



Електроніка

Напівпровідникові прилади

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

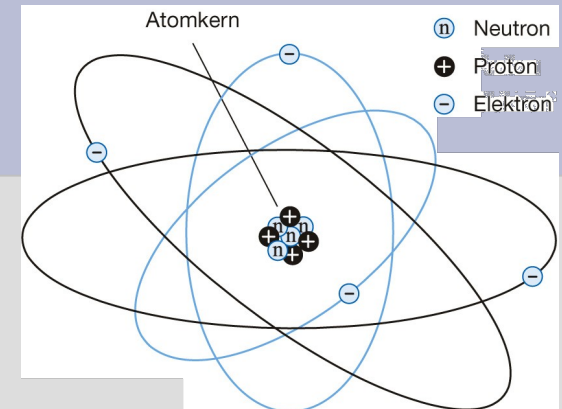
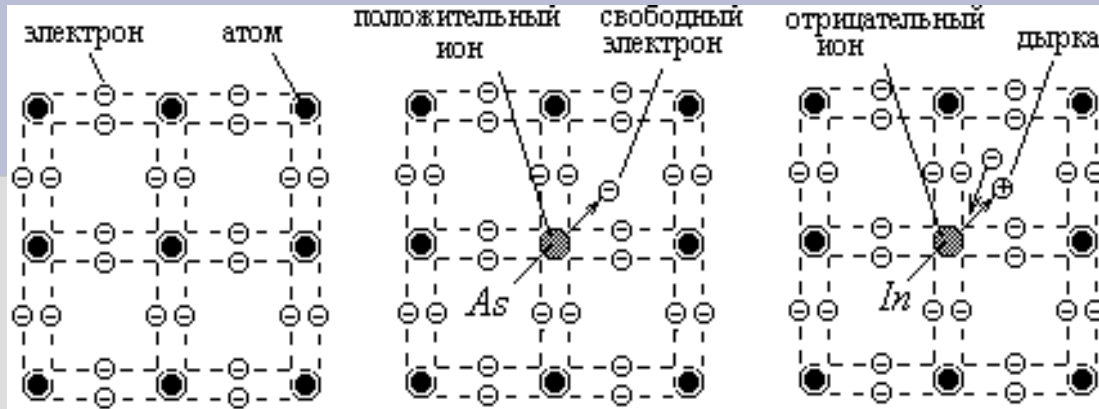
Период	Група				
	III	IV	V	VI	VII
1					
2	B	C	N	O	F
3	Al	Si	P	S	Cl
4	Ga	Ge	As	Se	Br
5	In	Sn	Sb	Te	I
6	Tl	Pb	Bi	Po	At

Полупроводники

Бор B, углерод C, фосфор P, сера S, германій Ge, мышьяк As, селен Se, олово Sn, сурьма Sb, телур Te и йод I

Полупроводникові елементи таблиці Менделєєва, бор B, вуглець C, фосфор P, сера S, германій Ge, мышьяк As, селен Se, олово Sn, сурьма Sb, телур Te, йод I.

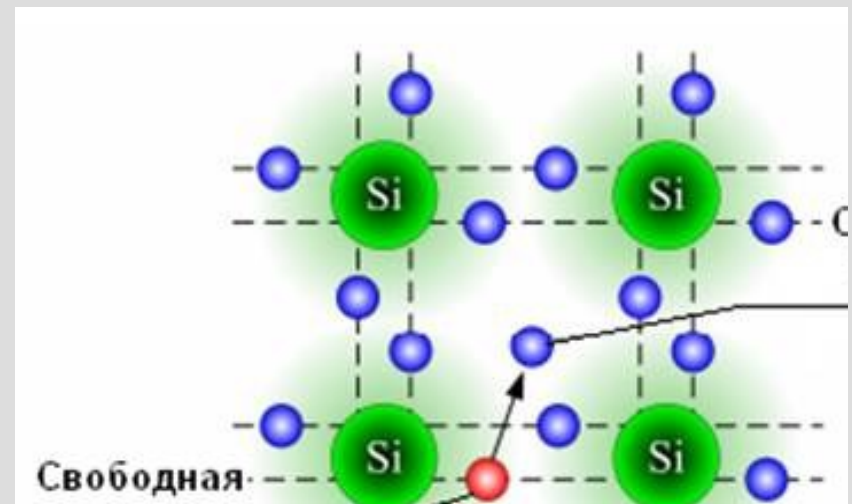
ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В НАПІВПРОВІДНИКАХ



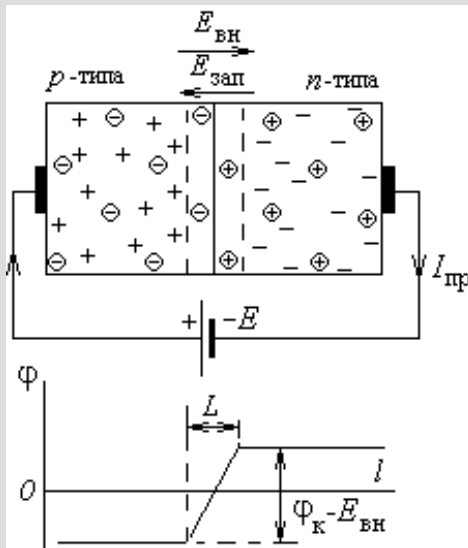
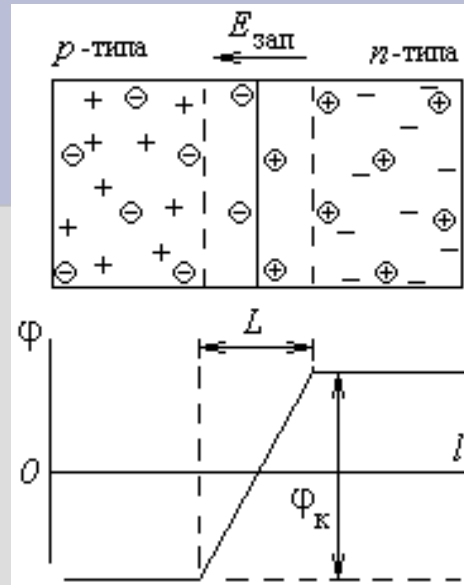
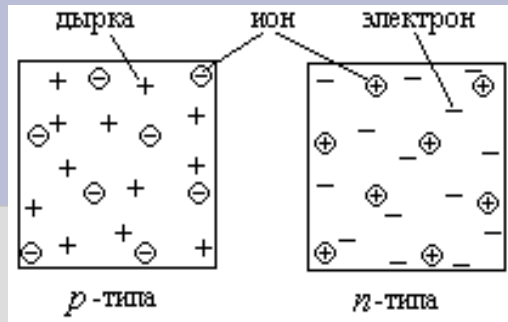
Електропровідність напівпровідника, що обумовлена іонізацією атомів донорною та акцепторною домішками, називається домішковою електропровідністю.

