

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
З ДИСЦИПЛІНИ «КОМП'ЮТЕРНА
ЕЛЕКТРОНІКА»
КРЕДИТНИЙ МОДУЛЬ «ЕЛЕКТРОНІКА І
МІКРОСХЕМОТЕХНІКА»
РОЗДІЛ «ЕЛЕМЕНТНА БАЗА КОМП'ЮТЕРНОЇ
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА АНАЛОГОВІ ЕЛЕКТРОННІ
ПРИСТРОЇ»**

**ТЕМА 1.1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ
ЛЕКЦІЯ 1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ**

1 ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ (P-N) ПЕРЕХІД

Концентрація атомів донорної домішки у n-області
атомів акцепторної домішки у p-області –

$$N_A = 10^{18}$$

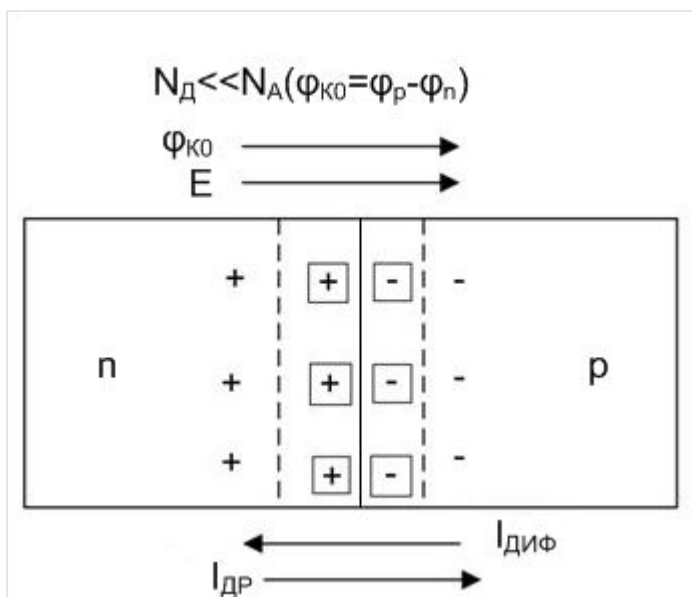
концентрація
 см^{-3}

$$\left. \begin{array}{l} p_A = N \\ n_D = N \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} n_n \gg n_P \\ p_p \gg p_n \end{array} \right\} \quad (2)$$

На межі розділу напівпровідників виникає градієнт (перепад) концентрації рухомих носіїв заряду (дірок і електронів)

$$\frac{dp}{dx}; \quad \frac{dn}{dx}. \quad (3)$$



Висота потенційного бар'єру

$$\varphi_{K0} = \varphi_p - \varphi_n \quad (4)$$

Рис.1 – Процеси у р-п переході при відсутності зовнішньої напруги

Термодинамічна рівновага струмів за відсутності зовнішнього поля у р-п переході

$$I_{ДИФ} - I_{ДР} = 0. \quad (5)$$

1.3 ЕФЕКТ ВИПРЯМЛЕННЯ У Р-Н ПЕРЕХОДІ

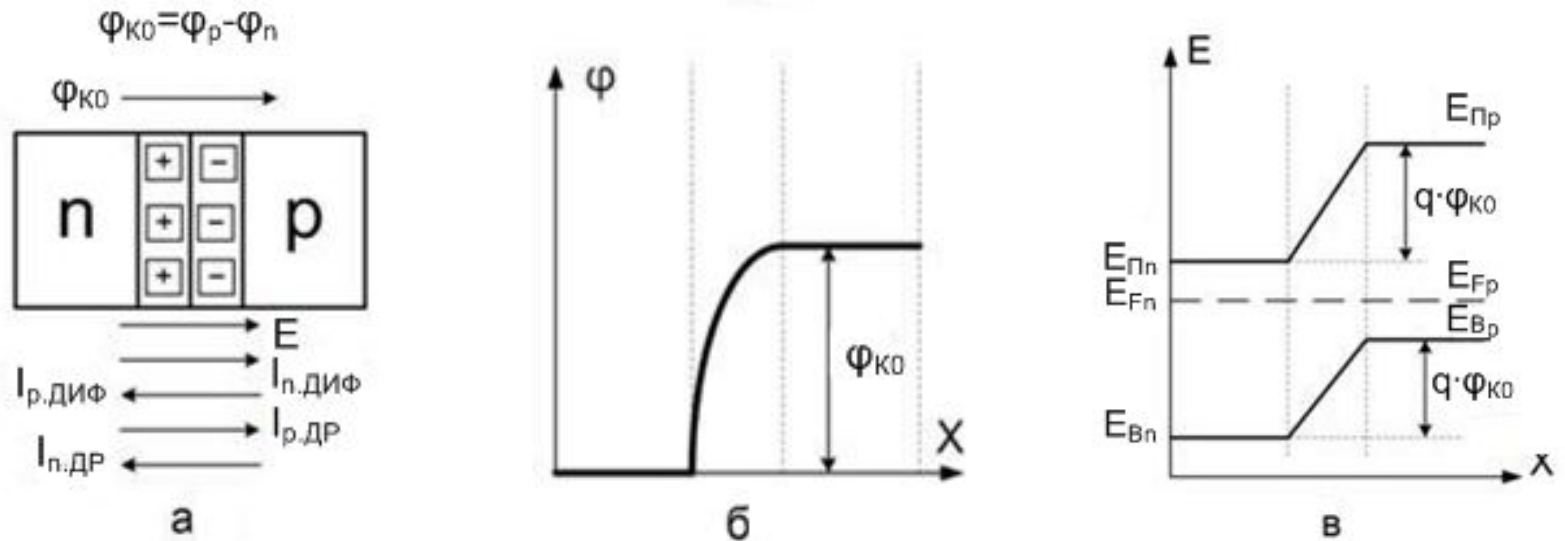


Рис. 2 – Процеси у р-п переході при: а, б, в – відсутності зовнішньої напруги

1.3.2 ЗВОРОТНЕ ВКЛЮЧЕННЯ Р-Н ПЕРЕХОДУ

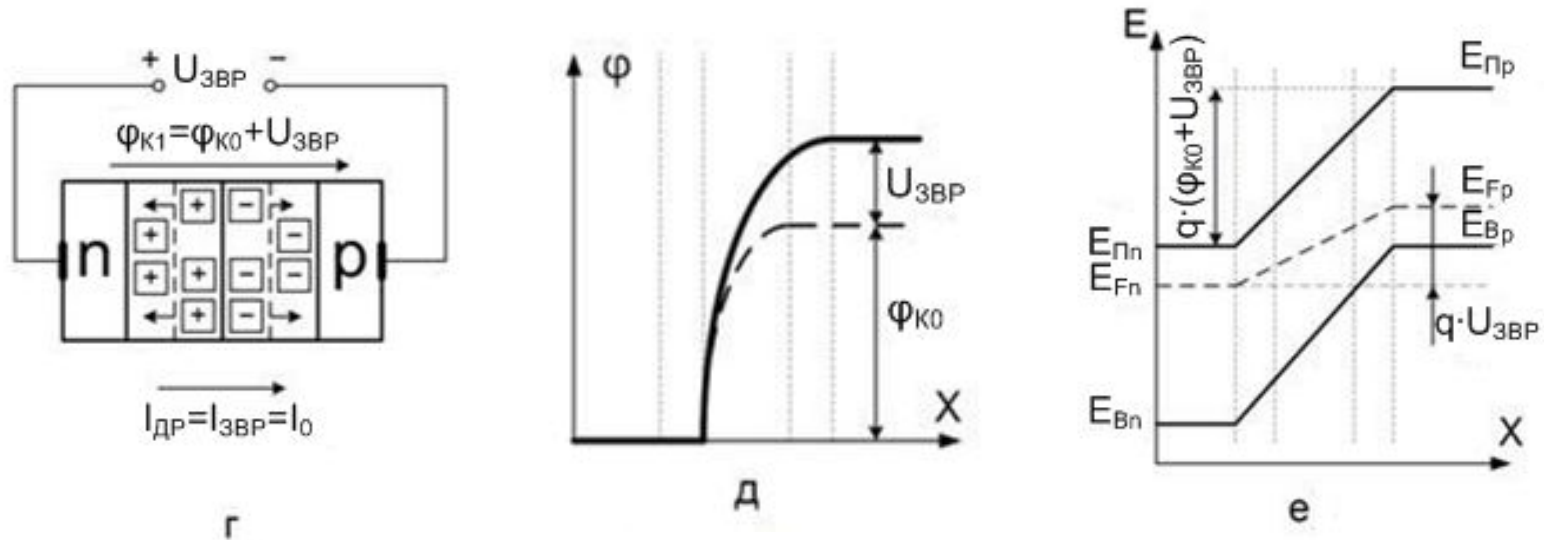


Рис. 2 – Процеси у р-п переході : г, д, е – при $U = U_{ЗВР}$

Потенційний бар'єр р-п переходу зростає: $\varphi_{ЗВР} = \varphi_{K0} + U$. (6)

Для неосновних носіїв потенційний бар'єр відсутній, і вони будуть втягуватися у р-п перехід полем, що створюється зовнішньою напругою

$U_{ЗВР}$ і будуть виводитися через нього у область, де вони є основними носіями.

Цей процес називається *екстракцією*.

Основну роль грає дрейфовий струм, його називають *зворотним струмом* **5** насичення р-п переходу і позначають I_0 .

1.3.3 ПРЯМЕ ВКЛЮЧЕННЯ Р-N ПЕРЕХОДУ

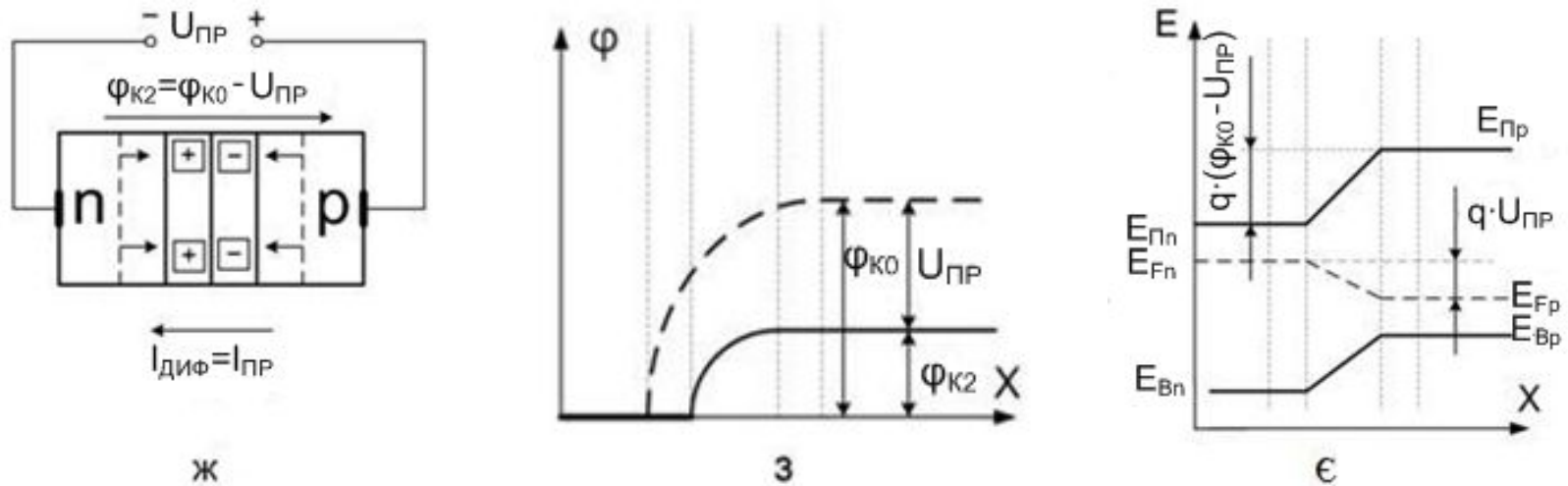


Рис. 2 – Процеси у р-п переході : ж, з, є – при $U = U_{PR}$

Висота потенційного бар'єру зменшується: $\varphi_{KP} = \varphi_{K0} - U$ (7)

Процес введення носіїв заряду через р-п перехід у область, де вони є неосновними носіями, при зниженні висоти потенційного бар'єру називається **інжекцією**.

