

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерний навчально-науковий інститут**

А.О. Ніконова, О.Ю. Небеснюк

**ФІЗИКА ЕЛЕКТРОННИХ ПРОЦЕСІВ  
В НАПІВПРОВІДНИКАХ ТА НАНОСТРУКТУРАХ**

Методичні рекомендації до самостійної роботи та  
практичних занять для здобувачів вищої освіти бакалавра  
спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка»  
освітньо-професійної програми  
«Мікро- та наносистемна техніка»

Затверджено  
Вченою радою ЗНУ  
Протокол № 11 від 23.06 2021

Запоріжжя  
2021

УДК 621.38  
НЗ77

Ніконова А.О., Небеснюк О.Ю. Фізика електронних процесів в напівпровідниках та наноструктурах: методичні рекомендації до самостійної роботи та практичних занять для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»: ЗНУ, 2021. 54с.

Методичні рекомендації до самостійної роботи та практичних занять розроблено для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка». Запропоновані завдання призначені для освоєння теоретичного матеріалу, опанування навичок розв'язання практичних задач, виконання самостійних завдань.

Рецензент

*В.Л. Коваленко*, доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та енергоефективності

Відповідальний за випуск

*Т.В. Критська*, доктор технічних наук, професор кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем

## Зміст

Вступ	4
1 Статистика електронів та дірок в напівпровідниках.....	5
Концентрація носіїв заряду і положення рівня Фермі.....	5
Концентрація електронів і дірок у власному напівпровіднику.....	8
Концентрація електронів і дірок у домішковому напівпровіднику.....	10
Визначення положення рівня Фермі.....	11
2 Генерація та рекомбінація носіїв заряду в напівпровідника.....	16
3 Дифузія та дрейф носіїв заряду.....	22
4 Дифузія та дрейф носіїв заряду в магнітному полі.....	27
5 Контактні явища в напівпровідниках.....	32
6 Завдання для самостійної роботи.....	37
Електронно-дірковий перехід.....	37
Структура метал-напівпровідник.....	39
Приклад розрахунку необхідних електрофізичних параметрів.....	40
Приклад розрахунку необхідних електрофізичних характеристик структури метал – напівпровідник.....	43
Варіанти завдань.....	46
ЛІТЕРАТУРА.....	50
Додаток А.....	51
Додаток В.....	52

## ВСТУП

Методичні рекомендації «Фізика електронних процесів в напівпровідниках та наноструктурах» розроблені для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»

Метою викладання навчальної дисципліни «Фізика електронних процесів в напівпровідниках та наноструктурах» є надання студентам поглиблених уявлень в області електронних процесів, що відбуваються в металах та напівпровідниках при дії на них зовнішніх впливів, таких як температура, електричне та магнітне поле, дія світла.

Основними завданнями викладання дисципліни «Фізика електронних процесів» є надання студентам знань і розуміння концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування в мікро- та наносистемній техніці.

Вивчення навчальної дисципліни забезпечує набуття студентами наступних загальних та спеціальних компетентностей:

- здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки;
- здатність застосовувати відповідні наукові та інженерні методи, сучасні інформаційні технології і комп'ютерне програмне забезпечення, комп'ютерні мережі, бази даних та Інтернет-ресурси для розв'язання професійних задач в галузі мікро- та наносистемної техніки;
- здатність ідентифікувати, класифікувати, оцінювати і описувати процеси у мікро- та наносистемній техніці за допомогою побудови і аналізу їх фізичних і математичних моделей;
- здатність розв'язувати інженерні задачі в галузі мікро- та наносистемної техніки з урахуванням всіх аспектів розробки, проектування, виробництва, експлуатації та модернізації;
- здатність визначати та оцінювати характеристики та параметри матеріалів мікро- та наносистемної техніки, аналогових та цифрових електронних пристроїв, мікропроцесорних систем;
- здатність розуміти та застосовувати технологічні принципи виробництва, випробування, експлуатації та ремонту мікро- та наносистемної техніки та біомедичного обладнання.

## 1 СТАТИСТИКА ЕЛЕКТРОНІВ ТА ДІРОК В НАПІВПРОВІДНИКАХ

Рівноважні процеси - процеси, що відбуваються в тілах, які не піддаються зовнішнім діям. У стані термодинамічної рівноваги для цього зразка кристала при заданій температурі існує певний розподіл електронів і дірок по енергіях, а також значення їх концентрацій. Обчислення концентрацій основних і неосновних носіїв заряду складає головне завдання статистики електронів і дірок в кристалах.

### Концентрація носіїв заряду і положення рівня Фермі

Електрони, як частинки, що володіють напівцілим спіном, підкоряються статистиці Фермі-Дірака. Імовірність того, що електрон буде перебувати в квантовому стані з енергією  $E$ , виражається функцією Фермі-Дірака:

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}. \quad (1.1)$$

Тут  $F$  - електрохімічний потенціал, або рівень Фермі. З (1.1) видно, що рівень Фермі можна визначити як енергію такого квантового стану, ймовірність заповнення якого дорівнює  $1/2$ .

Вид функції Фермі-Дірака схематично показаний на рисунку 1.1. При  $T=0$  вона має вид розривної функції. Для  $E < F$  вона дорівнює 1, а значить, всі квантові стани при  $E < F$  заповнені електронами. Для  $E > F$  функція  $f = 0$  і відповідні квантові стани зовсім не заповнені. При  $T > 0$  функція Фермі зображується безперервною кривою і у вузькій області енергій, порядку декількох  $kT$ , в околі точки  $E = F$  швидко змінюється від 1 до 0. Розмиття функції Фермі тим більше, чим вище температура.