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.

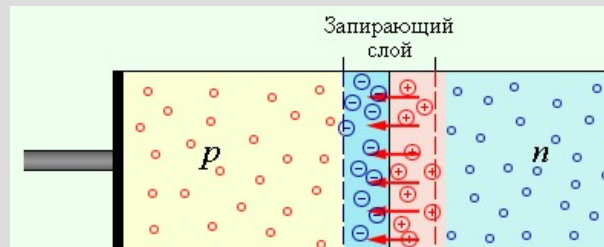
В напівпровіднику з акцепторною домішкою утворюються віжемні іони, а основними носіями заряду є дірки. Це напівпровідники *p-типу*. В такому напівпровіднику електрони є неосновними носіями заряду



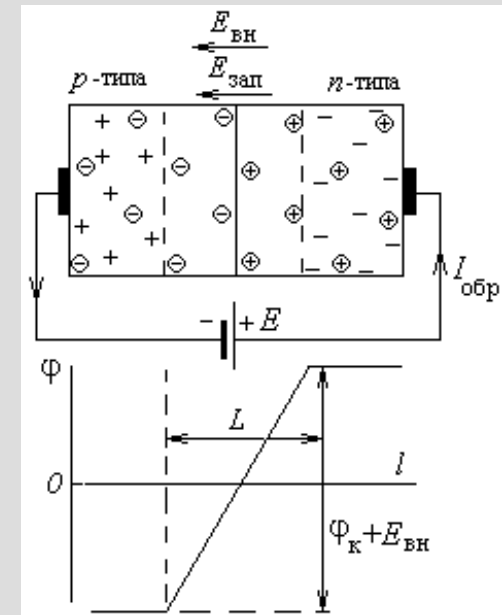
Електронно-дірочний перехід



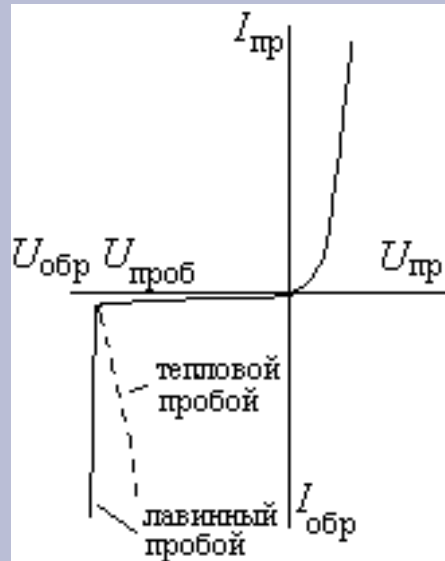
включення пряме:
 поле в переході $E_{рез} = E_{зап} - E_{вн}$
прямий дифузійний струм $I_{пр}$



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



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

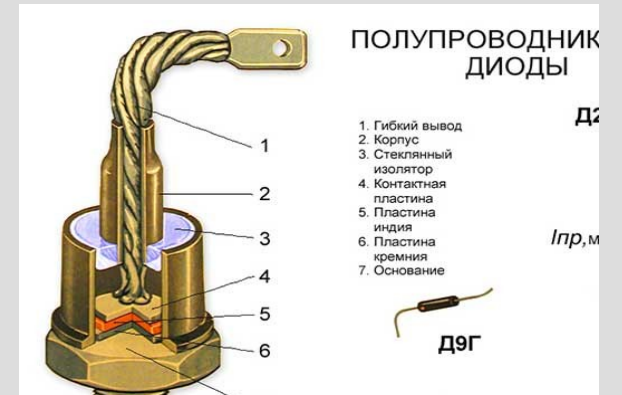
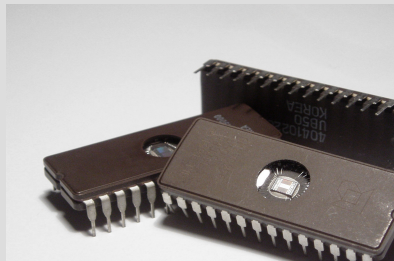
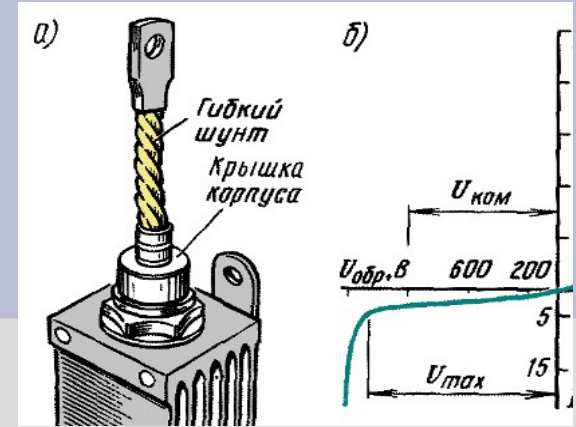
Лавиний (електричний) пробій - неосновні носії заряду з великою енергією ударно іонізують атоми напівпровідника, що призводить до лавиноподібного розмноження носіїв заряду. Він обратимий.