При збільшенні U_{PR} ($U_{PR} > 1V$) потенційний бар'єр у р-п переході зникає, дрейфовий струм прямує до нуля і через р-п перехід буде протікати дифузійний струм (струм основних носіїв).

1.3.4 ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА (ВАХ) P-N ПЕРЕХОДУ

Аналітично ВАХ представляється виразом
$$I = I_0 \cdot (e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1), \quad (8)$$

де I_0 - зворотний струм насичення р-п переходу (при незмінній температурі визначається фізичною властивістю напівпровідникового матеріалу),

U - напруга, що прикладена до р-п переходу

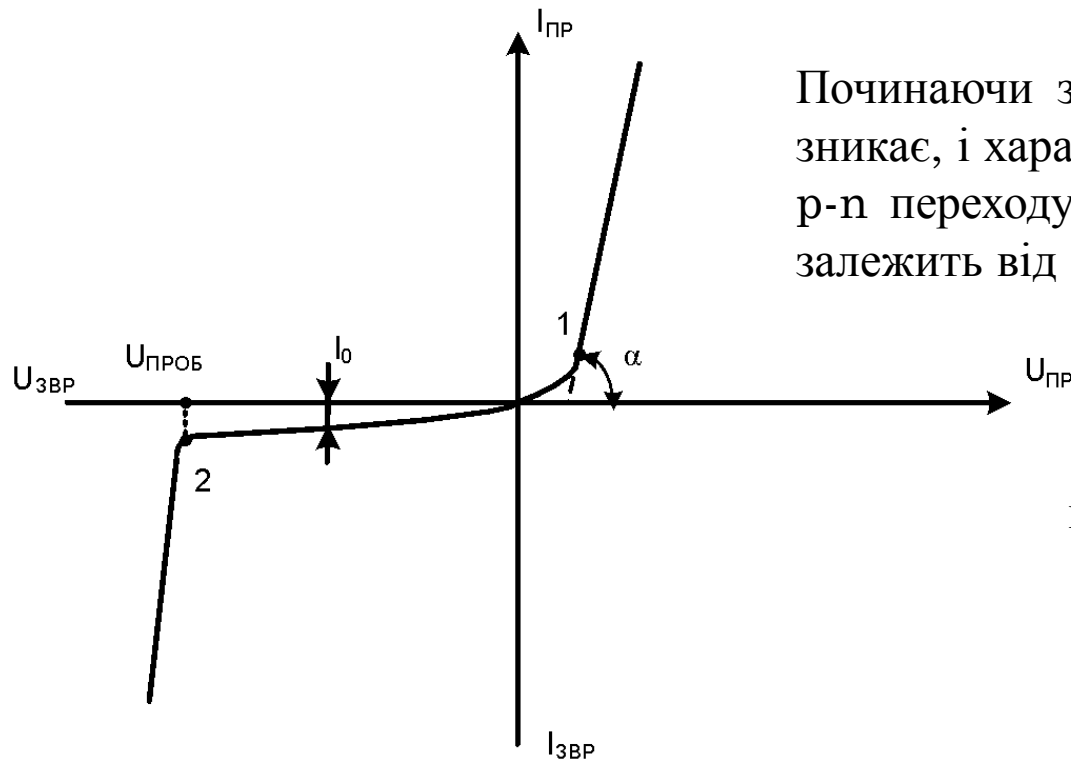
φ_T - температурний потенціал:
$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (9)$$

де k - постійна Больцмана,

T - абсолютна температура р-п переходу

q - заряд електрона

Іноді ВАХ наводять у вигляді
$$I = I_0 \cdot (e^{\frac{qU}{kT}} - 1). \quad (10)$$



Починаючи з точки 1, потенційний бар'єр зникає, і характеристика р-п переходу є прямою лінією, нахил якої залежить від опору базової області.

У точці 2 при $U_{ЗВР} = U_{ПРОБ}$ настає пробій р-п переходу.

Рис.3 – ВАХ р-п переходу

Аналіз ВАХ р-п переходу дозволяє зробити висновок про нелінійність властивостей р-п переходу, а також відзначити головну властивість р-п переходу - властивість односторонньої провідності.

1.4 ПРОБІЙ Р-N ПЕРЕХОДУ

Різке збільшення диференціальної провідності р-n переходу при досягненні зворотною напругою деякого критичного значення називається *пробоєм р-n переходу*.

Розрізняють *електричний* (оборотний) і *неелектричний* (необоротний) пробіи р-n переходу.

Електричний пробій р-n переходу буває двох видів:

- лавинний;
- тунельний.

Неелектричний пробій буває двох видів:

- тепловий;
- поверхневий.

Електричний пробій

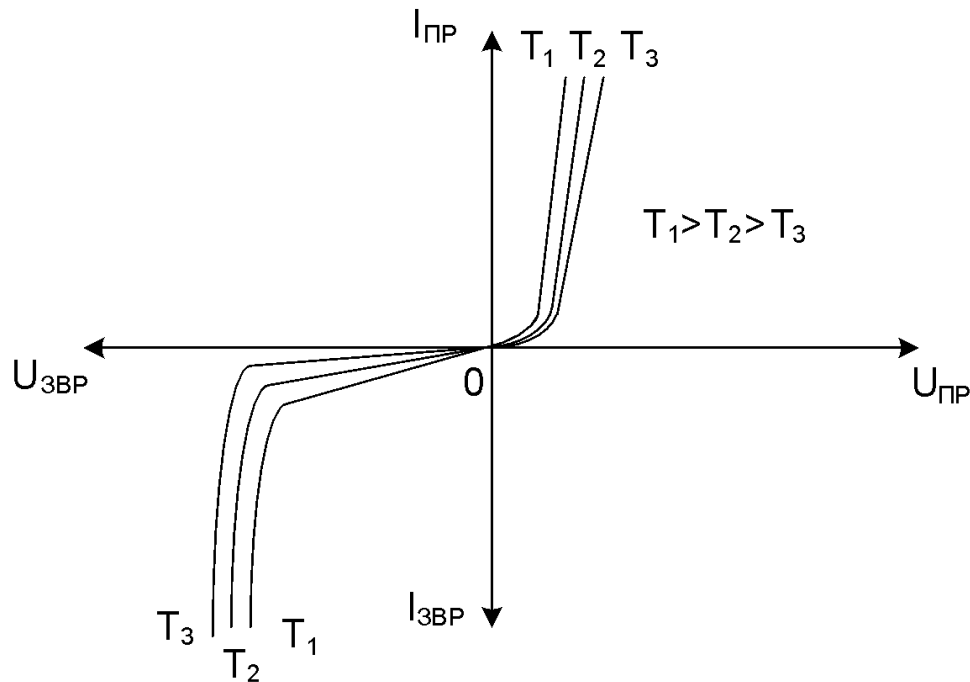
Електричний *лавинний* пробій виникає у результаті внутрішньої електростатичної емісії електронів під дією ударної іонізації атомів напівпровідника.

Тунельний пробій виникає за рахунок явища тунельного ефекту, яке буде докладніше розглянуто у розділі СРС. В цьому випадку довжина вільного пробігу носіїв заряду стає більше ширини р-n переходу і ударна іонізація при цьому неможлива.

Неелектричний пробій

Тепловий пробій відбувається за рахунок нагріву р-n переходу. Нагрів може відбуватися або за рахунок протікання більшого зворотного струму через р-n перехід, або від зовнішнього джерела тепла. Р-n перехід нагрівається, відбувається додаткова генерація пар електрон-дірка, що збільшує зворотний струм. Провідність р-n переходу різко падає. Наступає тепловий (необоротний) пробій р-n переходу, який виводить його з ладу.

1.5 ТЕМПЕРАТУРНІ ВЛАСТИВОСТІ Р-N ПЕРЕХОДУ



При підвищенні температури підсилюється генерація пар електрон-дірка, збільшується концентрація неосновних носіїв і власна провідність напівпровідника.

Також зворотний струм росте, і р-n перехід втрачає свою основну властивість - одностороння провідність

Рис. 4 – ВАХ р-n переходу для різних температур

1.6 ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ P-N ПЕРЕХОДУ

При роботі на високих частотах ємнісний опір переходу

$$X_{C_{\text{БАР}}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{БАР}}}$$

зменшується і шунтує високий опір зворотно включеного р-п переходу. Перехід при цьому втрачає властивість односторонньої провідності.

Окрім *бар'єрної ємності* р-п перехід має так звану *дифузійну ємність*. Ця ємність з'являється при прямому включенні р-п переходу за рахунок явища інжекції. Вона не має істотного впливу на роботу р-п переходу, оскільки завжди зашунтована малим прямим опором р-п переходу.

2 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ

Напівпровідниковим діодом (НД) називають електронний прилад з дірково-електронним р-п переходом, що має два виводи.

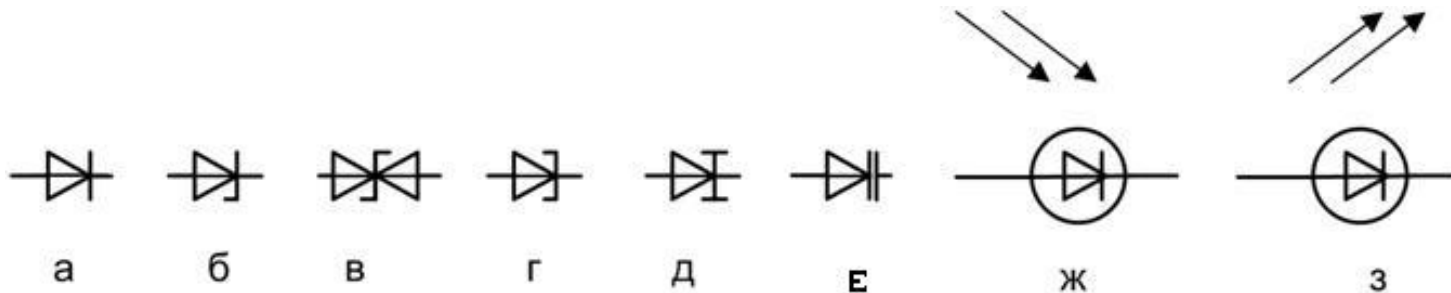


Рис. 5 – Позначення НД на електричних схемах: а - випрямних, імпульсних, ВЧ- і НВЧ- діодів; б - стабілітронів; в - двосторонніх стабілітронів; г - тунельних діодів; д - обернених діодів; е - варикапів; ж - фотодіодів; з - світлодіодів

2.2 ВИПРЯМНІ ДІОДИ

Випрямні діоди (ВД) - це напівпровідникові діоди, що призначені для перетворення змінного струму у постійний у обмеженому діапазоні частот (50 Гц...100 кГц).

