

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**НАПІВПРОВІДНИКОВА ЕЛЕКТРОНІКА**  
**ЧАСТИНА 2**

Конспект лекцій  
для студентів спеціальностей  
105 – Прикладна фізика та наноматеріали,  
172 – Електронні комунікації та радіотехніка  
денної форми навчання

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 2 від 27.06.2024р.

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2024

Напівпровідникова електроніка. Частина 2. Конспект лекцій для студентів спеціальностей 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, 172 – Електронні комунікації та радіотехніка денної форми навчання / укладачі Ю.І. Под'ячий, Г.Ю. Під'ячий. – Харків: НТУ «ХП», 2024. – 41 с.

Укладачі: Ю.І. Под'ячий  
Г.Ю. Під'ячий

Рецензент Д.А. Дзюбанов

Кафедра радіоелектроніки

В конспекті подано теоретичні відомості про основні керуючі елементи напівпровідникової електроніки – транзистори і тиристори. Детально розглянуто структуру кристалів, принципи роботи елементів, їх характеристики і параметри. Рівень викладення матеріалу відповідає рівню першої частини конспекту лекцій з напівпровідникової електроніки.

Зміст лекцій відповідає вимогам бакалаврату спеціальностей 105 – Прикладна фізика та наноматеріали, 172 – Електронні комунікації та радіотехніка з навчальних дисципліни "Напівпровідникова електроніка" і "Схемотехніка телекомунікаційних пристроїв".

## З М І С Т

<b>ТРАНЗИСТОРИ.....</b>	<b>5</b>
<b>Уніполярні транзистори.....</b>	<b>5</b>
Польові транзистори з керуючим <i>p-n</i> -переходом .....	6
Польові транзистори з ізольованим затвором .....	11
<b>Біполярні транзистори.....</b>	<b>14</b>
Струми в транзисторі .....	15
Співвідношення струмів біполярного транзистора .....	18
Схеми включення транзистора .....	20
Підсилювальні властивості транзистора .....	21
Ефект модуляції ширини бази .....	24
Вольт-амперні характеристики транзисторів .....	24
Еквівалентна схема транзистора .....	26
Диференціальні параметри транзистора .....	27
<b>Одноперехідні транзистори .....</b>	<b>30</b>
<b>ТИРИСТОРИ .....</b>	<b>33</b>
Діодні тиристори (диністори) .....	33
Тріодні тиристори (триністори) .....	36
Симістори та фототиристори .....	37

## ТРАНЗИСТОРИ

*Транзисторами* називають великий клас напівпровідникових приладів, основним призначенням яких є керування струмом. Вони можуть бути використані для:

- перетворення електричних сигналів,
- генерування сигналів різного виду,
- зберігання інформації в пам'яті,
- затримки поширення сигналів у часі
- і багато іншого.

Але сам собою транзистор може виконувати лише одну функцію – він керує струмом. Якщо коротко сказати, ця функція полягає в наступному.

Транзистор з'єднує два електричні ланцюги – вхідний і вихідний, і забезпечує певну залежність струму у вихідному ланцюгу від параметрів електричного сигналу, який діє у вхідному ланцюгу, – напруги або величини струму. Інакше кажучи – струм і напруга вихідного ланцюгу управляється струмом і напругою вхідного ланцюга.

Основні типи транзисторів, які широко застосовуються в сучасних електроніці:

- уніполярні (польові) транзистори,
- біполярні транзистори,
- одноперехідні (двобазові) транзистори.

Їх будова (структура кристалів), принципи роботи і навіть способи утворення струмів, істотно відрізняються, тому розглянемо їх окремо.

### УНІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

У транзисторах цього типу струм утворюється носіями одного виду – електронами або дірками, тому вони називаються *уніполярними* (від лат. *unus* – один). Управління струмом здійснюється зміненням за допомогою електричних полів провідності каналу, через який протікає струм транзистора, тому вони також називаються *польовими*. Широке застосування уніполярних транзисторів обумовлюється рядом їх позитивних якостей – великим вхідним опором, високою технологічністю і, як наслідок, гарною повторюваністю параметрів, відносно низькою вартістю та ін.

Існує два основних типи польових транзисторів:

- з керуючим *p-n*-переходом,
- з ізолюваним затвором.

## Польові транзистори з керуючим $p$ - $n$ -переходом

Структура кристала транзистора з керуючим  $p$ - $n$ -переходом і каналом  $n$ -типу і його схемне позначення показано на рисунку 1.

У пластині напівпровідника  $p$ -типу зверху і знизу створюються електрично з'єднані з нею через  $p$ - $n$ -перехід області з підвищеною провідністю  $n^+$ -типу.

Область кристала, від якої рухаються основні носії заряду (у транзисторів з  $p$ -каналом – дірки) називають *витоком*.

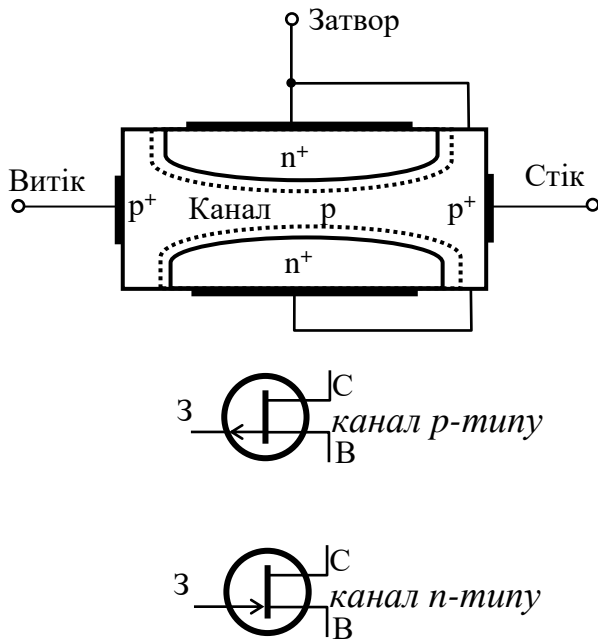


Рисунок 1

Область кристала, до якої рухаються ці носії, називають *стоком*.

Від цих областей кристала робляться електричні виводи – *електроди*, які називаються відповідно. Область  $n^+$ -типу називають *затвором* (дві області електрично поєднані), від неї також робиться відповідний вивід. Між двома областями затвора розташований *канал* транзистора, яким основні носії рухаються від витоку до стоку, створюючи струм через транзистор. (Польові транзистори іноді називають *канальними*). Тип провідності каналу відповідає типу провідності пластини. У наведеному прикладі канал має провідність  $p$ -типу, а затвор – провід-

ність  $n$ -типу. Такі транзистори називають транзисторами з каналом  $p$ -типу. Абсолютно аналогічну структуру мають транзистори з каналом  $n$ -типу та затвором  $p^+$ -типу. Схемне позначення транзисторів відрізняється напрямком стрілки. Головною рисою цих транзисторів є те, що між каналом і затвором утворюється  $p$ - $n$ -перехід.

Важливо відзначити, що концентрація домішки в каналі набагато менша, ніж в області затвора. В області витоку та стоку концентрація домішки також дещо підвищена порівняно з каналом. Це робиться для того, щоб зменшити марну втрату напруги і потужності в цих областях.

Величина струму, який протікає по каналу транзистора залежить як від напруги на затворі, так і від напруги на стоку. Тому керування струмом транзистора можна здійснювати зміною напруги як на затворі, так і на стоку (або одночасно і на затворі, і на стоку).

### Керування струмом транзистора напругою на затворі

Для цього транзистор з каналом  $p$ -типу потрібно підключити до джерел напруги, як показано на рисунку 2. Оскільки основними носіями в каналі  $p$ -типу є позитивно заряджені дірки, то до стоку потрібно підключити негативний полюс джерела напруги  $E_C$ . При такому підключенні дірки рухатимуться від виток до стоку.  $P$ - $n$ -перехід між затвором та каналом має бути включений у зворотному напрямку; тому до затвора  $n$ -типу підключається позитивний полюс джерела регульованої напруги  $U_{ЗВ}$ .

Якщо  $U_{ЗВ}=0$ , то ширина переходу в каналі мінімальна, і визначається тільки концентрацією домішки в ньому:

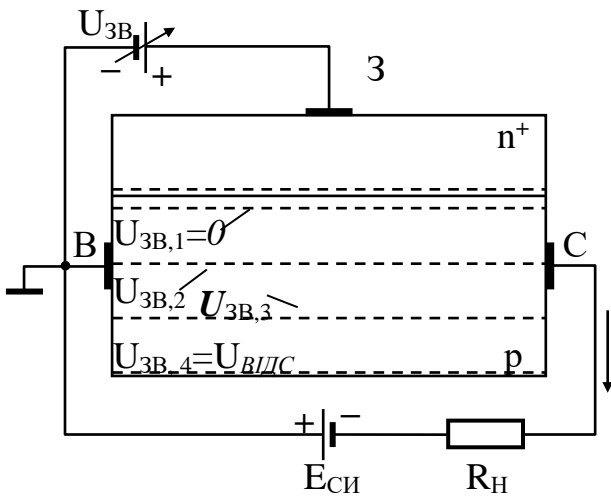


Рисунок 2

$$l_0 \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 \Delta\phi_0}{eN_{\text{канал}}}}$$

При збільшенні зворотної напруги  $U_{ЗВ}$  перехід розширюється у сторону каналу і майже не розширюється в сторону затвора, тому що концентрація домішки в каналі набагато менше, ніж у затворі. Ширина переходу визначається формулою

$$l_0 \approx \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 (\Delta\phi_0 + U_{ЗВ})}{eN_{\text{канал}}}}$$

При збільшенні напруги  $U_{ЗВ}$  перехід розширюється, а канал, відповідно, звужується. Його опір збільшується, а струм через канал  $I_C$  – струм стоку, зменшується. При певній напрузі на затворі, яка називається напругою відсічки,  $U_{З1,4}$

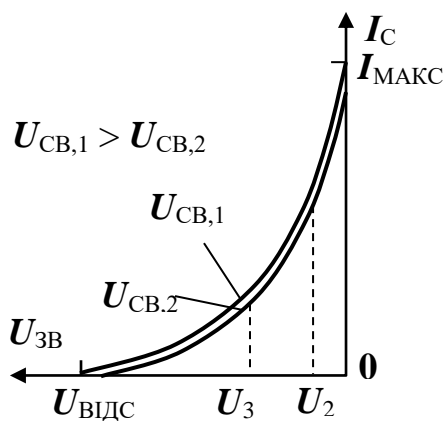


Рисунок 3

$= U_{ВІДС}$  (рисунку 2) перехід займає весь канал, його опір стає дуже великим, і струм через транзистор припиняється.

Процес керування струмом транзистора напругою на затворі відображається статичною стоко-затворною характеристикою, що відтворює залежність струму стоку від напруги на затворі при постійній напрузі на стоку:

$$I_C = f(U_{ЗВ}) \text{ при } U_{CB} = \text{const.}$$

Приклад типової стоко-затворної характеристики наведено на рисунку 3. Принципово важливо те, що характеристика нелінійна.

### Керування струмом транзистора напругою стоку

Схема включення транзистора показана на рисунку 4.

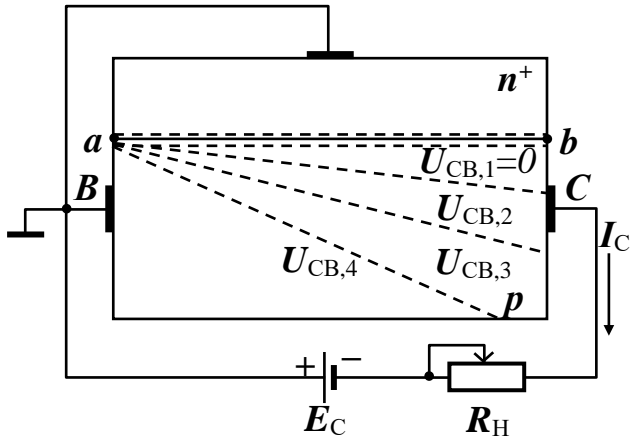


Рисунок 4

Для простоти затвор і виток коротко замкнуті, тобто  $U_{ЗВ} = 0$ . Напруга на стоку  $U_{СВ}$  змінюється за допомогою змінного резистора  $R_H$ . Різниця потенціалів між затвором і каналом у точці  $a$  не залежить від напруги на стоку і дорівнює нулю:

$$\Delta\varphi_a = 0.$$

Різниця потенціалів між затвором і каналом в точці  $b$  дорівнює величині напруги між стоком і витком транзистора:

$$\Delta\varphi_b = U_{СВ}.$$

Таким чином, при збільшенні напруги на стоку відносно витку транзистора ширина переходу в точці  $a$  не змінюється, а в точці  $b$  – збільшується. Тому структура  $p$ - $n$ -переходу має такий вигляд, як показано на рисунку.