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

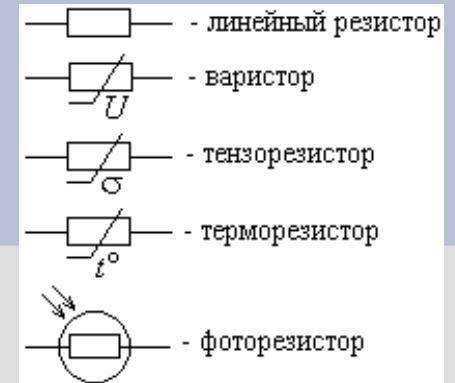
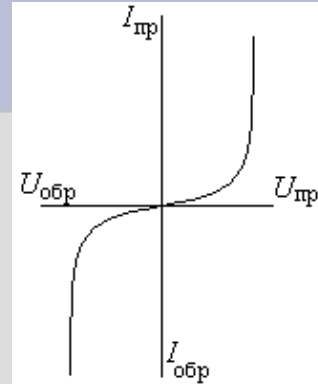




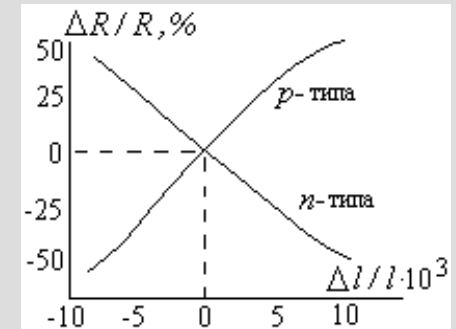
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ

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

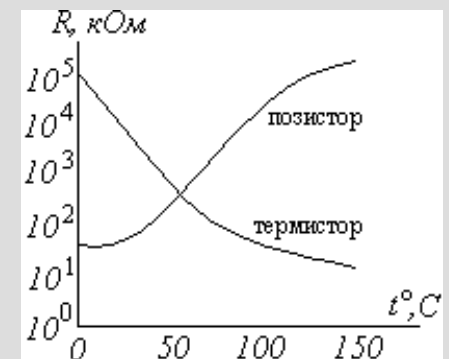
Лінійний резистор практично не змінює свій опір у широкому діапазоні напруг й струмів. Такі резистори поширені в інтегральних мікросхемах.
Варистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги, його вольт-амперна характеристика нелінійна й симетрична відносно початку



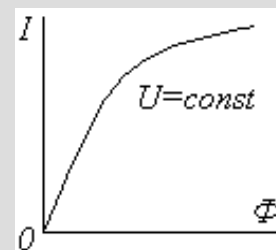
Тензорезистор – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від його механічної деформації. Закріплений належним чином на деталях різного роду машин і механізмів тензорезистор дозволяє вимірювати деформацію цих деталей і визначати за допомогою закону Гука механічні напруги в них



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. Φ - световой поток.



Використовується в різних областях спектру

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

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

ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ ДИОД

$U_{пр}$ не перевищує 1...2 В.

Густина струму сягає 1...10 А/мм².

$U_{обр}$ до сотнів Вольт.

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

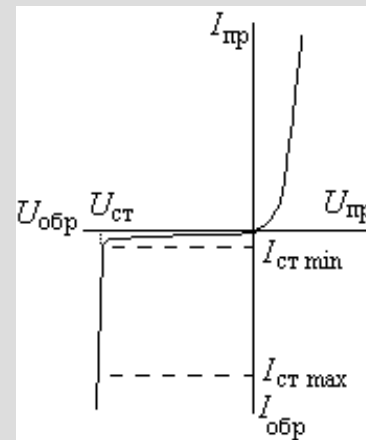
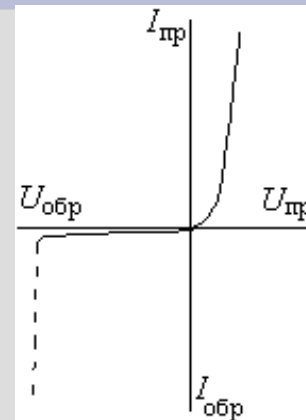
допустима температура:

T до 85...100°C (германієві)

T до 150...200°C (кремнієві)

НВЧ-ДІОД - працює при надзвичайно високих частотах.

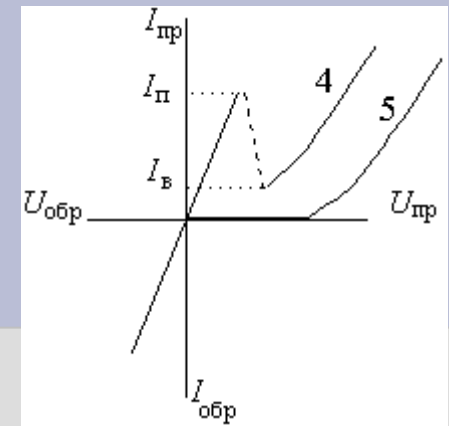
СТАБІЛІТРОН - Напівпровідниковий стабілітрон відрізняється від випрямного діода тим, що його зворотна напруга в зоні електричного пробую мало залежить від значення струму. Тому за його допомогою можна підтримувати стабільну напругу $U_{ст}$. Напруга стабілізації $U_{ст} = 1...1000$ В; Мінімальний струм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



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.

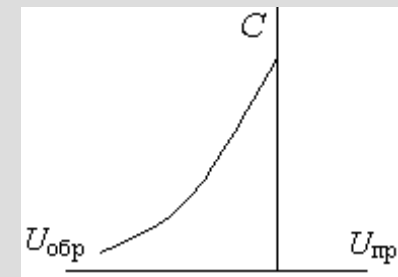
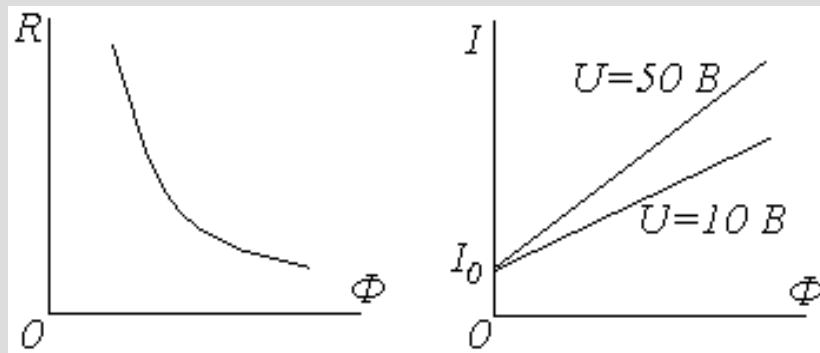


Фото- і світло діоди засновані на взаємодії оптичного випромінювання (видимого, інфрачервоного або ультрафіолетового) з носіями електричного заряду в $p-n$ переході.

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

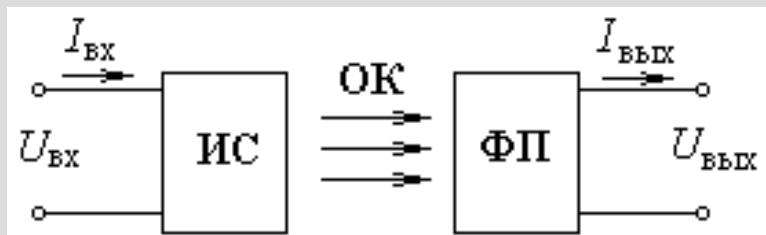


I_0 – темной ток

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.