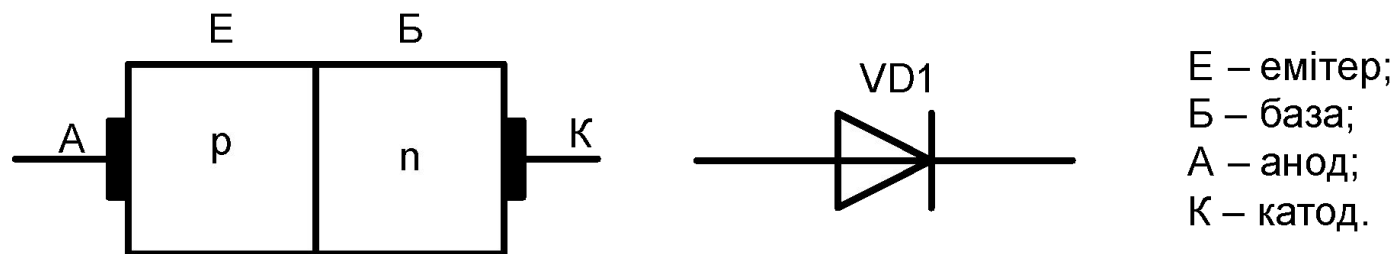
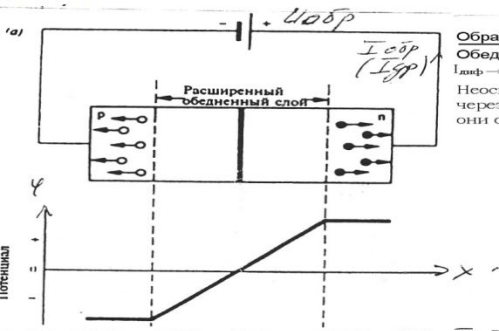
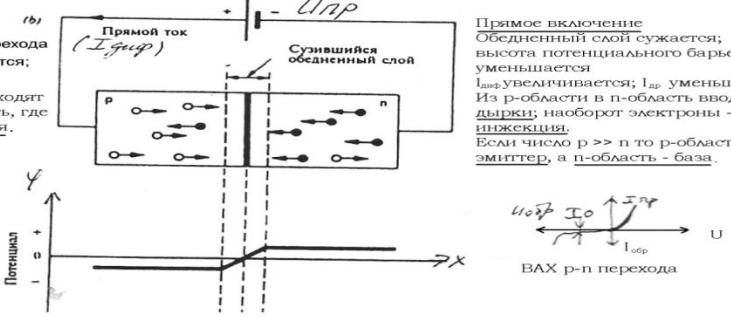


Рис. 6 – Випрямний діод: а – спрощена структура; б – позначення на електричних схемах

В основі роботи ВД лежить властивість *односторонньої провідності p-n переходу*.



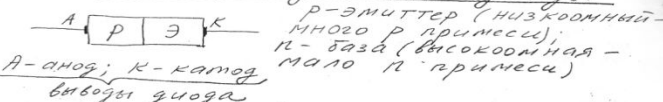
Обратное включение p-n перехода
Обедненный слой расширяется;
 $I_{обр} \rightarrow 0$;
Носовные носители проходят через p-n переход в область, где они основные - экстракция.



Прямое включение
Обедненный слой сужается;
высота потенциального барьера уменьшается
 $I_{обр}$ увеличивается; $I_{пр}$ уменьшается
Из p-области в n-область вводятся дырки; наоборот электроны - это инжекция.
Если число $p \gg n$ то p-область - эмиттер, а n-область - база.

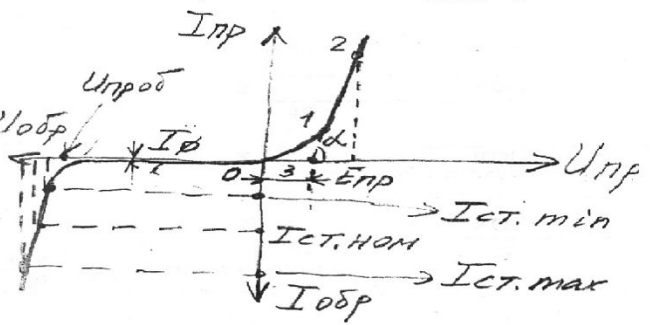


Полупроводниковые диоды

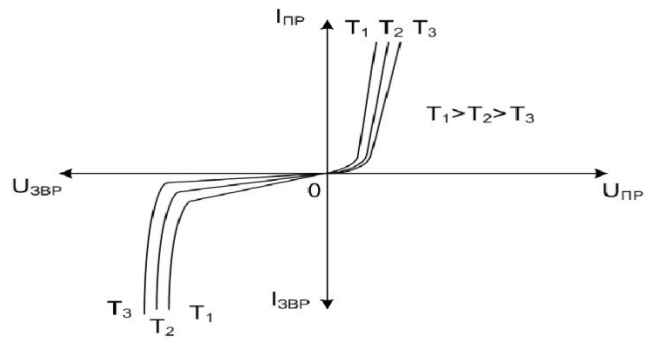


Обозначение диода на электрических схемах

ВАХ - вольт-амперная характеристика диода



Значения потенциалов: φ_A - анод; φ_K - катод	Состояние диода
$\varphi_A > 0; \varphi_K < 0$ ①	Открыт
$\varphi_A < 0; \varphi_K > 0$ ②	Закрит
$\varphi_A > 0; \varphi_K > 0$ ③	Открыт
$\varphi_A < \varphi_K$ ③.1	Открыт
$\varphi_A > \varphi_K$ ③.2	Закрит
$\varphi_A < 0; \varphi_K < 0$ ④	Открыт
$ \varphi_A < \varphi_K $ ④.1	Открыт
$ \varphi_A > \varphi_K $ ④.2	Закрит



ВАХ p-n переходу для різних температур

$$I_{пр} = \frac{U_{пр} - E_{пр}}{r_{\delta}}, \text{ пр } U_{пр} > E_{пр}$$

$$I_{пр} \approx 0, U_{пр} \leq E_{пр}$$

$$r_{\delta} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}} = \frac{1}{t_{\delta} q} - \text{сопротивление базы,}$$

$E_{пр}$ - составляет десятые доли Вольта

$$I_{обр} = I_{ст.мак}; I_{ст.мин} \dots$$

$$U_{обр} = U_{ст} \approx const$$

I_{δ} - обратный ток насыщения
 $U_{пробр}$ - напряжение пробоя
стабилитроны

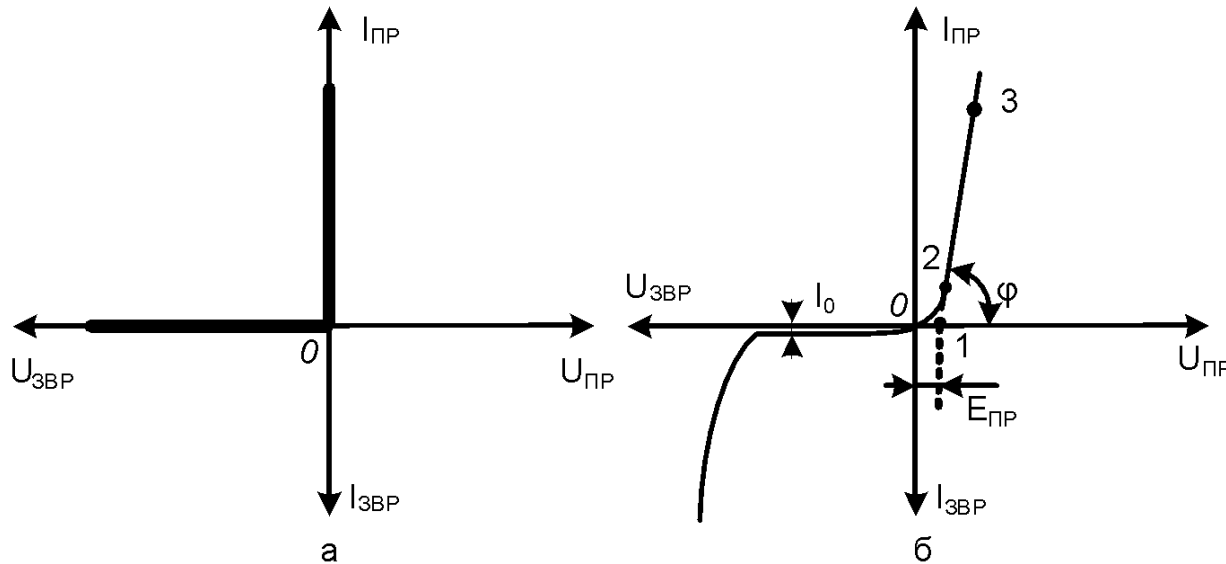


Рис. 7 – ВАХ ВД: а – ідеального; б – реального

Пряма гілка ВАХ ВД описується рівнянням
$$I_{PP} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_{PP} - I_{PP} \cdot r_B}{\varphi_T}} - 1 \right) \quad (11)$$
 де I_{PP} U_{PP} - відповідно прямий струм і пряма напруга; I_0 - зворотний струм насичення р-п переходу; r_B - опір базової області (складає одиниці - десятки Ом); $\varphi_T = \frac{kT}{q}$ - температурний потенціал

Робочою ділянкою ВАХ ВД є лінійна (омічна) ділянка характеристики при прямому включенні (рисунок 7,б, ділянка 2...3).

