



# Електроніка

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*

## НАПІВПРОВІДНИКИ ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ.

ПРОВІДНИКИ:  $\rho < 10^{-7}$  Ом·м (мідь, алюміній, срібло та ін.);

ДІЕЛЕКТРИКИ:  $\rho > 10^8$  Ом·м (скло, слюда, пластмаси, полістирол та ін.);

НАПІВПРОВІДНИКИ:  $10^{-7} < \rho < 10^8$  Ом·м (*Si, Ge, As, In* и др.).

В якості базових напівпровідникових матеріалів використовуються германій *Ge* та кремній *Si* - елементи IV групи таблиці Менделєєва

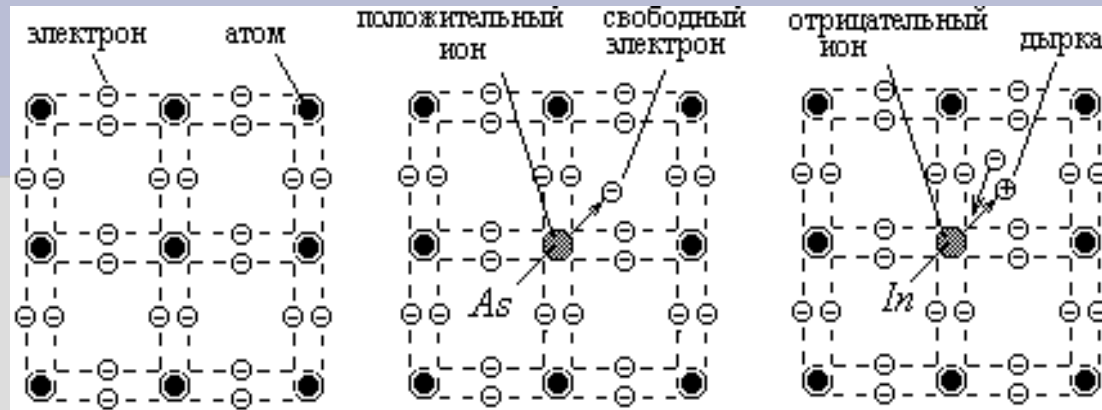
Период	Група				
	III	IV	V	VI	VII
1					
2	B	C	N	O	F
3	Al	Si	P	S	Cl
4	Ga	Ge	As	Se	Br
5	In	Sn	Sb	Te	I
6	Tl	Pb	Bi	Po	At

### Полупроводники

Бор В, углерод С, фосфор Р, сера S, германій Ge, мышьяк А, олово Sn, сурьма Sb, телуриум Те и йод I

Полупроводникові елементи таблиці Менделєєва, бор

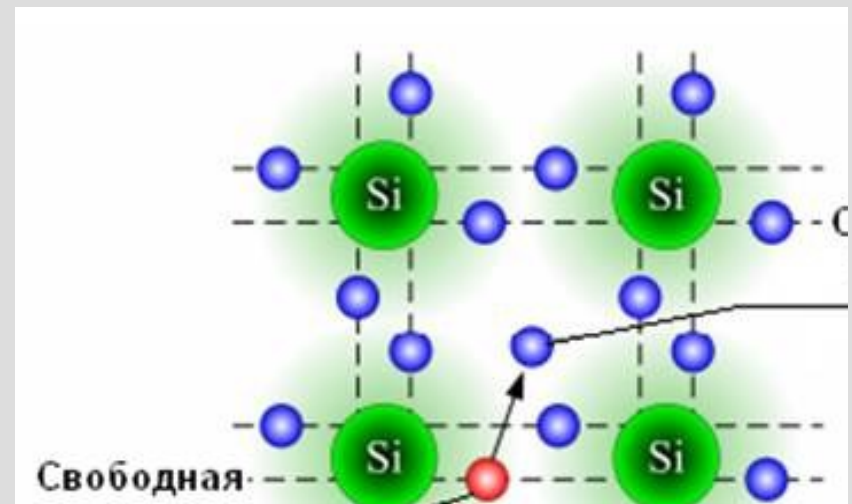
## ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В НАПІВПРОВІДНИКАХ



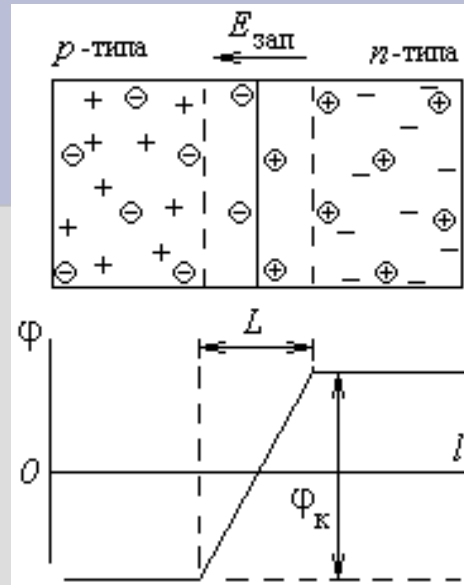
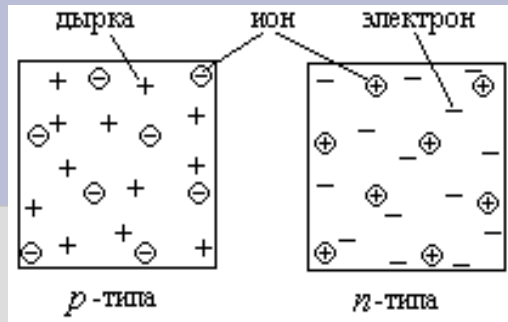
Електропровідність напівпровідника, що обумовлена іонізацією атомів донорною та акцепторною домішками, називається домішковою електропровідністю.

В напівпровіднику з донорною домішкою утворюються позитивні іони, а основним носієм заряду є вільні електрони. Це напівпровідники *n-типу*. В такому напівпровіднику дірки є неосновними носіями заряду.

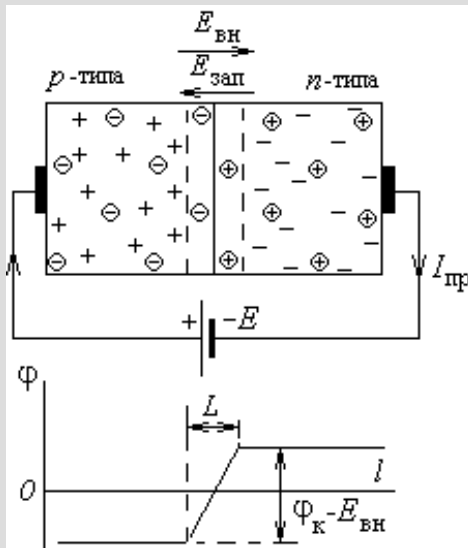
В напівпровіднику з акцепторною домішкою утворюються від'ємні іони, а основними носіями заряду є дірки. Це напівпровідники *p-типу*. В такому напівпровіднику електрони є неосновними носіями заряду