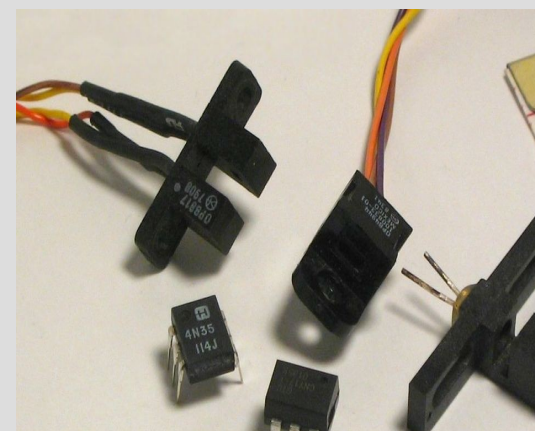
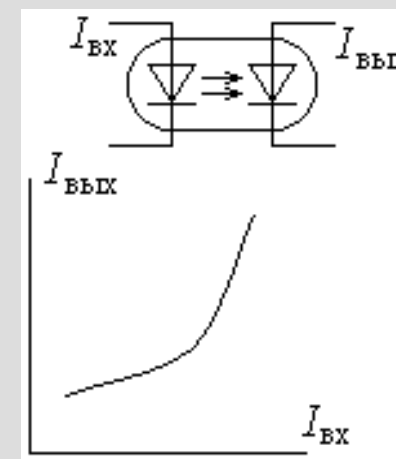
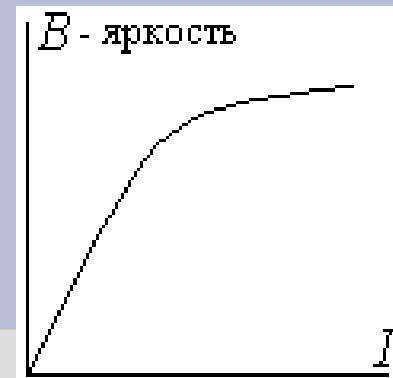
ОПТРОН или оптопара – це оптоелектричний напівпровідниковий прилад, що містить випромінювальний та фотоприймальний елементи, між якими є оптичний зв'язок та забезпечена електрична ізоляція.

Структурна схема оптопари



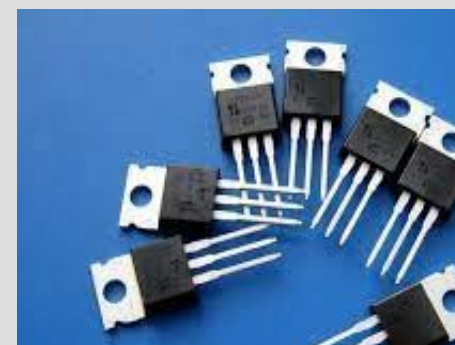
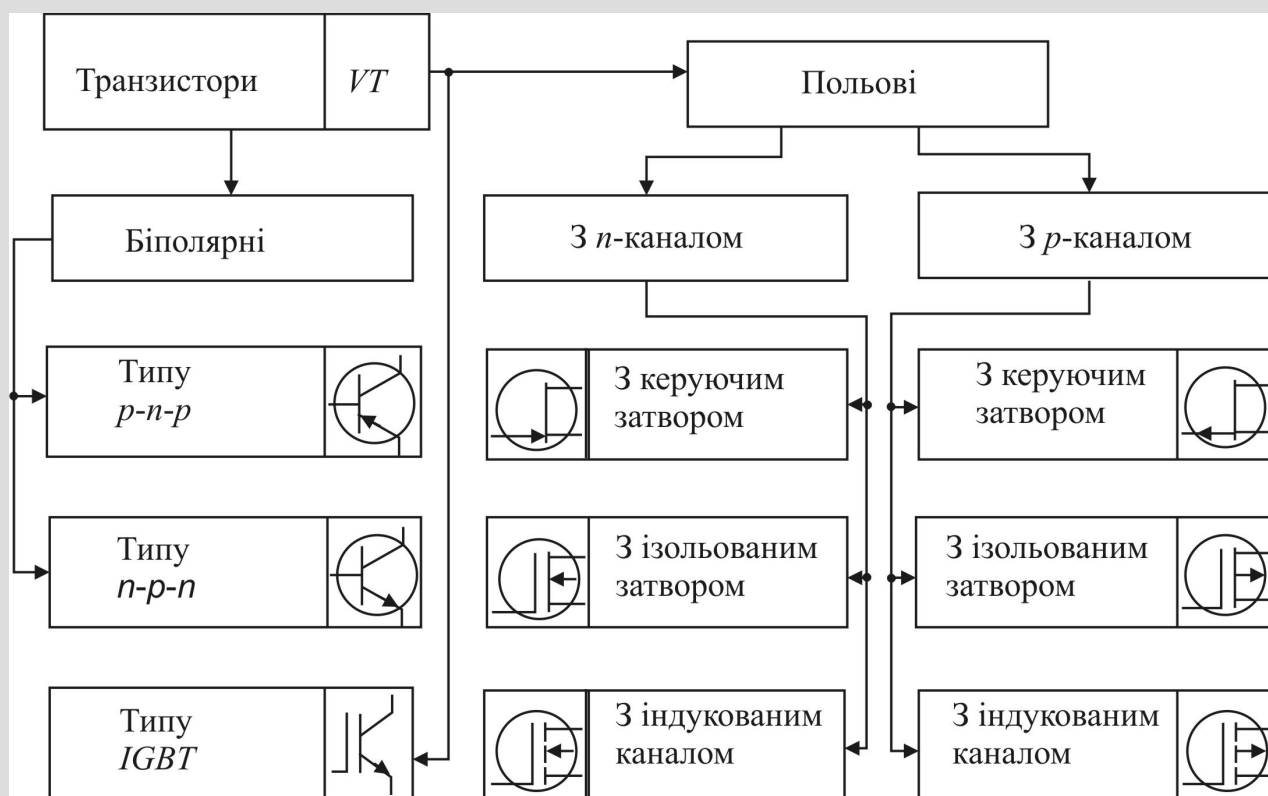
У джерелі світлового випромінювання (ІВ) енергія електричного сигналу перетворюється на світлове випромінювання. Світлове випромінювання через оптичний канал (ОК) надходить на фотоприймач (ФП), у якому перетворюється на електроенергію.

