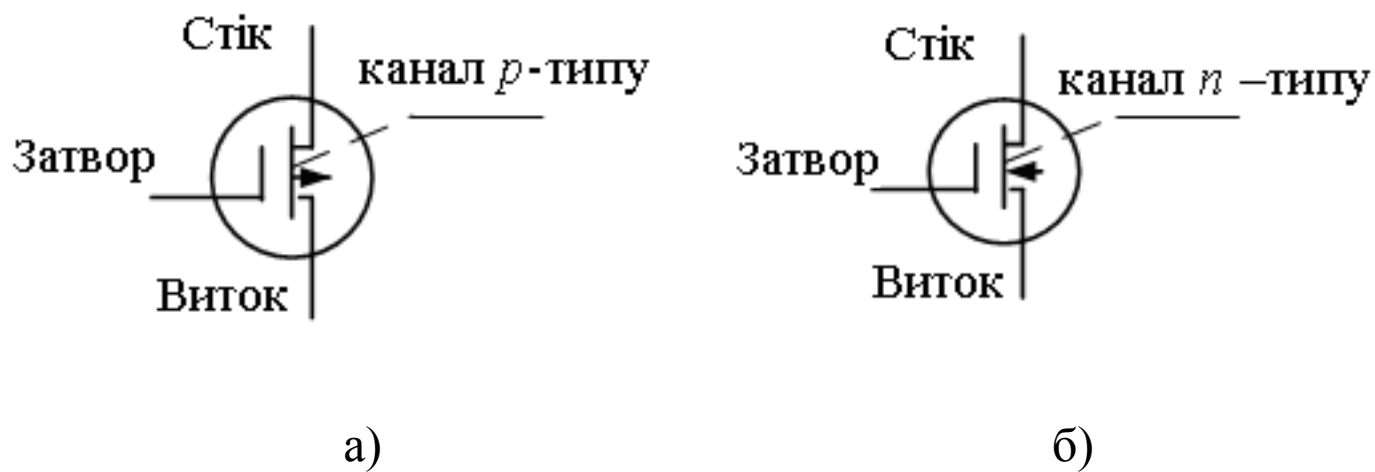


Рисунок 4.23 - Умовне графічне позначення МДП транзистор з вбудованим каналом: а - канал n –типу; б - канал p -типу

На його поверхні створюється шар наНАПІВПРОВІДНИКА зворотної провідності. Зовнішня поверхня якого покривається шаром діелектрика під яким і утворюється вбудований канал. Згори на діелектриці гальванічним способом наноситься електрод затвору.

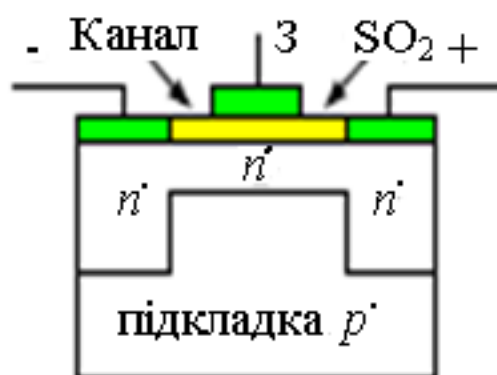


Рисунок 4.24 - Структура польового МДП транзистора з вбудованим каналом

Принцип дії польового транзистора з вбудованим каналом полягає в наступному. За відсутності напруги на затворі $U_{з-в}=0$ і подачі напруги між витоком і стоком $U_{с-в}$, під дією електричного поля між стоком і витоком через канал напівпровідника n -типу протікатимуть основні носії зарядів (для даного випадку - електрони), т. е. існуватиме деякий струм стоку I_{c1} .

При подачі на затвор позитивної напруги $U_{з-в} > 0$ електронів, як неосновні носії підкладки (напівпровідник p -типу), притягуватимуться в канал. Канал збагатиться носіями заряду, і струм стоку збільшиться $I_{c2} > I_{c1}$.

При подачі на затвор негативної напруги $U_{з-в} < 0$ електронів з каналу йтимуть в підкладку, канал опустошиться носіями зарядів, і струм стоку зменшиться $I_{c2} < I_{c1}$.

При досить великій напрузі на затворі усі носії заряду можуть піти з каналу в підкладку, і струм стоку буде дорівнювати нулю.

Таким чином, керування величиною струму стоку МДП транзисторів з вбудованим каналом досягається за рахунок накопичення або зменшення зарядів.

На рис. 4.25 показана вхідна характеристика польового транзистора з вбудованим затвором. Для випадку p -типу і n -типу напівпровідника каналу характеристика виходить симетричною.

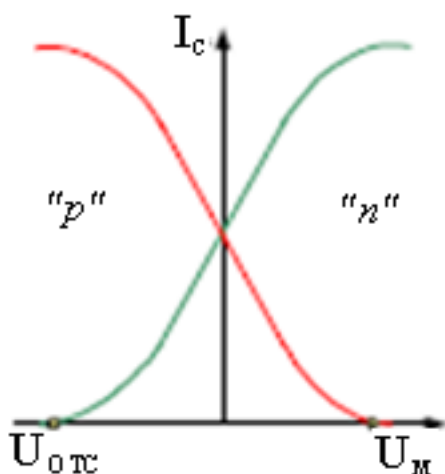


Рисунок 4.25 - Вхідна характеристика польового транзистора з вбудованим затвором

Польові транзистори з індукційним каналом також створюються на кристалі напівпровідника p - або n - типу, на поверхні якого формуються не тільки пов'язані між собою "кишені" напівпровідника зворотної провідності (рис 4.26).

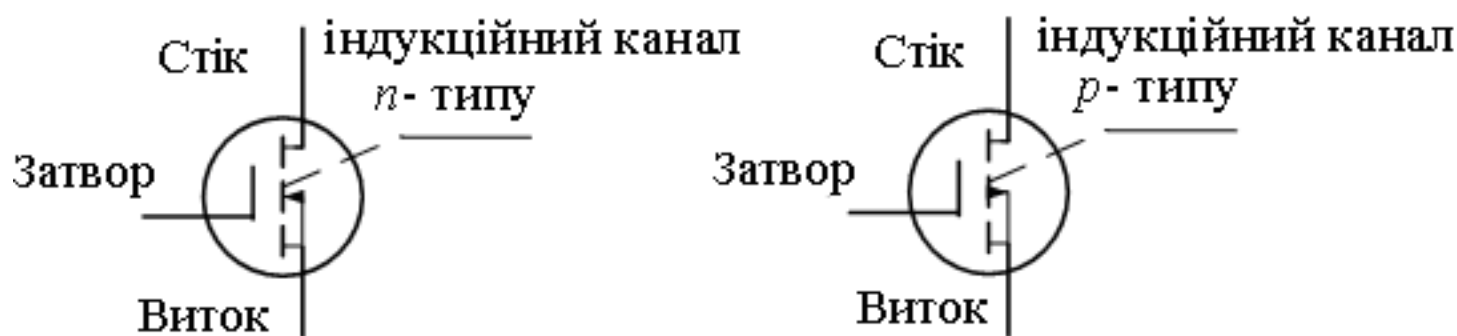


Рисунок 4.26 - Умовне графічне позначення МДП транзистора з індукційним каналом: а - індукційний канал n -типу; індукційний канал p -типу

У іншому конструкція (рис.4.27) аналогічна конструкції (рис.4.24) транзистора з ізолюваним затвором.

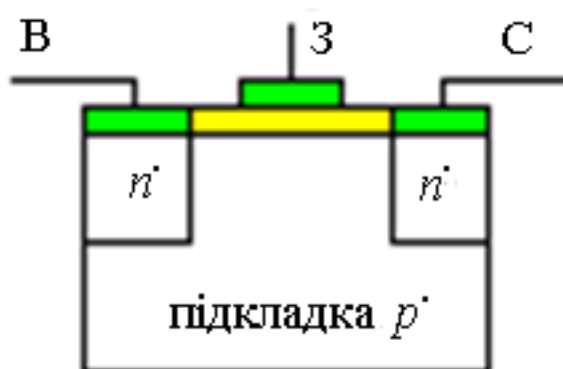


Рисунок 4.27 Структура польового МДП транзистора з індукційним каналом

Принцип дії польового транзистора з індукційним каналом полягає в наступному. При напрузі на затворі, рівній або менше нуля, канал відсутній, і струм стоку дорівнюватиме нулю.

При позитивній напрузі на затворі електрони, як не основні носії заряду підкладки p -типу, притягуватимуться до затвора, а дірки йтимуть вглиб підкладки. В результаті в тонкому шарі під затвором концентрація електронів перевищить концентрацію дірок, тоді у цьому шарі напівпровідник змінить тип своєї провідності. Утворюється (індукціюється) канал, і в крлі стоку під дією поля між витокom і стоком потече струм.

Таким чином, у МДП - транзисторів з індукційним каналом керування струмом стоку здійснюється за рахунок зміни міри накопичення напівпровідника носіями.

Через знаходження затвора на діелектричній підкладці, МДП - транзистори мають дуже великий вхідний опір $R_{вх}=(10^{13}...10^{15})$ Ом. Конструкція МОН транзисторів симетрична і тому витік і стік в принципі можуть змінитися місцями на відміну від біполярних у яких емітер і колектор постійні і їх ще називають уніполярними транзисторами.

4.2.5 Польові транзистори для репрограмуючого запам'ятовуючого пристрою

У інтегральних мікросхемах репрограмуючих запам'ятовуючих пристроїв (РПЗП), у вигляді комірки для зберігання одного біта інформації використовуються польові транзистори МСОН типу і МОН - транзистори з плаваючим затвором. Аббревіатура МСОН розшифровується таким чином: метал-сплав HSi_3N_4 (нітрид кремнію) - оксид металу - напівпровідник.