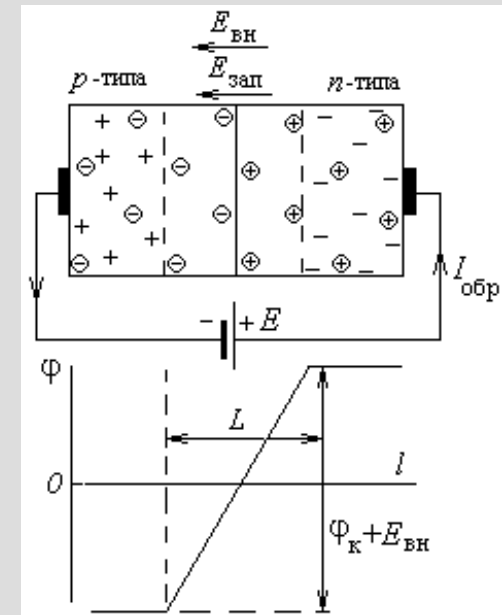
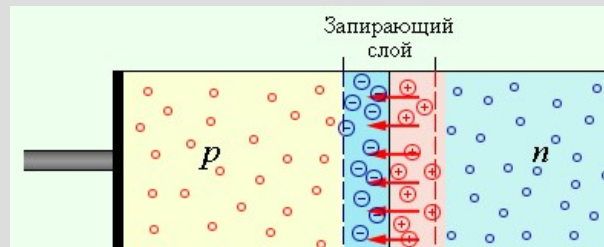
# Електронно-дірочний перехід



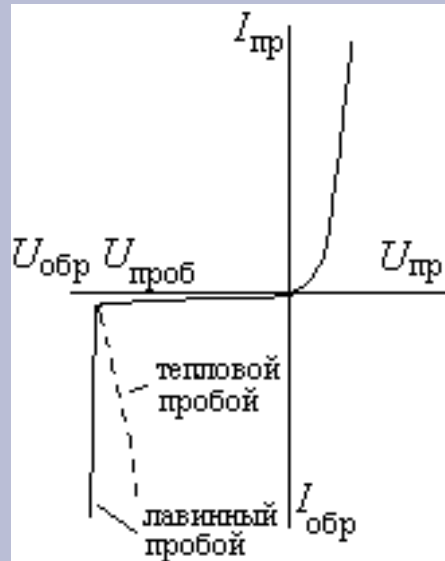
Результуючий струм дорівнює нулю, дрейфовий струм дорівнює дифузійному (якщо зовнішнє коло розімкнене). Виникає контактна різниця потенціалів  $\Phi_K$  ( $\Phi_K = 0,1 \dots 0,8$  В в Ge и Si). Ширина запираючого шару  $L = 0,01 \dots 1,0$  мкм.



включення пряме:  
поле в переході  $E_{рез} = E_{зап} - E_{вн}$   
прямий дифузійний струм  $I_{пр}$



При зворотньому включенні  $E_{рез} = E_{зап} + E_{вн}$ , потенційний бар'єр збільшується:  $\Phi = \Phi_K + E_{вн}$  і його ширина  $L$  збільшується.  
зворотній дрейфовий струм  $I_{обр}$



## Вольт-амперна характеристика р-п-переходу

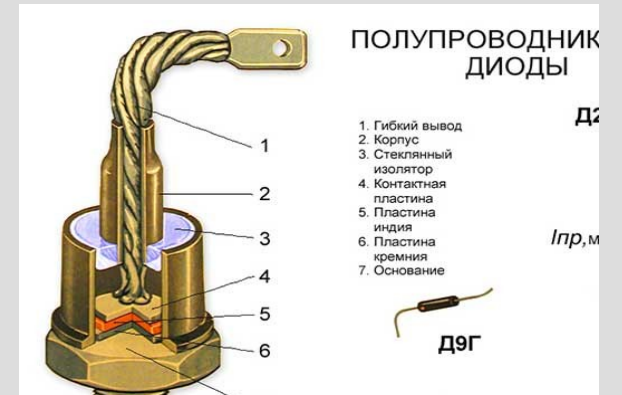
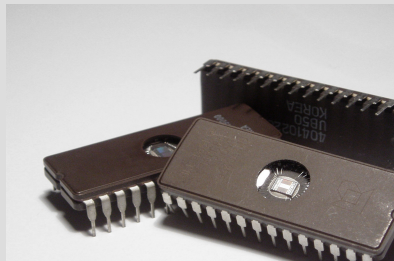
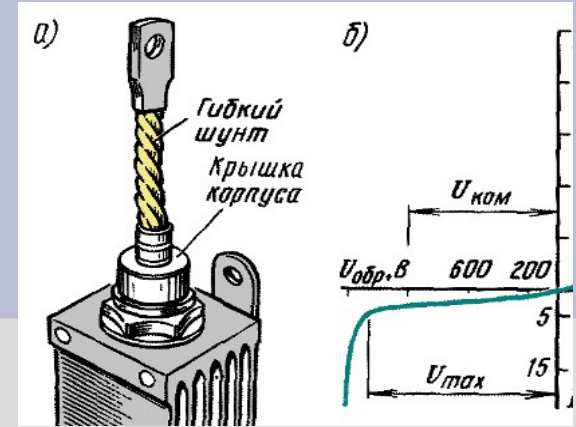
Лавиний (електричний) пробій - неосновні носії заряду з великою енергією ударно іонізують атоми напівпровідника, що призводить до лавиноподібного розмноження носіїв заряду. Він обратимий.

Тепловий пробій - температура напівпровідника збільшується через зворотній струм, що призводить до посилення процесу генерації зарядів. Цей пробій незворотній.

## Класифікація напівпровідникових приладів

№ п/п	Тип приладу	Кількість р-п-переходів	Кількість електродів
1.	Напівпровідникові резистори	0	2
2.	Напівпровідникові діоди	1	2
3.	Біполярні транзистори	2	3
4.	Польові транзистори	1	3
5.	Тиристри	3 і більше	2, 3
6.	Мікросхеми інтегральні	багато	багато

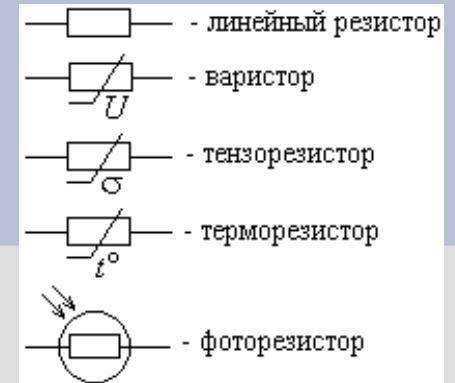
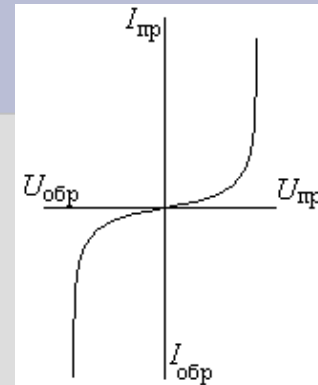




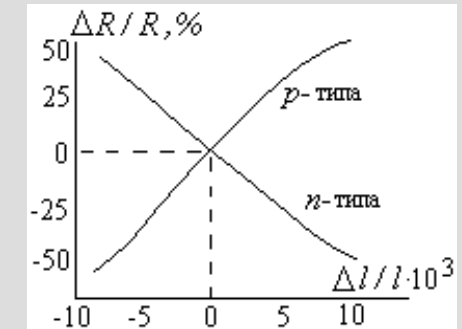
# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Усі ці електричні опори з двома виводами, виготовлені з рівномірно легованих напівпровідникових матеріалів.