Процес управління струмом транзистора напругою на стоку відображається статичною стоковою характеристикою. Вона відтворює залежність струму стоку від напруги на стоку при постійній напрузі на затворі:

$$I_C = f(U_{СВ}) \text{ при } U_{ЗВ} = \text{const.}$$

Приклад типової стокової характеристики наведено на рисунку 5. Розгля-

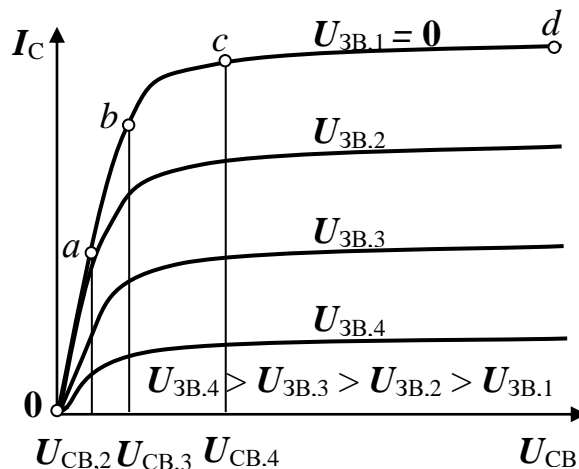


Рисунок 5

немо її характерні ділянки.

Ділянка **0 – a**. Величина напруги на стоку незначна, тому ширина переходу в точці **b** невелика. Канал майже не перекритий переходом, тому струм через транзистор пропорційний напрузі на стоку (згідно закону Ома).

Ділянка **a – b**. Підвищення напруги на стоку викликає розширення переходу, і, як наслідок, звуження каналу. Це звуження ще незначно, але достатньо, щоб лінійна залежність між струмом і напругою порушилася.

Ділянка **b – c**. Напруга на стоку достатня для того, щоб ширина переходу в точці **b** зрівнялася з шириною каналу. У цьому стані підвищення напруги викликає лише незначне зростання струму транзистора.

Ділянка **c – d**. Канал повністю перекритий переходом та його опір пропорційний напрузі на стоку. Підвищення напруги на стоку викликає таке ж відносне зростання опору каналу. Тому теоретично струм через транзистор не змінюється. На практиці на цій ділянці струм стоку трохи зростає за рахунок витоку зарядів поверхнею кристала. Подальше збільшення напруги на стоку викликає пробій переходу області стоку і різке зростання струму через транзистор.

### **Основні параметри польових транзисторів**

Параметри транзисторів зручно розділити на дві групи – з постійного струму та змінного струму. Останні також називають *диференційними*.

#### Параметри транзистора з постійного струму:

- *Максимальний струм стоку  $I_{C, \text{МАКС}}$* . Йому відповідає точка **d** на стоковій вольт-амперній характеристиці. Такий струм може протікати через транзистор як завгодно довго, не порушуючи його температурний режим.
- *Максимальна напруга стік – витік  $U_{\text{СВ, МАКС}}$* . Ця напруга зазвичай в 1,2 - 1,5 рази менше напруги пробою переходу на ділянці стік-затвор при напрузі на затворі  $U_{\text{ЗВ}} = 0$ .
- *Напруга відсічки  $U_{\text{ВІДС}}$* . Ця напруга на затворі, при якому струм стоку дорівнює нулю.
- *Величини міжелектродних ємностей  $C_{\text{СВ}}, C_{\text{СЗ}}, C_{\text{ЗВ}}$* .

#### Параметри транзистора зі змінного струму:

- *Крутизна стоко-затворної характеристики*

$$S_i = \frac{dI_C}{dU_{\text{ЗВ}}} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{\text{ЗВ}}} \text{ при } U_{\text{СВ}} = 0.$$

Цей параметр визначає керуючу дію затвору і вимірюється позасистемною одиницею [мА/В]. Він показує, на скільки міліамперів змінюється струм стоку, якщо напруга на затворі змінюється на 1 Вольт.

- *Внутрішній (вихідний) опір*

$$R_i = \frac{dU_{CB}}{dI_C} \approx \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \quad \text{при } U_{ЗВ} = 0.$$

Цей параметр визначає опір транзистора між стоком та витокком (опір каналу) зі змінного струму.

- *Коефіцієнт посилення за напругою*

Цей параметр показує у скільки разів сильніше діє на величину струму стоку зміна напруги на затворі, ніж зміна напруги на стоку. Коефіцієнт посилення пов'язаний з крутизною і внутрішнім опором простою залежністю

$$\mu = S_i R_i.$$

Диференціальні параметри визначають за вольт-амперними характеристиками. Обчислення похідної за допомогою дотичної пов'язане з певними труднощами, тому простіше користуватися відповідними прирощеннями струмів і напруг.

### ***Вплив температури на струм транзистора***

Вплив температури на струм польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом обумовлюється двома чинниками – залежністю від температури контактної різниці потенціалів (*a*, значить, ширини переходу) і рухливості основних носіїв заряду – електронів чи дірок.

Величина контактної різниці потенціалів визначається формулою:

$$\Delta\varphi_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n},$$

де *T* – температура, а логарифм береться від співвідношення концентрації основних та неосновних носіїв. Відомо, що концентрація неосновних носіїв експоненційно зростає із підвищенням температури.

Ширина переходу визначається формулою:

$$l_0 \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 \Delta\varphi_0}{eN_d}}.$$

Отже, підвищення температури веде до зменшення контактної різниці потенціалів, ширини переходу і до збільшення струму транзистора.

У невідроджених домішкових напівпровідниках залежність рухливості носіїв від температури може бути якісно описана графіком, наведеним на рисунку 6. При низькій температурі з її збільшенням рухливість також збільшується, а при високій температурі, до якої відноситься і кімнатна температура, – зменшується.

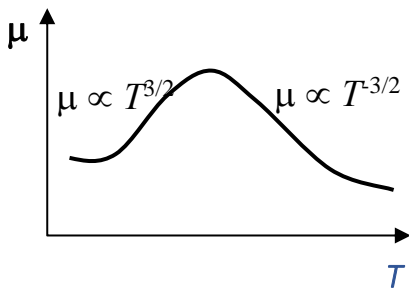


Рисунок 6

Таким чином, зі збільшенням температури зменшується рухливість носіїв, у результаті чого струм транзистора також зменшується.

Таким чином, ці фактори частково компенсують один одного, тому температура майже не впливає на величину струму в польових транзисторах. Більш детальні дані про вплив температури на параметри конкретних типів транзисторів наводяться в довідниках.

### Польові транзистори з ізолюваним затвором

У таких транзисторах металевий затвор відокремлений від напівпровідникового каналу тонким шаром ізолятора. Тому ці прилади також називають МДП-транзисторами (аббревіатура слів *метал-діелектрик-напівпровідник*) або МОП-транзисторами (від слів *метал-оксид-напівпровідник*), тому що як діелектрик найчастіше застосовується діоксид кремнію  $\text{SiO}_2$ .

Існують два типи транзисторів із ізолюваним затвором:

- з вбудованим каналом,
- з індукованим каналом.

Розглянемо їх окремо.

#### Польові транзистори з ізолюваним затвором і вбудованим каналом

Структура кристала МДП-транзистора з вбудованим каналом  $n$ -типу і схемне позначення приладів показані на рисунку 7.

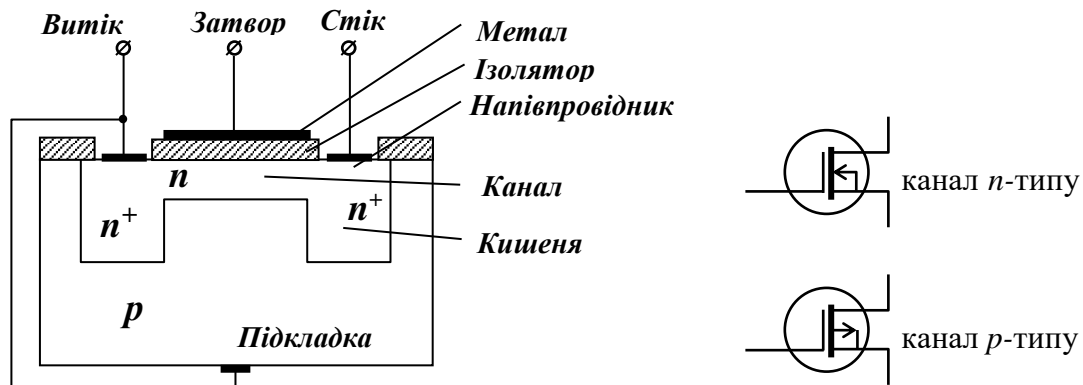


Рисунок 7

Основою транзистора є кремнієва пластинка  $p$ -типу – підкладка. У ній створюються дві області – кишень – з підвищеною електронною провідністю  $n^+$ . Від цих областей виводяться електроди – виток і стік. Між витоком і стоком створюється тонкий поверхневий канал з провідністю  $n$ -типу. Довжина каналу від

витоку до стоку зазвичай становить кілька мікрметрів, а ширина залежить від робочого струму транзистора і може досягати сотні мікрметрів.

Товщина ізолюючого шару між затвором та каналом – 0,1-0,2 мкм. Над ізолюючим шаром розташований *затвор* у вигляді тонкої металевої плівки з відповідним виводом. Підкладку транзистора найчастіше з'єднують з витокком, і його потенціал приймають за нульовий. Іноді від підкладки робиться окремий вивід.

При подачі на стік відносно витоку і підкладки позитивного потенціалу (при нульовому потенціалі затвора) електрони від витоку почнуть рухатися каналом до стоку. При цьому від стоку до витоку через транзистор потече струм, величина якого визначатиметься концентрацією домішки в каналі. Через підкладку струм не протікатиме, тому що перехід між нею і каналом включений у зворотному напрямку.

Якщо прикласти до затвора щодо витоку і підкладки позитивний потенціал, то електрони з кишень і підкладки будуть втягуватися в канал. Концентрація носіїв у каналі підвищиться, його опір зменшиться, а струм по каналу збільшиться. Чим більша величина позитивного потенціалу, тим більше електронів втягнеться в канал і величина струму також буде більшою. Такий режим роботи транзистора називають *режимом збагачення*.

При подачі на затвор щодо витоку негативного потенціалу процес буде зворотним – електрони з каналу виштовхуватимуться в підкладку і в кишень, концентрація носіїв у каналі зменшиться, а, отже, зменшиться і струм транзистора. Цей режим називають *режимом збіднення*.

Схематично ці режими і залежність величини стокового струму від напруги на затворі – *стоко-затворна характеристика*, показані на рисунку 8. Стокова характеристика МДП-транзистора з вбудованим каналом подібна до стокової характеристики польового транзистора з *p-n*-переходом.

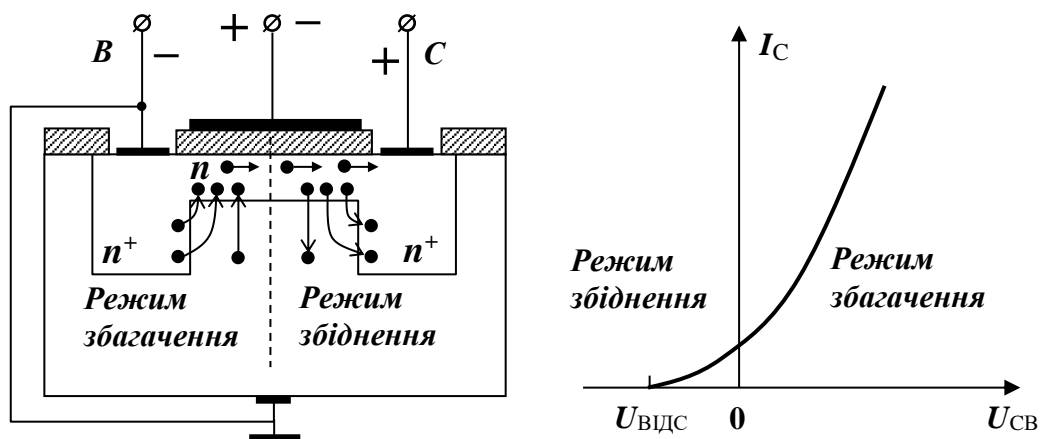


Рисунок 8

МДП-транзистор з каналом  $p$ -типу працює аналогічно, крім того, що основними носіями заряду в них є позитивно заряджені дірки, і тому режими збагачення і збіднення мають місце при протилежному знаку напруги на затворі.