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



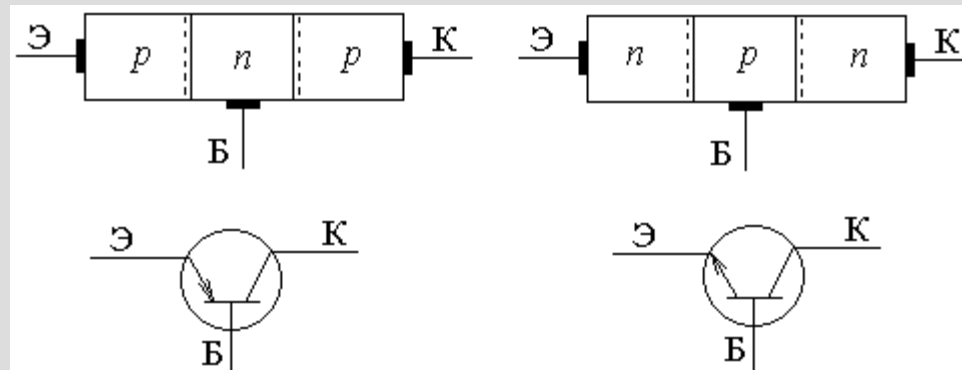
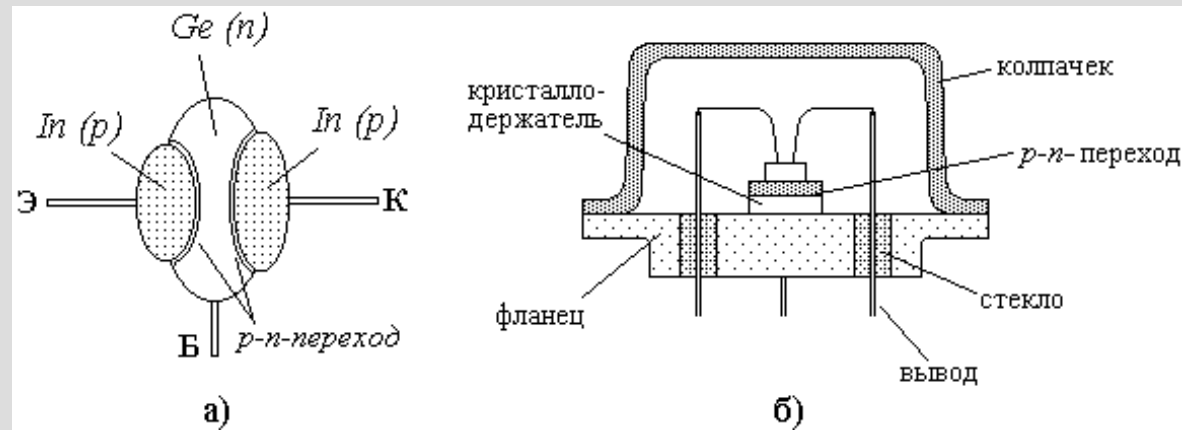
ТРАНЗИСТОРИ

Транзистором називають електроперетворювальний напівпровідниковий прилад з одним або двома взаємодіючими р-п-переходами і трьома висновками, що має підсилювальні властивості.

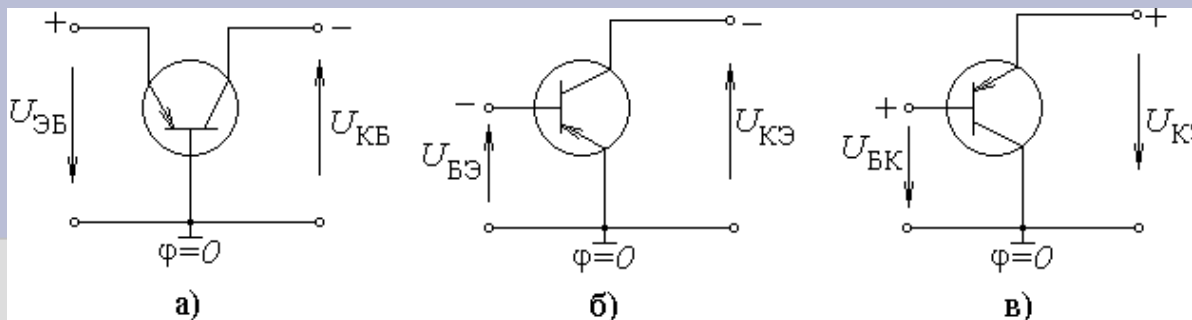


БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

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.

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

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

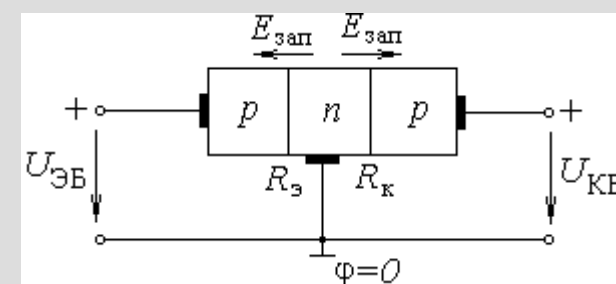
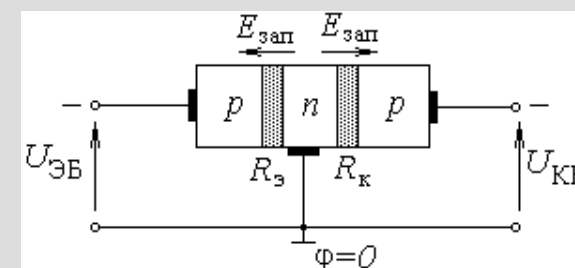
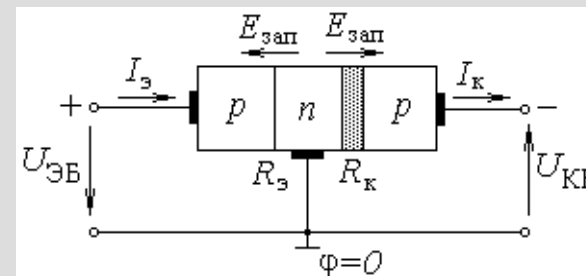
Активний режим використовується в підсилювальних пристроях