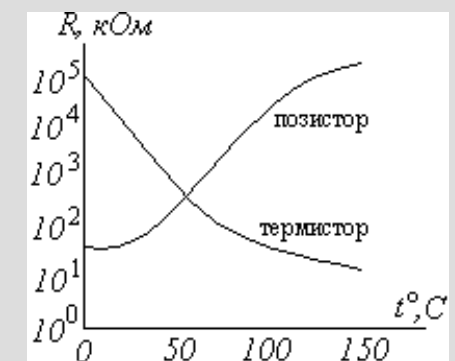
*Лінійний резистор* практично не змінює свій опір у широкому діапазоні напруг й струмів. Такі резистори поширені в інтегральних мікросхемах.  
*Варистор* – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги, його вольт-амперна характеристика нелінійна й симетрична відносно початку



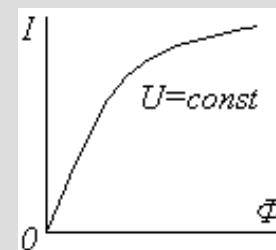
*Тензорезистор* – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від його механічної деформації. Закріплений належним чином на деталях різного роду машин і механізмів тензорезистор дозволяє вимірювати деформацію цих деталей і визначати за допомогою закону Гука механічні напруги в них



*Терморезистор* – це напівпровідниковий резистор, опір якого істотно залежить від температури. Розрізняють два види терморезисторів: *термістор*, опір якого різко зменшується при збільшенні температури, і *позистор*, опір якого різко збільшується при досягненні певного рівня температури (робоча ділянка характеристики).



*Фоторезистор* – це напівпровідниковий резистор, опір якого змінюється залежно від параметрів освітлення. Изготавливают на основе сульфида кадмия, селенида кадмия, сернистого свинца и др.  $\Phi$  - световой поток.



Використовується в різних областях спектру

# НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

Напівпровідниковим діодом називається електронний прилад з двома виводами, між якими розташований кристал з одним  $p-n$  переходом. Для виготовлення напівпровідникових діодів найчастіше використовують кремній (до ) або германій (до ). *Точкові та плоскі діоди.*

## ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ ДИОД

$U_{пр}$  не перевищує 1...2 В.

Густина струму сягає 1...10 А/мм<sup>2</sup>.

$U_{обр}$  до сотнів Вольт.

Допускається  $U_{обр} = (0,7...0,8) U_{проб}$ .

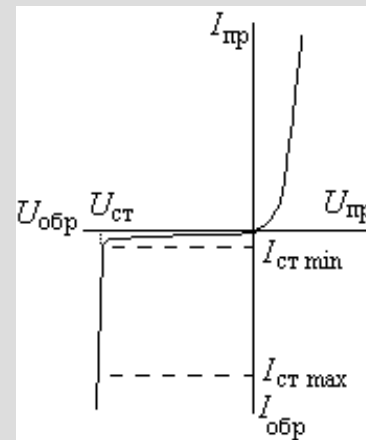
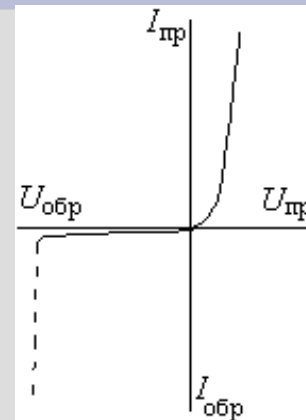
допустима температура:

$T$  до 85...100°C (германієві)

$T$  до 150...200°C (кремнієві)

**НВЧ-ДІОД** - працює при надзвичайно високих частотах.

**СТАБІЛІТРОН** - Напівпровідниковий стабілітрон відрізняється від випрямного діода тим, що його зворотна напруга в зоні електричного пробую мало залежить від значення струму. Тому за його допомогою можна підтримувати стабільну напругу  $U_{ст}$ . Напруга стабілізації  $U_{ст} = 1...1000$  В; Мінімальний струм стабілізації  $I_{ст\ min} = 1...10$  мА; Максимальний струм стабілізації  $I_{ст\ max} = 50...2000$  мА



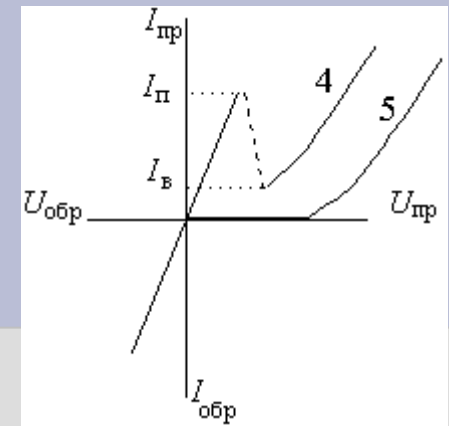
	- выпрямительный диод
	- СВЧ-диод
	- стабилитрон
	- туннельный диод
	- обратный диод
	- варикап
	- фотодиод
	- светодиод
	- оптрон диодный



**ТУНЕЛЬНИЙ ДІОД** - діод, в якому тунельний ефект призводить до появи на ВАХ при прямому включенні від'ємної диференційної провідності

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

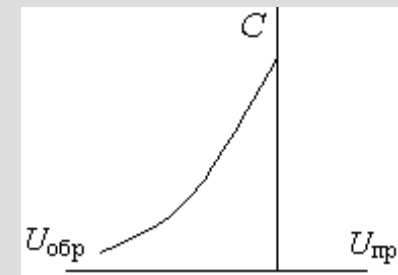
Робоча ділянка – пряма вітка.  $I_{\text{п}}$  – струм пика;  $I_{\text{в}}$  – струм впадини. Застосовується для генераторів високочастотних коливань та швидкодіючих імпульсних перемикачів.



**ОБЕРНЕНИЙ ДІОД** – різновид тунельного діода, у якого струм пика  $I_{\text{п}}=0$ .

Має вентиляльні властивості при малих напругах

**ВАРИКАП** – це напівпровідниковий діод, у якому ємність залежить від зворотної напруги. Тому він використовується як елемент з електрично керованою ємністю.  $C$  – ємність варикапа.

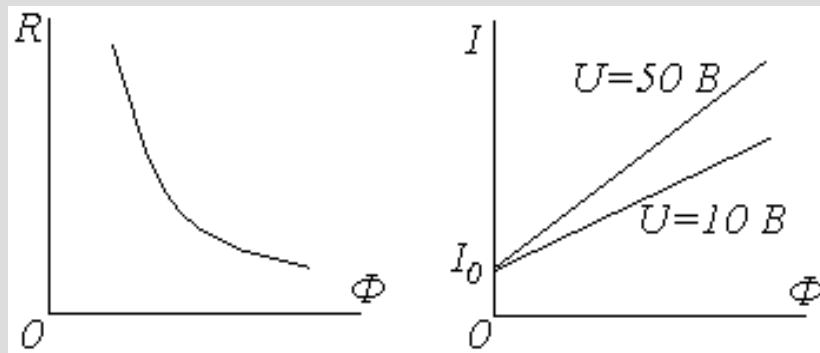


**Фото- і світло діоди** засновані на взаємодії оптичного випромінювання (видимого, інфрачервоного або ультрафіолетового) з носіями електричного заряду в  $p-n$  переході.