Принцип дії цих транзисторів МСОН заснований на тому, що в сильних електричних полях електрони можуть проникати в діелектрик на глибину до 1мкм. МСОН-структура транзистора зображена на рис. 4.28.

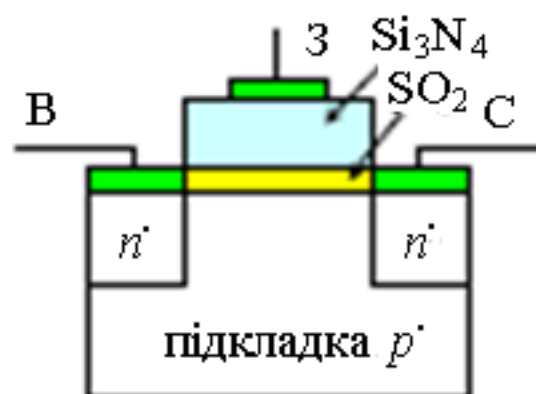


Рисунок 4.28 - Структура польового МНОП транзистора

Транзистори структури МНОП мають двошаровий діелектрик. Перший шар, товщиною не менше 1мкм - це оксид кремнію, другий шар - завтовшки декілька мікрон - нітрид кремнію. Без програмування цей транзистор працює як звичайний МОН - транзистор і містить логічну одиницю інформації.

Для програмування логічного нуля на затвор короткочасно подають відносно велику напругу ($U=25\ldots30\text{В}$). Під дією цієї напруги електрони проходять шар оксиду малої товщини, але не можуть пройти шар нітриду кремнію і накопичуються на межі цих шарів. Оскільки дія напруги короткочасна, тоді вони залишаються на межі шарів цих діелектриків. Залишивши, електрони створюють об'ємний негативний заряд, який може зберігатися скільки завгодно. За рахунок цього заряду виникає електричне поле, протидіюче полю затвора.

Щоб індукувати канал в транзисторі, на затворі необхідно подавати більшу напругу, щоб здолати дію поля об'ємного заряду. Це відповідає зрушенню стокзатворної характеристики вправо по осі напруги. При подачі на затвор імпульсу запиту для прочитування інформації амплітудою до 5В канал індукціюватися не буде, струм стоку і струм в навантаженні відсутні, і навантаження буде дорівнювати логічному нулю.

Для видалення інформації потрібно щоб згусток електронів, що створюють об'ємний заряд, розсмоктався. Для цього на затвор подають також напругу (25...30В), лише негативною полярністю. Сила відштовхування виштовхне електрони з об'ємного заряду і не стане імпульс запиту, що поступає, зможе індукувати канал. Через транзистор зможе протікати струм стоку, отже на навантаженні виділиться рівень логічної одиниці.

МОН транзистора з плаваючим затвором. Відмінність конструкції полягає в наявності в шарі оксиду кремнію області з алюмінію або полікристалічного кремнію на відстані менше 1мкм від напівпровідника (рис.4.29).

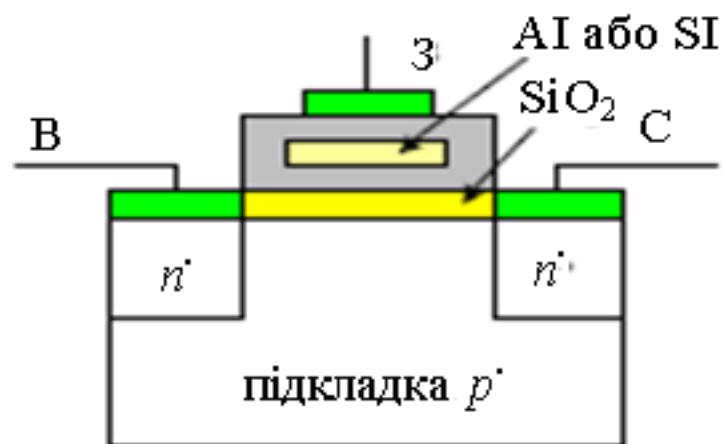


Рисунок 4.29 - Структура польового транзистора з плаваючим затвором

Принцип дії МОН - транзисторів з плаваючим затвором такої самої, як у транзисторів МСОН, лише при програмуванні (при записі логічного нуля) електрони скупчуються в плаваючому затворі з алюмінію або кремнію. Стирання інформації здійснюється ультрафіолетовим випромінюванням, надаючи електронам додаткову енергію для покидання плаваючого затвора. Для цього на корпусі мікросхеми передбачають вікно через яке поступають ультрафіолетові промені при перепрограмуванні. У звичайному стані це вікно заклеєне.

4.3 Тиристори

Тиристором називається чотиришаровий напівпровідниковий прилад, що становиться з послідовних областей p - і n -типів, провідність що чергуються. Тиристори розділяються на:

- динистори - це діодні тиристори, або некеровані перемикаючі діоди;
- триністори - це керовані перемикачі;
- симістори - це симетричні тиристори, тобто тиристори з симетричною ВАХ.

4.3.1 Основні параметри тиристорів

1. $U_{вкл}$ - напруга вмикання. Це напруга, при якій струм через тиристор починає сильно зростати.
2. $I_{вкл}$ - струм вмикання. Це струм, який відповідає за напругу вмикання.
3. $I_{викл}$ - струм виключення. Це мінімальний струм через тиристор, при якому він залишається ще у включеному стані.
4. $U_{ост}$ - остаточна напруга. Це мінімальна напруга на тиристорі у включеному стані.
5. I_o - струм витоку. Це струм через тиристор у вимкненому стані при заданій напрузі на аноді.
6. $U_{омах}$ - максимально допустима зворотня напруга. Це максимально допустима напруга на закритому тиристорі.
7. $U_{пр.мах}$ - максимально допустима пряма напруга.
8. $t_{вкл}$ - час вмикання. Це час, за який напругу на тиристорі зменшиться до величини $0,1U_{вкл}$ напруги вмикання.
9. $t_{викл}$ - час виключення. Це час, за який тиристор переходить з включеного у вимкнений стан.

4.3.2 Будова і принцип дії динисторів

Динистори використовуються у вигляді безконтактних пристроїв перемикачів, які керуються прикладеною напругою. Умовне графічне позначення показане на рис.4.30

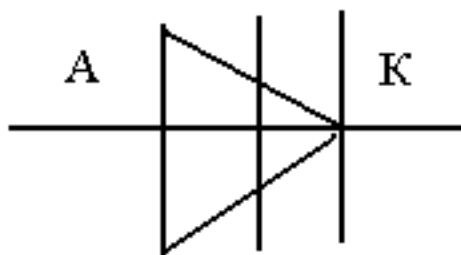


Рисунок 4.30 - Умовне графічне позначення динистора

Структура динистора представлена на рис.4.31. Динистор є

багатошаровою p - n структуру, що має два виводи. Зовнішня p -область і вивід від неї називається анодом.

Зовнішня n -область і вивід від неї називається катодом. Внутрішні p - і n -області називаються базами динистора. Крайні p - n переходи називаються емітерними, а середній p - n перехід називається колекторним.

Якщо подати напругу мінусом на анод і плюсом на катод. Тоді при цьому емітерні переходи будуть закриті, колекторний відкритий. Основні носії зарядів з анода і катода не можуть перейти в базу, тому через динистор протікатиме лише маленький зворотний струм, зумовлений неосновними носіями заряду.

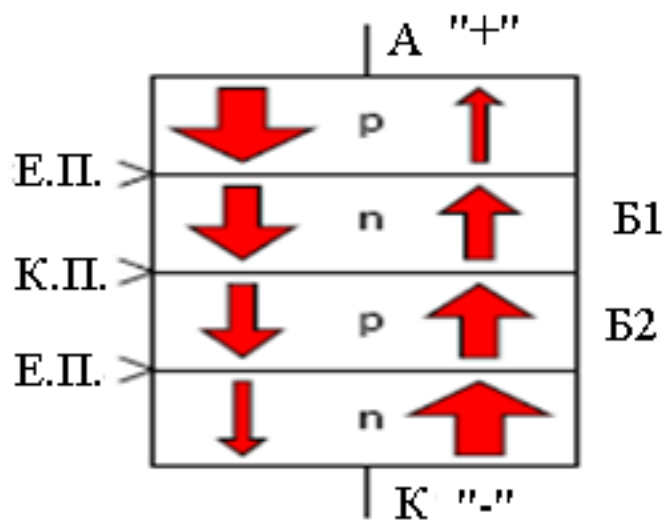


Рисунок 4.31 - Структура динистора

Якщо змінити полярність і подати плюс на анод, а на катод подати мінус, емітерні переходи відкриваються, а колекторний закривається.

Основні носії зарядів переходять з області анода в область бази 1, а з області катода - в область бази 2, де вони стають неосновними і в базах відбувається інтенсивна рекомбінація зарядів, в результаті якої кількість вільних носіїв зарядів зменшується. Ці носії заряду підходять до колекторного переходу, поле яких для них буде прискорюючим, потім проходять базу і переходять через відкритий емітерний перехід, тобто у базах вони знову стають основними. Пройшовши емітерні переходи, електрони переходять в область анода, а дірки - в область катода, де вони вторинно стають неосновними і повторно відбувається інтенсивна рекомбінація. В результаті кількість зарядів, що пройшли через динистор, буде дуже мала і прямий струм також буде дуже малий.

При збільшенні прикладеної напруги прямий струм трохи зростає, тобто збільшується швидкість руху носіїв, а інтенсивність рекомбінації зменшується (рис.4.32).