### Польові транзистори із ізольованим затвором і індукованим каналом

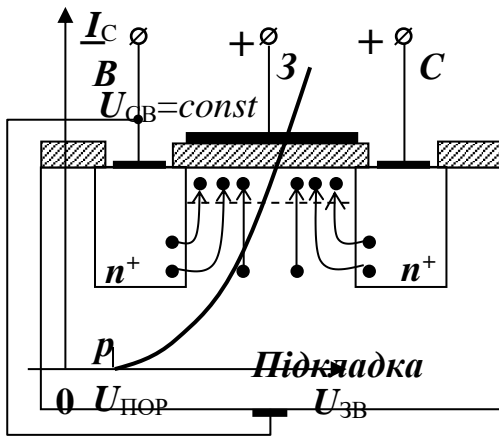


Рисунок 10

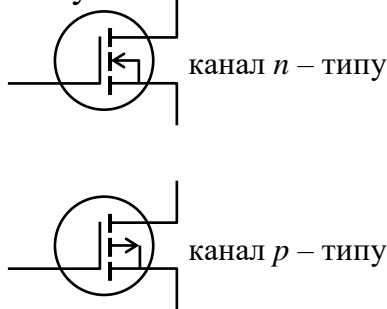


Рисунок 9

Структура кристала МДП-транзистора з індукованим каналом  $n$ -типу і схемне позначення приладів показані на рисунку 9. Канал в структурі кристалу відсутній. Він створюється (*індукується*) в процесі роботи транзистора. Канал створюється тільки при подачі на затвор напруги певної полярності. За відсутності цієї напруги між витоком і стоком  $n^+$ -типу розташована область підкладки  $p$ -типу. У цьому стані опір між витоком і стоком дуже великий, струм майже протікає, і транзистор вважається закритим. При подачі на затвор позитивного потенціалу (якщо канал  $n$ -типу) електрони з кишень і підкладки рухаються у напрямку до затвора. Коли напруга на затворі перевищить певне граничне значення (порогову напругу  $U_{ПОР}$ ), то в області підкладки під затвором концентрація електронів стане більше концентрації дірок, тобто відбудеться *інверсія* типу провідності, створиться канал  $n$ -типу, і транзистор почне проводити струм. Чим вище позитивна напруга на затворі, тим більший струм стоку

протікає через транзистор. Таким чином, транзистор з індукованим каналом може працювати тільки в режимі збагачення. Його стоко-затворна характеристика наведена на рисунку 10.

## БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ

Свою назву ці прилади одержали від того, що струми в них створюються носіями обох полярностей – електронами і дірками (от англ. – *bipolar*).

Кристал біполярного транзистора складається з трьох областей (шарів) напівпровідника з типом провідності, що чергується. Залежно від черговості типу провідності шарів розрізняють транзистори *p-n-p*- і *n-p-n*-типів. На рисунку 11 показана структура кристала площинного транзистора *n-p-n*-типу і схемне позначення транзисторів обох типів.

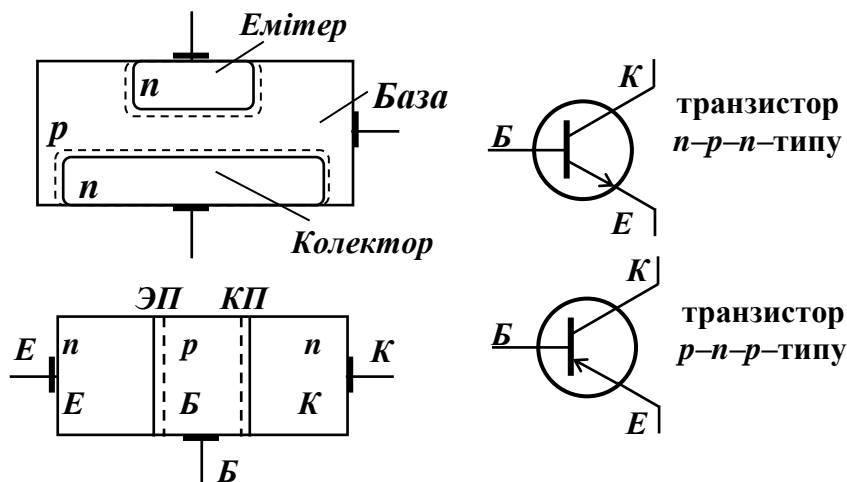


Рисунок 11

Центральна область транзистора називається базою (*Б*). В ній створюються дві області – емітер (*Е*) і колектор (*К*), провідність яких протилежна провідності бази. Тому між емітером і базою, а також колектором і базою утворюються *p-n*-переходи, які відповідно називаються емітерним переходом (*ЕП*) і колекторним переходом (*КП*). Від усіх областей транзистора робляться виводи, які мають таку ж назву, як і область, з якої вони виходять.

Функція емітерного переходу полягає в *інжектуванні* (*емітуванні*) основних зарядів емітера в базу. Функція колекторного переходу – збір зарядів, які перейшли з емітера в базу, і переведення їх в колектор. Щоб носії заряду, які інjektуються в базу емітером, повніше збиралися колектором, площа колекторного переходу створюється більшою площі емітерного переходу.

Основні технологічні вимоги до областей транзистора:

- концентрація домішки в емітері та колекторі набагато більша, ніж в базі;
- товщина бази в напрямку від емітера до колектора має бути меншою за дифузійну довжину пробігу основних носіїв заряду емітера.

Основним призначенням будь-якого транзистора є керування струмом. Режим роботи транзистора, в якому можливе керування величиною струму, що протікає через нього, називається *активним*. Для того, щоб транзистор працював

в активному режимі, джерела живлення повинні підключатися до транзистора так, щоб емітерний перехід був зміщений у *прямому* напрямку, а колекторний перехід – у *зворотному*. Це основне правило включення транзистора.

### Струми в транзисторі

Розглянемо утворення струмів у біполярному транзисторі *p-n-p*-типу при роботі в активному режимі. Для цього підключимо до нього джерела живлення так, як показано на рисунку 12.

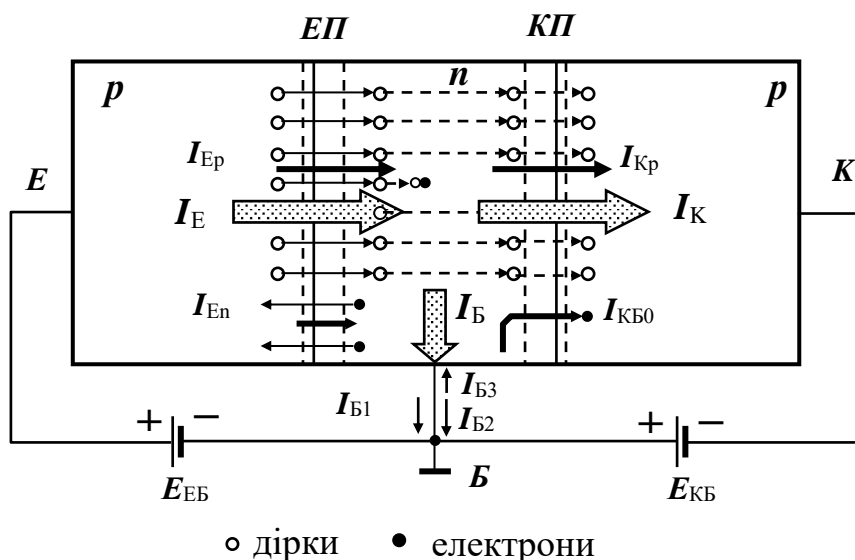


Рисунок 12

Очевидно, що емітерний перехід підключений до джерела  $E_{EB}$  у *прямому* напрямку, а колекторний перехід – до джерела  $E_{KB}$  – у *зворотному*. При такому підключенні в кристалі транзистора будуть існувати такі струми.

**Струм емітера.** Пряме включення емітерного переходу викликає дифузію дірок з області емітера в область бази. При цьому створюється діркова складова емітерного струму  $I_{Ep}$ . Одночасно електрони дифундують з бази в емітер, що створює електронну складову емітерного струму  $I_{En}$ . Загальний струм емітера визначається сумою цих складових:

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}.$$

Величина діркової складової емітерного струму набагато більша за електронну:

$$I_{Ep} \gg I_{En}.$$

Це пояснюється тим, що концентрація домішки в емітері набагато (на два-три порядки) більше, ніж у базі, тому концентрація основних носіїв в емітері – дірок – набагато більше концентрації електронів у базі. Фактично  $I_E \approx I_{Ep}$ .

Співвідношення

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E}$$

називається *коефіцієнтом інжекції*. Чим більше величина цього коефіцієнта, тим краще транзистор. Для типових транзисторів  $\gamma = 0,97-0,995$ .

**Струм колектора.** Незначна частина дірок, яка перейшла з емітера до бази, рекомбінує з електронами бази. Більшість же дірок, дифундуючи в базі, досягають колекторного переходу, який включений у зворотному напрямку, тому його замикаюче електричне поле направлено з бази в колектор. Дірка, яка дифундує в базі, потрапляючи в це поле, перекидається їм в колектор. При цьому створюється діркова складова колекторного струму  $I_{Kp}$ . Одночасно з цим замикаюче поле колекторного переходу сприяє дрейфу неосновних носіїв зарядів колектора – електронів – з колектора в базу, та неосновних носіїв бази – дірок – з бази в колектор. Створений при цьому струм є зворотним струмом колекторного переходу. Його величина визначається концентрацією неосновних носіїв у колекторі та в базі, яка, у свою чергу, залежить лише від температури. Тому і величина цього струму залежить від температури, а сам струм називають *тепловим* і позначають  $I_{KB0}$ . Він протікає з бази в колектор і замикається через джерело живлення  $E_{KB}$ .

Таким чином, колекторний струм є сумою діркової складової та теплового струму:

$$I_K = I_{Kp} + I_{KB0}.$$

Зрозуміло, що  $I_{Kp} \gg I_{KB0}$ , і фактично  $I_K \approx I_{Kp}$ .

Співвідношення діркових складових колекторного та емітерного струмів визначається *коефіцієнтом перенесення*

$$\delta = \frac{I_{Kp}}{I_{Ep}}.$$

Він показує, яка частина дірок, що вийшла з емітера, досягає колектора. Чим більше  $\delta$ , тим кращими є властивості транзистора з керування струмом. Типові значення цього коефіцієнта лежать у межах  $0,96 - 0,996$ .

Діркова складова колекторного струму пов'язана з повним емітерним струмом *коефіцієнтом передачі струму*

$$\alpha = \frac{I_{Kp}}{I_E},$$

який є одним з основних параметрів транзистора. Помноживши чисельник та знаменник цього співвідношення на  $I_{Ep}$ , отримаємо:

$$\alpha = \frac{I_{Kp}}{I_E} \cdot \frac{I_{Ep}}{I_{Ep}} = \gamma \cdot \delta.$$

Чим ближче  $\alpha$  до одиниці, тим краще транзистор керує струмом. Способи збільшення коефіцієнта передачі струму пов'язані зі способами збільшення коефіцієнтів  $\gamma$  і  $\delta$  (збільшення різниці концентрації основних носіїв заряду в області емітера та бази, збільшення часу життя дірок в базі, зменшення ширини базового шару, створення електричного поля в базі, яке прискорює рух зарядів, та ін.).

**Струм бази.** Цей струм визначається процесами, які відбуваються в базі при підключенні транзистора до джерел живлення.

Дірки, які інjektуються з емітера в базову область, підвищують їх концентрацію  $p_n(0)$  поблизу емітерного переходу порівняно з рівноважною концентрацією  $p_{n0}$  ( $p$  – концентрація дірок,  $n$  – в області з провідністю  $n$  – типу,  $0$  – умова рівноваги, тобто без підключення до джерел електричної енергії). Під дією підвищеної концентрації  $p_n(0)$  розвивається дифузійний рух у бік колекторного переходу, тобто в напрямку зменшення концентрації. Біля колекторного переходу концентрація дірок близька до нульової, тому що дірка, яка досягла колекторного переходу, прискорюється замикаючим полем переходу і перекидається в колектор. Через те, що товщина бази дуже невелика, розподіл концентрації дірок в базі майже лінійний (див. рисунок 13). Градієнт концентрації дірок в базі визначає величину дифузійного струму дірок в ній. Чим більший градієнт  $dp/dx$ , тим більший дифузійний струм.

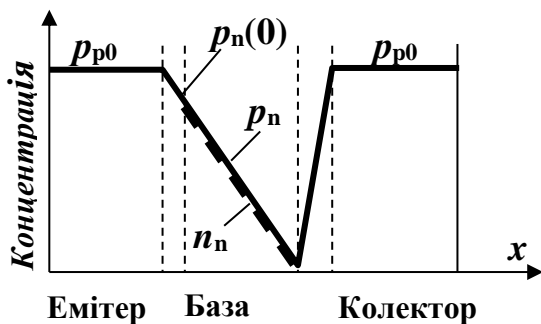


Рисунок 13

Описаний характер руху дірок можливий лише тоді, коли дірок у базі стільки, скільки й електронів, а розподіл їх концентрації ідентичний. Іншими словами, база має бути електрично нейтральною. Для підтримки нейтрального стану в базу з джерела живлення  $E_{EB}$  надходять електрони, які компенсують заряд дірок.