Обчислення різних статистичних величин значно спрощується, якщо рі-

вень Фермі  $F$  лежить в забороненій зоні енергій і віддалений від краю зони  $E_c$  хоча б на  $2kT$  (в деяких підручниках пишуть  $E_c - E > kT$ ). Тоді в розподілі (1.1) одиницею в знаменнику можна знехтувати і воно переходить у розподіл Максвелла - Больцмана класичної статистики. Це випадок невродженого напівпровідника :

$$f(E, T) = \exp\left(-\frac{(E - F)}{kT}\right). \quad (1.2)$$

Концентрація електронів у зоні провідності дорівнює:

$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{\infty} N_c(E) f(E, T) dE. \quad (1.3)$$

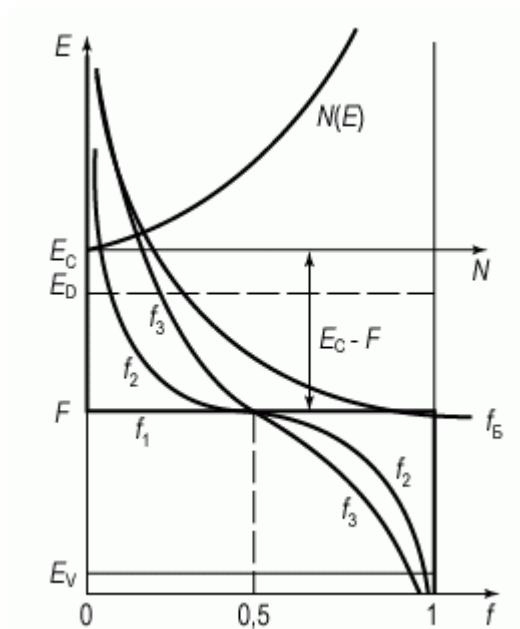


Рисунок 1.1 - Функція розподілу густини станів у зоні провідності  $N(E)$ , функції Фермі-Дірака  $f$  і Больцмана  $f_B$

Відзначимо, що в якості верхньої межі в написаному інтегралі ми повинні були б взяти енергію верхнього краю зони провідності. Але, так як функція  $f$  для енергій  $E > F$  експоненціально швидко убиває зі збільшенням  $E$ , то заміна верхньої межі на нескінченність не змінює значення інтеграла. Підставляємо в

(1.3) вираз (1.2). Розрахунок інтеграла нескладний. Отримаємо

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right), \quad (1.4)$$

де

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{3/2}. \quad (1.5)$$

Величина  $N_c$  отримала назву ефективної густини станів у зоні провідності.

У разі невиродженого напівпровідника, коли рівень Фермі лежить вище стелі валентної зони хоча б на  $2kT$ , тобто  $F - E_c > 2kT$  (в деяких підручниках пишуть  $F - E_c > kT$ ), функція Фермі-Дірака для дірок  $f_p$  має вигляд

$$f_p = \exp\left(-\frac{F - E}{kT}\right), \quad (1.6)$$

а концентрація дірок у валентній зоні

$$p = N_v \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right), \quad (1.7)$$

де  $E_v$  - енергія, відповідна стелі валентної зони, а  $N_v$  розраховується по рівнянню (1.5), якщо замість  $m_n$  взяти ефективну масу дірки  $m_p$ . Величина  $N_v$  - ефективна густина станів у валентній зоні.

Відзначимо, що в (1.3) перед інтегралом з'явився множник 2, що пов'язано з тим, що на кожному рівні енергії можуть знаходитися два електрони із протилежними спінами (принцип Паулі).

Для розрахунку  $n$  і  $p$  з рівнянь (1.4) і (1.7) необхідно знати положення рівня Фермі  $F$ . Однак добуток концентрацій електронів і дірок для невиродженого

напівпровідника не залежить від рівня Фермі, хоча залежить від температури:

$$n \cdot p = (n_i)^2 = N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right). \quad (1.8)$$

Це рівняння використовується для розрахунку  $p$  при відомому  $n$  або, навпаки, для розрахунку  $n$  при відомому  $p$ . Величина  $n_i$  при певних температурах для конкретних напівпровідників наводиться в довідниках.

### Концентрація електронів і дірок у власному напівпровіднику

Нагадаємо, що напівпровідник називається власним, якщо в ньому відсутні донорні і акцепторні домішки. У цьому випадку електрони з'являються в зоні провідності тільки за рахунок теплового закидання з валентної зони, тоді  $n = p$  (рис. 1.2).

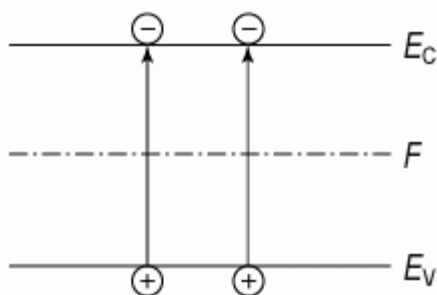


Рисунок 1.2 - Закид з валентної зони

При відсутності зовнішніх впливів (освітлення, електричне поле і т. д.) будемо позначати концентрації вільних електронів і дірок з індексом нуль, тобто  $n_0$  і  $p_0$  відповідно. При  $n_0 = p_0$  з (1.8) отримуємо:

$$n_0 = p_0 = n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right). \quad (1.9)$$

Нагадаємо, що значком  $n_i$  прийнято позначати концентрацію власних носіїв заряду в зоні провідності і валентній зоні. Для розрахунку  $N_c$  і  $N_v$  викорис-



товується формула (1.5). Як випливає з співвідношення (1.9), концентрація власних носіїв визначається в основному температурою і шириною забороненої зони напівпровідника. На малюнку 1.2 представлена залежність концентрації власних носіїв від температури для найбільш поширених напівпровідників - кремнію, германію, арсеніду і фосфіду галію. Видно, що при зміні ширини забороненої зони у діапазоні від 0,6 еВ для германію до 2,8 еВ для фосфіду галію власна концентрація  $n_i$  при кімнатній температурі змінюється від значення  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $10^1 \text{ см}^{-3}$ .