У фотодіоді внаслідок освітлення збільшується зворотний струм.

У світлодіоді при проходженні прямого струму виникає інфрачервоне або видиме випромінювання.

**ФОТОДІОД** – это фотогальванический приемник випромінювання без внутрішнього посилення

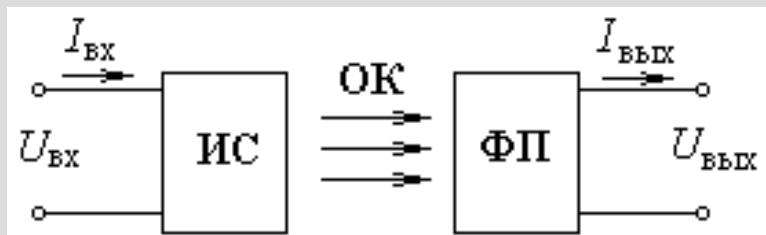


$I_0$  – темной ток

**СВЕТЛОДИОД** – це світловипромінюючий діод, який перетворює електроенергію на енергію некогерентного світлового випромінювання. Найбільш поширені світлодіоди, що випромінюють у видимій частині спектру: жовте, червоне та зелене світло.

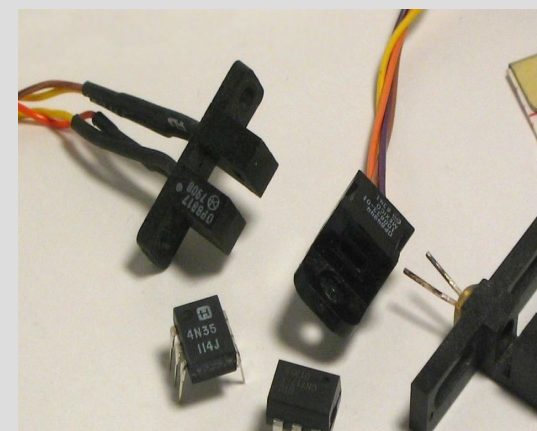
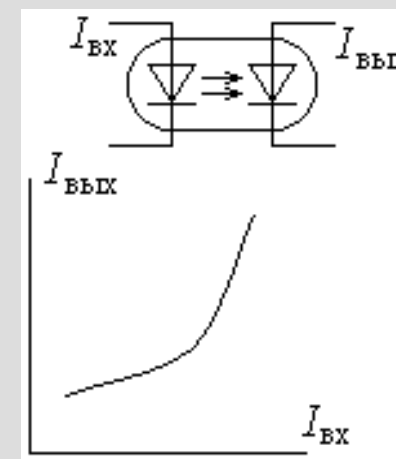
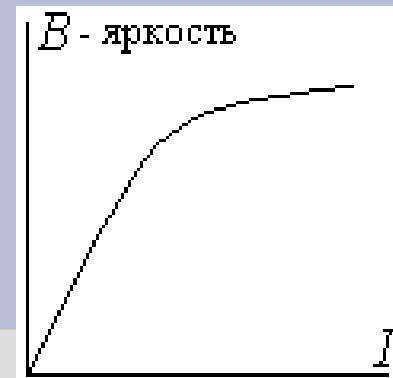
**ОПТРОН** или оптопара – це оптоелектричний напівпровідниковий прилад, що містить випромінювальний та фотоприймальний елементи, між якими є оптичний зв'язок та забезпечена електрична ізоляція.

### Структурна схема оптопари



У джерелі світлового випромінювання (ІВ) енергія електричного сигналу перетворюється на світлове випромінювання. Світлове випромінювання через оптичний канал (ОК) надходить на фотоприймач (ФП), у якому перетворюється на електроенергію.

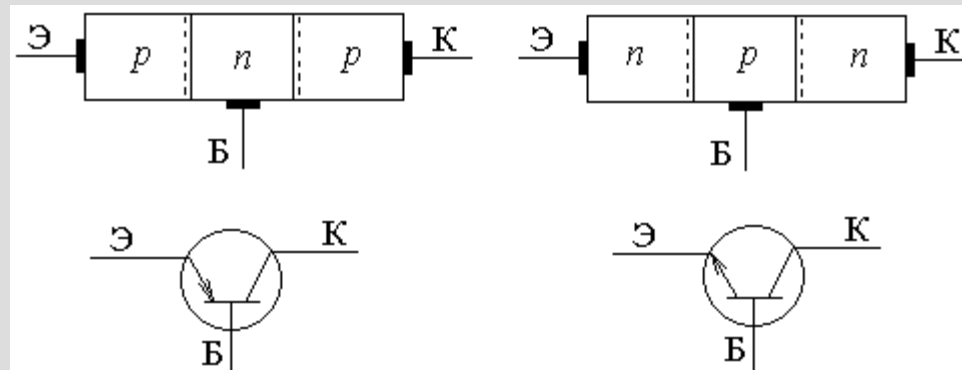
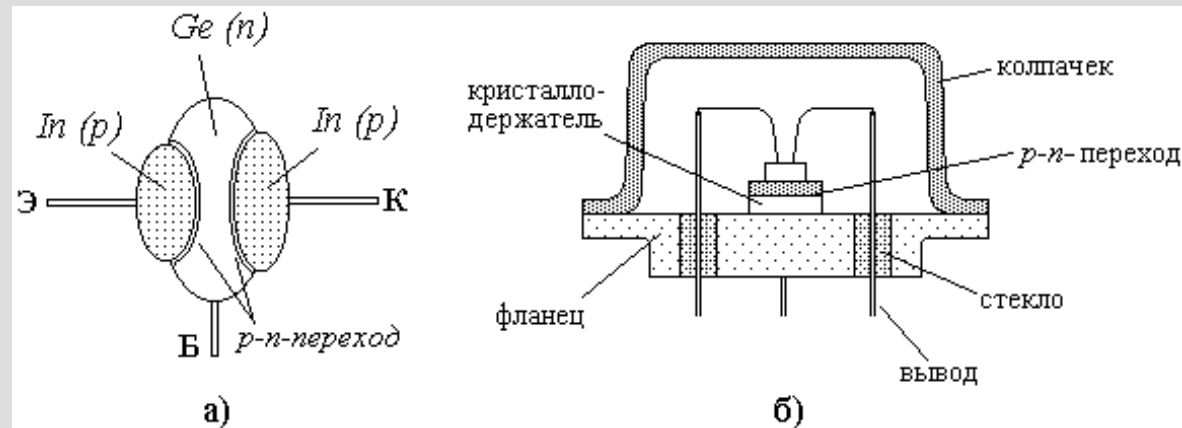
Як фотоприймач (ФП) в оптопарах застосовуються фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори та фототиристри. Залежно від типу ФП розрізняють резисторні, діодні, транзисторні та тиристорні оптопари



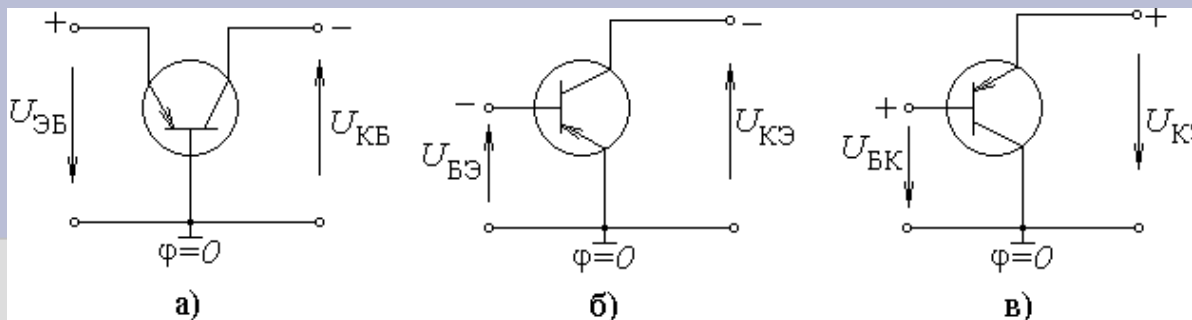


## БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистор із двома р-п-переходами називається біполярним. «Бі» - два типи носіїв заряду – електрони та дірки.