Розглянуті процеси, які відбуваються в базі при підключенні до транзистора джерел електричної енергії, дозволяють зрозуміти фізичну природу виникнення струму бази.

Цей струм є сумою трьох складових:

- При створенні електронної складової емітерного струму  $I_{En}$  електрони з бази йдуть в емітер. Через те, що база повинна залишатися електрично нейтральною, така ж кількість електронів надійде до бази з джерела  $E_{EB}$  з базового виводу. Таким чином, першою складовою струму бази є електронна складова емітерного струму:

$$I_{B1} = I_{En}.$$

- Частина дірок, які вийшли з емітера в базу, у процесі дифузійного руху зустрічаються з електронами бази та рекомбінують. Втрачені в цьому процесі електрони також компенсуються по ланцюгу бази з джерела живлення. Цим створюється друга складова струму бази – *рекомбінаційна*:

$$I_{B2} = I_{B(\text{рек})}.$$

- Як було зазначено вище, тепловий струм  $I_{KB0}$ , який протікає через колекторний перехід, замикається через джерело  $E_{KB}$ . Цей струм і є третьою складовою базового струму – *тепловою*:

$$I_{B3} = - I_{KB0}.$$

Знак “мінус” показує, що напрямок протікання цієї складової струму бази протилежний напрямку протікання двох перших складових.

Таким чином, повний струм бази

$$I_B = I_{B1} + I_{B2} + I_{B3} = I_{En} + I_{B(\text{рек})} - I_{KB0}.$$

### Співвідношення струмів біполярного транзистора

Величини струмів транзистора пов'язані між собою простими співвідношеннями, які визначають всі основні властивості цього приладу.

За визначенням коефіцієнт передачі струму

$$\alpha = \frac{I_{Kp}}{I_E}. \quad (1)$$

Струм колектора є сумою його діркової та теплової складової:

$$I_K = I_{Kp} + I_{KB0}. \quad (2)$$

Якщо уявити базу транзистора вузлом струмів  $I_E$ ,  $I_K$  та  $I_B$ , то відповідно до першого закону Кірхгофа їх співвідношення визначається рівністю:

$$I_E = I_K + I_B. \quad (3)$$

**Зв'язок струмів емітера та колектора.** З формули (1) діркова складова колекторного струму

$$I_{Kp} = \alpha I_E. \quad (4)$$

Підставивши це в (2), отримаємо співвідношення колекторного та емітерного струмів:

$$I_K = \alpha I_E + I_{KB0}. \quad (5)$$

Тому, що  $I_{KB0} \ll I_K$ ,  $I_E$ , то для практичних цілей можна використовувати спрощене співвідношення:

$$I_K \cong \alpha I_E. \quad (5a)$$

**Зв'язок струмів колектора та бази.** Підставимо (3) в (5):

$$I_K = \alpha (I_K + I_B) + I_{KB0}$$

або

$$(1 - \alpha) I_K = \alpha I_B + I_{KB0}.$$

Розділимо обидві частини рівняння на  $(1 - \alpha)$ :

$$I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{1}{1 - \alpha} I_{KB0}.$$

Позначимо  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ . Тоді  $\frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta$ . Підставляючи це у попередню формулу, отримаємо вираз, який пов'язує струми колектора та бази:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) \cdot I_{KB0}. \quad (6)$$

Через те, що  $I_{KB0} \ll I_K, I_B$ , то на практиці зазвичай використовується більш проста формула

$$I_K \cong \beta I_B. \quad (6a)$$

Величина  $\beta$  є одним із найважливіших параметрів транзистора. Цей параметр визначає у скільки разів постійний струм колектора більше постійного струму бази. Тому параметр  $\beta$  називається *коефіцієнтом посилення транзистора з постійному струму*.

Його величина визначається величиною *коефіцієнта передачі*  $\alpha$ . Якщо  $\alpha = 0,9$ , то  $\beta = 9$ ; якщо  $\alpha = 0,99$ , то  $\beta = 99$ , і т. д.

**Зв'язок струмів емітера та бази.** Підставимо (5) в (3):

$$I_E = \alpha I_E + I_{KB0} + I_B.$$

Тоді

$$(1 - \alpha) I_E = I_B + I_{KB0},$$

або

$$I_E = \frac{1}{1 - \alpha} (I_B + I_{KB0}).$$

Остаточно

$$I_E = (1 + \beta) \cdot (I_B + I_{KB0}). \quad (7)$$

Як і в попередніх випадках, на практиці часто використовується більш проста формула

$$I_E = (1 + \beta) \cdot I_B. \quad (7a)$$

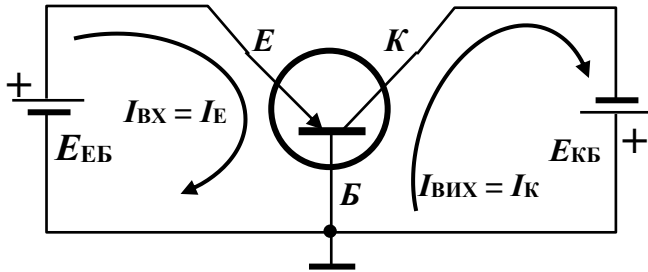
Таким чином, формули (5), (6) і (7) визначають залежність між парами струмів транзистора, а формула (3) пов'язує всі три струми.

## Схеми включення транзистора

Транзистор у реальній електронній схемі пов'язує два ланцюги – вхідний та вихідний. Кожен з них має два контакти, але транзистор має три виводи. Отже, один вивід транзистора повинен одночасно відноситись до вхідного та вихідного ланцюгів. Цей вивід називають *спільним*. В залежності від того, який вивід транзистора є спільним, розрізняють три схеми включення транзистора в схему. (У наведених нижче схемах показані тільки джерела живлення вхідний і вихідний ланцюгів і не показані джерела вхідних сигналів і опори навантаження. Тому ці схеми не є робочими.)

### Схема включення транзистора із спільною базою (схема СБ)

У цій схемі (рисунок 14) вхідним струмом є струм емітера, а вихідним – струм колектора. Залежність між цими струмами визначається формулою (5).



$$I_K = \alpha I_E + I_{КБ0}.$$

Тому, керування струмом в схемі СБ полягає в тому, що величина вихідного струму – струму колектора – залежить від величини вхідного струму – струму емітера.

Рисунок 14

### Схема включення транзистора зі спільним емітером (схема СЕ)

В цій схемі (рисунок 15) вхідним струмом є струм бази, а вихідним – струм колектора. Залежність колекторного струму від базового визначається формулою:

$$I_K = \beta I_B + (1 + \beta) I_{КБ0}.$$

Таким чином, керування струмом в схемі СЕ полягає в тому, що величина вихідного струму – струму колектора – залежить від величини вхідного струму – струму бази.

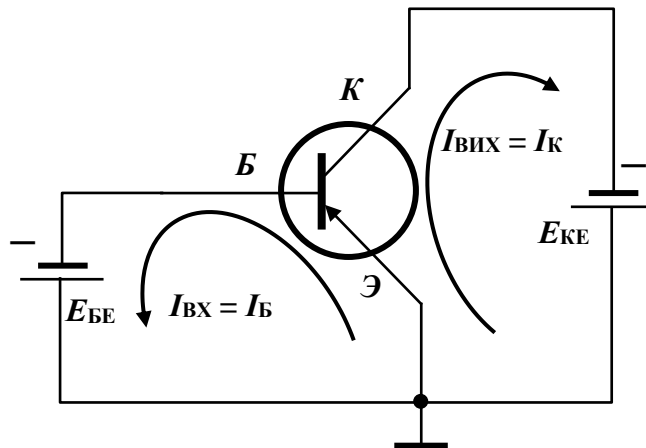


Рисунок 15

### Схема включення транзистора зі спільним колектором (схема СК)

За такого включення транзистора (рисунок 16) вхідним струмом є струм бази, а вихідним – струм емітера. Зв'язок між цими струмами дається формулою

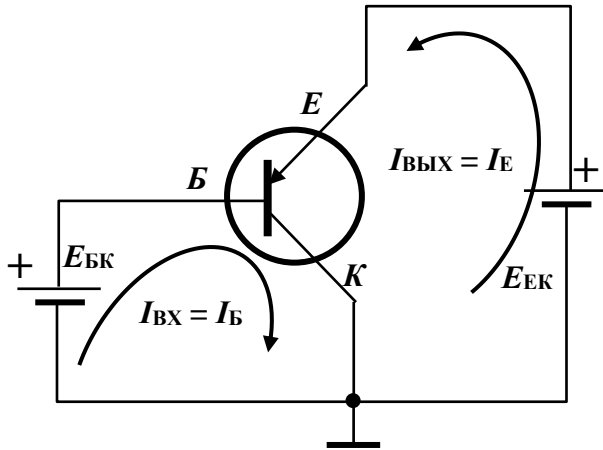


Рисунок 16

$$I_E = (1 + \beta) \cdot (I_B + I_{KB0}).$$

Керування струмом в схемі СК полягає в тому, що величина вихідного струму – струму емітера залежить від величини вхідного струму – струму бази.

### Підсилювальні властивості транзистора

Посилення електричних сигналів – одне із найважливіших застосувань біполярних транзисторів. Якщо величина струму у вихідному ланцюгу  $I_{ВИХ}$  більше, ніж величина струму у вхідному ланцюгу  $I_{ВХ}$ , це означає, що транзистор посилює сигнал зі струму. Це виражається відповідним параметром схеми – *коефіцієнтом посилення зі струму*:

$$K_I = \frac{I_{ВИХ}}{I_{ВХ}}.$$

Аналогічно визначається *коефіцієнт посилення з напруги*:

$$K_U = \frac{U_{ВИХ}}{U_{ВХ}}.$$

*Коефіцієнт посилення за потужністю* є добутком цих коефіцієнтів:

$$K_P = \frac{P_{ВИХ}}{P_{ВХ}} = \frac{U_{ВИХ} \cdot I_{ВИХ}}{U_{ВХ} \cdot I_{ВХ}} = K_U \cdot K_I.$$

*Підсилюючі властивості біполярного транзистора залежать від схеми його включення.*

### Схема СБ

У цій схемі (рисунок 17)  $R_{ВХ}$ ,  $R_{ВИХ}$  – еквівалентні опори вхідного та вихідного ланцюгів, а  $U_{ВХ}$ ,  $U_{ВИХ}$  – напруги вхідного та вихідного сигналів. Залежність вихідного струму від вхідного при нехтуванні тепловим струмом виражається формулою:

$$I_K = \alpha I_E.$$

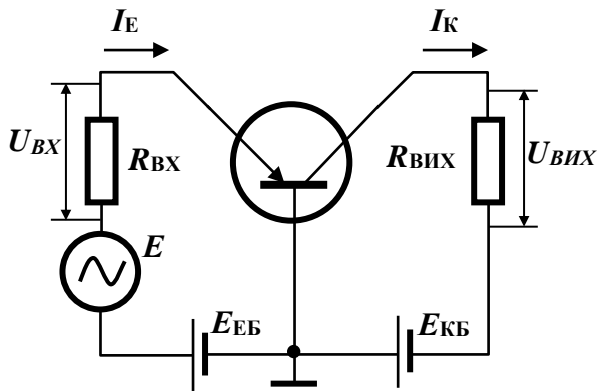


Рисунок 17

ного переходу набагато більший за опір емітерного переходу:

$$R_{КП} \gg R_{ЕП}.$$

Для того, щоб з вихідного ланцюга у вихідний передавалась максимальна потужність електричного сигналу потрібно дотримуватися правила узгодження опорів. Відповідно до цього еквівалентний опір вхідного ланцюга має бути рівним вхідному опору транзистора (опору емітерного переходу), а еквівалентний опір вихідного ланцюга має бути рівним вихідному опору транзистора (опору колекторного переходу):

$$R_{ВХ} = R_{ЕП},$$

$$R_{ВЫХ} = R_{КП}.$$

Це означає, що опір вихідного ланцюга має бути набагато більшим за опір вхідного ланцюга:

$$R_{ВЫХ} \gg R_{ВХ}. \quad (9)$$

Зі схеми видно, що

$$U_{ВХ} = I_E R_{ВХ},$$

$$U_{ВЫХ} = I_K R_{ВЫХ}.$$

Зіставляючи ці формули з формулами (8) і (9), можна зробити очевидний висновок:

$$U_{ВЫХ} \gg U_{ВХ}.$$

Таким чином, *транзистор, включений за схемою СБ, посилює електричний сигнал з напруги.*

Схема СБ також посилює сигнал і за потужністю тією самою мірою, як і за напругою, тобто

$$K_P = K_U.$$

Коефіцієнт передачі струму  $\alpha$  приблизно дорівнює одиниці. Тому

$$I_K \cong I_E. \quad (8)$$

Це означає, що *транзистор, включений за схемою СБ, не підсилює електричний сигнал зі струму.*