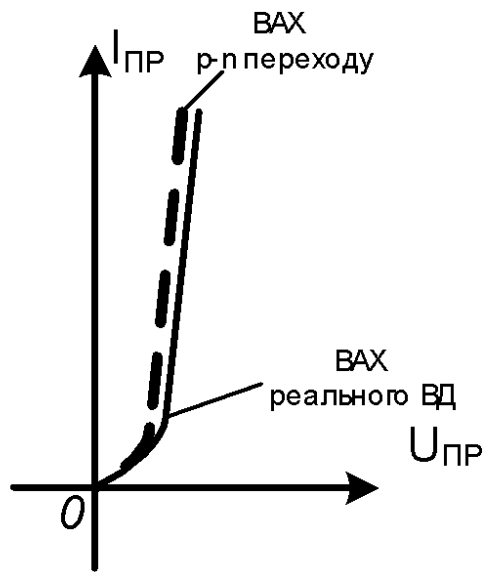
На практиці пряму гілку ВАХ реального ВД можна апроксимувати ломаною лінією (рисунок 7, б, ділянки 0...1, 1...3):

$$I_{\text{ПР}} = \frac{E_{\text{ПР}} - U_{\text{ПР}}}{r_{\text{Б}}}, \text{ при } U_{\text{ПР}} > E_{\text{ПР}}, \quad (13)$$

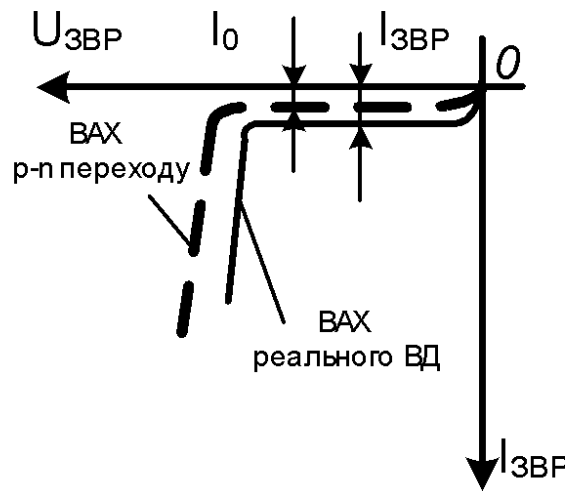
$$I_{\text{ПР}} = 0, \text{ при } U_{\text{ПР}} \leq E_{\text{ПР}},$$

де $E_{\text{ПР}} \approx (0,5 \dots 0,7) \cdot \varphi_{\text{К0}}$ $\varphi_{\text{К0}}$ - висота потенційного бар'єру р-п переходу;

$$r_{\text{Б}} = \frac{1}{\text{tg}\varphi}$$



а



б

У реальних діодах зворотний струм має три складові:

$$I_{ЗВР} \neq I_0 + I_B + I_T, \quad (12)$$

де I_0 - зворотний струм насичення р-п переходу;

I_B - струм витoku на поверхні р-п переходу;

I_T - струм термогенерації в об'ємі напівпровідника.

Рис. 8 – ВАХ ВД та р-п переходу: а – при прямому включенні; б – при зворотному включенні

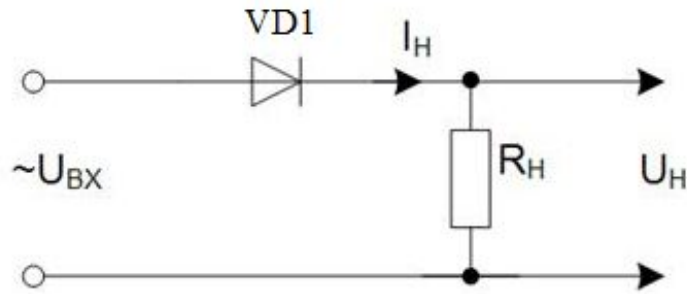


Рис. 9 – Схема включення ВД в електричний ланцюг

Основні параметри, що характеризують роботу ВД у випрямних схемах:

$I_{ПР.СЕР}$ - середнє значення прямого випрямленого струму;

$U_{ПР.СЕР}$ - середнє за період значення прямої напруги;

$I_{ЗВР}$ - постійний зворотний струм діода;

$U_{ЗВР}$ - напруга на діоді, що включений у зворотному напрямку;

$R_{ДИФ}$ - диференціальний (динамічний) опір;

$K_{ВИПР}$ - коефіцієнт випрямлення;

$$R_{ДИФ} = \frac{\partial U_{ПР}}{\partial I} \approx \frac{\Delta U_{ПР}}{\Delta I_{ПР}} \quad K_{ВИПР} = \frac{I_{ПР}}{I_{ЗВР}} = \frac{R_{ЗВР}}{R_{ПР}}.$$

2.3 ВИСОКОЧАСТОТНІ І НАДВИСОКОЧАСТОТНІ ДІОДИ (ВЧ І НВЧ ДІОДИ)

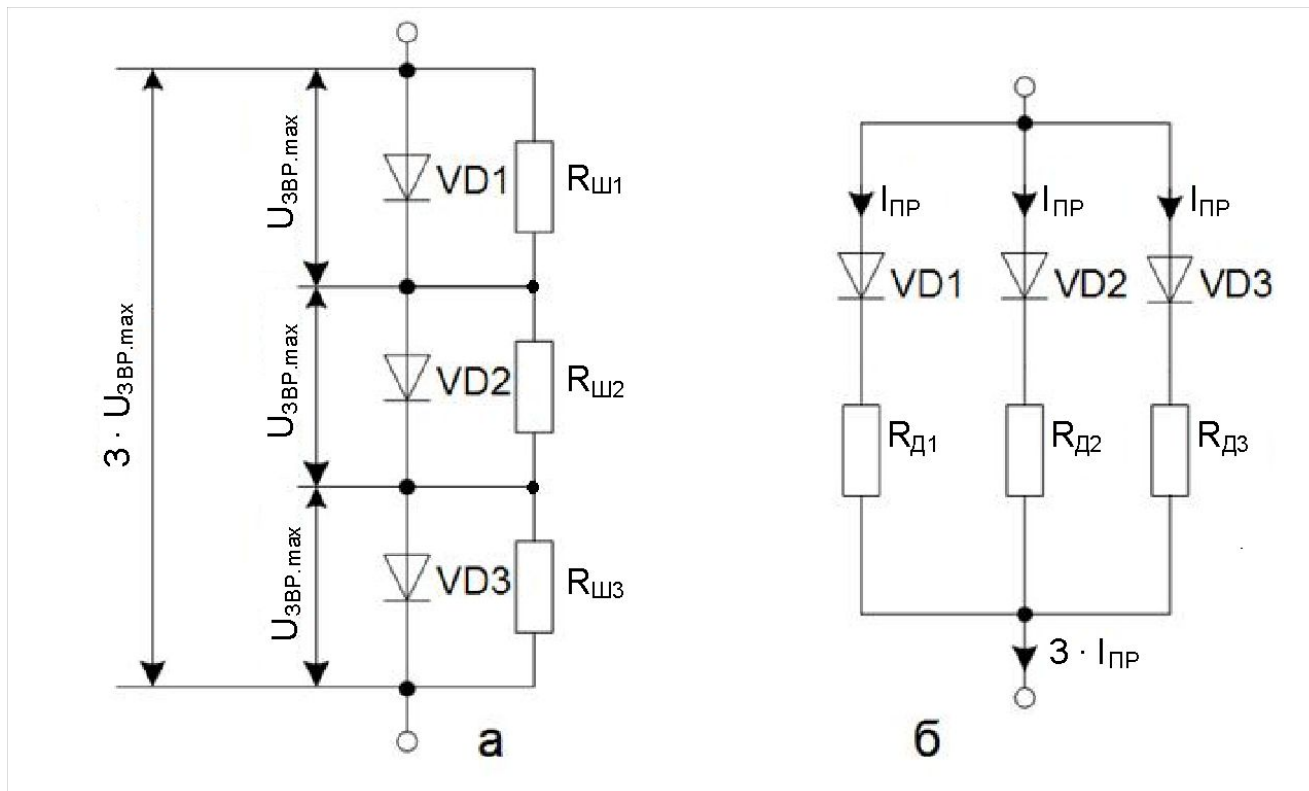
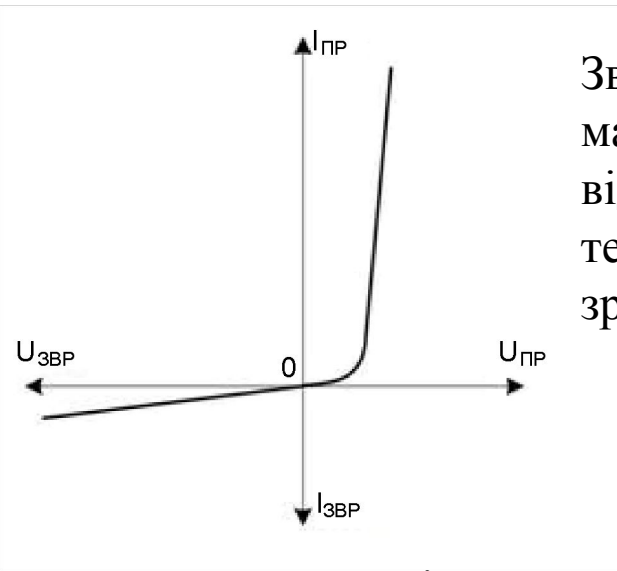


Рис.10 – Способи підвищення: а – максимальної зворотної напруги ВД;
б – максимального прямого струму ВД



Зворотний струм має менше значення, ніж у ВД через малу площу р-п переходу. Але оскільки практично відсутня ділянка насичення, то за рахунок струмів термогенерації і витоку зворотний струм рівномірно зростає.

Рис.11 – ВАХ ВЧ діода

Основним параметром ВЧ- діодів є *бар'єрна ємність*. Чим C_D менше тим ширше частотний діапазон діода. Зазвичай $C_D \leq 1\text{пФ}$.

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

2.4 ІМПУЛЬСНІ ДІОДИ (ІД)

ІД - різновид високочастотних діодів, призначених для використання як ключові елементи у швидкодіючих імпульсних схемах. Їх конструкція, ВАХ, статичні параметри такі ж, як і у ВЧ- і НВЧ- діодів .

Відмінність полягає у динаміці роботи ІД, які працюють при дії імпульсів малої довжини і повинні добре зберігати їх форму.

2.5 НАПІВПРОВІДНИКОВІ СТАБІЛІТРОНИ (ОПОРНІ ДІОДИ)

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

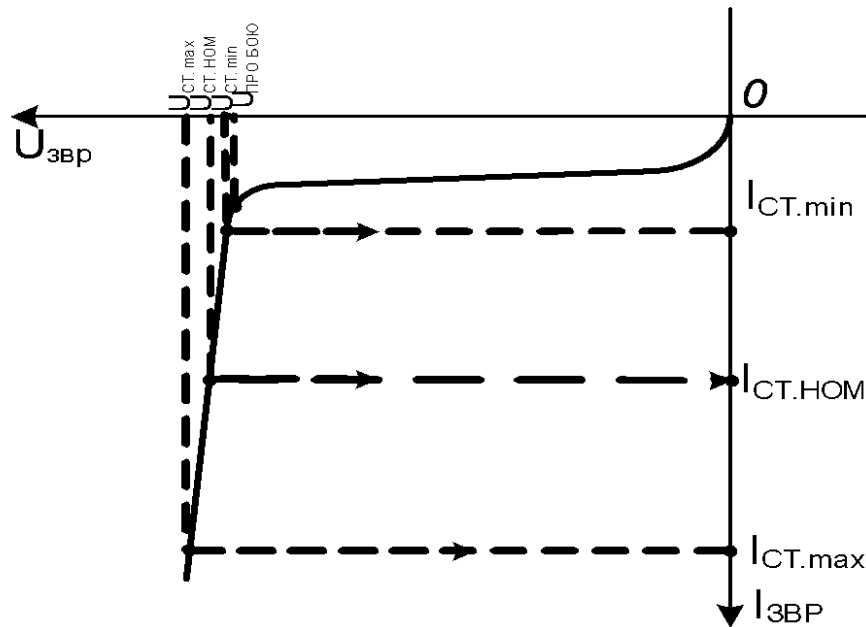


Рис 12 – Робоча область ВАХ НС

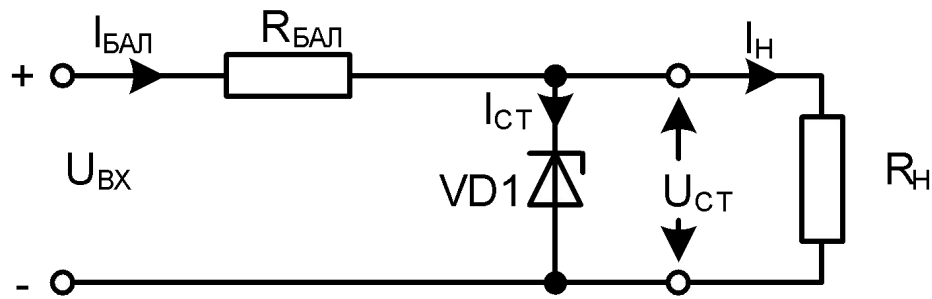


Рис. 13 – Схема включення НС у електричний ланцюг

Слід звернути увагу на те, що робочим є зворотне включення стабілітрона у електричний ланцюг. Основні електричні параметри НС:

$U_{CT.НОМ.}$ - номінальна напруга стабілізації ;

$I_{CT.min}$ - мінімально допустимий постійний струм стабілізації;

$I_{CT.max}$ - максимально допустимий постійний струм стабілізації;

$I_{CT.НОМ.}$ - номінальний струм стабілізації;

$$I_{CT.НОМ.} \approx \frac{I_{CT.max} - I_{CT.min}}{2};$$

r_{CT} - диференційний опір стабілітрону;

$$r_{CT} = \frac{\partial U_{CT}}{\partial I_{CT}} \approx \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}$$

$U_{ПРОБ}$ - напруга пробою;

α_{CT} - температурний коефіцієнт напруги стабілізації (ТКН);

$$\alpha_{CT} = \frac{\partial U_{CT}}{U_{CT}} \cdot \frac{1}{\partial T} \cdot 100\%, \quad \text{при } I_{CT} = const$$

(14)

САМОСТІЙНА РОБОТА СТУДЕНТІВ (СРС)

1 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКІВ

1.1 ЕНЕРГЕТИЧНІ РІВНІ ЕЛЕКТРОНІВ У АТОМІ

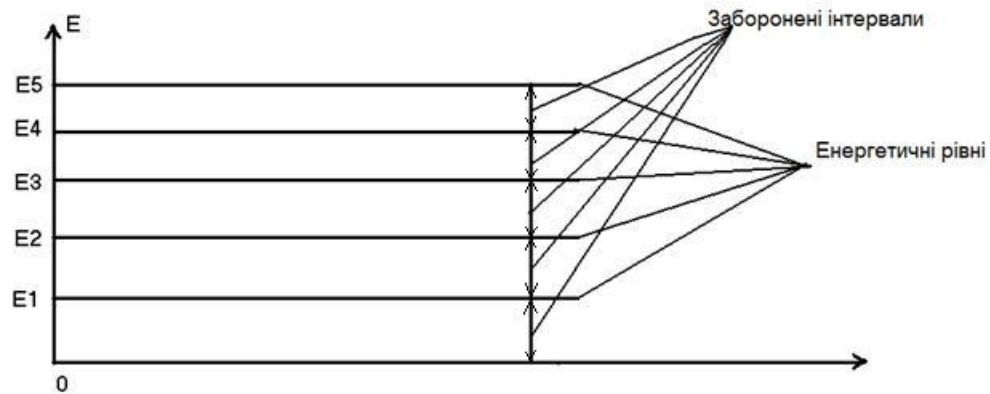


Рис. 1 – Енергетичний спектр електронів у атомі

1.2 ЕНЕРГЕТИЧНІ СТАНИ ЕЛЕКТРОНІВ У ТВЕРДОМУ ТІЛІ

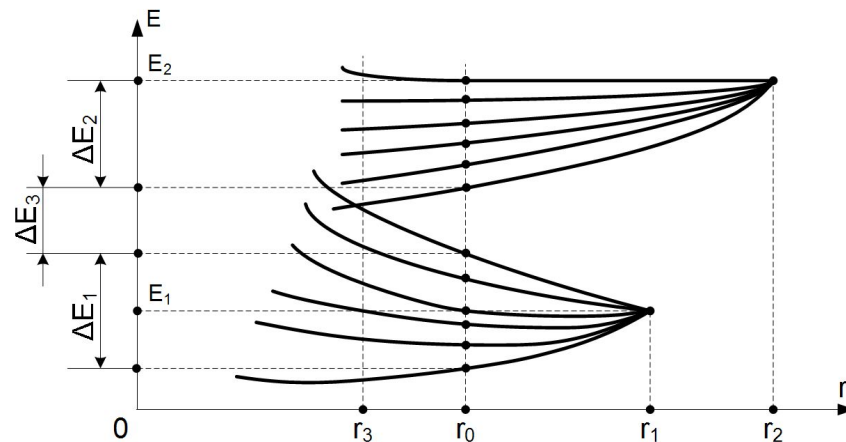


Рис. 2 – Розщеплення енергетичних рівнів електронів у твердому тілі

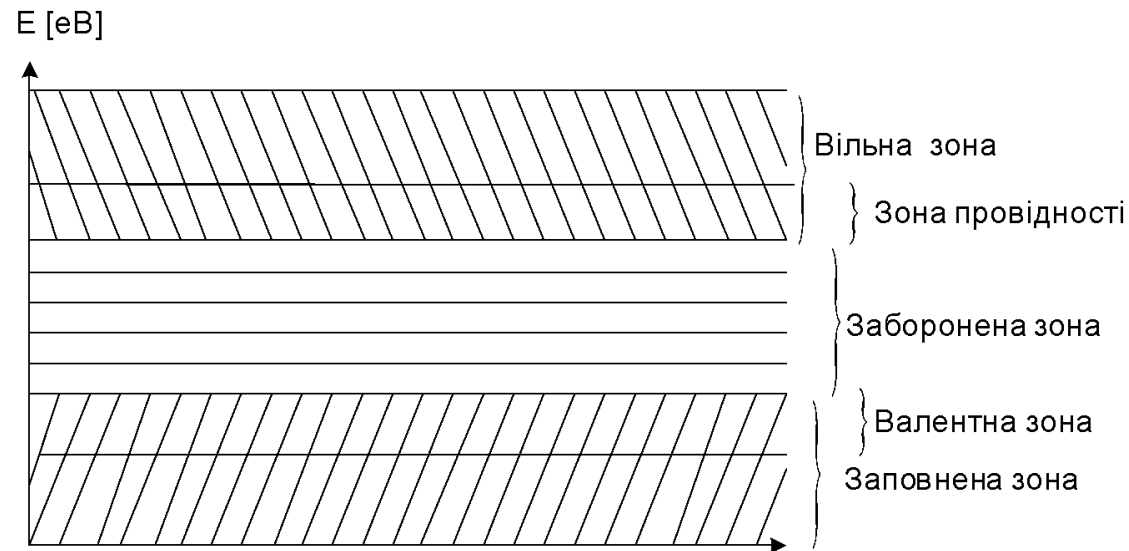


Рис. 3 – Енергетичні зони твердого тіла

1.3 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

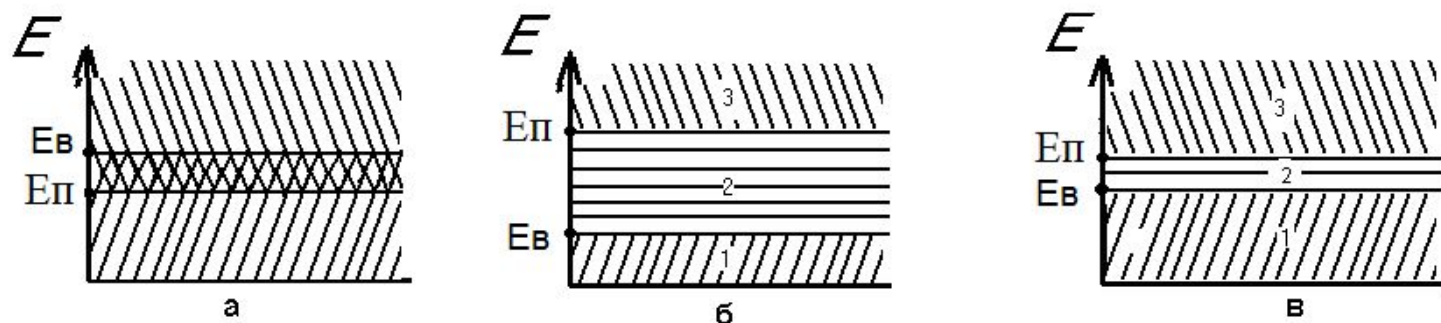


Рис. 4 – Діаграми енергетичних зон: а – провідника; б – діелектрика; в – напівпровідника

Електропровідність матеріалів визначається шириною забороненої зони, розташованої між валентною зоною і зоною провідності. Провідність твердого тіла визначається тією енергією, яку потрібно передати валентним електронам, щоб вони могли перейти на вищий енергетичний рівень, що відповідає зоні провідності. При цьому електрони втрачають зв'язок з ядром і стають вільними.

1.4 РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРОНІВ ЗА КВАНТОВИМИ СТАНАМИ

Процес заняття електронами того або іншого енергетичного рівня носить імовірнісний характер і описується *функцією розподілу Фермі*.

$$f_n(E) = P_n(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad (1)$$

де $f_n(E)$ - функція розподілу Фермі;

$P_n(E)$ - ймовірність того, що при температурі T квантовий стан з енергією E зайнятий електроном;

E_F - рівень Фермі - енергетичний рівень, функція Фермі для якого рівна 0,5 при температурах, що відрізняються від абсолютного нуля;

T - абсолютна температура;

k - стала Больцмана.

Ймовірність того, що квантовий стан з енергією E вільний від електрона, тобто зайнятий діркою:

$$f_P(E) = \frac{1}{e^{\frac{E_F-E}{kT}} + 1} \quad (2)$$

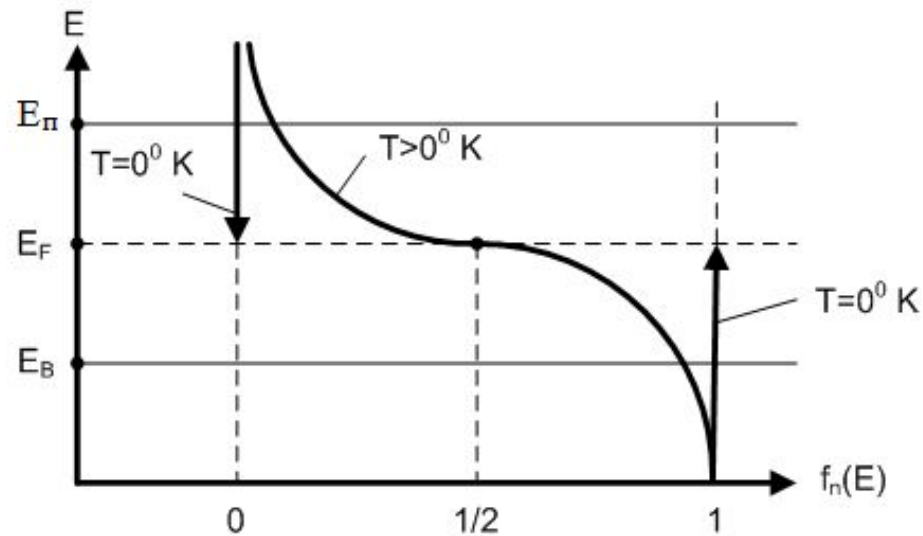


Рис. 5 – Функція розподілу Фермі

На рисунку 5 зображена функція $f_n(E)$ для $T = 0^\circ \text{ K}$ і $T > 0^\circ \text{ K}$.