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

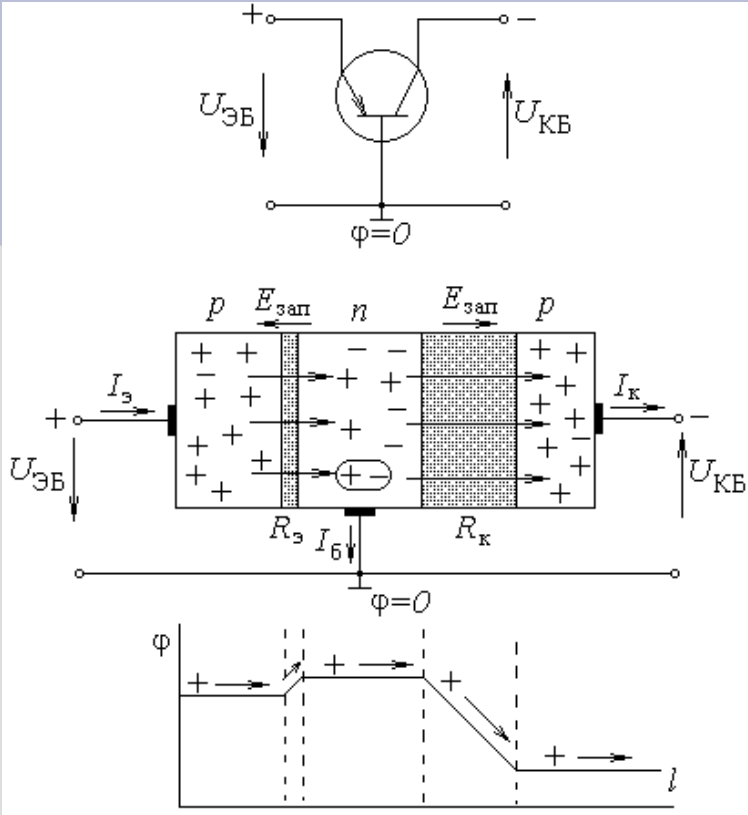
Режим відсікання використовується у ключових режимах: стан «Закрито» або «Вимкнено».

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

$$\alpha = \frac{\partial I_{\text{к}}}{\partial I_{\text{э}}} \approx \left(\frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}} \right)_{U_{\text{КБ}} = \text{const}}$$

Так як $\Delta I_{\text{к}} < \Delta I_{\text{э}}$ то $\alpha = 0,9 \dots 0,995$

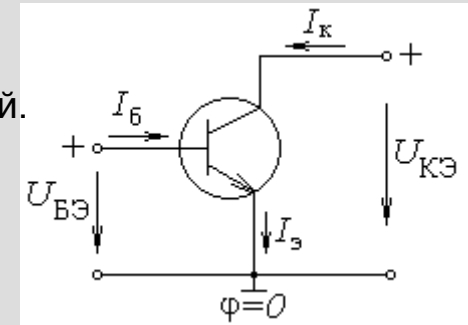
При $I_{\text{э}} = 0$ існує початковий колекторний струм $I_{\text{к}0}$ утворений неосновними носіями заряду

$$\text{При } I_{\text{э}} \neq 0 \quad I_{\text{к}} = I_{\text{к}0} + \alpha \cdot I_{\text{э}} \approx I_{\text{э}}$$

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 $I_{\text{б}}$ – вхідний;
Струм колектора $I_{\text{к}}$ – вихідний.



$$I_{\text{э}} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}} \quad I_{\text{к}} = I_{\text{к}0} + \alpha \cdot I_{\text{э}} \quad I_{\text{б}} = I_{\text{э}} - I_{\text{к}} = I_{\text{э}} - I_{\text{к}0} - \alpha I_{\text{э}} = I_{\text{э}}(1 - \alpha) - I_{\text{к}0} \ll I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}$$

Так як $\alpha = 0,9 \dots 0,995$, то $I_{\text{б}} \ll I_{\text{к}}$ Мала величина вхідного (керуючого) струму $I_{\text{б}}$ і обумовила широке застосування схеми с СЕ.

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

$$\beta \approx \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}} - \Delta I_{\text{к}}} = \frac{\frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}}}{1 - \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$\beta = \left. \frac{\partial I_{\text{к}}}{\partial I_{\text{б}}} \right|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}} \approx \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}} \quad \Delta I_{\text{б}} = \Delta I_{\text{э}} - \Delta I_{\text{к}}$$

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

Підсилювальні властивості біполярних транзисторів

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

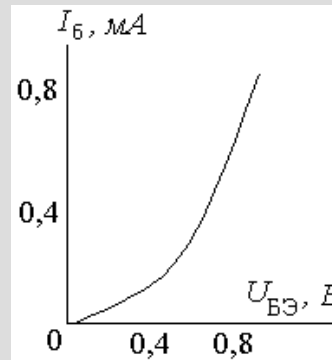
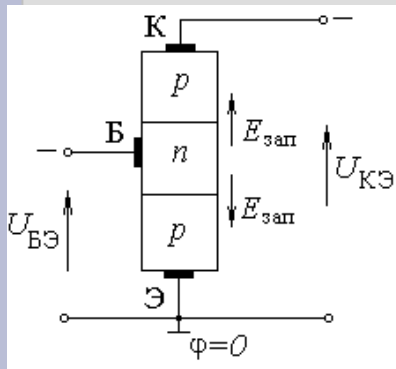
В активному режимі підсилювальні показники

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

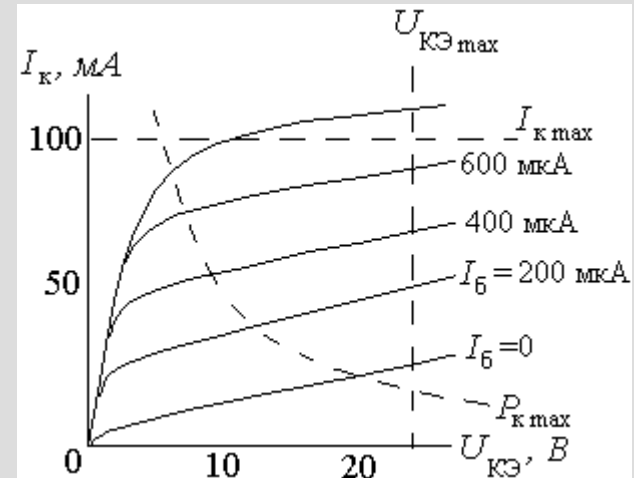
ВХІДНА ХАРАКТЕРИСТИКА

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



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, підсилувальні 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.