Далі збільшується напруга до певної величини відбувається електричний пробій колекторного переходу. Опір динистора різко зменшується, струм через нього сильно збільшується і падіння напруги на ньому значно зменшується (крива ВАХ різко зміщується вліво). Вважається, що динистор перейшов з вимкненого стану у включений. Далі крива ВАХ практично повторює хід кривий ВАХ відкритого p - n переходу.

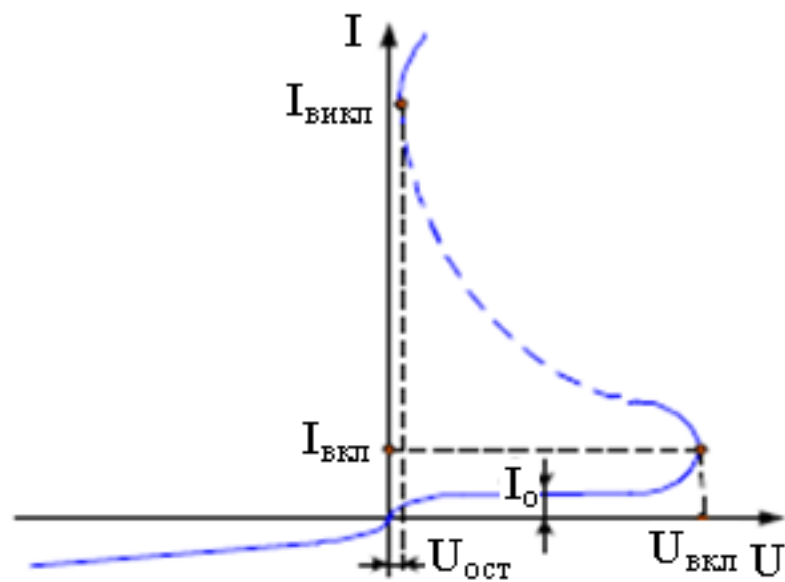


Рисунок 4.32 - ВАХ динистора

4.3.3 Триністори

Триністори представляють клас тиристорів призначений для роботи як потужні комутуючі пристрої, які управляються зовнішнім малопотужним додатковим струмом, що відноситься до області однієї з баз багат шарової $p-n$ структури (рис.4.33).

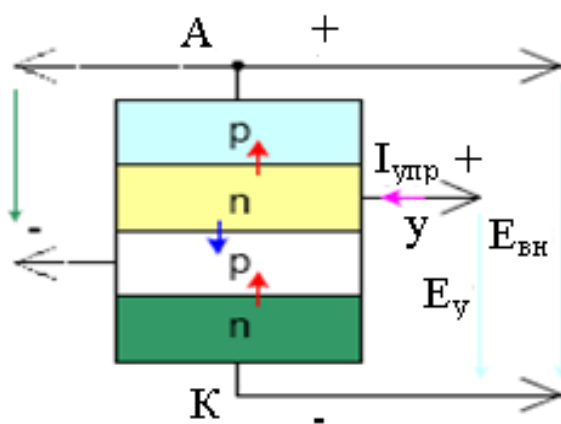


Рисунок 4.33 - Структура триністора

При цьому триністор можна включати при напрузі, менша напруга вмикання динистора (рис.4.32). Для цього досить щоб додаткова напруга створювала поле співпадаюче за напрямком з полем анода на колекторному переході. ВАХ триністора представлена на рис.4.34.

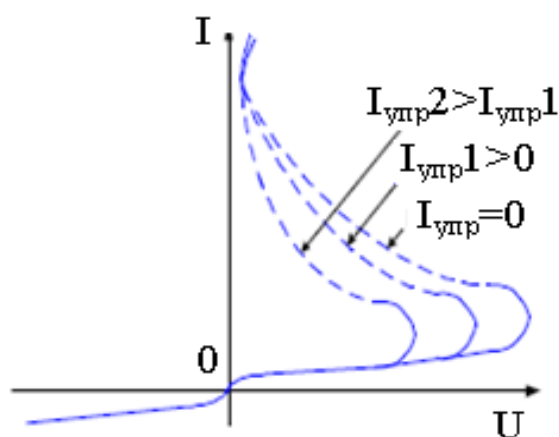


Рисунок 4.34 - ВАХ триністора

Як видно з графіків можна управляти триністором подаючи струм, зумовлений негативним анодом відносно керуванням напругою, на другу базу. Тому розрізняють триністори з керуванням по катоду і з керуванням по аноду. На рис. 4.35 зображено умовні графічні позначення триністора з керуванням по катоду, аноду і симісторі.

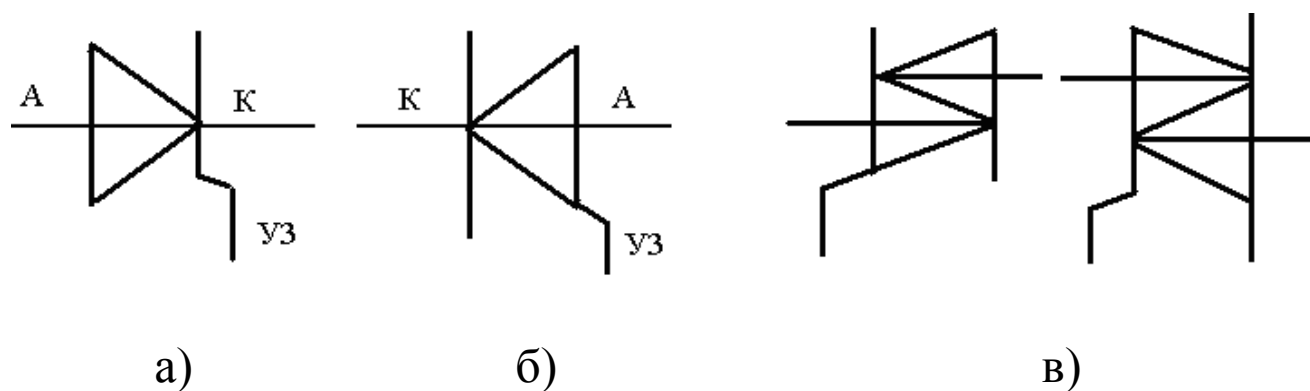


Рисунок 4.35 - Умовні графічні позначення триністора з керуванням:
а – катод; б - анод; в - симістор

4.3.4 Поняття про симістори

Симістори, у відмінності від триністорів, уніполярні, тобто у них немає позначених виводів анода і катода, а лише силові виводи і керівник. Завдяки цьому вони працюють в колах змінного струму, пропускаючи обидві половини синусоїдальної напруги. Структура симістора представлена на рис. 4.36. Як видно з рисунка, вона багатошарова і має три p - n переходу ($\Pi 1$, $\Pi 2$, $\Pi 3$). Розглянемо принцип дії симістора. Подамо позитивну напругу на області $p1$, $n1$, а негативне на області $p2$, $n3$. Перехід $\Pi 1$ закритий, і вимикається після роботи область $n1$. Переходи $\Pi 2$ і $\Pi 4$ відкриті і виконують функцію емітерних переходів. Перехід $\Pi 3$ закритий і виконує функцію колекторного переходу.

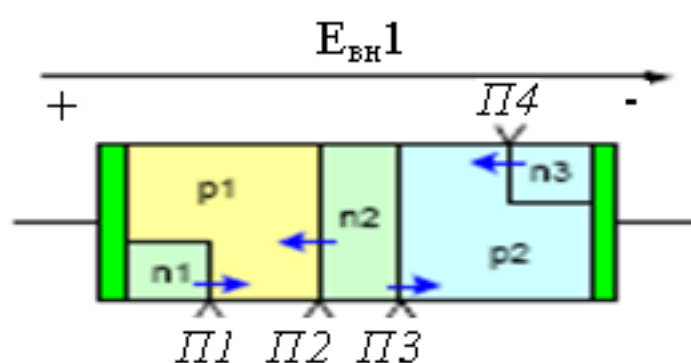


Рисунок 4.36 - Структура симістора

Таким чином, структура симістора буде областями $p1$, $n2$, $p2$, $n3$, де $p1$ виконуватиме функції анода, а $n3$ - при прямому включенні катода.

Подамо напругу плюсом на області $p2$, $n3$, а мінусом на області $p1$, $n1$. Перехід $\Pi 4$ закриється і вимкне з роботи область $n3$. Переходи $\Pi 1$ і $\Pi 3$ відкриваються і гратимуть роль емітерних переходів. Перехід $\Pi 2$ закриється і виконуватиме функцію колекторного переходу.

Таким чином, структура симістора матиме вигляд $p2-n2$, $pl-nl$, де область $p2$, буде анодом, а nl - катодом. В результаті виходитиме структура в прямому включенні, але при зворотній напрузі. ВАХ матиме вигляд, зображений на рис. 4.37. Вона представляє дві прямі гілки ВАХ триністора, представленою на рис.4.37.

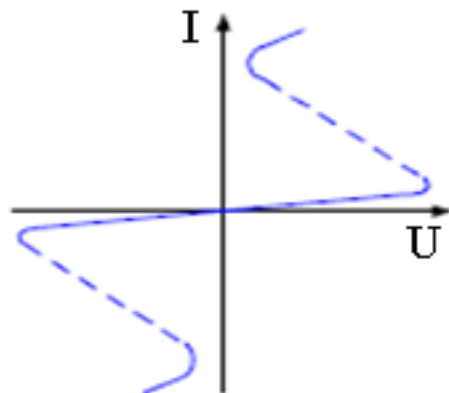


Рисунок 4.37 - ВАХ симістора

Контрольні запитання

1. Як влаштований біполярний транзистор?
2. Принцип дії біполярного транзистора.
3. Які схеми вмикання транзистора існують, дати характеристику кожної з них?
4. В чому полягають підсилювальні властивості біполярного транзистора?
5. Статичні характеристики біполярного транзистора.
6. В чому полягають динамічний режим роботи транзистора?
7. Транзистор як активний чотириполіусник.
8. Система h - параметрів і їх фізична мета.
9. В чому полягає ключовий режим роботи транзистора?
10. Привести і пояснити еквівалентну схему транзистора.
11. Температурні властивості біполярних транзисторів.
12. Частотні властивості біполярних транзисторів.
13. Що таке фототранзистор?
15. Будова польових транзисторів з керуючим $p-n$ переходом.
16. Принцип дії польового транзистора з керуючим $p-n$ переходом.
17. Характеристики польових транзисторів.
18. Основні параметри польових транзисторів.
19. Будова і принцип дії транзистора з вбудованим каналом.
20. Будова і принцип дії транзистора з індукційним каналом.
21. Будова і принцип дії МОН транзистора з плаваючим затвором.
22. Будова і принцип дії динисторів.
23. Будова і принцип дії триністорів.
24. Будова і принцип дії симісторів.
25. Основні параметри тиристорів.