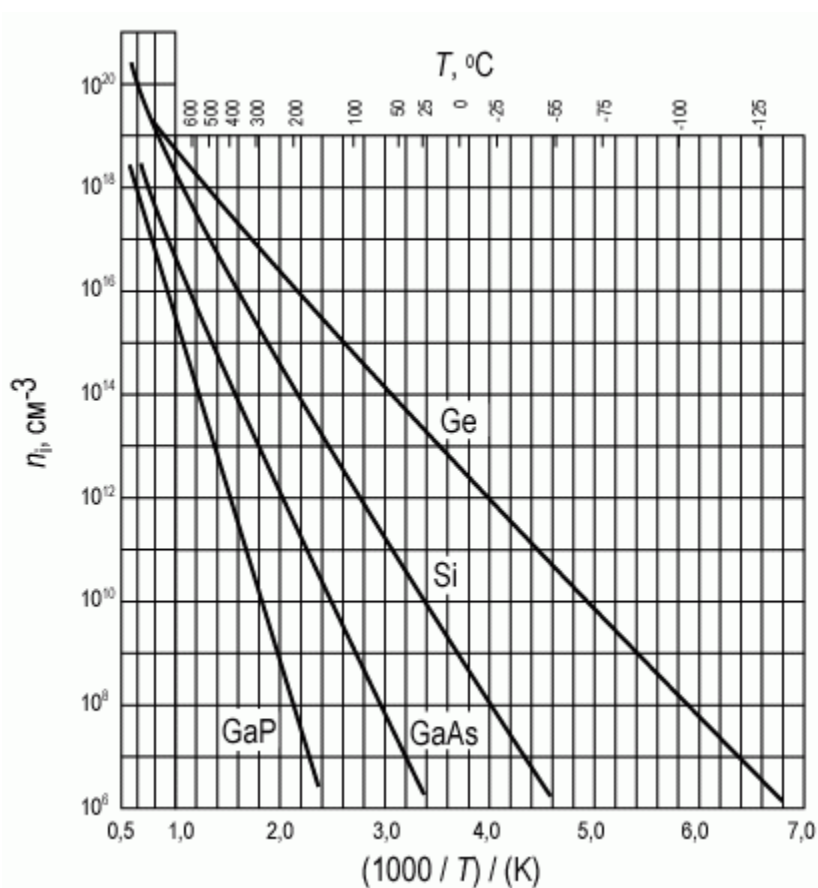


Рисунок - 1.2 - Залежність концентрації власних носіїв від температури для найбільш поширених напівпровідників - кремнію, германію, арсеніду і фосфіду галію

## Концентрація електронів і дірок у домішковому напівпровіднику

Рівняння (1.8) справедливо тільки для рівноважних носіїв заряду, тобто у відсутності зовнішніх впливів. У наших позначеннях

$$n_0 \cdot p_0 = (n_i)^2. \quad (1.10)$$

Нехай напівпровідник легований донорами з концентрацією  $N_D$ . При кімнатній температурі в більшості напівпровідників всі донори іонізовані, так як енергії активації донорів складають всього декілька сотих електронвольта. Тоді для донорного напівпровідника (рис. 1.3)

$$n_0 = N_D. \quad (1.11)$$

Концентрацію дірок у донорному напівпровіднику знайдемо з (1.16):

$$p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1.12)$$

На рисунку 1.3 наведена зонна діаграма напівпровідника n-типу, що показує положення енергетичних рівнів донорної домішки  $E_D$  і схематичне співвідношення концентрацій основних  $n_0$  і неосновних  $p_0$  носіїв.

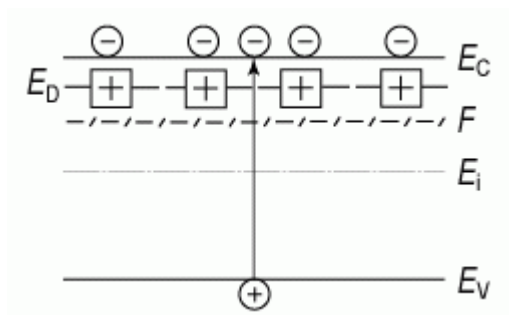


Рисунок 1.3 - Зонна діаграма напівпровідника n-типу

Відповідно якщо напівпровідник легований акцепторами з концентрацією  $N_A$ , то концентрації основних  $p_0$  і неосновних  $n_0$  носіїв будуть

$$p_0 = N_A \text{ и } n_0 = \frac{n_i^2}{N_A}. \quad (1.13)$$

На рисунку 1.4 наведена зонна діаграма напівпровідника р-типу, що показує положення енергетичних рівнів акцепторної домішки  $E_A$  і схематичне співвідношення концентрацій основних  $p_0$  і неосновних  $n_0$  носіїв.

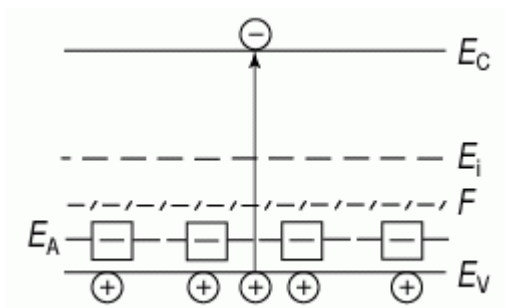


Рисунок 1.4 - Зонна діаграма напівпровідника р-типу

### Визначення положення рівня Фермі

У попередніх міркуваннях ми вважали, що рівень Фермі задано. Подивимося тепер, як можна знайти положення рівня Фермі.

Для власного напівпровідника рівняння електронейтральності набуває вигляду  $p - n = 0$  або  $p = n$ . Якщо ширина забороненої зони напівпровідника досить велика ( $E_g$  багато більше  $kT$ ) і якщо ефективні маси електронів  $m_n$  і дірок  $m_p$  одного порядку, то рівень Фермі буде досить віддалений від країв зон ( $E_C - F > 2kT$  і  $F - E_V > 2kT$ ) і напівпровідник буде невідродженим.