## Схеми включення транзистора



## Режими роботи біполярного транзистора

Активний режим – на емітерний перехід подається пряма напруга, але в колекторний перехід – зворотне.

$$R_э \ll R_к, \quad I_э \approx I_к, \text{ то } U_э = I_э R_э \ll U_к = I_к R_к$$

$$\text{потужності: } P_э = I_э^2 R_э \ll P_к = I_к^2 R_к \quad P_{вх} = P_э \ll P_{вих} = P_к$$

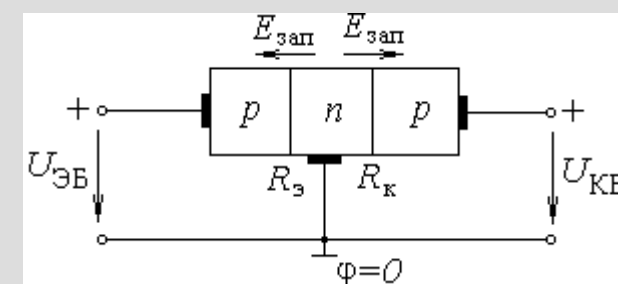
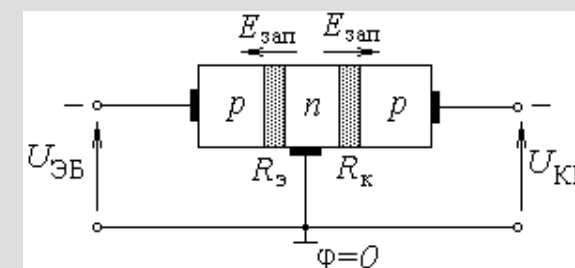
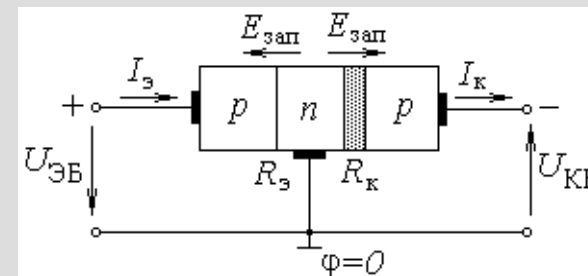
Активний режим використовується в підсилювальних пристроях

Режим відсічення – до обох переходів підводяться зворотні напруги. Струм через них дуже малий і обумовлений лише неосновними носіями.

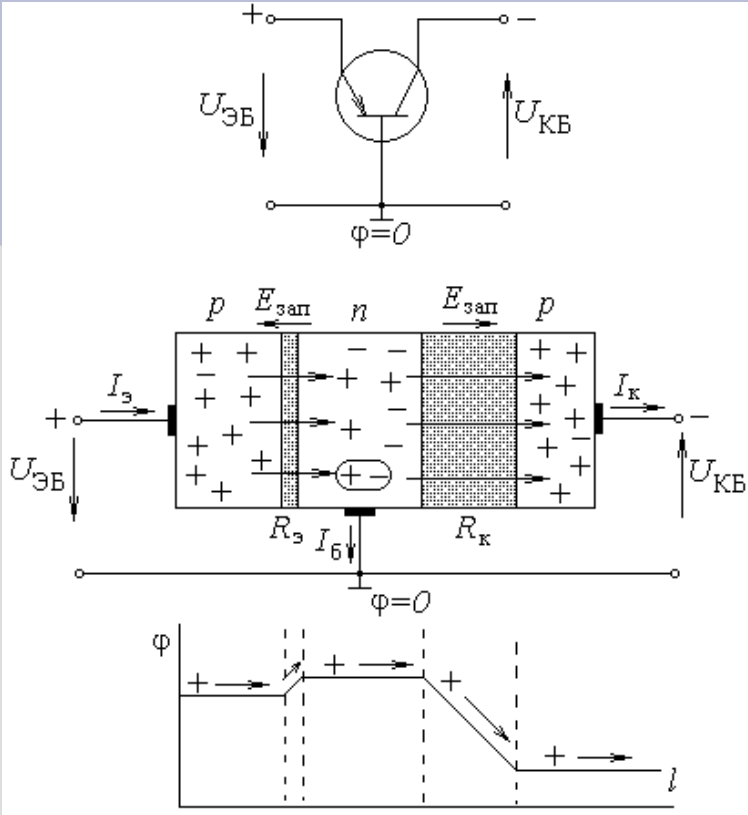
Режим відсікання використовується у ключових режимах: стан «Закрито» або «Вимкнено».

Режим насичення – до обох переходів підводиться пряма напруга. Струм у вихідний ланцюг транзистора максимальний і практично не регулюється струмом вхідного кола. Транзистор повністю відкрито.

Режим насичення використовується у ключових режимах: стан "Увімкнено" або "Відкрито".



# Принцип дії біполярного транзистора



Біполярний транзистор зі структурою р-п-р на постійному струмі, включений за схемою ПРО в активному режимі

Коефіцієнт передачі струму

$$\alpha = \frac{\partial I_K}{\partial I_Э} \approx \left( \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э} \right)_{U_{КБ} = const}$$

Так як  $\Delta I_K < \Delta I_Э$  то  $\alpha = 0,9 \dots 0,995$

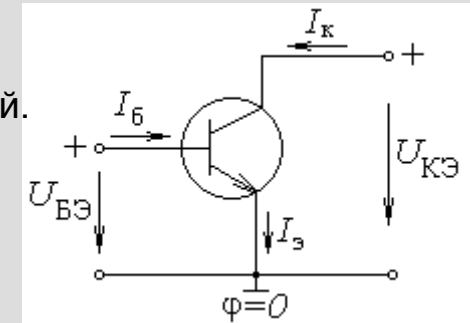
При  $I_Э = 0$  існує початковий колекторний струм  $I_{К0}$  утворений неосновними носіями заряду

$$\text{При } I_Э \neq 0 \quad I_K = I_{К0} + \alpha \cdot I_Э \approx I_Э$$

В схемі з СБ посилення по струму нема, а є тільки посилення по напрузі.

Основною для підсилювачів є схема з СЕ.  
(транзистор п-р-п).