У чистому (власному) напівпровіднику енергетичний рівень Фермі E_{F_I} можна визначити за співвідношенням:

$$E_{B_I} = E + \frac{\Delta E_3}{2\pi} = E - \frac{\Delta E_3}{2}. \quad (3)$$

Тобто рівень Фермі у бездомішковому напівпровіднику при будь-якій температурі розташований посередині забороненої зони.

1.6 ВЛАСНА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

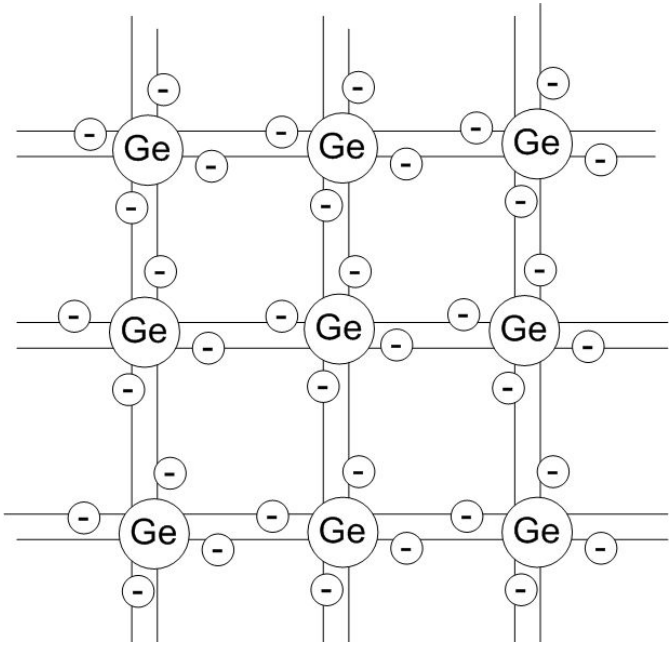


Рис. 6 – Об'ємна кристалічна решітка Германію

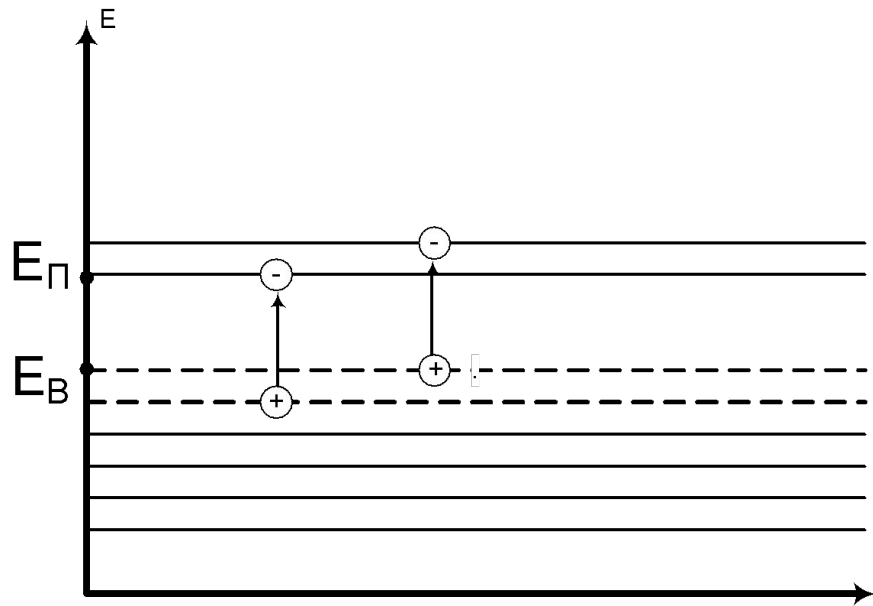


Рис. 7 – Генерація пар електрон-дірка

Загальну провідність знаходять за формулою:

$$\sigma = q_n \cdot n \cdot \mu_n + q_p \cdot p \cdot \mu_p \quad (4)$$

де σ - провідність напівпровідника,

n - концентрація електронів,

p - концентрація дірок,

μ_n - рухливість електронів,

μ_p - рухливість дірок,

q_n і q_p - заряди електрона і дірки відповідно.

Така провідність називається власною, а напівпровідник - власним напівпровідником. Ця провідність зазвичай невелика і збільшується з підвищенням температури.

1.7 ДОМІШКОВА ПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

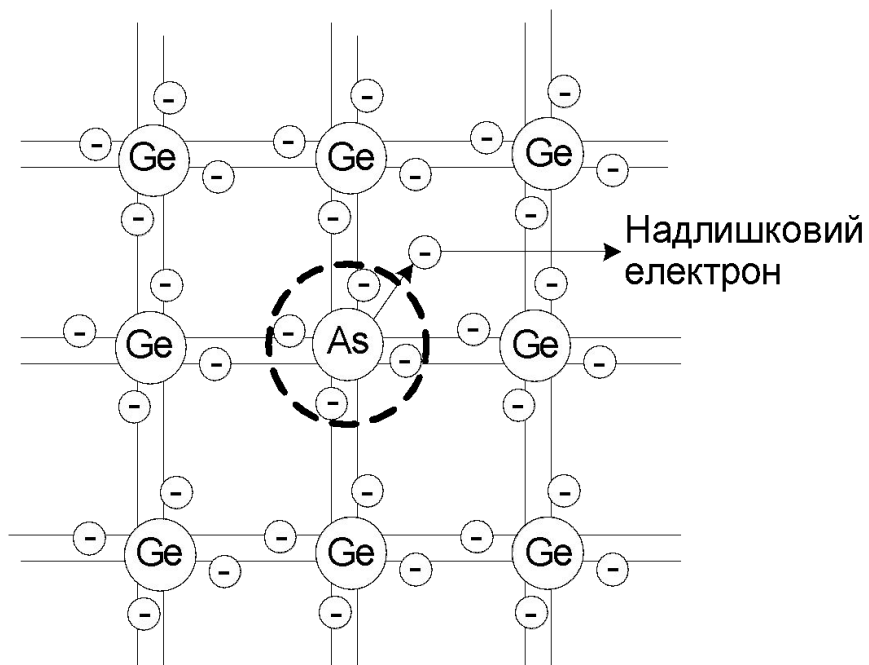


Рис. 8 – Утворення надлишкових електронів у домішковому напівпровіднику

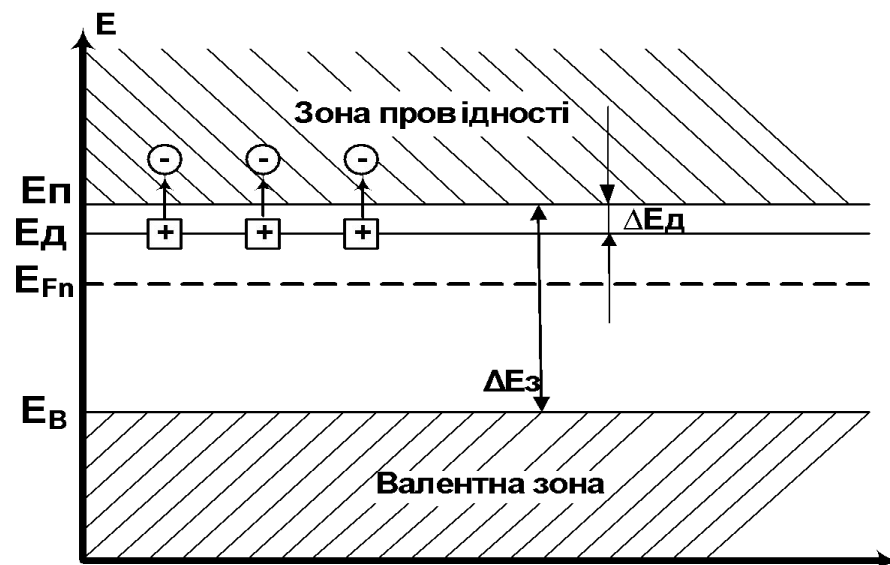


Рис. 9 – Енергетичні зони домішкового напівпровідника n-типу

Положення рівня Фермі у напівпровіднику n-типу:

$$E_{F_n} = E_{F_I} + kT \cdot \ln\left(\frac{n_n}{n_I}\right) \quad (5)$$

де k - постійна Больцмана,

T - абсолютна температура,

n_I - концентрація електронів у бездомішковому напівпровіднику,

n_n - концентрація електронів, як основних носіїв, у напівпровіднику n-типу.

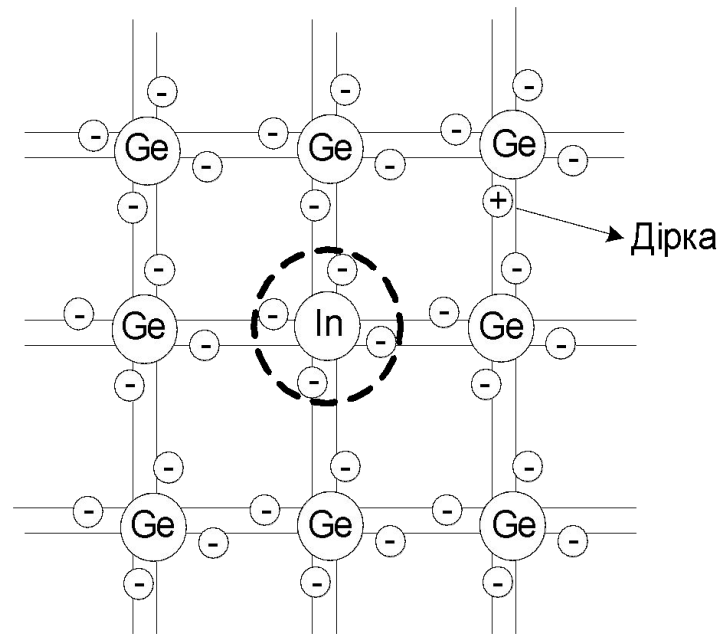


Рис. 10 – Утворення надлишкових дірок у домішковому напівпровіднику

Оскільки домішковий енергетичний рівень Індію E_A лежить у забороненій зоні поблизу валентної зони Ge , то досить дуже невеликої енергії

$\Delta E_A = E_A - E_B \ll \Delta E_Z$, щоб електрони із верхніх рівнів валентної зони перемістилися на рівень домішки, утворивши потрібні ковалентні зв'язки.