Підставляючи (1.4) і (1.7) у рівняння  $p + p_D - n - n_A = 0$ , маємо:

$$N_C \exp\left(\frac{F - E_C}{kT}\right) = N_V \exp\left(\frac{E_V - F}{kT}\right). \quad (1.14)$$

Звідси обчислюємо  $F$ . Рівняння (1.14) - це рівняння першого порядку щодо  $\exp(F/kT)$ .

Це дає

$$F = E_i - \frac{1}{2} kT \ln \left( \frac{N_c}{N_v} \right) = E_i - \frac{3}{4} kT \ln \left( \frac{m_n^*}{m_p^*} \right), \quad (1.15)$$

де через  $E_i = (1/2) * (E_v + E_c)$  позначена енергія середини забороненої зони. При виведенні правого виразу для  $F$  величина  $(N_c / N_v)$  була замінена на  $(m_n^* / m_p^*)$  за допомогою рівняння (1.15).

Для випадку  $m_n^* = m_p^*$  енергія Фермі у власному напівпровіднику знаходиться посередині забороненої зони  $F = (E_c + E_v)/2$ .

Положення рівня Фермі залежить від того, які інші величини задані. Якщо відомі концентрації носіїв заряду в зонах  $n$  і  $p$ , то значення  $F$  можна визначити з формули (1.4) і (1.7). Так, для невідродженого напівпровідника  $n$ -типу маємо:

$$F = E_c - kT \cdot \ln \frac{N_c}{n}. \quad (1.16)$$

Аналогічно для невідродженого напівпровідника  $p$ -типу:

$$F = E_v + kT \cdot \ln \left( \frac{N_v}{p} \right). \quad (1.17)$$

З виразів (1.16 та 1.17) видно, що чим більше концентрація основних носіїв, тим ближче рівень Фермі до краю відповідної зони. Для донорного напівпровідника  $n_0 = N_D$ , тоді

$$F = E_c - kT \cdot \ln \frac{N_c}{N_D}. \quad (1.18)$$

Для акцепторного напівпровідника  $p_0 = N_A$ , тоді

$$F = E_v + kT \cdot \ln \left( \frac{N_v}{N_A} \right). \quad (1.19)$$

## Рішення задач

1. Знайти положення рівня Фермі та температурну залежність концентрації у власному напівпровіднику в невиродженому випадку. Як зміниться концентрація електронів при зміні температури від 200К до 300К , якщо  $E_g = (0,785\text{eV} - \zeta T)$
2. Концентрація електронів у власному напівпровіднику при температурі 400К дорівнює  $1,38 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Знайти добуток ефективних мас електронів та дірок , якщо відомо, що ширина забороненої зони змінюється за законом  $E_g = (0,785\text{eV} - 4 \cdot 10^{-4} T)\text{eV}$ .
3. Розрахувати положення Фермі відносно середини забороненої зони у власному напівпровіднику Si та InSb (антимоніди індію) при  $T=300\text{K}$  з урахуванням різниці значень ефективних мас електронів та дірок.
4. Знайти об'ємне положення рівня Фермі  $\phi_0$  в n – GaAs при питомому опорі  $8,4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
5. Знайти об'ємне положення рівня Фермі  $\phi_0$  в InAs при питомому опорі  $10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
6. Германій легований домішкою As до концентрації  $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Вважати домішку повністю іонізованою. Знайти концентрацію основних та неосновних носіїв при температурі 300К.
7. Яка імовірність заповнення електронами рівній розташованих на  $kT$  вище рівня Фермі?
8. На якій відстані (в одиницях  $kT$ ) від рівня Фермі знаходяться рівні, імовірність заповнення яких 0,1 та 0,9?
9. При якій температурі концентрація власних носіїв в кремнії буде дорівнювати концентрації власних носіїв в германії при температурі 300К?

10. Яка імовірність знайти електрон на дні зони провідності у власному германії ( $E_g = 0,72$  eV), якщо температура зразка дорівнює 30К?
11. Рівень Фермі напівпровідника знаходиться на 0,3eV нижче зони провідності. Яка імовірність того, що при кімнатній температурі енергетичні рівні, розташовані на відстані  $3kT$  вище дна зони провідності, зайняті електронами, якщо  $E_g = 1,1$  eV?
12. Визначити питомий електричний опір кремнія при температурі 300К, якщо концентрація донорної домішки дорівнює  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Рухомість електронів в кремнії при кімнатній температурі прийняти як  $0,14 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .
13. Концентрація носіїв в кремнії дорівнює  $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , рухомість електронів  $\mu_n = 0,15 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  та дірок  $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Визначити опір кремнієвого зразка довжиною 5см та перерізом  $2 \text{ мм}^2$ .
14. Визначити питомий електричний опір кремнія р-типа при температурі 300К якщо концентрація акцепторної домішки дорівнює  $20 \text{ м}^{-3}$ . Рухомість дірок при температурі 300 К прийняти як  $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .
15. Визначити імовірність заповнення електронами рівнів розташованих на  $3kT$  нижче рівня Фермі.
16. Зразок германію має домішку фосфора  $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Визначити питомий опір та тип провідності при  $T = 300\text{К}$ .
17. Зразок германію має домішку фосфора  $2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Визначити концентрацію домішки необхідну для зміни питомого опору до значення  $0,006 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;
18. Знайти положення рівня Фермі у власному напівпровіднику відносно середини забороненої зони при  $T = 300\text{К}$ , якщо ефективна маса електрона в 2 рази більша ефективної маси дірки.
19. Яка імовірність знайти електрон на дні зони провідності при  $T = 300\text{К}$  в алмазі ( $E_g = 5,6$  eV)?