У режимі посилення емітерний перехід транзистора включається у прямому напрямку, а колекторний перехід – у зворотному. Тому опір колекторного переходу набагато більший за опір емітерного переходу:

### Схема СЕ

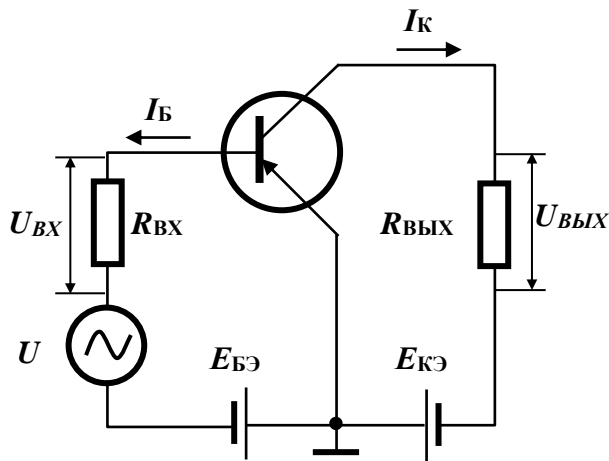


Рисунок 18

Якщо не брати до уваги тепловий струм, то в цій схемі включення транзистора залежність вихідного струму, тобто струму колектора, від вхідного струму – струму бази виражається формулою

$$I_K \cong \beta I_B .$$

Раніше було показано, що  $\beta \gg 1$ . Тому  $I_K \gg I_B$ , тобто *транзистор, включений за схемою СЕ, здатний посилювати струм.*

Повністю аналогічні міркування, які мали місце при розгляді схеми СБ, показують, що *схема ОЕ посилює також напругу і потужність електричних сигналів.*

### Схема СК

Також можна показати, що *транзистор, включений за схемою СК, посилює струм і потужність електричних сигналів, але не посилює їх напругу.*

Таким чином, в енергетичному сенсі найбільші переваги має схема СЕ, тому що транзистор, включений за цією схемою, здатний посилити сигнал і зі струму, і з напруги. Тому коефіцієнт посилення за потужністю

$$K_P = K_I \cdot K_U$$

для цієї схеми найбільший. Завдяки цьому схема СЕ найчастіше використовується в транзисторних пристроях.

В Таблиці 1 наведені орієнтовні параметри різних схем включення транзистора.

Таблиця 1

Параметр	ОЕ	ОБ	ОК
$K_I$	Десятки – сотні	Менше одиниці	Десятки – сотні
$K_U$	Десятки – сотні	Десятки – сотні	Менше одиниці
$K_P$	Сотні – десятки тисяч	Десятки – сотні	Десятки – сотні
Вхідний опір	Сотні Ом – одиниці кОм	Одиниці – десятки Ом	Десятки – сотні кОм
Вихідний опір	Одиниці – десятки кОм	Сотні кОм – одиниці МОм	Сотні Ом – одиниці кОм
Фазовий зсув $U_{ВВХ}$ і $U_{ВХ}$	180°	0°	0°

## Ефект модуляції ширини бази

В активному режимі роботи транзистора колекторний перехід підключається до джерела живлення у зворотному напрямку. При збільшенні напруги на колекторі зворотна напруга на колекторному переході також збільшується. Це призводить до розширення колекторного переходу в бік базової області, тому що концентрація домішки в ній набагато менше, ніж в колекторі. Внаслідок цього ширина бази зменшується. Цей ефект називають *модуляцією ширини бази*.

Зменшення ширини бази має такі наслідки:

- *Зменшується струм бази*. Це пояснюється тим, що скорочується шлях руху основних носіїв в базі і кількість їх рекомбінацій. Через це зменшується рекомбінаційна складова базового струму.
- *Збільшується струм колектора*. Зменшення кількості актів рекомбінації призводить до зростання основної складової струму колектора (діркової – у разі транзистору *p-n-p*-типу).
- *Збільшується струм емітера*. Зменшення ширини бази призводить до зростання градієнта концентрації основних носіїв. Це, своєю чергою, підвищує дифузію основних носіїв через відкритий емітерний перехід.

Потрібно додати, що ефект модуляції ширини бази є причиною появи зворотного зв'язку в транзисторі. Цей зв'язок полягає в тому, що зміна вихідної напруги (наприклад, на колекторі у схемі *СБ*) викликає відповідну зміну вхідної напруги (тобто на емітері – у тій же схемі включення транзистора). Ця властивість відноситься до недоліків біполярного транзистора.

## Вольт-амперні характеристики транзисторів

Залежності між струмами і напругами в транзисторі виражаються статичними вольт-амперними характеристиками, які експериментально визначається при постійному струмі і відсутності навантаження у вихідному ланцюгу.

Як більшість властивостей і параметрів транзистора, його вольт-амперні характеристики також залежать від схеми включення. Для практики найбільше значення мають дві характеристики: вхідна – залежність струму від напруги у вхідному ланцюгу, та вихідна – залежність струму від напруги у вихідному ланцюгу.

Розглянемо вольт-амперні характеристики транзистора найбільш поширеної схеми *СЕ*.

У цій схемі *вхідна характеристика визначає залежність струму бази від напруги між базою і емітером при постійній напрузі на колекторі*:

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ при } U_{KE} = \text{const.}$$

Очевидно, що ця характеристика визначає залежність струму, який протікає через відкритий емітерний перехід, від напруги на ньому. Отже, її вид подібний до вольт-амперної характеристики  $p-n$ -переходу, включеного в прямому напрямку.

Графік вхідної характеристики для двох значень колекторної напруги ( $U_{KE,1}, U_{KE,2} \neq 0$ ) наведено на рисунку 19.

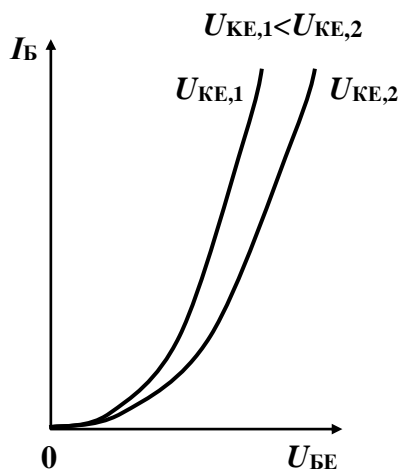


Рисунок 19

Зменшення струму бази зі збільшенням колекторного напруги обумовлюється ефектом модуляції ширини бази.

Вихідна вольт-амперна характеристика у схемі ОЕ визначає залежність колекторного струму від напруги між колектором та емітером при постійному струмі бази:

$$I_K = f(U_{KE}) \text{ при } I_B = \text{const.}$$

Ця характеристика відображає залежність між струмом і напругою в закритому колекторному переході, тому вона подібна до вольт-амперної характеристики  $p-n$ -переходу, включеного у зворотному напрямку (рисунки 20).

Якщо транзистор  $n-p-n$ -типу, то напруга на колекторі має позитивний знак. Для транзистора  $p-n-p$ -типу колекторна напруга негативна.

Нижня з вихідних характеристик знімається при струмі бази  $I_B = 0$ . Це відповідає умові розімкнутого вхідного ланцюга. При цьому через весь транзистор

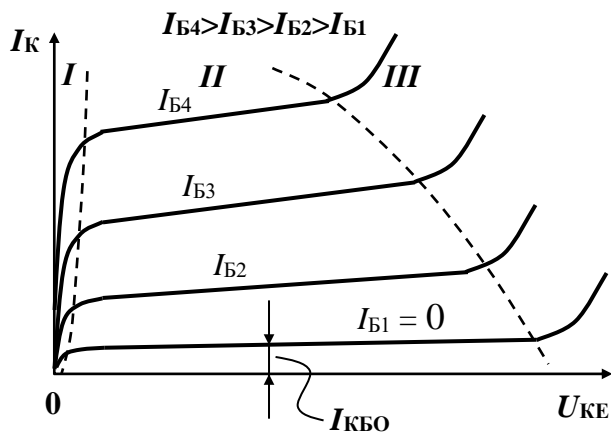


Рисунок 20

від емітера до колектора протікає тільки тепловий струм  $I_{КБ0}$ . При збільшенні струму бази збільшується струм колектора відповідно до рівняння (6). Завдяки майже лінійній залежності  $I_K$  від  $I_B$  вихідні характеристики розташовуються на однаковій відстані одна від одної (*еквідистантні* характеристики).

Сімейство вихідних характеристик мають три характерні області, позначених на графіку римськими цифрами.

**Область I.** При невеликій колекторній напрузі (десяти частки вольта) колекторний перехід повністю не закривається, і через нього протікає прямий струм, який швидко збільшується зі зростанням напруги  $U_{КЕ}$ . (Колекторний перехід працює у *режимі інжекції*).

**Область II.** Коли напруга на колекторі досягне величини контактної різниці потенціалів (для германієвих транзисторів 0,3-0,5 В, для кремнієвих – 0,6-0,8 В), перехід закриється і колекторний струм буде залежати від струму бази, тобто транзистор буде виконувати функцію керування струмом. Тому цю область характеристики часто називають *активною* або *робочою* областю. Незначне зростання колекторного струму в області II пояснюється ефектом модуляції ширини бази.

**Область III.** Різке зростання струму при незначному підвищенні напруги обумовлюється електричним пробоем колекторного переходу. Чим більший колекторний струм, тим при меншій напрузі  $U_{КЕ}$  настає електричний пробій. Область III не є робочою областю транзистора, тому що електричний пробій майже миттєво розвивається в тепловий, і транзистор руйнується. Тому можлива напруга на колекторі обмежується областю II.

### Еквівалентна схема транзистора

Представлення транзистора *еквівалентною* схемою (схемою *заміщення*) застосовується при розрахунках відповідних електричних ланцюгів. Вигляд такої схеми залежить від способу включення транзистора. На рисунку 21 показана

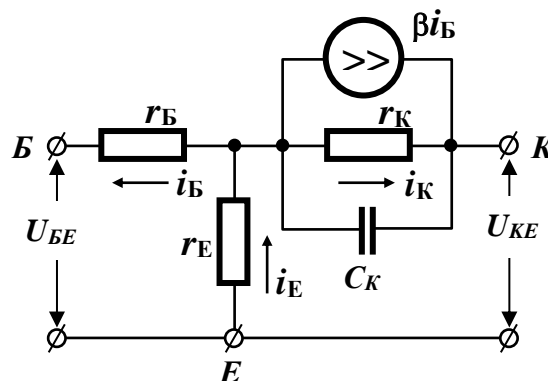


Рисунок 21

T-подібна еквівалентна схема транзистора в схемі  $CE$ , який працює в режимі керування змінним струмом на лінійній ділянці вольт-амперної характеристики. На цих ділянках параметри транзистора вважатимуться незмінними.

Елементи, що входять до еквівалентної схеми, мають такий фізичний сенс:

- $r_E$  – опір емітерного переходу в прямому напрямку зі змінного струму. Він визначається так:

$$r_E = \frac{du_E}{di_E} \text{ при } U_{KE} = \text{const},$$

де  $u_E$  – напруга на емітерному переході,  $i_E$  – струм цього переходу. Величина  $r_E$  становить одиниці – десятки Ом.

- $r_B$  – об'ємний опір бази. Він визначається в напрямі протікання струму бази.

Величина  $r_B$  залежить від типу транзистора і становить 100–400 Ом.

- $r_K$  – опір колекторного переходу зі змінного струму у зворотному напрямку:

$$r_K = \frac{du_{KB}}{di_K} \text{ при } I_B = \text{const}.$$

Опір  $r_K$  враховує зміну колекторного струму при зміні напруги на колекторі в результаті ефекту модуляції ширини бази (область II на вихідний ВАХ). Величина цього опору становить сотні кОм – одиниці МОм.

- $C_{кп}$  – ємність колекторного переходу. Через те, що колекторний перехід включений у зворотному напрямку, його ємність в основному є бар'єрною. Її величина залежить від типу транзистора і приблизно дорівнює десяткам пікофард.
- $\beta i_B$  – джерело струму у вихідному ланцюзі, яке враховує зв'язок колекторного струму з базовим.

Напрями протікання струмів в еквівалентній схемі визначаються умовою

$$I_E = I_B + I_K.$$

### Диференціальні параметри транзистора

Параметри транзистора, які входять до його еквівалентної схеми, безпосередньо характеризують фізичні властивості структури напівпровідникового кристала. Вони можуть бути розраховані за геометричними розмірами областей транзистора і параметрами матеріалу, з якого він виготовлений. Однак прямий їх вимір неможливий. Для практичної мети велике значення мають параметри, які

можна виміряти. В якості таких обрані параметри, які характеризують властивості транзистора як лінійного чотириполюсника.