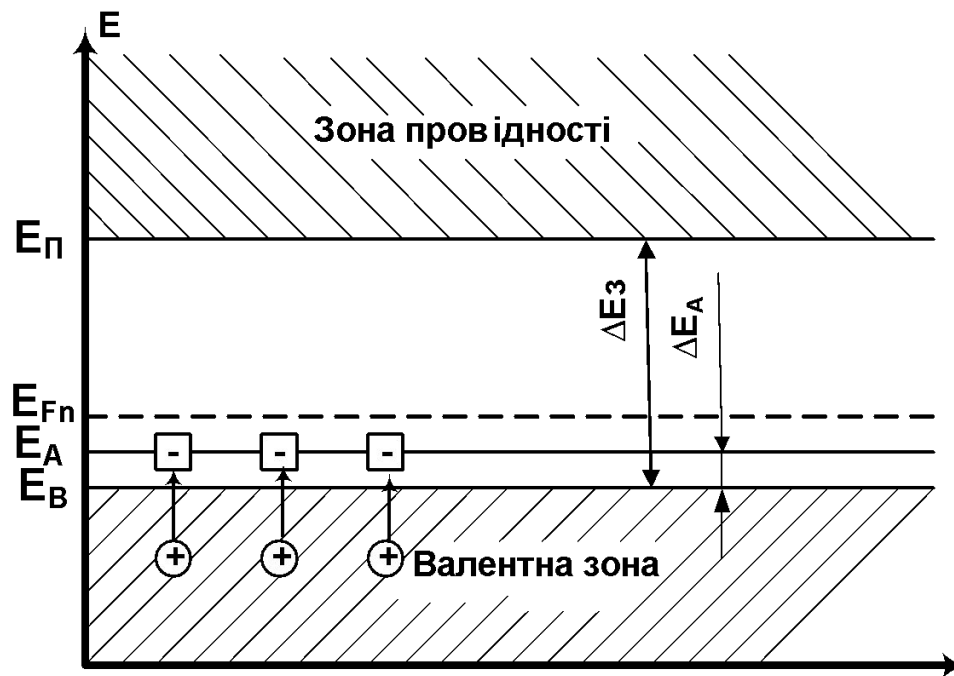


Рис. 11 – Енергетичні рівні домішкового напівпровідника р-типу

Положення рівня Фермі у напівпровіднику p - типу

$$E_{F_p} = E_{F_I} - kT \cdot \ln \left(\frac{p_p}{p_I} \right) \quad (6)$$

де p_p - концентрація дірок, як основних носіїв, у напівпровіднику p - типу.

2 ТУНЕЛЬНИЙ ЕФЕКТ У Р-Н ПЕРЕХОДІ

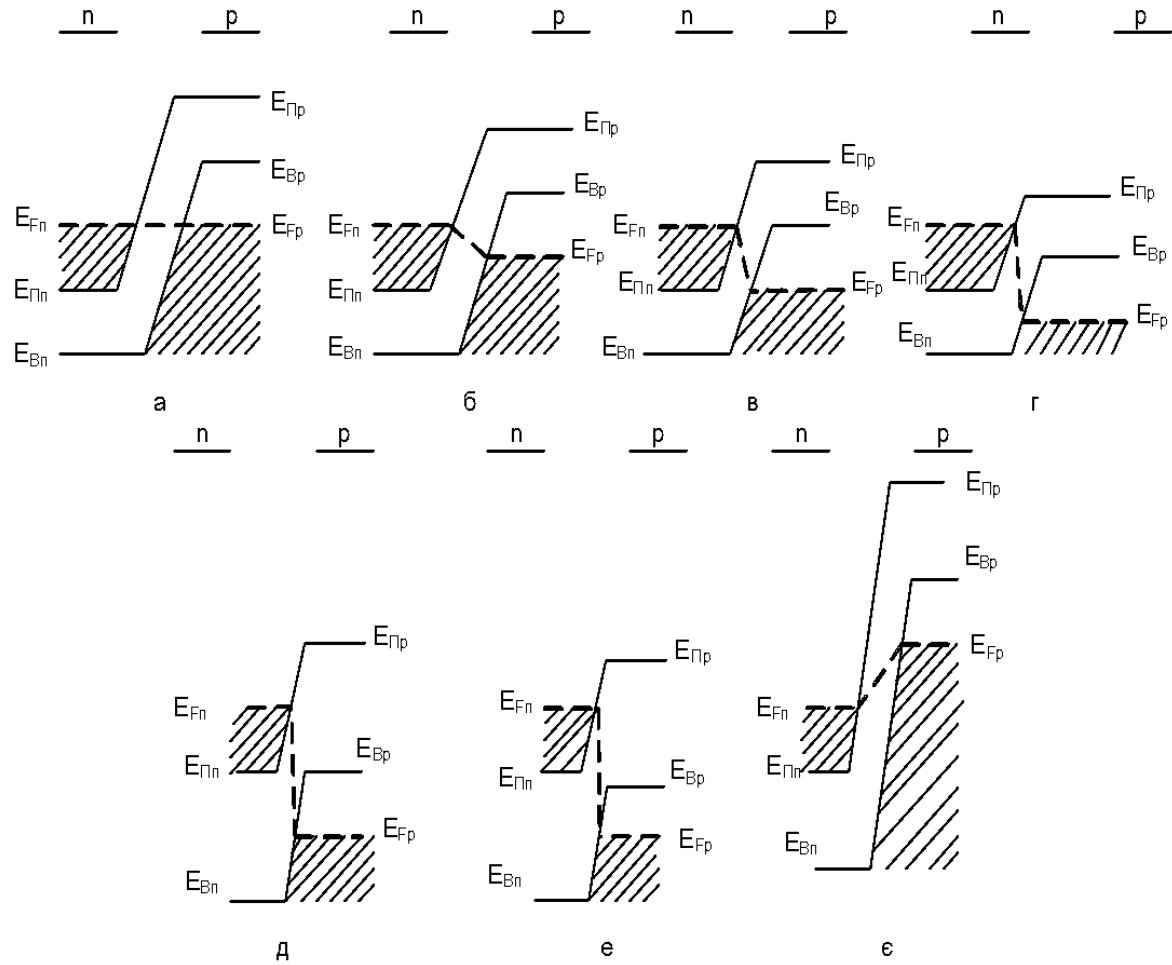


Рис. 12 – Енергетичні діаграми р-п переходу на базі вироджених напівпровідників

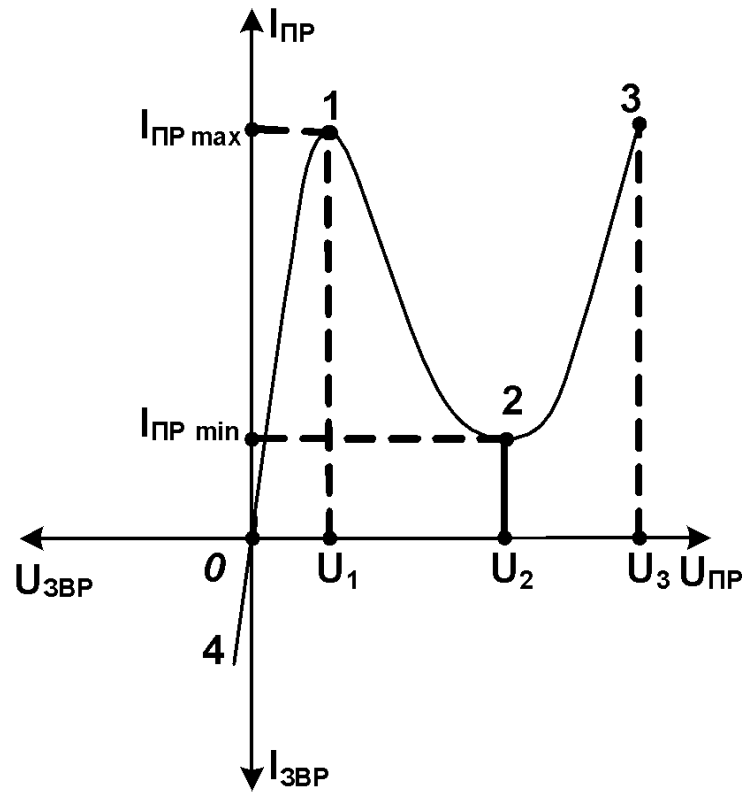


Рис. 13 – ВАХ р-n переходу на базі вироджених напівпровідників

3 ТУНЕЛЬНІ ДІОДИ (ТД)

Тунельним називається напівпровідниковий діод, у якому використовується тунельний механізм перенесення носіїв заряду через р-n перехід і у ВАХ якого є ділянка від'ємного диференціального опору (рис. 14, ділянка 1-2).

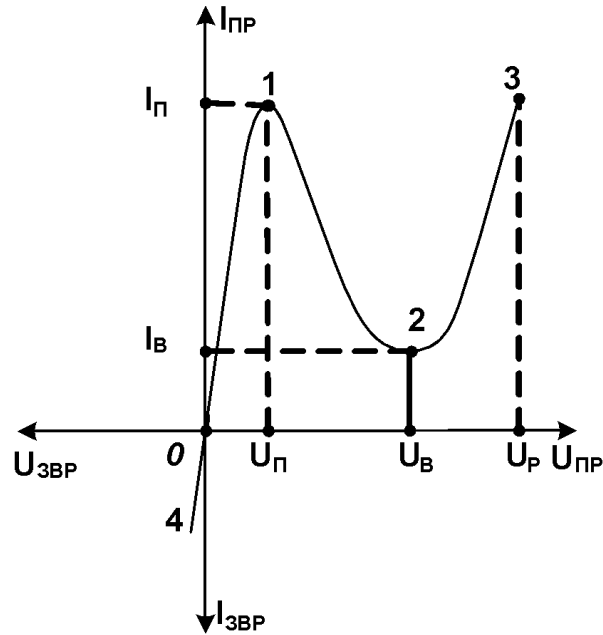


Рис. 14 – ВАХ тунельного діода

До основних електричних параметрів ТД належать:

I_{Π} - напруга піка - піковий (максимальний) струм ТД;

U_{Π} - напруга піка;

I_B - струм впадини ТД (мінімальний струм);

$\gamma = \frac{I_{\Pi}}{I_B} = 5 \dots 20$ - відношення пікового струму до струму впадини;

U_B - напруга впадини ТД;

U_P - напруга розхилу;

$U_{\text{ПЕР}}$ - напруга переключення (стрибок напруги) $U_{\text{ПЕР}} = U_P - U_{\Pi}$;

$r_{\text{ДИФ}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ - диференціальний від'ємний опір;

Робочим для ТД є пряме включення (рис. 15).

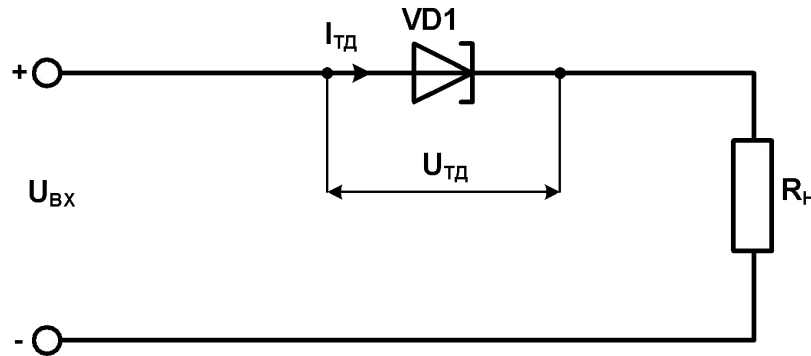


Рис. 15 – Схема включення ТД у електричний ланцюг

Різновидом ТД є обернені діоди - ТД, у яких максимум струму на прямої гілці ВАХ або незначний або повністю відсутній.