5 ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ [1,5]

Нині більшість електронних схем будуються не з дискретних елементів (резисторів, конденсаторів, транзисторів, діодів і тому подібне), а з готових підсилювачів, генераторів, регістрів, елементів пам'яті і тому подібне, так звані інтегральні мікросхеми (ІМС). Таким чином, ІМС - мікроелектроний Будова, що виконує функції цілої електричної схеми і виконано в єдиному технологічному циклі.

5.1 Класифікація інтегральних мікросхем

Класифікують ІМС за такими ознаками:

1. За технологією виготовлення:

- плівкові - це ІМС, у яких всі елементи виконані у вигляді тонких плівок, нанесених на діелектричну основу, яка називається підкладка;
- гібридні - це ІМС, у яких пасивні елементи виконані за тонко-плівковою технологією на підкладці, а активні елементи (транзистори, діоди) виконані як окремі, навісні, безкорпусні;
- напівпровідникові ІМС - це мікросхеми, у яких всі елементи утворені безпосередньо в кристалі напівпровідника.

2. За способом перетворення і обробки інформації є два види ІМС:

- аналогові ІМС - мікросхеми, що працюють з безперервними сигналами, тобто безперервно опрацьовані інформацію;
- цифрові ІМС - мікросхеми, що працюють з імпульсними сигналами, дискретно опрацьовані інформацію.

5.2 Елементи і компоненти гібридних інформаційних систем

Розглянемо основу плівкової і гібридної технології отримання ІМС. Одним з основних елементів таких мікросхем є підкладка з склокерамічного матеріалу. Форма завжди прямокутна. До підкладки пред'є високі вимоги по чистоті обробки поверхні, хімічна стійкість і електрична потужність.

На поверхні підкладки гальванічним способом або способом напилення створюються контактні майданчики (рис. 5.1).

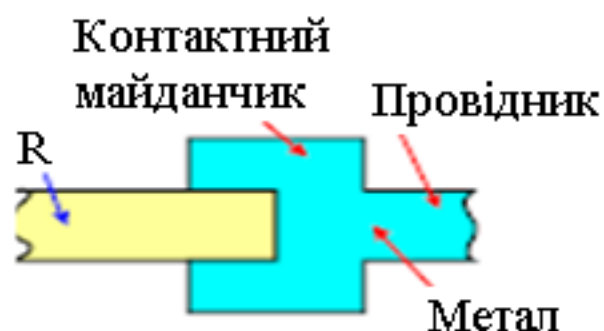


Рисунок 5.1 - Вид контактного майданчика на підкладці

Контактні майданчики призначені для забезпечення електричного контакту між плівковими елементами з сполученими провідниками, а також між плівковими і навісними елементами.

Контактні майданчики найчастіше виготовляють з алюмінію, міді, рідко з срібла, золота. Для поліпшення адгезії (прилипання) між провідником (контактним майданчиком) і підкладкою їх напилюють на підшар з нікелю.

На рис. 5.2 показаний плівковий резистор, виготовлений на підкладці. Для підвищення опору резистори виготовляють у вигляді меандру. Матеріалами для виготовлення резисторів служать нікель, ніхром, метало-кераміка.

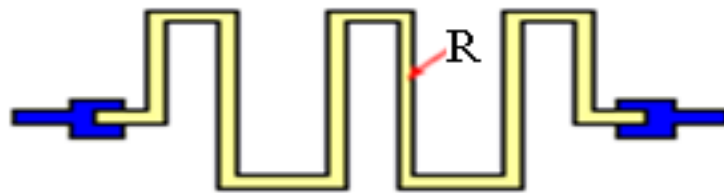


Рисунок 5.2 - Вигляд плівкового резистора

Плівкові конденсатори є плівково тришаровою структурою, між шарами, що проводять, обкладаннями конденсатора, що є, наноситься діелектрична плівка. Для обкладань застосовують алюміній, мідь, рідко срібло, золото. У вигляді діелектрика наноситься монооксид кремнію (SiO_2), монооксид германію (GeO), оксид танталу (Ta_2O_5). Допускається для отримання великих місткостей конденсаторів напилять їх багат шаровими.

Дуже рідко і лише для високих частот виготовляють плівкові котушки індуктивності (рис.5.3).



Рисунок 5.3 - Вигляд плівкової котушки індуктивності

Навісні активні елементи - діоди і транзистори можуть бути з гнучкими або жорсткими виводами, які припаюються до контактних майданчиків. Застосування навісних елементів з жорсткими виводами дозволяють автоматизувати процес зборки ІМС.

5.3 Елементи і компоненти напівпровідникових інтегральних мікросхем

Основа напівпровідникового ІМС являється підложка з кремнія завжди *p*-типу провідності. В основі виготовлення напівпровідникових ІМС лежить

дифузійно-планарна або епітаксильно-планарна технологія. Обидва методи призначені для утворення в середині напівпровідника острівків з проміжними слоями p - і n -типу провідності. На рис.5.4 принципова відмінність цих технологічних прийомів полягає в тому, що в процесі створення шарів в одному випадку використовується переміна дифузія атомів акцепторною або донорною домішок в глибину кристалу напівпровідника, а в другому випадку - епітаксія (вирощування, осадження) напівпровідника заданої структури на поверхні кристала.

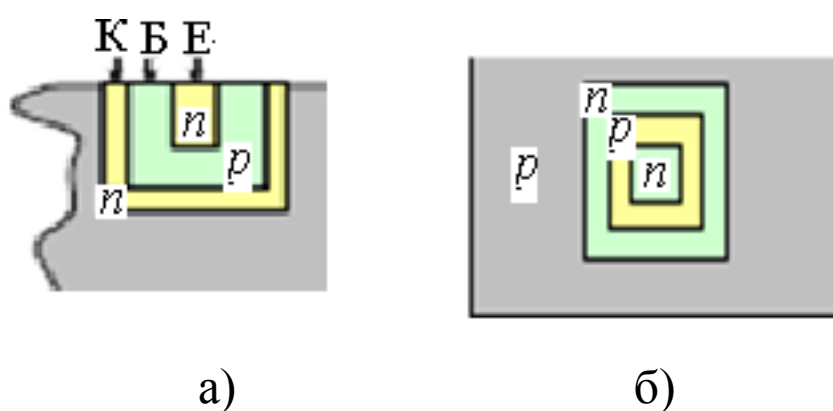


Рисунок 5.4 - Структура транзистора напівпровідникової ІМС:
а- утворююча структура в розрізі; б – в плані

Общим для двох планарних технологій є послідовне використання масок різної конфігурації, які пропускають потрібні атоми в глибину або накопичують на поверхні кристала.

Чергуючи донорні або акцепторні домішки в певній послідовності можна створити на поверхні кристала необхідну структуру, наприклад транзистор.

5.4 Характеристики цифрових інтегральних мікросхем

До основних характеристик цифрових ІМС відносяться:

- **вхідні характеристики** - це залежність вхідного струму ІМС від величини вхідної напруги - $I_{вх}=f(U_{вх})$. Вхідна характеристика $U_{ост}$ показує якої величини має бути вхідний сигнал щоб сталося надійне спрацювання логічного елементу, на рис. 5.5 представлені крива 1 - для ІМС, у яких вхідний струм максимальний при логічному нулі на вході і крива 2 - це характеристика ІМС, у яких вхідний струм максимальний при логічній одиниці на вході.

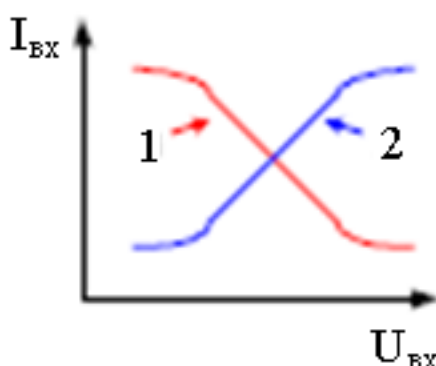


Рисунок 5.5 - Крива для ІМС вхідна характеристика

- **передавальні характеристики** - це залежність вихідної напруги ІМС $U_{\text{вих}}$ від вхідного $U_{\text{вх}}$. $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$. На рис.5.6 представлені крива 1 - для ІМС з інверсією і крива 2 - для ІМС без інверсії.

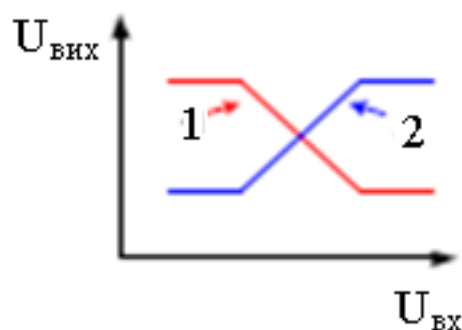


Рисунок 5.6 - Крива для ІМС передавальна характеристика

5.5 Параметри цифрових інтегральних мікросхем

Параметри ІМС підрозділяються на дві групи - статичні і динамічні. Статичні параметри характеризують роботу ІМС при сигналі, що не змінюється, на вході (статичних 0 або 1).