20. В зоні провідності GaAs поряд з основним мінімумом(I), який лежить в центрі зони Бріллюена, є побічні мінімуми, розташовані на  $E_s$  вище основного. Дослідити концентраційну залежність рівня Фермі в такому напівпровіднику для неvirодженого електронного газу. Впливом інших зон знехтувати.
21. Розрахувати залежність населеності верхніх мінімумів арсеніду галія від температури електронного газу у відсутність virодження. Чому дорівнює відношення концентрацій електронів верхніх мінімумів  $n_{II}$  до концентрації електронів основного мінімуму  $n_I$  при 300 К і при 1000 К. Ефективну масу густини станів для електронів верхнього мінімуму прийняти рівною  $m_{II} = 15m_{II}$ ;  $E_s = 0,35$  eВ, а повну щільність електронів вважати не залежною від температури.
22. Дослідити залежність провідності GaAs від температури електронного газу. Рухливості в мінімумах(I) і (II) та повну концентрацію електронів вважати не залежними від температури. Знайти зміну провідності при зміні температури електронного газу від 300 До 1000 К, якщо відношення рухливості  $\frac{\mu_1}{\mu_2} = 50$ . Потрібні значення параметрів взяти із попередньої задачі.
23. Концентрація електронів у власному н/п, при  $T = 400$  К, дорівнює  $1,38 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Знайти значення добутку ефективних мас електрона та дірки, якщо відомо, що ширина забороненої зони змінюється за законом  $E_g = (0,785 - 4 \cdot 10^{-4} T)$  eВ.

## 2 ГЕНЕРАЦІЯ ТА РЕКОМБІНАЦІЯ В НАПІВПРОВІДНИКАХ

Утворення вільних носіїв заряду в напівпровідниках пов'язано з переходом електронів з валентної зони в зону провідності. Для здійснення такого переходу електрон повинен отримати енергію, достатню для подолання забороненої зони. Цю енергію електрон отримує від іонів решітки, здійснюючих теплові коливання. Концентрація носіїв заряду, викликана термічним порушенням у стані теплової рівноваги, називається рівноважною.

Однак, крім теплового збудження, поява вільних носіїв заряду може бути пов'язано з іншими причинами, наприклад в результаті опромінення фотонами або частинками великої енергії, ударної іонізації, введення носіїв заряду в напівпровідник з іншого тіла (інжекція) та ін. Виникли таким чином надлишкові носії заряду називаються нерівноважними. Процес введення нерівноважних носіїв заряду називають інжекцією. Таким чином, повна концентрація носіїв заряду дорівнює:

$$n = n_0 + \Delta n;$$

$$p = p_0 + \Delta p,$$

де  $n_0$  і  $p_0$  - рівноважна концентрація, а  $\Delta n$  і  $\Delta p$  - нерівноважні концентрації електронів і дірок.

Якщо порушення надлишкових електронів проводилося з валентної зони, а напівпровідник однорідний і не містить об'ємного заряду, то концентрація надлишкових електронів дорівнює концентрації надлишкових дірок:

$$\Delta n = \Delta p .$$

Після припинення дії механізму, що викликало появу нерівноважної концентрації носіїв, відбувається поступове повернення до рівноважного стану.

Процес встановлення рівноваги полягає в тому, що кожен надлишковий електрон при зустрічі з вакантним місцем (діркою) займає його, в результаті чого пара нерівноважних носіїв зникає. Явище зникнення пари носіїв отримало назву рекомбінації. У свою чергу, збудження електрона з валентної зони або



домішкового рівня, що супроводжується появою дірки, називається генерацією носіїв заряду.

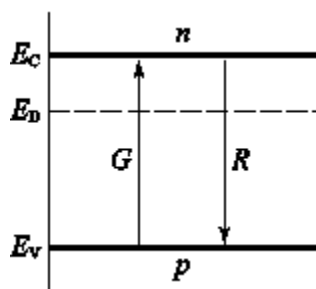


Рисунок 1.5 -  $G$  - темп генерації,  $R$  - темп рекомбінації вільних носіїв заряду у власному напівпровіднику.

Швидкість (темп) рекомбінації  $R$  пропорціональна концентрації вільних носіїв заряду. При відсутності освітлення (в темряві)  $G = G_0$  і  $R = R_0 = \gamma \cdot n_0 \cdot p_0$ , величини  $n_0$  і  $p_0$  іноді називають темновими концентраціями вільних електронів і дірок відповідно. Враховуючи закон діючих мас  $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ , отримаємо

$$R_0 = \gamma \cdot N_C N_V \cdot e^{-\frac{E_g}{k_B T}}, \quad (1.20)$$

где  $E_g = E_C - E_V$  – ширина забороненої зони. Таким чином, швидкість рекомбінації  $R_0$  буде більше в вузькозонних напівпровідниках і при високих температурах.

Якщо в напівпровіднику немає електричного струму і об'ємних зарядів, то зміна в часі нерівноважних концентрацій електронів і дірок у зонах визначається рівняннями:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = G - R \quad (1.21)$$

Швидкості (темпи) генерації і рекомбінації мають дві складові:

$$G = \Delta G + G_0, \quad R = \Delta R + R_0, \quad (1.22)$$

де  $\Delta G$ ,  $\Delta R$  - темпи генерації і рекомбінації тільки нерівноважних електронів, тобто  $\Delta G$  - це темп генерації електронів і дірок за рахунок освітлення напівпровідника,  $R_0 = \gamma \cdot n_0 \cdot p_0$  і  $\Delta R = \gamma \cdot \Delta n \cdot \Delta p$ .