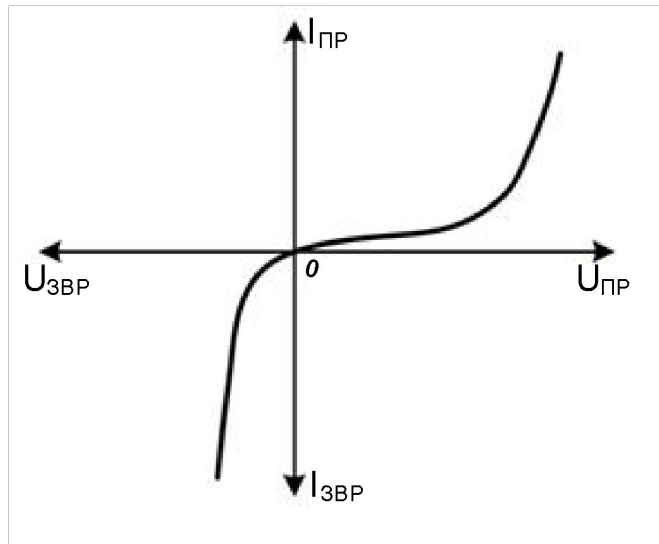


Рис. 16 – ВАХ оберненого діода

4 ВАРИКАПИ

Варикапами називають напівпровідникові діоди, робота яких заснована на використанні залежності бар'єрної ємності р-n переходу від величини прикладеної зворотної напруги.

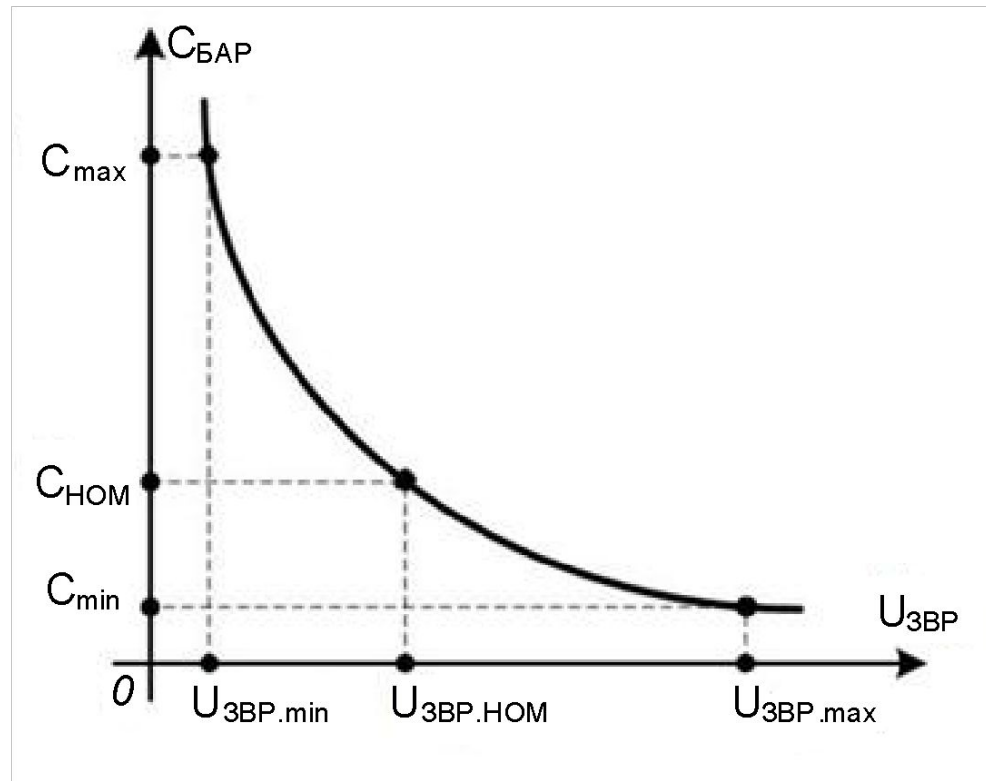


Рис. 17 – Вольт-фарадна характеристика варикапа

До основних параметрів варикапів відносяться: $C_{НОМ}$ (при $U_{ЗВР} = U_{ЗВР.НОМ}$);

C_{max} ; C_{min} ; коефіцієнт перекриття за ємністю $K_{\Pi} = \frac{C_{max}}{C_{min}}$; добротність Q ;

$U_{ЗВР.max}$; температурний коефіцієнт ємності $TK\epsilon \approx \frac{\Delta C}{C_{НОМ}} \cdot \frac{1}{\Delta T} K^{-1}$ (складає

приблизно $(200...500) \cdot 10^{-6} K^{-1}$).

5 ГЕТЕРОПЕРЕХІД

Приклад гетеропереходів: Германій - Кремній, Германій - Арсенід галію і т. ін. Гетероперехід може бути створений напівпровідниками як різних типів провідності n - p; p - n, так і одного типу провідності n - n; p - p. Гетеропереходи застосовуються у фотоелектронних приладах (світлодіоди, фотодіоди).

6 ПЕРЕХІД ШОТТКИ

При контакті металу з напівпровідником n-типу з'являється *перехід Шоттки*. Його особливість - відсутність неосновних носіїв заряду. Перехід Шоттки працює тільки на основних носіях (електронах).

7 ІМПУЛЬСНІ ДІОДИ

Імпульсні діоди - це ВЧ діоди, які призначені для роботи у імпульсних схемах із часом переключення ≤ 1 нс. В них вжиті спеціальні заходи для зниження та скорочення часу життя неосновних носіїв.

Під час подачі прямої напруги діод відкритий і через нього протікає струм:

$$I_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R}$$

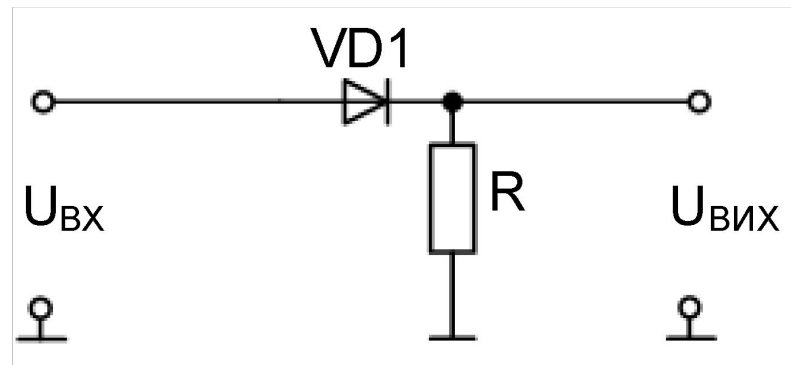


Рис. 18 – Схема включення імпульсного діода у електричний ланцюг

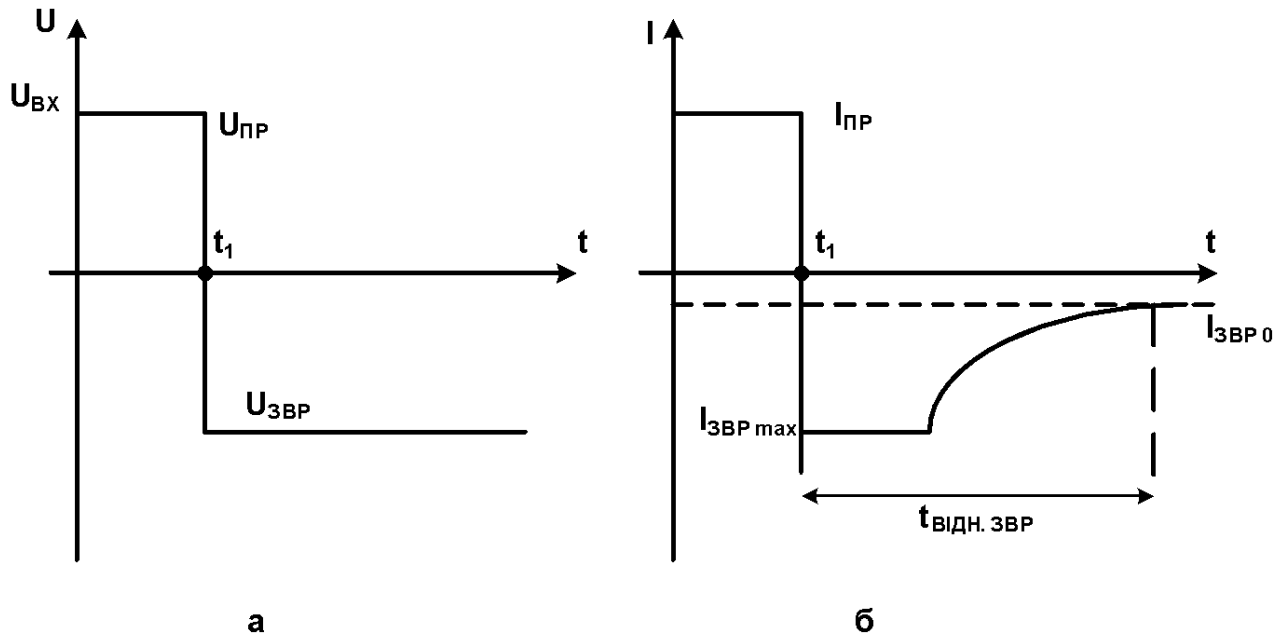


Рис. 19 – Часові діаграми роботи імпульсного діода

8 СТАБІСТОРИ

Стабістор - це напівпровідниковий діод, в якому для стабілізації напруги використовується пряма гілка вольт-амперної характеристики. Відмінною особливістю стабісторів у порівнянні із стабілітронами є менша напруга стабілізації, яка становить приблизно 0,7 В.

9 ДВОАНОДНІ СТАБІЛІТРОНИ

У порівнянні зі звичайними стабілітронами двоанодні стабілітрони мають досить низьку регламентовану напругу пробою (при зворотному включенні) і можуть підтримувати цю напругу на постійному рівні при значній зміні величини зворотного струму.

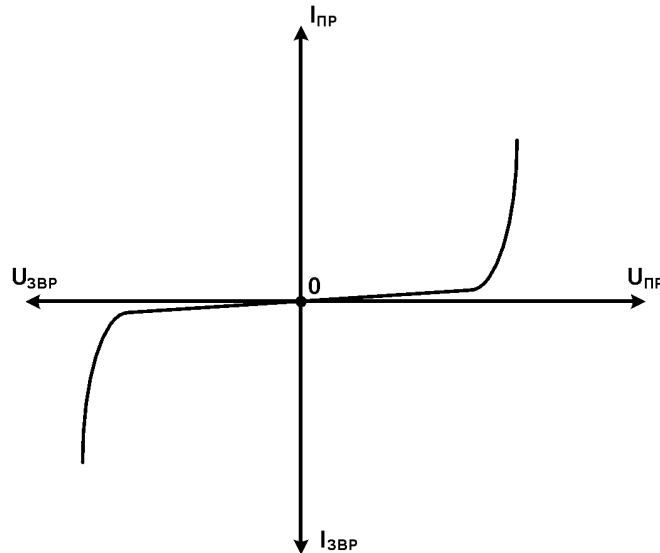


Рис. 20 – ВАХ двоанодного стабілітрона