До статичних параметрів відносяться:

- напруга джерела живлення - $U_{\text{дж}}$;
- вхідна і вихідна напруга логічного нуля і логічної одиниці: $U_{\text{вх}}^0$, $U_{\text{вх}}^1$, $U_{\text{вих}}^0$, $U_{\text{вих}}^1$;
- вхідні і вихідні струми логічного нуля і логічної одиниці: $I_{\text{вх}}^0$, $I_{\text{вх}}^1$, $I_{\text{вих}}^0$, $I_{\text{вих}}^1$.

1. Коефіцієнт розгалуження (характеризується здатність навантаження ІМС) показує кількість входів мікросхем навантажень, які можна підключити до виходу цієї мікросхеми без втрати її працездатності - K_p .

5. Коефіцієнт об'єднання по входу показує, кількість входів мікросхем за якими реалізується виконання нею функція - $K_{\text{об}}$.

6. Напруга статичної перешкоди - це максимально допустима статична напруга на вході, при якому мікросхема не втрачає своєю працездатність. Характеризує завадостійка ІМС - $U_{\text{ст.п.}}$.

7. Середня потреба потужності від джерела живлення $P_{\text{пот.ср.}}$.

Динамічні параметри. Вони характеризують роботу ІМС у момент переключення з нуля в одиницю або з одиниці в нуль.

1. Час переключення з логічного нуля в логічну одиницю t^{01} - цей час, за який напруга на вході або виході зростає від 0,1 до 0,9 рівня логічної одиниці (рис.5.5).

2. Час переключення з логічної одиниці в логічний нуль t^{10} .

3. Час затримки поширення сигналу при перемиканні з нуля в одиницю, позначається $t_{\text{зад}}^{01}$.

4. Час затримки поширення сигналу при перемиканні з логічної одиниці в логічний нуль; позначається $t_{\text{зад}}^{10}$.

5. Середній час затримки поширення сигналу, характеризує швидкодію ІМС; позначається $t_{\text{зад.ср.}}$.

5.6 Основні типи логіки

Принципові схеми ІМС, використовуються в цифровій техніці, можуть будуватися на основі одного з принципів дії, який заведено називати логікою. Існує багато різновидів логіки. Сьогодні найбільш поширені:

- ДТЛ - діодно-транзисторна логіка;
- ТТЛ - транзистор-транзисторна логіка.

Існують такі різновиди ТТЛ:

- ТТЛШ - транзисторно-транзисторна логіка з переходами Шотки;
- ТТЛВК - транзисторно-транзисторна логіка з відкритим колектором;
- ЕЗЛ - емітерно-зв'язна логіка.

Особливе місце займає КМОП - логіка на польових МОН - транзисторах, що становиться з пар Комплементарна.

Ця логіка характеризується дуже малим споживанням енергії, оскільки вона працює з струмами величиною частки мікроампер. Завдяки чому КМОП логіка і знайшла широке застосування в процесорах ЕОМ, де на одному кристалі формуються десятки - сотні тисяч вентилів (вентилем називається електронний ключ, який може знаходитися в одному з двох станів, логічної одиниці або логічного нуля).

5.7 Логічні елементи на польових транзисторах МЕТАЛ - ОКИСУ НІТРАТ-СТРУКТУРИ

5.7.1 Електронні ключі на МЕТАЛ- ОКИСУ НІТРАТ ТРАНЗИСТОРИ

Принципова схема електронного ключа на основі МОН транзистора і його структура представлена на рис. 5.7. За відсутності напруги на затворі (логічний нуль на вході) канал відсутній і струму виток-сток немає. При цьому напруга на стоці максимальна, що відповідає логічній одиниці на виході.

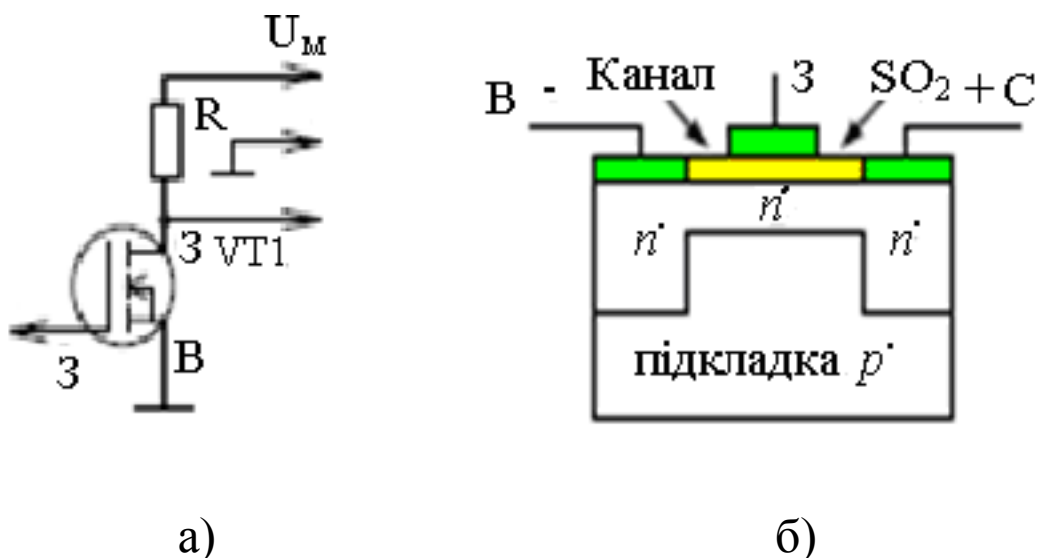


Рисунок 5.7 Електронний ключ і його структура:

а - принципова схема електронного ключа на основі МОН транзистора;

б - структура транзистора

При потраплянні на затвор напруги (логічна одиниця), що управляє, канал відкривається, з'єднується струм в колі виток-сток. Це призводить до падіння напруги на резисторі. Потенціал стоку падає до мінімуму, що відповідає логічному нулю. Таким чином, електронний ключ реалізує функцію логічного заперечення НЕ.

5.7.2 Комплементарна пара МЕТАЛ -ОКИСУ НАПІВПРОВІДНИК (КОМПЛЕМЕНТАРНА МЕТАЛ ОКИСУ НАПІВПРОВІДНИК).

Недоліком електронних вище розглянутих ключів є наявність резисторів в колі стоку. Технологічно при виготовленні вони займають на підкладці значно більше місця, ніж транзистор. Тому найчастіше застосовуються ІМС, у яких замість резистора навантаження застосовується МОН - транзистор, але з каналом іншого типу провідності. Такі взаємодоповнюючі структури дістали назву комплементарна МОН - пара. Схема електронного ключа на основі КМОП приведена на рис.5.8.

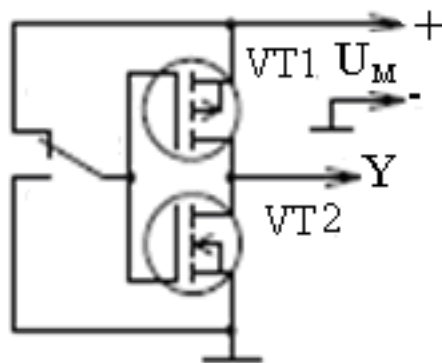


Рисунок 5.8 - Схема електронного ключа на основі КМОП

Якщо на затвори обох транзисторів подати сигнал логічного нуля, тоді в транзисторі VT2 (з каналом "n" типу провідності) канал буде відсутній, а в транзисторі VT1 з каналом "p" типу канал буде індукційний, тобто на затворі відносно витоків буде негативна напруга. Через цей канал вихід Y з'єднується з плюсом джерела живлення, і на виході буде високий рівень логічної одиниці.

При подачі на затвори логічної одиниці канал в транзисторі VT1 зникає, а в VT2 канал індукціюється і через цей канал вихід Y з'єднується з нульовим потенціалом загального дроту, послідовно, на виході буде логічний нуль.

Переваги КМОН - пари є: відсутність резисторів, що дозволяє підвищити міру інтеграції і дуже мале споживання струму від джерела. Це обумовлено тим, що між плюсом і мінусом ІП завжди виє транзистор, у якого немає каналу, тобто наскрізний струм через КМОП пару відсутня. Недолік КМОН - пари - відносно низька швидкодія, пов'язана з перезарядом паразитних місткостей через закриті МОН транзистори.

Контрольні запитання

1. Класифікація мікросхем.
2. Технологія отримання елементів для плівкових і гібридних мікросхем.
3. Технологія отримання елементів для напівпровідникових мікросхем.
4. Основні характеристики цифрових ІМС.
5. Основні параметри цифрових ІМС.
6. Основні типи логіки.
7. Електронні ключі на МОН-ТРАНЗИСТОР.
8. Що таке КМОН - пара?

6 ПРИЛАДИ ВІДОБРАЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ[1,5]

Особливе місце серед електронних приладів займають прилади відображення інформації. До них, окрім звичайних технічних вимог існують споживча потужність, величина питомої напруги, швидкодія і тому подібне, пред'є ряд таких вимог:

- яскравість;
- контрастність;
- читаність;
- кольорова насиченість;
- ряд інших, які пов'язані з ергономічними чинниками.

Прилади відображення інформації є сполучною ланкою в системі людина-машина. Тому вони повинні мати такі характеристики щоб людині і операторові було зручно і безпечно працювати з ними, допускаючи мінімум помилок через неузгоджені можливості органів чуття оператора з параметрами пристроїв відображення.

Основними класами приладів відображення інформації є:

- індикатори;
- екрани.