Струм бази  $I_Б$  – вхідний;  
Струм колектора  $I_К$  – вихідний.



$$I_Э = I_Б + I_K \quad I_K = I_{К0} + \alpha \cdot I_Э \quad I_Б = I_Э - I_K = I_Э - I_{К0} - \alpha I_Э = I_Э(1 - \alpha) - I_{К0} \ll I_Э \approx I_K$$

Так як  $\alpha = 0,9 \dots 0,995$ , то  $I_Б \ll I_K$  Мала величина вхідного (керуючого) струму  $I_Б$  і обумовила широке застосування схеми с СЕ.

Коефіцієнт передачі струму бази (прирощення струмів вхідного і вихідного кіл):

$$\beta \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б - \Delta I_K} = \frac{\frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э}}{1 - \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\beta = \left. \frac{\partial I_K}{\partial I_Б} \right|_{U_{КЭ} = const} \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Б} \quad \Delta I_Б = \Delta I_Э - \Delta I_K$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \beta = 50 \dots 100 \text{ і вище}$$

# Підсилювальні властивості біполярних транзисторів

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вх}}} \quad K_U = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}} \quad K_P = K_I K_U \quad R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{вх}}}$$

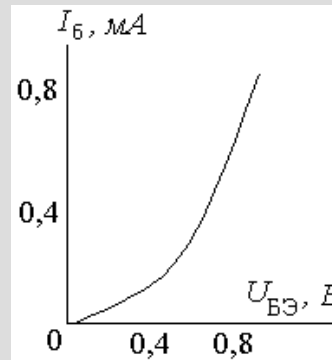
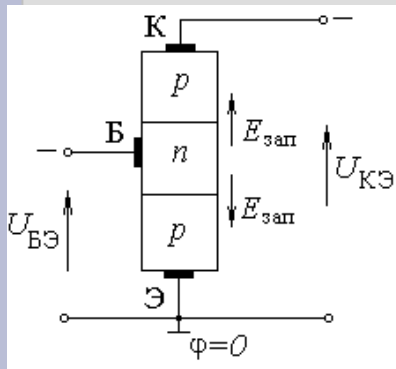
В активному режимі підсилювальні показники

Схема включення	$R_{\text{вх}}, \text{Ом}$	$K_I$	$K_U$	$K_P$
ОБ	Единиці – десятки	1	До 1000	До 1000
ОЭ	Сотни	10...100	100	До 10000
ОК	Десятки тисяч	10...100	1	До 100

## Статичні характеристики біполярного транзистора з СЕ

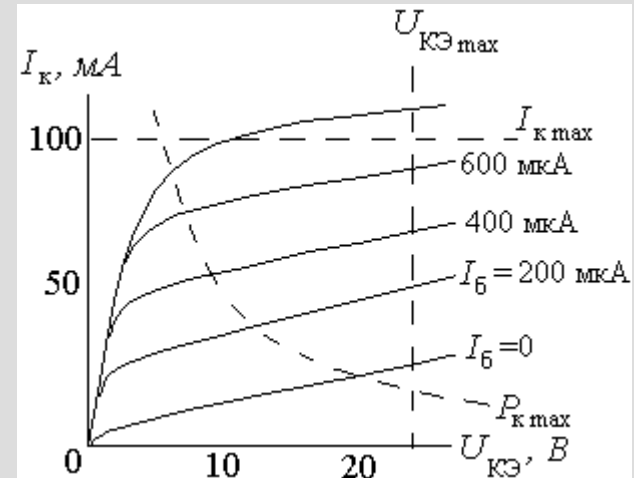
### ВХІДНА ХАРАКТЕРИСТИКА

$$I_B(U_{BЭ}) / \text{при } U_{KЭ} = \text{const}$$



### ВИХОДНА ХАРАКТЕРИСТИКА

(сімейство):



Обмеження по навантаженню

$I_K \approx I_Э \leq I_{K \text{ max}}$  - перегрів відкритого емітерного переходу

$U_{KЭ} \leq U_{KЭ \text{ max}}$  - пробій закритого колекторного переходу

$P_K = I_K U_K \leq P_{K \text{ max}}$  - перегрів закритого колекторного переходу

$$|U_{KЭ}| < |U_{BЭ}|$$

$$|U_{KЭ}| > |U_{BЭ}|$$

## ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ

Польовий транзистор – це напівпровідниковий прилад, підсилювальні властивості якого обумовлені потоком основних носіїв заряду одного знака, що протікає через провідний канал, і який управляється електричним полем.

В польовому транзисторі є:

КАНАЛ – це область транзисторі, опір якої залежить від потенціалу на затворі.

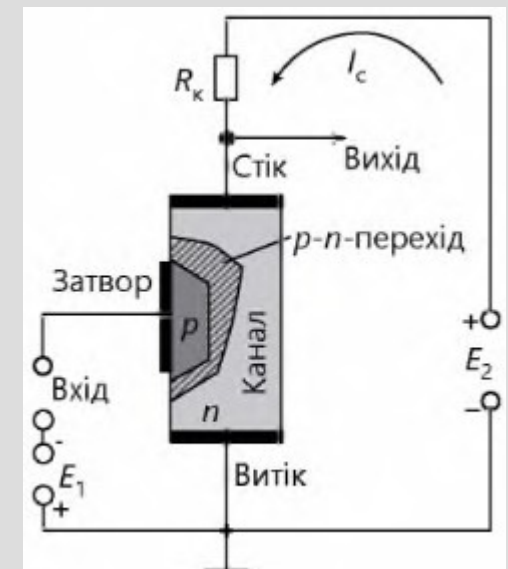
ЗАТВОР (З) – електрод, який служить для регулювання поперечного перерізу каналу.

ДЖЕРЕЛО (I) – електрод, з якого в канал входять основні носії заряду.

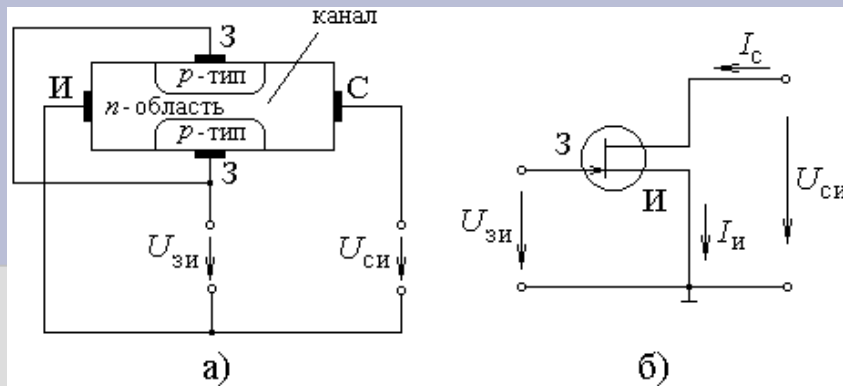
СТІК (С) – електрод, через який основні носії заряду йдуть з каналу.

Польові транзистори поділяються на транзистори з каналами *n*- та *p*-типів. За способом ізоляції затвора польові транзистори поділяються на: транзистори з керуючим *p-n*-переходом та транзистори з ізольованим затвором.