Розглянемо процес рекомбінації нерівноважних носіїв заряду (тобто при вимкненні освітлення в момент часу  $t = 0$ ). Загальне рішення рівняння (1.23) досить складне. Тому розглянемо два приватних випадки. У власному напівпровіднику при сильному освітленні концентрація надлишкових електронів набагато більше суми рівноважних концентрацій електронів і дірок  $\Delta n \gg n_0 + p_0$ . З (1.23) отримаємо:

$$\Delta p = \Delta n = \frac{\Delta n_0}{1 - \gamma \cdot \Delta n_0 \cdot t}, \quad (1.24)$$

З урахуванням критерію низького рівня інжекції рівняння (1.24) зводиться до вигляду:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\gamma n_0 \Delta n = -\frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad (1.25)$$

де  $\tau_n$  – час життя неосновних носіїв, які мають наступні значення:

$$\tau_n = \frac{1}{\gamma n_0} = \frac{1}{\gamma N_D} \quad (1.26)$$

Рівняння (1.25) легко вирішується:

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (1.27)$$

де  $\Delta n_0$  - початкова концентрація нерівноважних носіїв заряду. Спад концентрації відбувається за гіперболічним законом.

Величина  $\tau_n$  має сенс середнього часу життя нерівноважних електронів у зоні провідності. Отримані рішення відповідають кривій, зображеної на рис. 1.6. З формули (1.27) видно, що процес рекомбінації описується експоненціаль-

ною залежністю від часу, причому середній час життя являє собою такий відрізок часу, за який концентрація надлишкових носіїв змінюється в  $e$  раз. На закінчення відзначимо, що нерівноважні носії заряду з'являються тільки в тому випадку, якщо енергія фотонів при освітленні напівпровідника перевищує ширину забороненої зони ( $h\nu > E_g$ ).

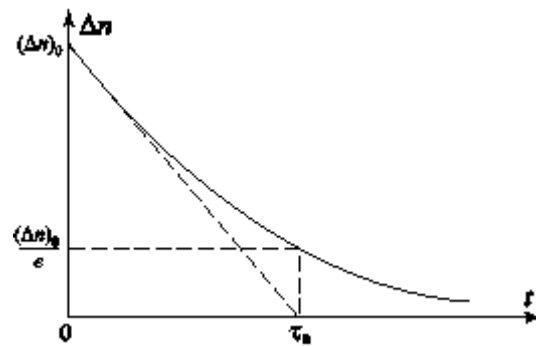


Рисунок 1.6 - Спад нерівноважної концентрації електронів в часі в донорному напівпровіднику

## Рішення задач

1. В момент часу  $t_1 = 10^{-4}$  с після виключення рівномірної по об'єму генерації електронно - діркових пар нерівноважна концентрація носіїв виявилася в 10 разів більше, ніж в момент  $t_2 = 10^{-3}$  с. Визначити час життя  $\tau$ , якщо рівень збудження малий й рекомбінація відбувається через прості дефекти.
2. Зразок n-Si з питомим опором  $0,6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  містить  $N_t = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  центрів генерації - рекомбінації, розташованих на рівні Фермі для матеріалу з власною провідністю. Перетин захоплення носіїв заряду  $S = 10^{-15} \text{ см}^{-3}$ , теплова швидкість  $10^7 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ .
  - 1) Обчислити швидкість генерації, якщо область була збіднена рухомими носіями заряду.
  - 2) Обчислити швидкість генерації в області, де тільки концентрація неосновних носіїв заряду знижена порівняно з рівноважними значеннями.
3. В германії n-типу знаходяться центри рекомбінації з  $N_t = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  та  $E_t = (E_c + E_v)/2$ . При температурі 300К перетини захоплення електронів та дірок однакові, при малих відхиленнях від рівноваги  $\tau = 10^{-4}$  с,  $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Знайти перетин захоплення S.
4. Енергія електронів, генерованих світлом в зоні провідності становила 1 еВ. Розсіюючись на довгохвильових акустичних фонах, електрони за зіткнення будуть передавати ґраткам енергію  $2 \cdot 10^{-3}$  еВ. Через скільки часу надлишкові електрони отримають температуру кристалічної ґратки, якщо довжина вільного пробігу електронів  $10^{-6}$  см, а їх теплова швидкість  $10^7 \text{ см/с}$ .
5. Зразок n-Si з питомим опором  $0,6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  містить  $N_t = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  центрів генерації-рекомбінації, розташованих на рівні Фермі для матеріалу з власною провідністю. Перетин захоплення носіїв заряду  $\sigma_t = 10^{-15} \text{ см}^2$ , теплова швидкість  $v_t = 10^7 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ .
  - 1) Розрахувати швидкість генерації якщо область збіднена рухливими

носіями заряду;

- 2) Розрахувати швидкість генерації в області де тільки концентрація неосновних носіїв знижена відповідно до рівноважного значення.
6. В зразку n - Ge з  $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  рекомбінація відбувається на простих центрах, їх енергетичний рівень  $E_t$  розташовано в верхній половині забороненої зони і  $N_t = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . При  $T = 300 \text{ K}$  час життя  $\tau = 17 \text{ мкс}$ , при  $T = 200 \text{ K}$  час життя  $\tau = 2 \text{ мкс}$ . При більш низьких температурах  $\tau \sim T^{-1/2}$  визначити  $E_t$  та  $S_p$  вважаючи  $n_0$  та перетин захоплення  $S_p$  постійними.

### 3 ДИФУЗИЯ ТА ДРЕЙФ НОСІЇВ ЗАРЯДУ

При додатку електричного поля до однорідного напівпровідника в останньому тече електричний струм. При наявності двох типів вільних носіїв - електронів і дірок - провідність  $\sigma$  напівпровідника буде визначатися сумою електронної  $\sigma_n$  та діркової  $\sigma_p$  компонент провідності:  $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$ . Величина електронної та діркової компонент повної провідності визначається класичним співвідношенням:

$$\sigma_n = \mu_n n_0 e, \quad \sigma_p = \mu_p p_0 e, \quad (1.28)$$

де  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – рухливості електронів та дірок відповідно. Детальний аналіз провідності напівпровідників на основі кінетичного рівняння Больцмана показує, що величина рухливості  $\mu$  визначається наступним співвідношенням:

$$\mu_n = \frac{e \langle \tau \rangle}{m_n^*}, \quad (1.29)$$

де  $\langle \tau \rangle$  – середній час релаксації.