6.1 Індикатори

Індикаторами називаються прилади для відображення інформації у вигляді нерухомих символів (точок, знаків, цифр або букв). Розроблена велика кількість типів індикаторів, що працюють на основі різних фізичних принципів. Найбільше поширення нині для відображення цифрової інформації отримали:

- світлодіодні;
- вакуумні електролюмінесцентні;
- рідкокристалічні.

6.1.1 Світлодіодні індикатори

Як випливає з назви, джерелом інформації у світлодіодних індикаторах є світлодіоди. У простому випадку світіння світлодіода символізує логічну "1". Відсутність світіння означає логічний "0". Складніші індикатори складаються з декількох світлодіодів (декілька сотень штук). Складні світлодіодні індикатори бувають двох видів: семисегментні і матричні.

Семисегментні світлодіодні індикатори призначені для відображення інформації у вигляді цифр (знаків) і включають до свого складу вісім світлодіодів, сім з яких мають форму сегментів (ліній), а один, восьмий, - точка або знак плюс/мінус (рис 6.1). Всі аноди світлодіодів з'єднані разом. А виводи катодів підключаються в певному порядку. Подаючи живлячу напругу на певні

сегменти можна з "рисок" отримати необхідний знак, наприклад будь-яку цифру від 0 до 9

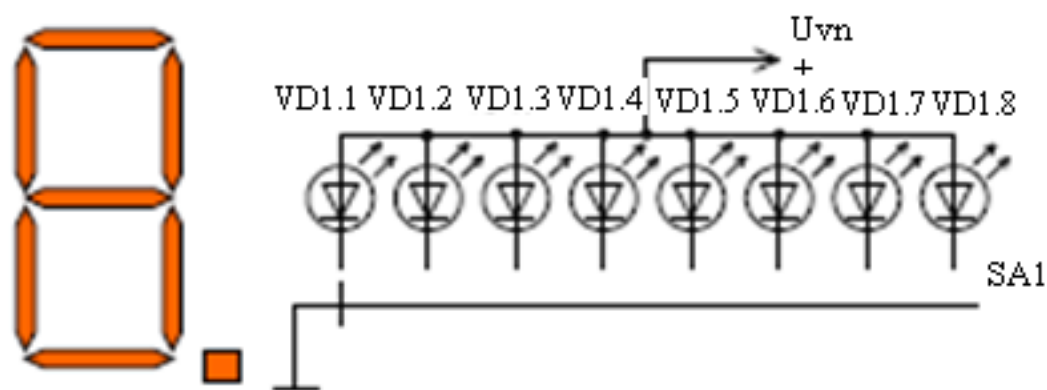


Рисунок 6.1 -Схема сегментного індикатора

Світлодіодні матричні індикатори мають у своєму складі велику кількість світлодіодів, що утворюють матрицю. Шляхом підключення тих або інших світлодіодів в матриці можна сформувати будь-яку цифру, букву, знак або символ з точок (рис. 6.2), що світяться

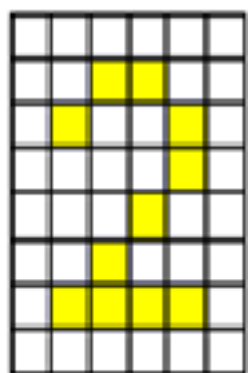


Рисунок 6.2 - Приклад формування знаку "2" матричним індикатором

Переваги світлодіодних індикаторів:

- низьковольтна живляча напруга;
- порівняно малий споживчий струм;
- висока чіткість формованих знаків.

6.1.2 Вакуумні електролюмінесцентні індикатори

Принцип дії вакуумних електролюмінесцентних індикаторів заснований на тому, що аноди у вигляді металізованих сегментів, покриті люмінофором, будуть світитися при попаданні на них електронного потоку. Будова індикаторів такого типу показаний на рис. 6.3.

До складу такого індикатора входять:

- катод для створення потоку електронів шляхом термоелектронної емісії;
- прискорююча сітка;
- маска;
- аноди.

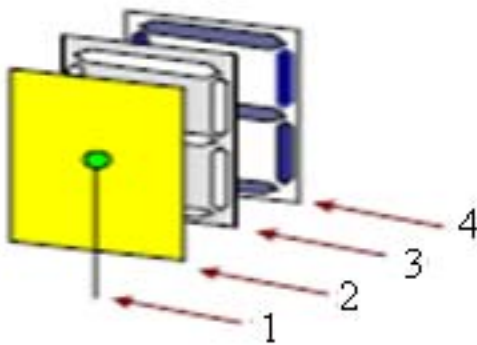


Рисунок 6.3 - Конструкція вакуумного електролюмінесцентного індикатора

Принцип дії такий: катод створює електронний потік, який прискорюється сіткою і через маску потрапляє на ті аноди, до яких підведена позитивна напруга. Під дією потоку електронів люмінофор анода, що бомбардується, починає світитися. Маска є металевою фольгою з прорізами по конфігурації анодів і призначена для отримання чіткої конфігурації знаків.

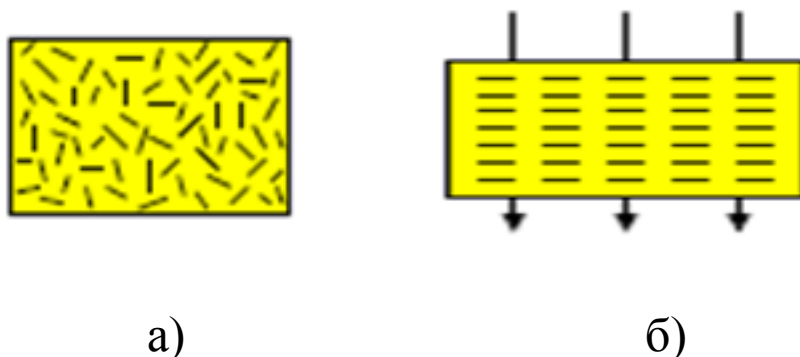
Переваги:

- найбільша яскравість світіння з усіх типів індикаторів;
- порівняно низька живляча напруга.

Недолік: відносно великий споживчий струм за рахунок необхідності підігрівати нитку катода.

6.1.3 Рідкокристалічні індикатори

Рідкими кристалами (РК) називають матеріали, що мають будову молекул у вигляді довгих кіл з дуже високою рухливістю. За рахунок цього в звичайному стані ці молекули розташовуються хаотично і рідкий кристал не прозорий (рис. 6.4а). Якщо помістити рідкий кристал в електричне поле, тоді молекули орієнтуються відносно лінії напруги поля і рідкий кристал стає прозорим (рис. 6.4б).



а)

б)

Рисунок 6.4 - Рідкий кристал за відсутності і під впливом електричного поля:
а – не прозорий кристал; б- прозорий кристал

Індикатори на основі рідких кристалів можуть бути двох видів: що працюють на негатив і працюють на просвіт. РК індикатори, що працюють на

віддзеркалення мають конструкцію, представлену на рис.6.5. До складу індикатора входять:

- скло, що служить основою;
- прозорий електрод;
- рідкий кристал;
- непрозорий електрод.



Рисунок 6.5 - Конструкція РК індикатора, що працює на віддзеркалення

Прозорий електрод виконується у вигляді сегментів, букв або символів. Якщо на нього подати електричний потенціал відносно непрозорого електроду, електричне поле в цьому місці займе рідкий кристал прозорим і крізь нього під дією зовнішнього джерела світла буде видно непрозорий електрод.

РК, що працюють на просвіт, мають два прозорі електроди. Для відображення інформації за ними повинне розташовуватися джерело світла, яке може бути різних кольорів. Таким чином, під дією електричного поля, коли РК стане прозорим відображається кольоровий знак.

Переваги індикаторів на основі РК: напруга, яка не значно управляє, надзвичайно малий споживчий струм (протікає лише у момент переключення). Істотним недоліком рідкокристалічних індикаторів є потреба зовнішнього освітлення (денне світло або спеціальне підсвічування).

6.2 Екрани

Електронно-променевою трубкою (ЕПТ) називається електровакуумний прилад призначений для отримання на екрані видимого зображення за допомогою сфокусованого у вузький промінь потоку електронів. ЕПТ розділяються за принципом формування і керування електронного світла на:

- електронно-променеві трубки з електростатичним керуванням;
- електронно-променеві трубки з електромагнітним керуванням;
- кінескопи.

6.2.1 Електронно-променеві трубки з електростатичним керуванням

Електростатичні променеві трубки застосовуються в осцилографах і тому їх часто називають осцилографічними.

Основу ЕПТ становить циліндрична скляна колба що розширюється з одного кінця. Плоске дно колби, покрите зсередини спеціальною речовиною - люмінофором, називається екран. Люмінофор - це хімічна сполука, що має властивість світитися при попаданні на нього електронів, що мають досить

високу кінетичну енергію. Від хімічного складу люмінофора залежить колір світіння і тривалість післясвітіння.

У протилежній до екрану стороні колби розміщується електронна гармата і система, що відхиляє. Електронна гармата утворює і формує потік електронів, що утворюють електронний промінь. Для виключення зіткнення електронів з молекулами газів що містяться в повітрі в колбі створюється глибокий вакуум. Будова і схема живлення осцилографічної ЕПТ показані на рис. 6.6. ЕПТ становиться з наступних основних частин: *K* - катод; *M*- модулятор; *A1* і *A2* - перший і другий аноди; *ПВВ* і *ПГВ* - пластини вертикального і горизонтального відхилення; *E* - екран. Розподільник живлячої напруги зібраний на резисторах *R1*, *R2*, *R3*, *R4*.

Електронна гармата призначена для створення вузького сфокусованого електронного потоку, в якому електрони мають достатньо високу швидкість, тобто кінетична енергія. Вона становиться з катода з ниткою накалу (КНН), модулятор (М) і системи двох анодів (А1, А2).