Транзистор є принципово нелінійний елемент. Це означає, що залежність між струмом та напругою на його виводах нелінійна. Але транзистор можна уявити лінійним елементом, якщо вимірювати не абсолютні значення струму і напруги, а їх невеликі приращення (ділянка  $a-b$  на рисунку 22).

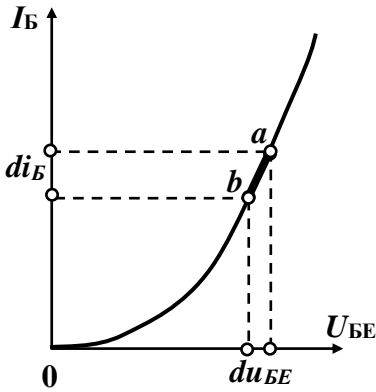


Рисунок 22

Якщо змінення струму  $di$  і напруги  $du$  досить малі, то ділянку  $a-b$  вольт-амперної характеристики можна вважати лінійною. Отже, якщо величини струму і напруги, які діють у транзисторі, не виходять за межі цієї ділянки, то транзистор можна вважати лінійним елементом і інтерпретувати як лінійний чотириполюсник (рисунок 23).

В цьому випадку зв'язок між диференціалами вхідних і вихідних струмів і напруг описується лінійними рівняннями.

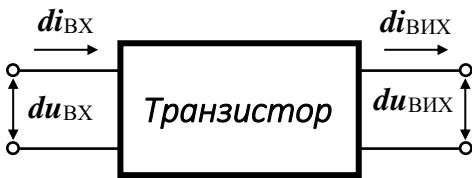


Рисунок 23

Виберемо в якості незалежних параметрів (аргументів) чотириполюсника приращення вхідного струму  $di_{ВХ}$  і вихідної напруги  $du_{ВИХ}$ . Тоді його незалежними параметрами (функціями) будуть приращення вихідного струму  $di_{ВИХ}$  і вхідної напруги  $du_{ВХ}$ . Тепер чотириполюсник можна описати системою двох лінійних рівнянь:

$$du_{ВХ} = h_{11} di_{ВХ} + h_{12} du_{ВИХ}, \quad (10)$$

$$di_{ВИХ} = h_{21} di_{ВХ} + h_{22} du_{ВИХ}, \quad (11)$$

Коефіцієнти, які пов'язують напруги і струми, мають постійне значення, і називаються диференціальними  $h$ -параметрами транзистора. Їх фізичний зміст можна визначити, провівши два уявні експерименти.

У першому експерименті, підтримуючи постійну напругу на виході транзистора ( $u_{ВИХ} = \text{const}$ , а  $du_{ВИХ} = 0$ ), змінимо вхідний струм  $i_{ВХ}$  і виміряємо як при цьому зміниться вхідна напруга  $u_{ВХ}$  і вихідний струм  $i_{ВХ}$ . Тоді з рівнянь (10) і (11) отримаємо:

$$h_{11} = \frac{du_{ВХ}}{di_{ВХ}} - \text{вхідний опір транзистора зі змінного струму};$$

$h_{21} = \frac{di_{ВИХ}}{di_{ВХ}}$  – коефіцієнт передачі (або підсилення) зі змінного струму.

У другому експерименті, підтримуючи постійний вхідний струм транзистора ( $i_{ВХ} = \text{const}$ , а  $di_{ВХ} = 0$ ), змінимо вихідну напругу  $u_{ВИХ}$  і виміряємо, як при цьому зміняться вхідна напруга  $u_{ВХ}$  і вихідний струм  $i_{ВИХ}$ . З рівнянь (10) та (11) отримаємо:

$h_{12} = \frac{du_{ВХ}}{du_{ВИХ}}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку транзистора зі змінної напруги;

$h_{22} = \frac{di_{ВИХ}}{du_{ВИХ}}$  – вихідна провідність транзистора зі змінної напруги.

Чисельні значення  $h$ -параметрів залежать від схеми включення транзистора і наводяться в довідниках для середньої смуги частот при типових значеннях струму та напруги на виводах транзистора. Для кожної схеми включення струму та напруги у формулі визначення  $h$ -параметрів потрібно замінювати конкретною величиною. Наприклад, для схеми  $CE$   $h$ -параметри визначаються за формулами:

$$h_{11E} = \frac{du_{BE}}{di_B}; \quad h_{12E} = \frac{du_{BE}}{du_{KE}}; \quad h_{21E} = \frac{di_K}{di_B}; \quad h_{22E} = \frac{di_K}{du_{KE}}.$$

Зв'язок між  $h$  - параметрами для різних схем включення дається формулами:

$$h_{11Б} = h_{11E} / (1 + h_{21E});$$

$$h_{12Б} = h_{11E} h_{22E} / (1 + h_{21E});$$

$$h_{21Б} = -h_{21E} / (1 + h_{21E}); \quad h_{11К} = h_{11E};$$

$$h_{22Б} = h_{22E} / (1 + h_{21E}); \quad h_{12К} = 1 / (1 + h_{12E});$$

$$h_{11К} = h_{11E};$$

$$h_{12К} = 1 / (1 + h_{12E});$$

$$h_{21К} = - (1 + h_{21E});$$

$$h_{22К} = h_{22E}.$$

$$h_{22К} = h_{22E}.$$

Ці формули є приблизними, але вони придатні для використання на практиці.

За допомогою  $h$ -параметрів можна виразити і фізичні параметри транзистора, які входять в його еквівалентну схему:

$$r_E = h_{11} - (1 - h_{21}) h_{12} / h_{22},$$

$$r_B = h_{12} / h_{22},$$

$$r_K = 1 / h_{22},$$

$$\alpha = h_{21Б}, \beta = h_{21Е}.$$

## ОДНОПЕРЕХІДНІ ТРАНЗИСТОРИ

Одноперехідні транзистори (ОПТ) наразі мають досить обмежене застосування, але принцип їх роботи і історія створення заслуговують певної уваги.

Конструкція приладу відноситься до сплавних структур на пластинах германію. Вперше ОПТ описаний Шоклі, Пірсоном і Хайнсом у п'ятдесяті роки минулого століття. У той час така структура називалася *ниткоподібним транзистором*. У процесі розвитку прилад мав об'ємну структуру, потім дифузійно-планарну і, нарешті, епітаксіально-планарну. Змінювалася і його назва від «діода з подвійною базою» до останньої, яка і закріпилася як *одноперехідний транзистор*.

Структура кристалу, схема підключення джерел живлення і схемне позначення одноперехідного транзистора з базою  $n$ -типу показана на рисунку 24.

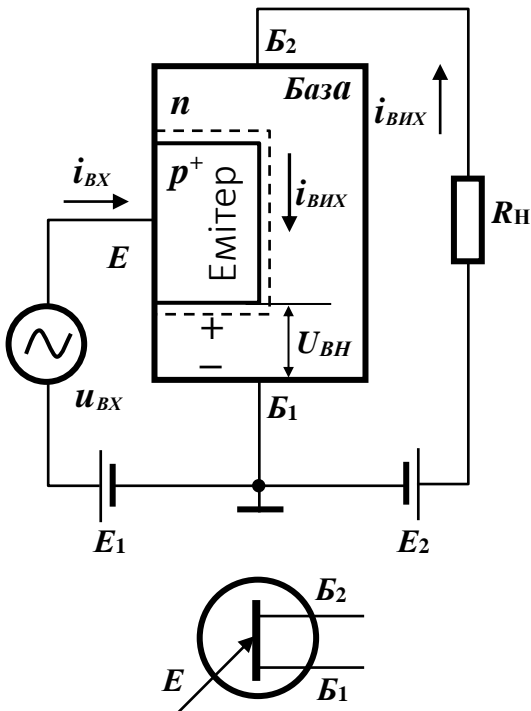


Рисунок 24

Кристал транзистора містить дві області: базу – з провідністю  $n$ -типу і емітер з провідністю  $p+$  ( $p+$  означає підвищену концентрацію акцепторної домішки). Отже концентрація носіїв в емітері набагато вища, ніж в базі. Між емітером і базою утворюється  $p$ - $n$ -перехід, який зосереджений в основному в базі, тому що концентрація домішок в ній набагато менша, ніж в емітері.

База має два омичних виводи –  $B_1$  і  $B_2$  (тому друга назва одноперехідного транзистора – *двохбазовий діод*), до яких підключається вихідний ланцюг з джерелом живлення  $E_2$ . Полярність вихідного джерела живлення відповідає протіканню струму в кристалі від бази  $B_2$  до бази  $B_1$ .

Вхідний сигнал подається на емітер  $E$ . Вхідне джерело живлення  $E_2$  створює необхідне зміщення вхідного сигналу  $u_{ВХ}$  і забезпечує пряме включення  $p$ - $n$ -переходу між емітером і базою.

### Принцип роботи ОПТ

Протікаючи по базі вихідний струм на ділянці емітер–база  $B_1$  створює внутрішнє падіння напруги  $U_{ВН}$ , полярність якого показана на рисунку. Ця полярність є зворотною для переходу, тому він закривається якщо  $U_{ВН} + \Delta\phi_0 > E_1 + u_{ВХ}$ . Якщо зовнішня пряма напруга  $E_1 + u_{ВХ}$  стане більшою, ніж  $U_{ВН} + \Delta\phi_0$ , то результуюча напруга на переході стане прямою, перехід відкриється і почнеться інжекція

дірок із емітера в базу. Опір бази зменшиться, вихідний струм зросте. Чим більша напруга вхідного сигналу  $u_{ВХ}$ , тим більша пряма напруга на переході, а, значить, і більша інжекція дірок в базу, і більший вихідний струм. В цьому і полягає принцип керування струмом в транзисторах такого типу.

Більш детально принцип дії одноперехідного транзистора зручно розглянути, користуючись найпростішою еквівалентною схемою (рисунок 25), де  $R_{Б1-Е}$  та  $R_{Б2-Е}$  – опори між відповідними виводами бази та емітером, а  $VD$  – емітерний  $p-n$ -перехід.

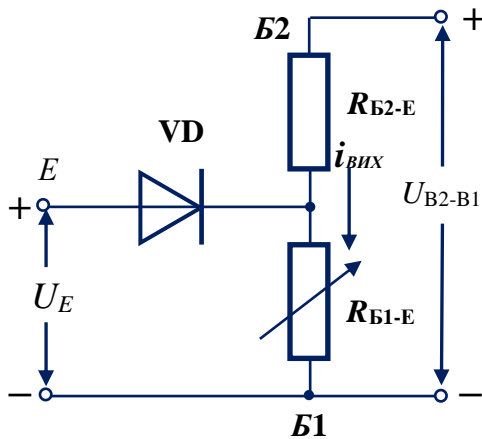


Рисунок 25

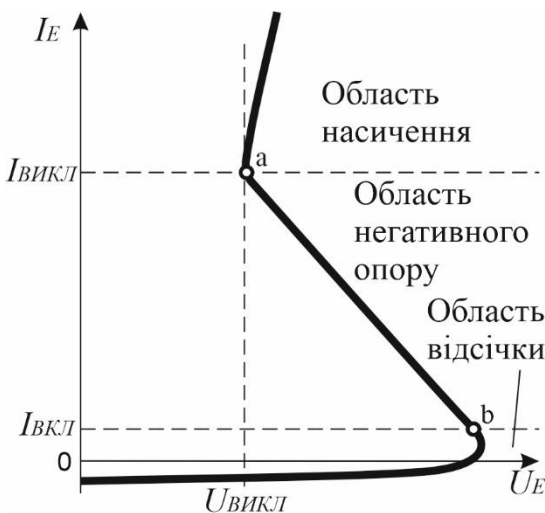


Рисунок 26

Струм, що протікає через опори  $R_{Б1-Е}$  і  $R_{Б2-Е}$ , створює на першому з них падіння напруги, що зміщує діод  $VD$  у зворотному напрямку. Якщо напруга на емітері  $U_E$  менша за падіння напруги на опорі  $R_{Б1-Е}$ , то діод  $VD$  закритий, і через нього тече тільки струм витoku. Коли ж напруга  $U_E$  стає вищою напруги на опорі  $R_{Б1-Е}$ , діод починає пропускати струм у прямому напрямку. При цьому опір  $R_{Б1-Е}$  зменшується за рахунок протікання цього струму, що в свою чергу призводить до збільшення струму в ланцюзі  $E \rightarrow VD \rightarrow R_{Б1-Е} \rightarrow Б1$ , а це, своєю чергою, викликає подальше зменшення опору  $R_{Б1-Е}$ . Цей процес протікає лавиноподібно. Опір  $R_{Б1-Е}$  зменшується швидше, ніж збільшується струм через  $p-n$ -перехід. В результаті цього на вольт-амперній характеристиці одноперехідного транзистора (рисунок 26), з'являється область негативного опору – ділянка  $a - b$ . При подальшому збільшенні струму залежність опору  $R_{Б1-Е}$  від струму через  $p-n$ -перехід зменшується, і при значеннях, більших деякої величини  $I_{ВИКЛ}$  вона не залежить від струму (область насичення).