Тип затвора	Канал	Условное обозначение
<i>p-n</i> -переход	<i>n</i> -типа	
	<i>p</i> -типа	
Изолированный	<i>n</i> -типа	
	<i>p</i> -типа	



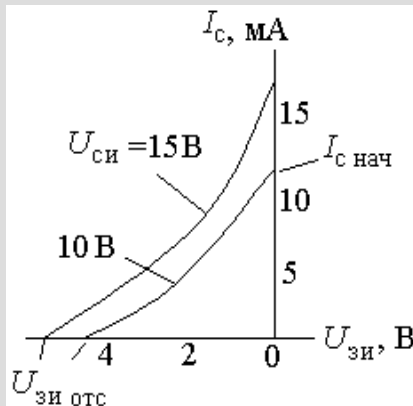
## Польовий транзистор із затвором у вигляді р-п-перехода



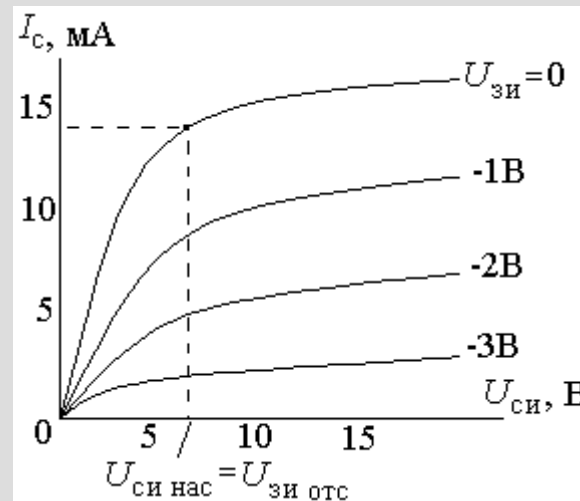
Структурна схема (а) та схема включення (б) польового транзистора з каналом n-типу та затвором у вигляді р-п-переходу.

### Вольт-амперні характеристики

СТОК-ЗАТВОРНА (ПЕРЕХІДНАЯ характеристика: I(Uзи)Uси=const I(ВЫХОДНЫЕ) характеристики: I(Uси)Uзи=const



$U_{зи\ отс}$  – напруга затвора, при якій канал повністю перекривається.  
 $I_{с\ нач}$  при  $U_{зи} = 0$  – початковий струм стока.



На початковій ділянці:

$$U_{си} + |U_{зи}| < U_{зан}$$

При підвищенні напруги  $U_{си}$

$$U_{си} + |U_{зи}| = U_{зан}$$

При подальшому збільшенні напруги  $U_{си}$  відбувається пробій р-п-переходу між затвором та каналом

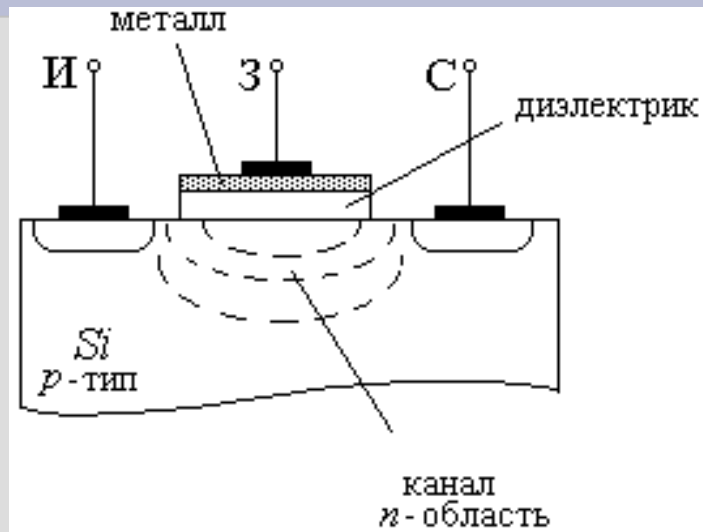
При  $U_{зи} = 0$  товщина каналу найбільша та його опір мінімально.

Якщо на затвор подати по відношенню до початку негативну напругу  $U_{зи} < 0$ , то р-п-переходи розширюються, товщина каналу зменшиться, а його опір зросте.

Якщо включити джерело  $U_{си}$ , то силою струму стоку  $I_c$ , що протікає через канал, можна керувати шляхом напруги  $U_{зи}$ , що подається на затвор.

## Польовий транзистор з ізолюваним затвором

Польовий транзистор з ізолюваним затвором - це напівпровідниковий прилад, в якому для зменшення струму витoku затвора між металевим затвором і каналом знаходиться тонкий шар діелектрика (зазвичай окис кремнію). Ці транзистори називають МОП-транзистори (метал - оксид - напівпровідник) або МДП-транзистори (метал - діелектрик - напівпровідник).



Залежно від полярності напруги  $U_{зі}$  канал може збіднюватись або збагачуватись носіями заряду (електронами).

При негативному напрузі  $U_{зі} < 0$  електрони провідності виштовхуються з області каналу обсяг напівпровідника, канал збіднюється носіями заряду і струм стоку  $I_c$  зменшується.

При позитивному напрузі  $U_{зі} > 0$  електрони провідності втягуються канал з напівпровідника. Відбувається збагачення каналу, струм стоку  $I_c$  зростає.

ВАХ цих польових транзисторів аналогічні

## IGBT-транзистори

Польовий транзистор індукційного типу в парі з біполярним дає можливість створювати у вигляді інтегральних мікросхем монолітні транзисторні збірки, параметри яких є не нижчими за параметри потужних діодів і тиристорів. Ці транзисторні збірки мають назву транзисторів типу *IGBT* (біполярні транзистори з ізольованим затвором), їхні параметри досягають за напругою – 6000 В (60-й клас), за струмом – 3000 А.

У таблиці наведені параметри польових транзисторів і транзисторних збірок.

Тип транзистора	Параметри		
	$U_{CB \max}$ , В	$I_{C \max}$ , А	$I_3$ , мкА
З керованим <i>p-n</i> переходом	5...100	$10^{-2}$ ...1,0	$10^{-3}$ ... $10^{-2}$
З ізольованим затвором	10...1000	$10^{-4}$ ...5,0	$10^{-9}$ ... $10^{-4}$
З індуктованим каналом	50...1000	$10^{-4}$ ...1,0	0
Транзисторні збірки (типу <i>IGBT</i> )	1000...6000	100...3000	$10^{-4}$ ... $10^{-1}$

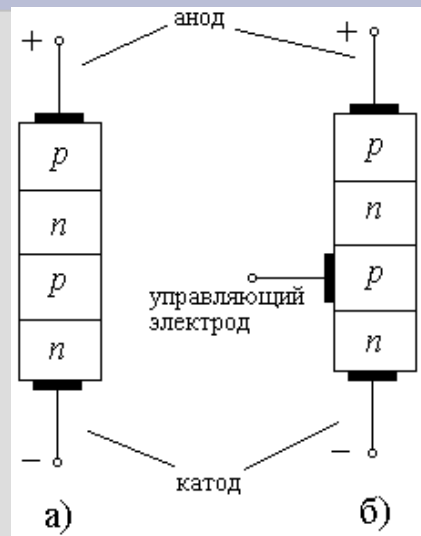
За рахунок того, що польові транзистори управляються полем (величиною напруги прикладеного до затвора), а не струмом, що протікає через базу (як у біполярних транзисторах), польові транзистори споживають значно менше енергії, що особливо актуально в схемах пристроїв, що чекають і стежать, а також у схемах малого споживання та енергозбереження (реалізація сплячих режимів).