Струм, який протікає по нитці накалу розігріває її і катод до високої температури (800-1000С°). Під дією високої температури речовина катода починає випускати електрони, які утворюють навколо нього електронну хмару. Модулятор призначений для керування струмом променя від чого зрештою залежить яскравість світіння екрану. Принцип керування ґрунтується на взаємодії негативно заряджених електронів з полем модулятора. Чим менш негативний потенціал має модулятор по відношенню до катода, тим більша кількість електронів вилітають назовні, утворюючи електронний промінь. Перший і другий аноди виконують дві функції. Перший – за рахунок позитивного прискорюючого поля розганяє до електронів необхідної швидкості (збільшують кінетичну енергію електронів). Другий - здійснюють фокусування електронного променя.

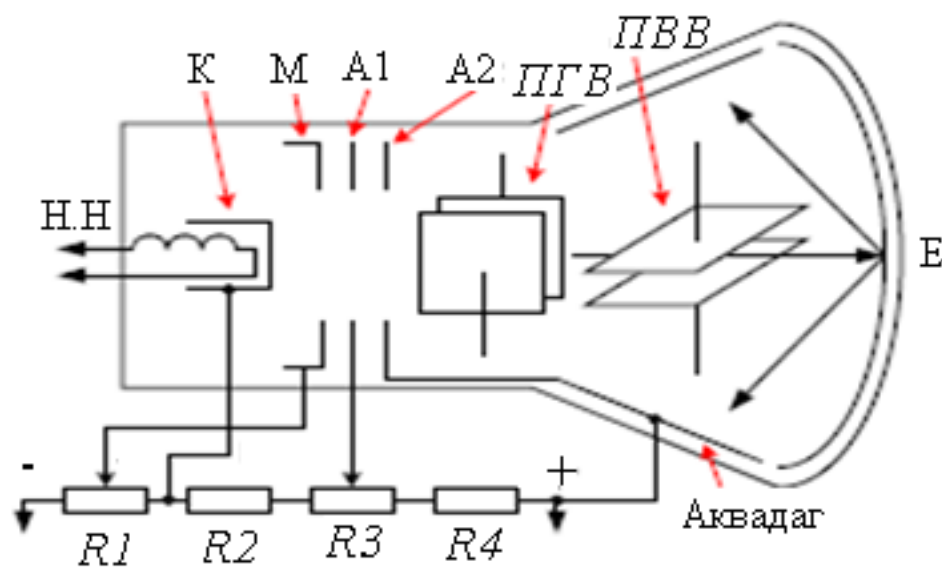


Рисунок 6.6 - Будова і схема живлення осцилографічної ЕПТ

На перший анод подається позитивна напруга (+U) в декілька сотень вольт, а на другий анод - декілька кіловольт відносно катода. Така висока

напруга забезпечує необхідну швидкість електронів з тим, щоб кінетична енергія електронного потоку була достатньою для світіння екрану.

Фокусування досягається тим, що зміна різниці потенціалів між анодами призводить до зміни кривизни силових ліній електричного прискорюючого поля, що утворюють електронну лінзу. У свою чергу, кривизна силових ліній електричного поля між анодами (рис.6.7) впливатиме на траєкторію поле електронів.

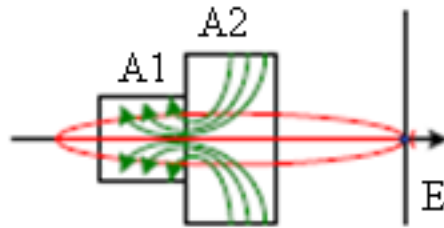


Рисунок 6.7 - Отримання електронної лінзи за допомогою силових ліній поля двох анодів

Якщо електрони, пролітаючи між анодами, відхилятимуться від осьової лінії, тоді електричне поле відхилятиме їх до центру. В результаті усі траєкторії електронів перетнуться в одній точці. Змінюючи потенціометром $R3$ напругу на першому аноді послідовно, а напругу поля між анодами, можна переміщати цю точку в просторі, досягаючи щоб ця точка знаходилася в площині екрану.

Відхиляюча система становиться з двох пар пластин. Це пластини горизонтального (ПГВ) і вертикального (ПВВ) відхилення променя. Пролітаючи між пластинами, електрони потрапляють в поперечне електричне поле, в якому їх траєкторія представляє початковий ділянку параболи, за рахунок чого вони відхиляються від центру екрану на величину h (рис.6.8).

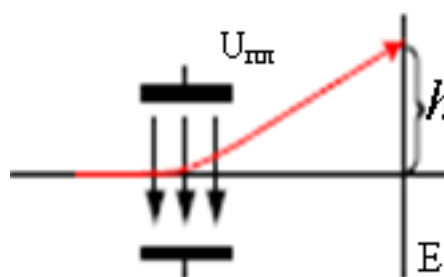


Рисунок 6.8 - Принцип дії пластин, що відхиляються ЕПТ

Основним параметром системи, що відхиляє, є чутливість - ϵ . Вона показує, на скільки міліметрів від центру екрану відхилятиметься електронний промінь при подачі на відхилення пластини напруги в 1 В:

$$\epsilon = h/U_{a2} = lL/d U_{a2},$$

де l - довжина пластин, що відхиляються;

L - відстань від пластин до екрану;

d - відстань між пластинами;

U_{a2} - напруга на другому аноді.

Конічна частина колби зсередини покрита аквадагом. Аквадаг - це графітове покриття, яке знаходиться під високим потенціалом - потенціалом другого анода. Він призначений для притягування електронів, що вилітають з люмінофора за рахунок вторинної емісії.

В цілому ЕПТ працює таким чином. Електрони, що вилетіли з катода, потрапляють під прискорюючу дію поля першого і другого анодів. Проте, в безпосередній близькості від катода знаходиться модулятор, що має негативний потенціал по відношенню до катода. Змінюючи цей потенціал за допомогою потенціометра $R1$ ("Яскравість"), можна міняти кількість електронів, що вилітають у напрямку до анодів, тобто змінювати струм променя. На екрані це відіб'ється зміною яскравості світіння люмінофора.

Проходячи між першим і другим анодами електрони розганяються (збільшують свою кінетичну енергію) і змінюють свої траєкторії польоту так, щоб на екран потрапити в одну точку. Це досягається за допомогою потенціометра $R3$ ("Фокусування"), що змінює взаємну різницю потенціалів першого і другого анодів.

Далі сформований потік електронів (електронний промінь) послідовно проходить між парами пластин, що відхиляються. Якщо на них подана напруга, що управляє, тоді промінь відштовхується від пластини з негативним потенціалом і притягується до пластини з позитивним. В результаті промінь прийде на поверхню екрану в точку, визначену рівнодією силою обох пар пластин, які відхиляє.

Якщо подати змінну синусоїдальної напруг лише на пластини, що вертикально відхиляють, промінь переміщається після вертикально викреслюючи на екрані вертикальну смугу, що світиться. Довжина лінії, що світиться, визначатиметься амплітудою синусоїдальної напруги. Аналогічно - вийде горизонтальна смуга, що світиться, якщо подати синусоїдальну напругу лише на пластини, що горизонтально відхиляють.

При одночасній подачі напруги на обидві пари пластин, що відхиляються, на екрані з'являтимуться криві. Які відповідають сумі цієї напруги. Звичайна напруга, що подається на пластини, що горизонтально відхиляються, називається напруга розгортки і має пилкоподібну форму. Воно формується в осцилографі. Напруга, яка подається на пластини, що вертикально відхиляються, є посилений досліджуваний сигнал.

ЕПТ з електростатичним керуванням застосовуються у вигляді екранів: осцилографів, радіолокаторів і гідролокаторів, дисплеїв.

6.2.2 Електронно-променеві трубки з електромагнітним керуванням

ЕПТ з електромагнітним керуванням по конструкції схожі на ЕПТ з електростатичним керуванням. Ці трубки так само мають електронну гармату, екран, аквадаг. Різниця полягає в тому, що по-перше, напруга на першому аноді не змінюється, і аноди призначені лише для прискорення електронного потоку.

По-друге, в колбі немає пар пластин (рис.6.9), що відхиляються. Фокусування електронного променя здійснюється за допомогою фокусуючої котушки - Ф.К. Фокусуюча котушка має рядове намотування і одягається прямо на колбу трубки. Фокусуюча котушка створює магнітне поле, магнітні силові лінії якого розташовуються так, як зображено на рис.6.9. Якщо електрони рухаються по осі, тоді кут між вектором швидкості і магнітними силовими лініями дорівнюватиме нулю ($\alpha=0^\circ$), отже, сила Лоренца дорівнює нулю.

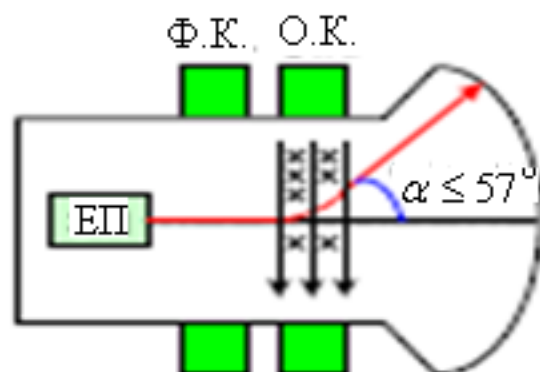


Рисунок 6.9 - Принцип дії ЕПТ з магнітним керуванням променем

Якщо електрон влітає в магнітне поле під кутом, тоді за рахунок сили Лоренца траєкторія електрона відхиляється до центра котушки. В результаті усі траєкторії електронів перетинатимуться в одній точці. Змінюючи струм через фокусуючу котушку, можна змінювати місце розташування цієї точки. Домагаються того, щоб ця точка знаходилась в площині екрана. Це і є фокусування.