### Основні параметри ОПТ

- Міжбазовий опір –  $R_{ББ} = R_{Б1} + R_{Б2}$ .
- Коефіцієнт передачі, що характеризує напругу перемикавання

$$\eta = \frac{R_{Б1}}{R_{Б2} + R_{Б2}}$$

- *Напруга спрацьовування*  $U_{СПР}$  – мінімальна напруга на емітері, необхідна для переходу транзистора зі стану з великим опором у стан з негативним опором.
- *Струм включення*  $I_{ВКЛ}$  – мінімальна величина струму, необхідна переведення транзистора в стан негативного опору.
- *Струм виключення*  $I_{ВИКЛ}$  – мінімальна величина емітерного струму, що утримує транзистор у стані негативного опору.
- *Напруга виключення*  $U_{ВИКЛ}$  – величина напруги на емітерному переході при струмі через нього, рівному  $I_{ВИКЛ}$ .
- *Зворотний струм емітера*  $I_{ЕЗ}$  – струм витоку закритого емітерного переходу.

### ***Застосування***

Одноперехідні транзистори отримали застосування в різних пристроях автоматики, імпульсної та вимірювальної техніки – генераторах, порогових пристроях, дільниках частоти, реле часу тощо.

У зв'язку з відносно великим об'ємом бази одноперехідні транзистори поступаються біполярним за частотними характеристиками.

## ТИРИСТОРИ

*Тиристор* – це напівпровідниковий прилад, який може приймати два стійкі стани: стан низької провідності (*тиристор закритий*) і стан високої провідності (*тиристор відкритий*). Їх назва походить від грецького слова *thyra* – *двері*. Переведення тиристора з одного стану в інше здійснюється зовнішнім впливом – наприклад – напругою, струмом, світлом та ін.

### ДІОДНІ ТИРИСТОРИ (ДИНІСТОРИ)

Структура кристала діодного тиристора, схема його підключення до джерел живлення і схемне зображення наведено на рисунку 27.

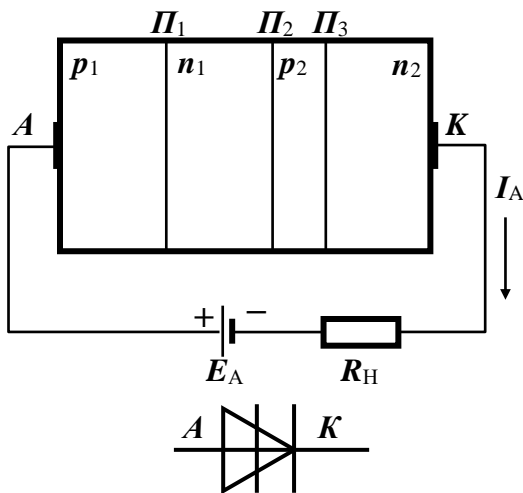


Рисунок 27

Кристал діодного тиристора містить чотири області. Зовнішні області – анод і катод – мають провідності  $p_1$  і  $n_2$ , відповідно. Область  $n_1$  називається товстою базою, а область  $p_2$  – тонкою базою. Концентрація домішок в областях  $p_2$  і  $n_2$  значно вище, ніж в областях  $p_1$  і  $n_1$ . Між областями кристала з різною провідністю створюються три  $p$ - $n$ -переходи –  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ .

При аналізі роботи тиристора його зручно подати у вигляді двох паралельно включених транзисторів (*двохтранзисторна аналогія*), як це показано на рисунку 28.

Транзистор  $T_1$  –  $p$ - $n$ - $p$ -типу, транзистор  $T_2$  –  $n$ - $p$ - $n$ -типу. База транзистора  $T_1$  одночасно є колектором транзистора  $T_2$ , а база транзистора  $T_2$  – колектором транзистора  $T_1$ . Таким чином, переходи  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$  є емітерними переходами цих транзисторів, а перехід  $\Pi_2$  є для них колекторним.

Відповідно до цього колекторний струм першого транзистора  $I_{K1}$  є струмом бази  $I_{B2}$  другого транзистора, а колекторний струм другого транзистора  $I_{K2}$  є струмом бази першого транзистора  $I_{B1}$ .

Принцип дії діодного тиристора легше зрозуміти, розглядаючи його вольт-амперну характеристику, яка наведена на рисунку 29. При прямому включенні тиристора на анод  $A$  подається позитивний полюс джерела живлення, а на катод  $K$  – негативний. Тоді переходи  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$ , які є емітерними переходами транзисторів  $T_1$  і  $T_2$ , зміщуються в прямому напрямку, а перехід  $\Pi_2$ , який є колекторним переходом обох транзисторів, – у зворотному. Тобто обидва транзистори працюють в активному режимі. При невеликій прямій напрузі  $U_{A,пр}$  через тиристор протікає зворотний струм переходу  $\Pi_2$ . Цей процес відображається на вольт-амперній характеристиці ділянкою 0 – 1. При збільшенні прямої напруги струм на цій ділянці незначно зростає.

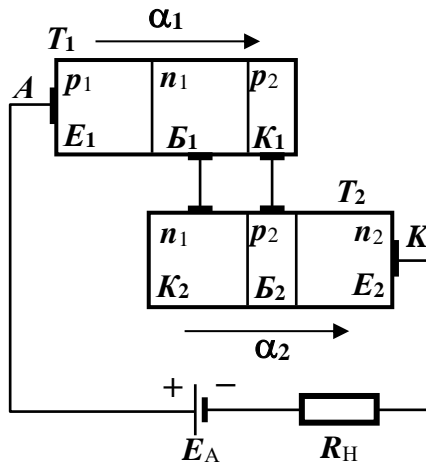


Рисунок 28

При напрузі, яка відповідає точці 1 на графіку, починається електричний пробій переходу П2 і струм починає зростати значно швидше. При цьому дірки з емітера транзистора  $T_1$  (область  $p_1$ ) переходять у колектор (область  $p_2$ ) і накопичуються там, а електрони з емітера транзистора  $T_2$  (область  $n_2$ ) переходять у його колектор (область  $n_1$ ) і також в ній накопичуються. Дірки, які накопилися в області  $p_2$ , компенсують негативний заряд іонів домішок, а електрони в області  $n_1$  компенсують позитивний заряд таких іонів. Цей процес називають *переполюсуванням*. Повна компенсація зарядів іонів досягається в точці 2 і перехід П2 відкривається. Тепер всі переходи тиристора відкриті, їх сумарний опір стає малим, тому напруга на тиристорі різко зменшується (точка 3 на графіку). Наступне навіть незначне збільшення напруги на тиристорі призводить до значного зростання струму (ділянка 3 – 4).

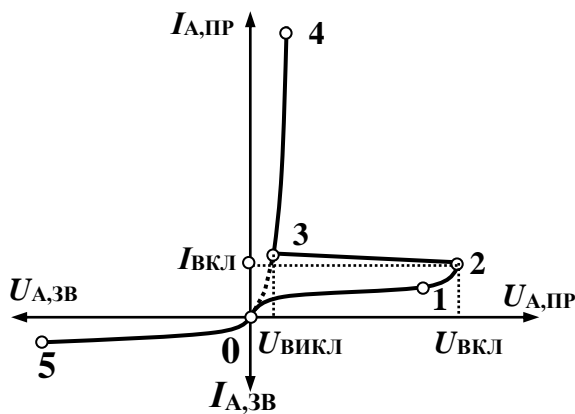


Рисунок 29

При зворотному включенні тиристора закриваються переходи П1 і П3, а перехід П2 відкривається. При певному досить невеликому значенні зворотної напруги в переході П3 відбувається електричний пробій, тому що області  $p_2$  і  $n_2$  містять високу щодо областей  $p_1$  і  $n_1$  концентрацію домішок. Перехід П1 залишається закритим. Тому струм через тиристор є зворотним струмом закритого переходу П1 (ділянка 0 – 5) вольт-амперної характеристики.

Напруга на тиристорі, при якому відбувається його миттєве відкриття, називається *напругою включення*  $U_{ВКЛ}$ . Для того, щоб закрити тиристор потрібно знизити напругу на ньому до величини  $U_{ВКЛ}$  (практично до нуля), яка називається *напругою виключення*.

Процес миттєвого перемикання тиристора із закритого стану у відкритий можна пояснити і математично. Розглядаючи схему двохтранзисторної аналогії тиристора, можна побачити, що струм тиристора  $I_A$  є емітерними струмами першого  $I_{E1}$  або другого  $I_{E2}$  транзисторів, тому що вони з'єднані послідовно:

$$I_A = I_{E1} = I_{E2}. \quad (1)$$

З іншого боку, струм тиристора  $I_A$  є сумою колекторних струмів транзисторів  $T_1$  та  $T_2$  та теплового струму колекторного переходу П2, тобто

$$I_A = I_{K1} + I_{K2} + I_{KB0}. \quad (2)$$

Колекторні та емітерні струми пов'язані співвідношеннями

$$I_{K1} = \alpha_1 I_{E1}, \quad I_{K2} = \alpha_2 I_{E2}, \quad (3)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти передачі транзисторів  $T_1$  та  $T_2$ .

Підставимо (3) в (2) і візьмемо до уваги (1). Одержимо

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_A + I_{KB0}.$$

Розв'язуючи це рівняння щодо  $I_A$ , отримаємо

$$I_A = \frac{I_{KB0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (4)$$

При малих струмах через тиристор  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  значно менше одиниці; тому відповідно (3) і струм  $I_A$  буде невеликим (трохи більше теплового струму). З підвищенням напруги на тиристорі підвищується струм через нього, і ростуть  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ . Це призводить до подальшого збільшення струму, а, отже, і подальшого збільшення коефіцієнтів передачі. При певній величині струму, який і є струмом включення  $I_{BKЛ}$ , сума  $\alpha_1 + \alpha_2$  досягає одиниці і струм  $I_A$  повинен би зрости до нескінченності, якби його не обмежував опір навантаження  $R_H$ . Саме таке прагнення струму до нескінченності і зумовлює його стрибкоподібне зростання, тобто відкриття тиристора.

Параметри діодного тиристора, які можна визначити за його вольт-амперною характеристикою:

- *максимально допустимий струм* – точка 4 на вольт-амперній характеристиці;
- *напруга та струм включення* – точка 2; до цих значень потрібно збільшити  $U_A$  і  $I_A$  для того, щоб тиристор відкрився;
- *напруга та струм виключення* – точка 3; до цих значень потрібно зменшити  $U_A$  та  $I_A$  для того, щоб тиристор заклався (на практиці їх треба знизити майже до нуля);
- *максимально допустима зворотна напруга* – точка 5 на ВАХ.

## ТРИОДНІ ТИРИСТОРИ (ТРИНІСТОРИ)

У тріодних тиристорах від однієї з баз існує вивід, який називається *керуючим електродом (КЕ)*. Основне застосування триністорів – це керування потужним струмом навантаженням за допомогою відносно слабкого сигналу, що подається на керуючий електрод.

На рисунку 30 показана схема підключення тріодного тиристора з керуючим електродом від тонкої бази. Такі тиристори називають *тиристорами з керуванням по катоду*, тому що керуючий електрод виведений від бази, ближчої до катода. При такому підключенні струм через відкритий перехід П<sub>3</sub> збільшується,

що рівнозначно збільшенню струму тиристора на величину  $\alpha_2 I_K$  ( $I_K$  – керуючий струм або струм керуючого електрода):

$$I = \frac{I_{KB0} + \alpha_2 I_K}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

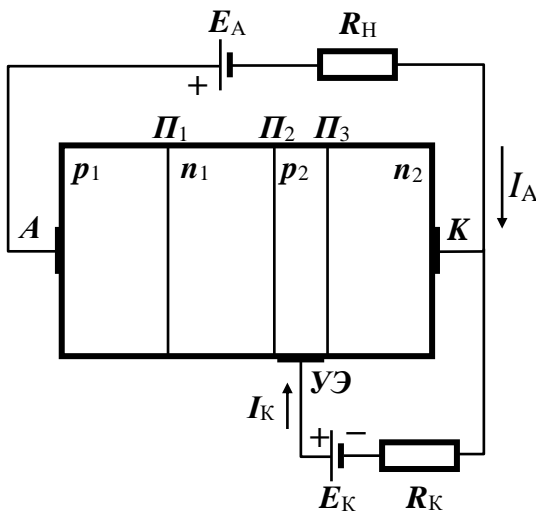


Рисунок 30

Збільшення струму через *p-n*-перехід П<sub>3</sub> у першому наближенні аналогічно збільшенню анодної напруги, оскільки в обох випадках збільшується ймовірність лавинного розмноження носіїв заряду. Тому, змінюючи керуючий струм, можна змінювати напругу, при якому відбувається перемикання тиристора, і, тим самим, керувати моментом його включення. Для того, щоб ви-

ключити тиристор, потрібно зменшити анодний струм шляхом зменшення анодної напруги до величини  $I_A < I_{ВКЛ}$ , або задати в ланцюзі керуючого електрода імпульс струму протилежного напрямку.