Так, наручний електронний годинник і пульт дистанційного керування для телевізора можуть працювати кілька років від одного мініатюрного джерела живлення.

Застосування в радіопристроях, де успішно замінюють біполярні. Їх застосування в радіопередаючих пристроях дозволяє збільшити частоту несучого сигналу, забезпечуючи такі пристрої високою стійкістю до перешкод. Маючи низький опір в відкритому стані, знаходять

# ТИРИСТОРИ

Тиристором називають напівпровідниковий прилад з двома стійкими станами, який має 3 і більше р-n-переходів, у вольт-амперній характеристиці якого є ділянка негативного диференціального опору і який може перемикатися із закритого стану у відкритий та навпаки  $-\frac{\Delta U}{\Delta I}$



Тиристори з двома висновками називають диністорами (а), і з трьома – триністорами (б).

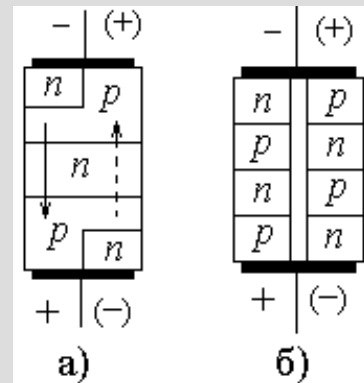
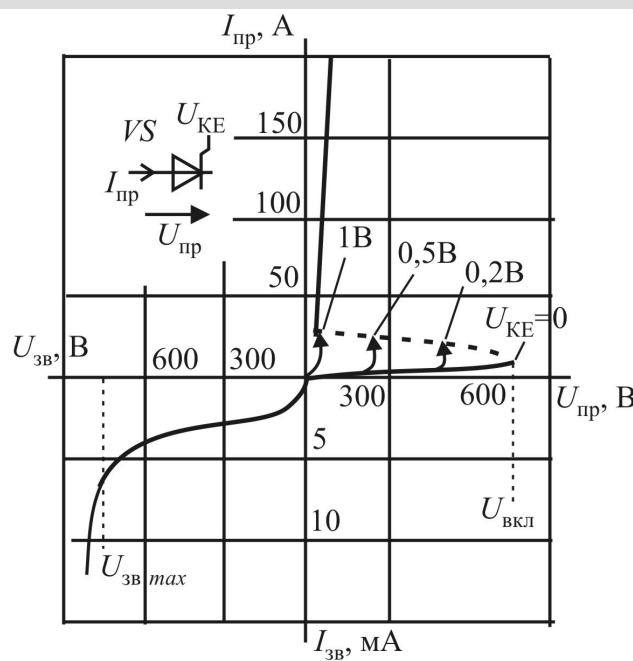
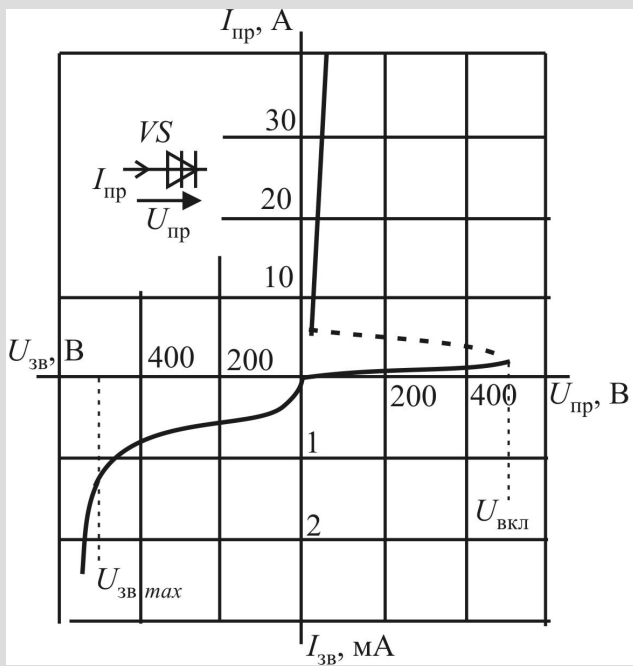
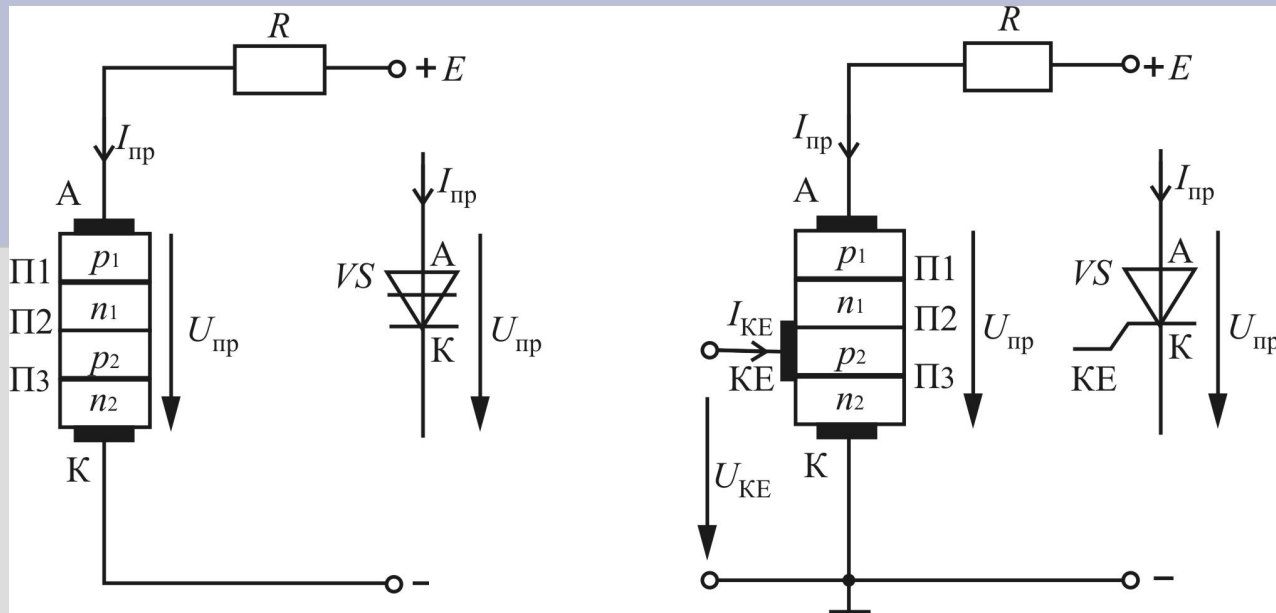
Електрод, з'єднаний із зовнішньою n-областю, називається КАТОДОМ, а електрод з'єднаний у зовнішній р-областю - АНОД.

## Умовні позначення тиристорів

Обозначение	Название
	- Динистор
	- Симметричный динистор (диак)
	- Тринистор с управлением по аноду (вывод ближе к аноду)
	- Тринистор с управлением по катоду (вывод ближе к катоду)
	- Запираемый анодный тринистор
	- Запираемый катодный тринистор
	- Симметричный тринистор (симистор)



# Принцип дії і характеристики тиристора



***Thanks for your attention***