Відхилення променя здійснюється за допомогою магнітних полів, що формуються двома парами котушок, що відхиляються. Одна пара - котушки вертикального відхилення, і інша - котушки горизонтального відхилення. Котушки мають складну форму і розташовуються таким чином, що їх магнітні силові лінії на осьовій лінії будуть взаємо перпендикулярні (рис.6.10).

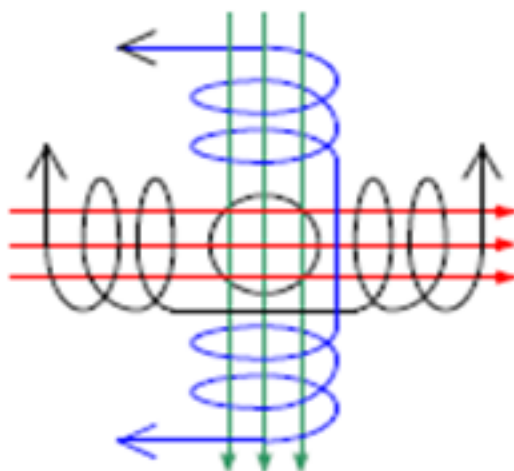


Рисунок 6.10 Принцип керування магнітного променя ЕПТ

Коли електрон пролітає між котушками і потрапляє під дію їх магнітних полів, оскільки кут між траєкторією електрона і магнітних силових ліній становить 90° ($\sin\alpha=1$), тоді сила Лоренца, що впливає на електрон, буде

максимальною. Під дією цієї сили Лоренца електрони рухатимуться по дузі кола, за рахунок чого кут відхилення і, отже, чутливість електромагнітних ЕПТ буде значно вище, ніж у електростатичних.

6.2.3 Кінескопи

Кінескопи відносяться до комбінованих ЕПТ, тобто вони мають електростатичне фокусування і електромагнітне відхилення променя для збільшення чутливості. Основними відмінностями кінескопів від ЕПТ є: по-перше, електронна гармата кінескопів має додатковий електрод, який називається прискорюючим електродом. Він розташовується між модулятором і першим анодом, на нього подається позитивна напруга в декілька сотень вольт відносно катода, і він служить для додаткового прискорення електронного потоку. Другою відмінністю є те, що екран кінескопа, на відміну від електростатичних ЕПТ, тришаровий. Перший зовнішній шар – скло, другий шар - люмінофор, нанесений на скло і третій шар - тонка алюмінієва плівка. Ця плівка виконує дві функції: збільшує яскравість світіння екрану, тобто діючи як дзеркало і друга функція полягає в захисті люмінофора від руйнування важкими іонами, які вилітають з катода разом з електронами.

Особливістю кольорових кінескопів є те, що для отримання будь-якого кольору і відтінку необхідно змішувати три основні кольори - червоного, синього і зеленого. Тому кольорові кінескопи мають три електронні гармати (червоного, синього і зеленого) і одну загальну відхиляючу систему. Екран кольорового кінескопа становиться з окремих ділянок, кожен з яких містить три клітинки люмінофора (триаду), які світяться червоним, синім та зеленим кольорами. Промені пушук потрапляють лише на свої ділянки: червоний промінь на червону ділянку, синій промінь на синю ділянку і зелений промінь на зелену ділянку). Інтенсивність світіння ділянок залежить від струму променів. Розміри цих осередків настільки малі і вони розташовані настільки близько один до одного, що їх світіння сприймається оком як сумарне. Це основна відмінність принципу побудови кольорових кінескопів.

Кінескопи формують зображення на екрані в вигляді растру. Растр становиться з рядків (горизонтальних ліній), які щільно прилягають один до одного. Рядки розташовуються по екрану згори до низу, утворюючи кадр. Тому в кінескопах котушки, що відхиляються, дістали назву рядковою і кадровою. При проходженні через рядкову котушку пилкоподібного імпульсу струму промінь (чи промені в кольоровому кінескопі) прокреслюють на екрані горизонтальну лінію - рядок. Потім, під дією імпульсу струму через кадрову котушку, промінь зміщується на величину, приблизно рівну ширині одного рядка і під дією струму рядкової котушки креслить наступний рядок, і так далі. В результаті цього відбувається повне засвічення екрану кінескопа, яка і називається растр. Загальна кількість рядків в телебаченні у нас в країні прийнята рівною 625.

Корисний сигнал, що містить відео інформацію (картинку), оброблений схемою телевізора, підходить на катод або модулятор кінескопа, змінюючи струм променя (модулюючи промінь), що призводить до зміни яскравості колірності. В результаті формується зображення на екрані, що складаються з рядків, яскравість і колір яких змінюється від точки до точки.

6.3 Поняття про дисплеї

Під дисплеями розуміють пристрої для динамічного віддзеркалення інформації у вигляді знаків, що рухаються, або зображення. Дисплей становиться з екрану і пристрою керування. Як екран можуть застосовуватися: кінескопи, світлодіодні, плазмові або рідкокристалічні панелі (матриці). Вибір того або іншого типу індикатора визначається призначенням дисплея.

Будова керування будується на базі процесора з записаною в нього програмою. Відповідно до цієї програми в динамічному режимі і формується на екрані необхідне зображення, яке може швидко змінюватися як по виду, так і по яскравості кольору.

Нині в пристроях відображення інформації мобільних телефонів, персональних комп'ютерів, інформаційних табло на вулицях і стадіонах знайшли широке застосування дисплеї з світлодіодними, плазмовими або рідкокристалічними екранами (панелями або матрицями). Для створення зображення на панелях будь-якого типу використовується матричний принцип (рис 6.11). Є n горизонтальних і m вертикальних шин, керованих електронними ключами. Елемент панелі (матриці) стає активним, тобто світиться, коли процесор подає одночасно сигнал на відкриття i -го і j -го ключа. При цьому на перетині i -ої і j -ої шини утворюється різниця потенціалів достатня для активізації i - j осередку.



Рисунок 6.11 - Принцип керування екранними панелями

6.3.1 Плазмові панелі

Плазмові панелі предствляють з себе матрицю, що становиться з $n \times m$ елементів для кожного основного кольору. Кожен елемент - це осередок, порожнина між двома електродами. Один з електродів прозорий, за ним знаходиться люмонофор. Порожнина наповнена інертним газом. При одночасній подачі досить високої різниці потенціалів на електродах, виникає світіння газу (холодна плазма). У свою чергу світіння плазми викликає світіння люмінофора відповідного кольору.

Для керування плазмовою панеллю потрібно мати $n + m$ електронних ключів для кожного кольору.

Перевагою плазмових панелей є:

- висока яскравість світіння;
- великий кут видимості.

Недоліки плазмових панелей:

- велика споживана потужність;
- необхідність використовувати високовольтні транзистори в електронних ключах.

6.3.2 Світлодіодні панелі

За конструкцією і принципом керування аналогічні плазмовим панелям, лише замість порожнини з газом встановлений світлодіод, який світиться при одночасній подачі напруги і не відповідають горизонтальним і вертикальним електродам.

Перевагою світлодіодних панелей є:

- низьке енергоспоживання;
- відносно висока яскравість зображення;
- використовуються низьковольтні транзистори в електронних ключах.

Недоліки світлодіодних панелей:

- малий кут видимості;
- висока вартість.

6.3.3 Рідкокристалічні панелі

За конструкцією і принципом керування аналогічні плазмовим панелям, лише замість порожнини з газом встановлений рідкий кристал, який стає прозорим (підрозділ 6.1.3) при одночасній подачі напруги на відповідні горизонтальні і вертикальні електроди. Іншою особливістю рідкокристалічних осередків є прозорість обох електродів. Для отримання зображення використовуються рідкі кристали що працюють на просвіт, тому з зворотнього боку екрану розміщується джерело світла (підсвічування) - світлодіоди білого кольору або газонаповнені лампи-трубки.

Превагами рідкокристалічних панелей є:

- дуже низьке енергоспоживання;
- використовуються низьковольтні транзистори в електронних ключах.

Недоліки світлодіодних панелей:

- малий кут видимості;
- порівняно низький рівень яскравості зображення.

Контрольні запитання

1. Які бувають індикатори?
2. Будова ЕПТ.
3. Принцип формування електронного променя в ЕПТ з електронним керуванням.
4. Принцип формування електронного променя в ЕПТ з магнітним керуванням.
5. В чому полягає особливість кінескопів?
6. Які бувають екрани?
7. Пояснити будову і роботу світлодіодного індикатора.
8. Пояснити будову і роботу вакуумного люмінесцентного індикатора.
9. Пояснити будову і роботу індикатора на рідких кристалах.
10. Що таке дисплеї і де вони застосовуються?
11. Пояснити будову і роботу світлодіодної панелі.
12. Пояснити будову і роботу плазмової панелі.
13. Пояснити будову і роботу рідкокристалічної панелі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1982.
2. Головань В.Г., Вельміскін Д.І., Головань А.В. Основи радіотехніки. Конспект лекцій, Одеса, «ТЕС», 2007.- 431 с.
3. Бессонов Л.А. – Теоретические основы электроники, 6-е изд.- М.: - 1973.
4. Луний Л.Ф. : «Каталог полупроводниковых приборов», 1978
5. Стахів П.Г. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування: підручник/Львів, «Новий світ», 2006. 208 с.

Навчальне електронне видання

Лавріненко Юліан Володимирович

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ

Частина 2

"Електроніка"

Конспект лекцій

Видавець і виготовлювач

Одеський державний екологічний університет

вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016

тел./факс: (0482) 32-67-35

Е-mail: info@odeku.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 5242 від 08.11.2016