Сімейство вольт-амперних характеристик тріодного тиристора для трьох значень керуючого струму показано на рисунку 31. Зі збільшенням  $I_K$  напруга включення  $U_{ВКЛ}$  зменшується.

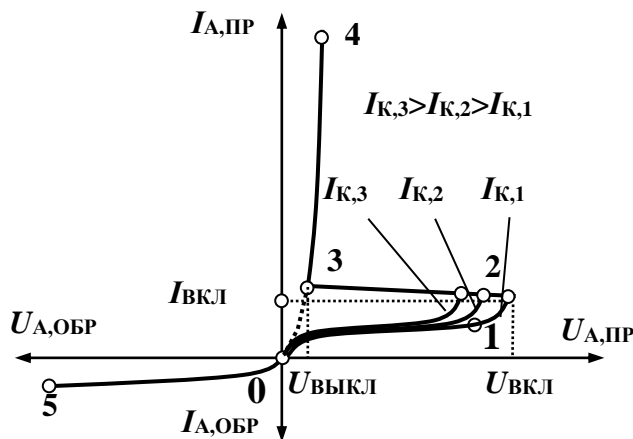


Рисунок 31

тріодні тиристори мають кілька різновидів. Якщо вимкнення тиристора здійснюється тільки зниженням напруги між анодом і катодом, то він відноситься до типу *одноопераційних* тиристорів. Якщо вимкнути тиристор можна зменшенням напруги на аноді або подачею на керуючий електрод напруги протилежної полярності, їх називають *двоопераційними* тиристорами.

## СИМІСТОРИ ТА ФОТОТИРИСТОРИ

Симістор (симетричний тріодний тиристор) або триак (від англ. *TRIAC* – *triode for alternating current*) – напівпровідниковий прилад, що є різновидом тиристорів і використовується для комутації в ланцюгах змінного струму.

Симетричні тиристори мають однакову вольт-амперну характеристику при протилежних полярностях прикладеної напруги. Іншими словами, такі прилади проводять струм в обох напрямках.

Структура кристала симетричного тиристора і його вольт-амперна характеристика показані на рисунку 32. Він має шість областей  $n_1, n_2, n_3, n_4, p_1, p_2$  і п'ять  $p$ - $n$ -переходів –  $\Pi_1 \dots \Pi_5$ .

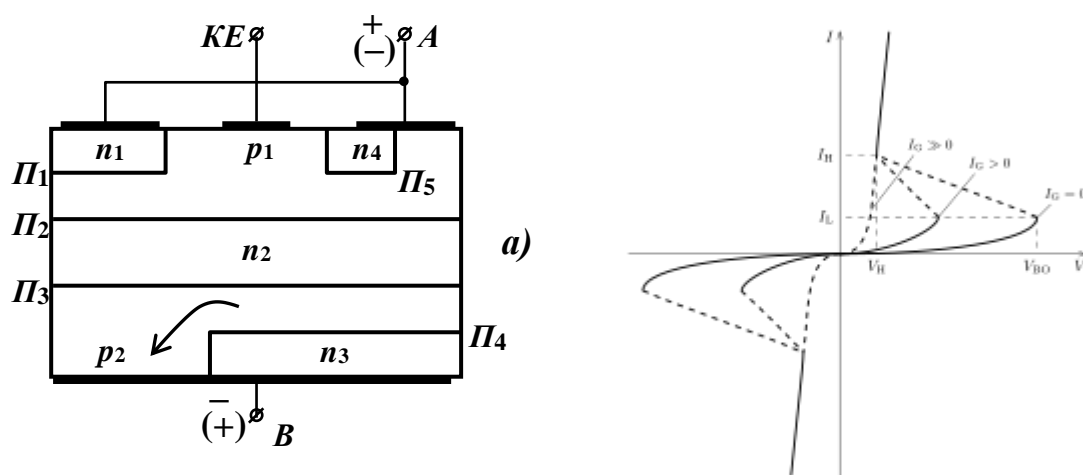


Рисунок 32

Принцип дії симістора полягає в наступному. Припустимо, що тиристор закритий і до зовнішнього виводу  $A$  відносно виводу  $B$  подано напругу позитивної полярності (на рисунку 32 вона показана без дужок). У цьому випадку переходи  $\Pi_2, \Pi_4$  зміщуються у прямому напрямку, а перехід  $\Pi_3$  – у зворотному. Вся зовнішня напруга буде прикладена до переходу  $\Pi_3$ .

При подачі на керуючий електрод  $KE$  імпульсу напруги позитивної полярності відносно виводу  $A$  перехід  $\Pi_5$  зміщується у прямому напрямку та інжектує електрони з області  $n_4$  в область  $p_1$ . Інжектвані електрони під дією дифузії проходять область  $p_1$  у напрямку переходу  $\Pi_2$ . Пряма напруга на переході  $\Pi_2$  буде прискорюючою для електронів, що входять в область  $n_2$ . Ці електрони знижують потенціал області  $n_2$  відносно області  $p_1$ , пряма напруга на переході  $\Pi_2$  збільшується, і це призводить до інжекції дірок з області  $p_1$  в область  $n_2$ . Пройшовши під дією дифузії область  $n_2$ , дірки потрапляють у прискорююче поле переходу  $\Pi_3$  і перекидаються в область  $p_2$ . Дифузійний рух дірок в області  $p_2$  в напрямку зовнішнього виводу  $B$  можливе лише шляхом огинання переходу  $\Pi_4$  (на рисунку 32 показано стрілкою), оскільки поле переходу  $\Pi_4$  для дірок буде гальмуючим.

В результаті протікання діркового струму через область  $p_2$  у ньому створюється падіння напруги, яке збільшує пряме зміщення переходу  $P_4$ . У свою чергу, збільшується інжекція електронів з області  $n_3$  в область  $p_2$  і подальший їх перехід в область  $n_2$  у зустрічному напрямку. Поява додаткової кількості електронів в області  $n_2$  викликає ще більший потік дірок у напрямку зовнішнього виводу  $B$ .

Таким чином, в симісторі діє внутрішній позитивний зворотний зв'язок, що призводить до лавиноподібного процесу наростання струму через прилад та відмикання правої половини тиристорної структури  $p_1-n_2-p_2-n_3$ . Таким чином, в результаті подачі імпульсу управління здійснюється перехід тиристора з ділянки закритого стану на ділянку відкритого стану вольт-амперної характеристики тиристора.

При підведенні до симістора напруги протилежної полярності (на рисунку 32 показана в дужках) дія приладу визначається структурою його лівої частини  $n_1-p_1-n_2-p_2$ , що відповідає звичайному тиристорі, до якого зовнішня напруга прикладена у прямому напрямку. До речі, роль симетричного тиристора можуть виконувати два звичайних тиристора, з'єднаних паралельно.

Фототиристор за принципом дії подібний до тріодного тиристора. Різниця полягає в тому, що збільшення числа носіїв заряду у фототиристорах, необхідне для його відмикання, відбувається не за рахунок подачі струму управління, а за рахунок освітлення однієї з областей кристалу (наприклад, області  $p_2$ ). З цією метою в корпусі фототиристора передбачено спеціальне прозоре віконце. Фототиристори знайшли широке застосування у високовольтних пристроях перетворення електричної енергії, оскільки вони дозволяють вирішити задачу надійної розв'язки по напрузі вихідного ланцюга та ланцюга управління.

Вплив температури на роботу тиристорів досить значний. При підвищенні температури прямий і зворотний струми експоненційно зростають, зменшуються струми вмикання та вимикання, а також напруга вмикання.

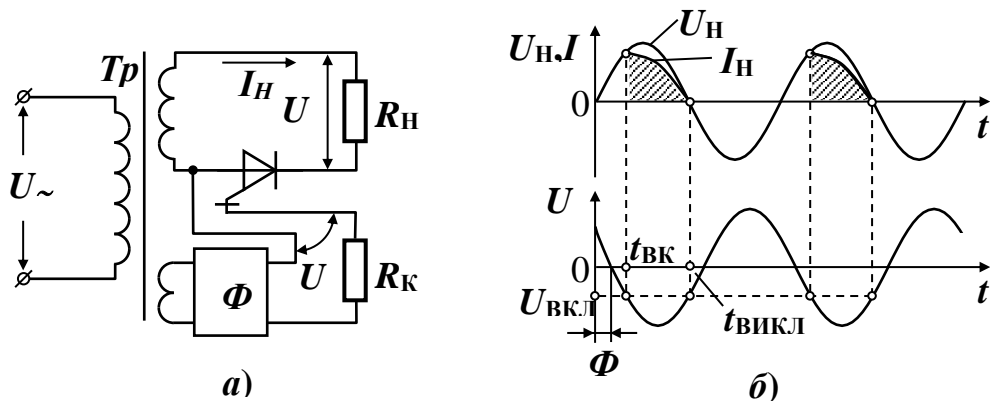
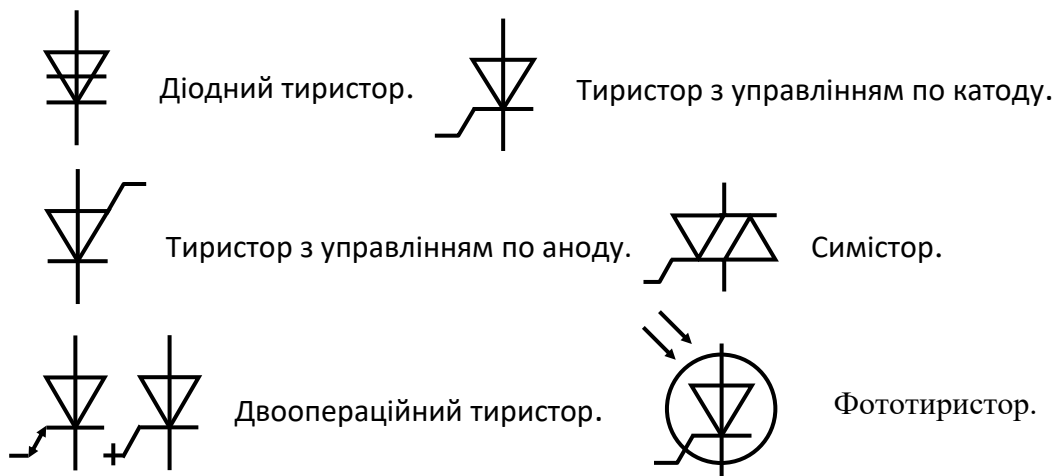


Рисунок 33

Тиристри широко застосовуються в пристроях регулювання потужності електричного струму, найпростіша схема якого показана на рисунку 33а. На рисунку 33б показані діаграми, які пояснюють принцип роботи пристрою.

Двоопераційний тиристор, що керується по аноду, включений послідовно з опором навантаження  $R_H$ . У відкритому стані тиристор пропускає струм у навантаження, а закритому – перешкоджає цьому. Моменти відкриття і закриття тиристора визначаються керуючим ланцюгом, в якій головну роль виконує регулятор фази  $\Phi$ . У момент  $t_{ВКЛ}$ , коли напруга на керуючому електроді  $U_K$  досягає величини  $U_{ВКЛ}$ , тиристор відкривається, і через опір навантаження починає протікати струм  $I_H$ . Коли напруга на керуючому електроді спадає приблизно до тієї ж величини  $U_{ВКЛ}$ , тиристор закривається (момент часу  $t_{ВИКЛ}$ ), і струм у вихідному ланцюгу припиняється. Таким чином, струм через навантаження протікає лише в проміжок часу  $\Delta t = t_{ВКЛ} - t_{ВИКЛ}$  і, отже, лише в цьому проміжку часу в навантаження виділяється електрична потужність. Чинне значення потужності визначається моментами часу, в яких відбувається відкриття і закриття тиристора, які, у свою чергу, залежать від фазового зсуву між вихідним і керуючим напругами.

Схематичне позначення тиристорів.



Навчальне видання

## **НАПІВПРОВІДНИКОВА ЕЛЕКТРОНІКА**

### **ЧАСТИНА 2**

Конспект лекцій

для студентів спеціальностей

105 – Прикладна фізика та наноматеріали,

172 – Електронні комунікації та радіотехніка

денної форми навчання.

Укладачі: Под'ячий Юрій Іванович

Під'ячий Гліб Юрійович

Відповідальний за випуск  
Роботу до видання рекомендував  
В авторській редакції

План 2024 р, поз. 793.

Підп. до друку 2024 р. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 1,5.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---

Електронне видання