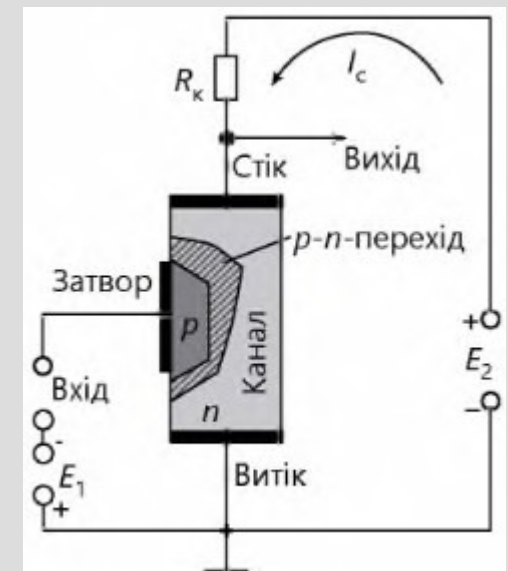
ЗАТВОР (З) – електрод, який служить для регулювання поперечного перерізу каналу.

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

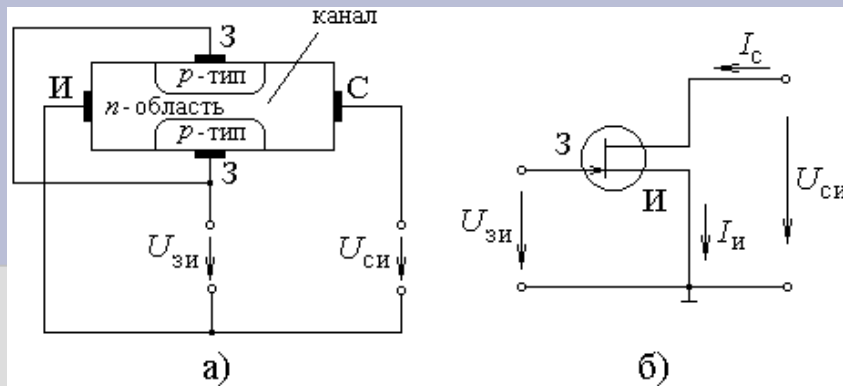
СТІК (С) – електрод, через який основні носії заряду йдуть з каналу.

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	
Ізолюваний	<i>n</i> -типа	
	<i>p</i> -типа	



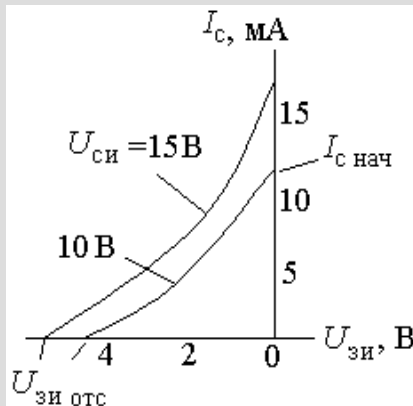
Польовий транзистор із затвором у вигляді р-п-перехода



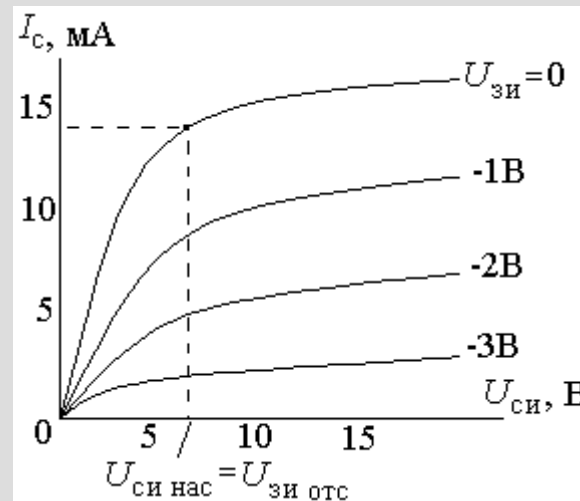
Структурна схема (а) та схема включення (б) польового транзистора з каналом n-типу та затвором у вигляді р-п-переходу.

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

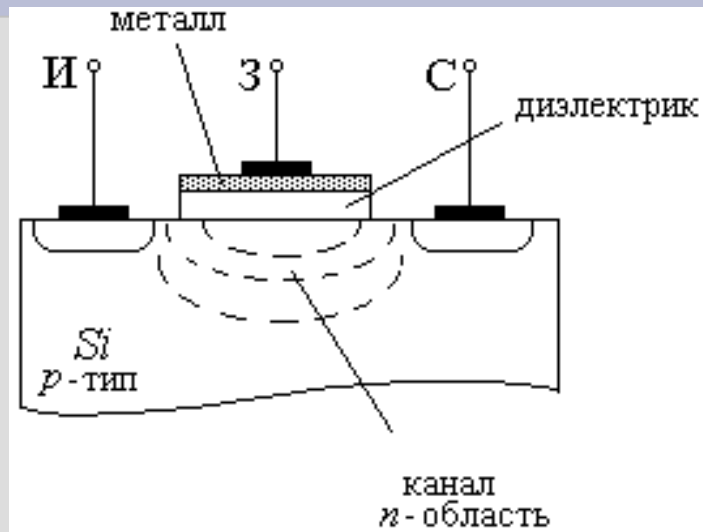
При $U_{зи} = 0$ товщина каналу найбільша та його опір мінімально.

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 ізольованим затвором

Польовий транзистор з ізольованим 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 ізолюваним 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 ізолюваним 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}

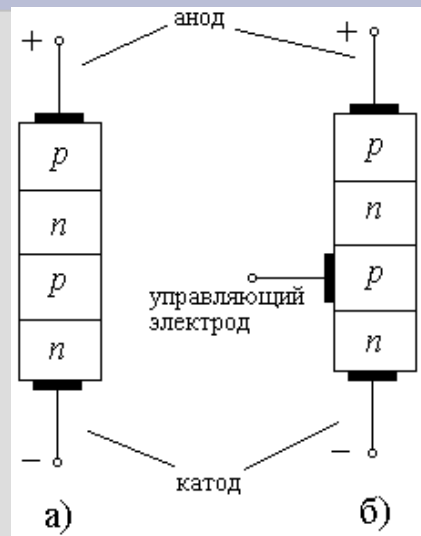
За рахунок того, що польові транзистори управляються полем (величиною напруги прикладеного до затвора), а не струмом, що протікає через базу (як у біполярних транзисторах), польові транзистори споживають значно менше енергії, що особливо актуально в схемах пристроїв, що чекають і стежать, а також у схемах 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 у відкритому стані, знаходять застосування в кінцевих каскадах підсилювачів потужності звукових частот високої потужності (Hi-Fi), де з успіхом замінюють біполярні транзистори та електронні лампи.

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 $-\frac{\Delta U}{\Delta I}$



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

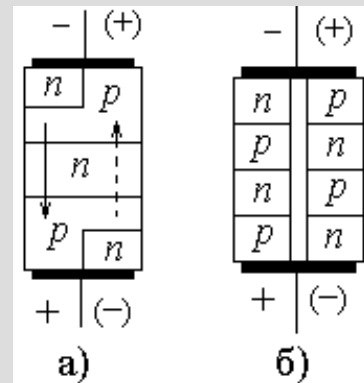
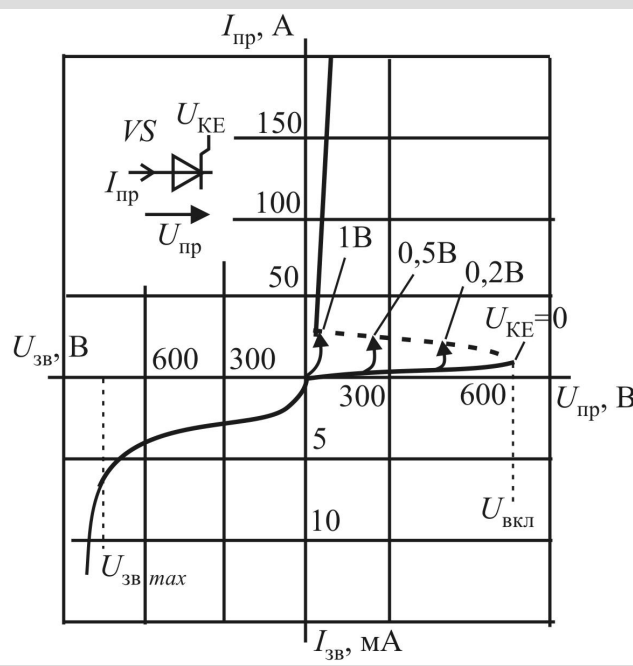
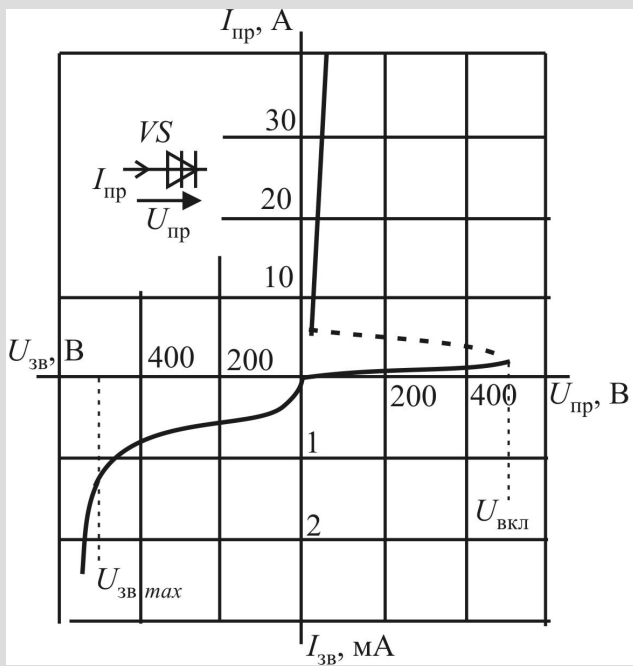
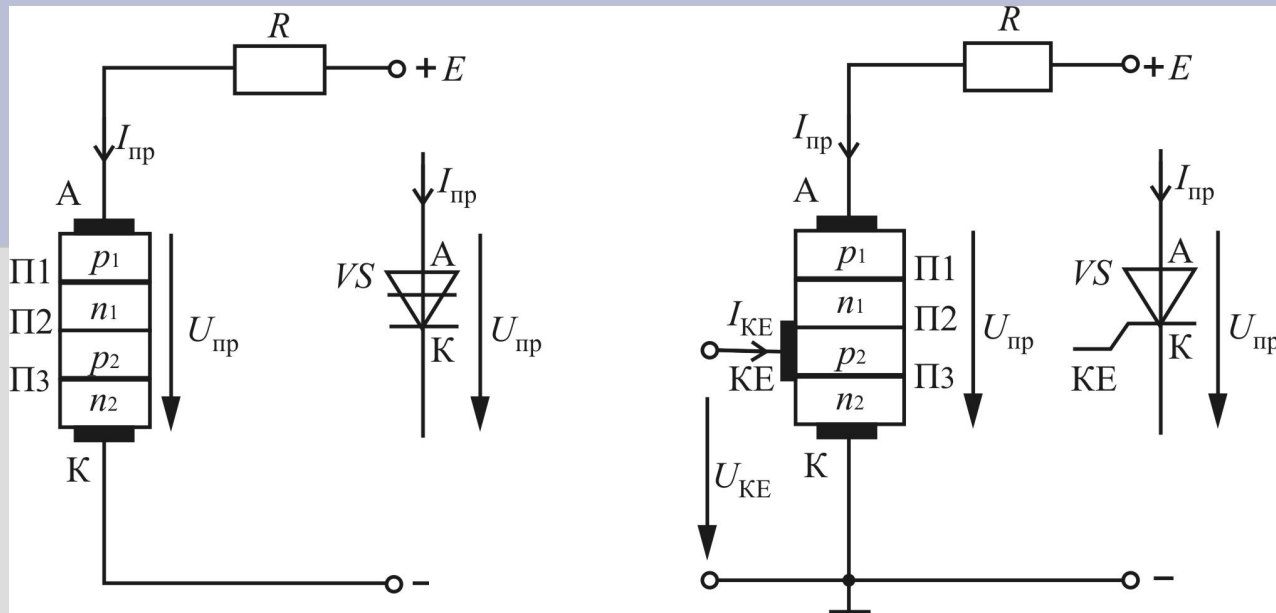
Електрод, з'єднаний із зовнішньою n-областю, називається КАТОДОМ, а електрод з'єднаний у зовнішній р-областю - АНОД.

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