Для легованих напівпровідників концентрація основних носіїв завжди значно більша, ніж концентрація неосновних носіїв, тому провідність таких напівпровідників буде визначатися тільки компонентою провідності основних носіїв. Так, для напівпровідника n-типу

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p \approx \sigma_n. \quad (1.30)$$

Величина, зворотна питомої провідності, називається питомим опором:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\sigma_n + \sigma_p} \approx \frac{1}{\sigma_n}. \quad (1.31)$$

Тут  $\rho$  - питомий опір, зазвичай вимірюється в одиницях [Ом·см]. Для типових напівпровідників, що використовуються у виробництві інтегральних схем, величина питомого опору знаходиться в діапазоні  $\rho = (1 \div 10)$  Ом·см.

Підставляючи співвідношення (1.28) (1.31), отримуємо:

$$\rho = \frac{1}{\sigma_n} = \frac{1}{e\mu_n n_0} = \frac{1}{e\mu_n N_D}, \quad (1.32)$$

де  $N_D$  - концентрація донорів в напівпровіднику n-типу в умовах повної іонізації донорів, рівна концентрації вільних електронів  $n_0$ .

У галузевих стандартах для маркування напівпровідникових пластин зазвичай використовують таке скорочене позначення типу КЕФ-4,5. В цих позначеннях перші три букви позначають назву напівпровідника, тип провідності, найменування легуючої домішки. Цифри після літер означають питомий опір, виражений в позасистемних одиницях, Ом·см. Наприклад, ГДА-0,2 - германій, діркового типу провідності легованого алюмінієм, з питомим опором  $\rho = 0,2$  Ом·см; КЕФ-4,5 - кремній, електронного типу провідності, легований фосфором, з питомим опором  $\rho = 4,5$  Ом·см.

Як вже зазначалося вище, провідність, а отже, і струм у напівпровідниках обумовлені двома типами вільних носіїв. Поява електричного струму обумовлено двома причинами: наявністю електричного поля і наявністю градієнта концентрації вільних носіїв. З урахуванням сказаного щільність струму в напівпровідниках в загальному випадку буде сумою чотирьох компонент:

$$j = j_p + j_n = j_{pE} + j_{pD} + j_{nE} + j_{nD}, \quad (1.33)$$

де  $j$  – щільність струму,  $j_p$  – діркова компонента,  $j_n$  – електронна компонента,  $j_{nE}$  – дрейфова компонента електронного струму,  $j_{nD}$  – дифузійна компонента електронного струму,  $j_{pE}$  – дрейфова компонента діркового струму,  $j_{pD}$  – дифузійна компонента діркового струму.

Вираз для кожної з компонент струму дається наступними співвідношеннями:

$$j_{nE} = e\mu_n nE = \sigma_n E, \quad (1.34)$$

$$j_{pE} = e\mu_p pE = \sigma_p E, \quad (1.35)$$

$$j_{nD} = eD_n \frac{dn}{dx}; \quad (1.36)$$

$$j_{pD} = -eD_p \frac{dp}{dx}, \quad (1.37)$$

де  $D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів, пов'язаний з рухливістю електронів

$\mu_n$  співвідношенням  $D_n = \frac{k_B T}{e} \mu_n$ . Аналогічні співвідношення для коефіцієнтів дифузії дірок  $D_p$  і рухливості дірок  $\mu_p$ .

### Рішення задач

1. Розрахувати коефіцієнти дифузії електронів та дірок в невідродженому германію та кремнію при температурі 300К, якщо рухливість електронів та дірок при цієї температурі дорівнюють: в германії  $\mu_n=3800 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p=1800 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , в кремнії  $\mu_n=1450 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p=500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .
2. Розрахувати дифузійну довжину електронів в невідродженому германію при температурі 300К, якщо час життя електронів складає: 1)  $\tau_n=10^{-4} \text{ с}$ , 2)  $\tau_n=10^{-6} \text{ с}$ ; рухливість електронів  $\mu_n=3800 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
3. Обчислити коефіцієнт біполярної дифузії для власного германія при кімнатній температурі:  $b=2,1$ ;  $\mu_n=3800 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .
4. Обчислити коефіцієнт біполярної дифузії в арсеніді галію з власною провідністю при температурі 300К;  $\mu_n=8800 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\mu_p=400 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
5. В однорідний напівнескінчений електронний напівпровідник ( $x \geq 0$ ) у площині  $x=0$ , безперервно інжектуються дірки, так що  $\Delta p(0)=10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Знайти нерівноважну концентрацію дірок на відстані  $x = 4 \text{ мм}$  від поверхні, якщо  $\tau_p=10^{-3} \text{ с}$ ,  $D_p=40 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .



6. В деякій точці однорідного електронного напівпровідника світловим зондом генеруються пари носіїв. Вважаючи задачу одномірною, визначити дифузійну довжину дірок, якщо концентрація нерівноважних носіїв на відстані  $x_1=2\text{мм}$ , від зонда дорівнює  $\Delta p_1=10^{16}\text{см}^{-3}$ , а при  $x_2=4,3\text{мм}$  вона дорівнює  $\Delta p_2=10^{13}\text{см}^{-3}$ .
7. У зразку кремнію n-типу при температурі  $T=300\text{К}$  час життя неосновних носіїв  $\tau_p=5\text{мкс}$ , їх рухливість  $\mu_p=0,04\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . В одну з площин зразка вводиться та підтримується постійною у часі надлишкова концентрація дірок  $\Delta p_0=10^{19}\text{м}^{-3}$ . Визначити щільність дифузійного струму в безпосередній близькості до цієї площини. На якій глибині  $x$  концентрація дірок складе  $\Delta p_1=10^{18}\text{м}^{-3}$ . Товщина зразка значно більша дифузійної довжини носіїв заряду.
8. У зразку p-Si який знаходиться при температурі  $300\text{К}$  розподіл домішки вздовж осі  $x$ :  $N_A(x)=N\cdot e^{-x/x_0}$ , де  $x_0=0,5\text{мкм}$ . Вважаючи  $p(x)=N_A(x)$  розрахувати напруженість внутрішнього електричного поля  $E_i$  та щільності дифузійного та дрейфового струмів дірок в залежності від  $N$ . Вважати  $D_p=10\text{см}^2\cdot\text{с}^{-1}$ ,  $\mu_p=3800\text{см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ .
9. Світло падає на зразок кремнію, легованого домішкою з концентрацією  $N_D=10^{16}\text{см}^{-3}$ . При цьому генерується  $10^{21}\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$  електронно-діркових пар. Генерація відбувається рівномірно вздовж зразка. Є  $10^{15}$  центрів генерації - рекомбінації з енергією  $E_t=E_i$ , поперечні перетини захоплення електронів та дірок дорівнюють  $10^{-14}\text{см}^2$ . Розрахувати:
- 1) Встановлені концентрації електронів та дірок після вмикання світла;
  - 2) Час релаксації системи після вимкнення світла  $\tau_p$  та  $\tau_0$ .
10. Зразок арсеніду галію піддається зовнішньому впливу внаслідок чого генерується  $10^{20}\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$  електронно-діркових пар. Рівень легування  $N_D=2\cdot 10^{15}\text{см}^{-3}$ , час життя  $\tau_0=5\cdot 10^{-8}\text{с}$ ,  $T=300\text{К}$ . Розрахувати: 1) коефіцієнт рекомбінації; 2) надлишкову концентрацію неосновних носіїв заряду.

11. Концентрація електронів в однорідному слабо легovanому кремнію n-типу при кімнатній температурі лінійно спадає від  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $x=0$  до  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при  $x=2 \text{ мкм}$  і увесь час підтримується постійною. Знайти щільність струму електронів при відсутності електричного поля. Рухомість при даному рівні легування вважати рівною  $\mu=1000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .
12. Розрахувати відносну зміну провідності  $\Delta\sigma/\sigma_0$  при стаціонарній зміні освітлення з інтенсивністю  $I=5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в германії. Коефіцієнт поглинання  $\gamma=100 \text{ см}^{-1}$ , товщина зразка набагато менша  $\gamma^{-1}$ . Рекомбінація відбувається на простих дефектах, час життя  $\tau_0=2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , рівноважна концентрація електронів  $n_0=10^{15} \text{ см}^{-3}$ .
13. Розрахувати дрейфову довжину нерівноважних дірок в германії n-типу при кімнатній температурі в електричному полі  $E=5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ , якщо дифузійна довжина дірок дорівнює  $L_p=7 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ .

#### 4 ДИФУЗИЯ ТА ДРЕЙФ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ

В однорідному і ізотропному напівпровіднику, що знаходиться під дією електричного поля  $\varepsilon$  і слабкого магнітного поля  $H$ , перпендикулярного  $\varepsilon$ , щільності струму носіїв виражаються наступним чином:

$$j_n = ne\mu_n \left\{ \varepsilon \left[ 1 - \eta_n (\mu_{nH} H / c)^2 \right] - [\varepsilon \times H] \mu_{nH} / c \right\} \quad (1.38)$$

$$j_p = pe\mu_p \left\{ \varepsilon \left[ 1 - \eta_p (\mu_{pH} H / c)^2 \right] + [\varepsilon \times H] \mu_{pH} / c \right\} \quad (1.39)$$

Тут  $\mu_{nH}$  и  $\mu_{pH}$  - холлівські рухливості, а  $\eta_n$  и  $\eta_p$  - константи, що визначаються залежністю довжин вільного пробігу носіїв від енергії. Магнітне поле вважається слабким в тому сенсі, що  $\mu_{nH}H/c \ll 1$ ,  $\mu_{pH}H/c \ll 1$ ; в наведених формулах відкинуті члени вище другого порядку за цими параметрами.

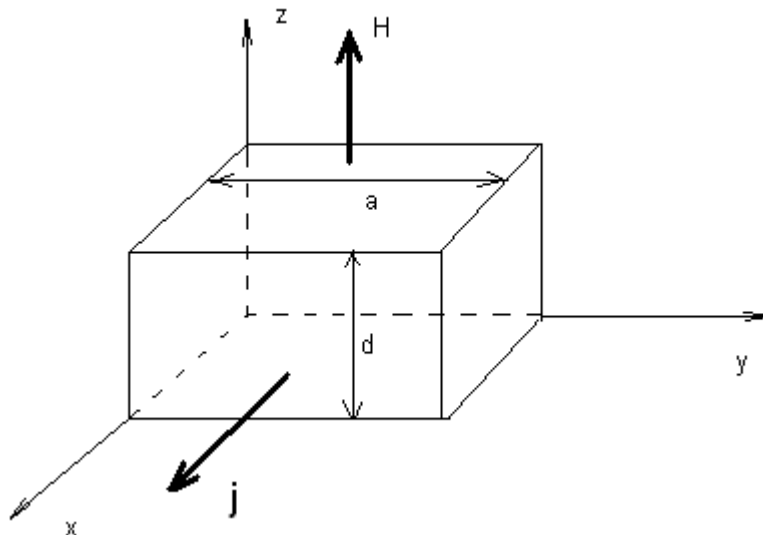


Рисунок 1.7 – Геометрія досвіду зі спостереження ефекту Холла

В умовах досвіду, зображених на рис. 1.7, між бічними торцями зразка виникає напруга Холла  $V_H$ , так що в напрямку вісі  $y$  діє холлівське поле  $\varepsilon_y$ . Відношення

$$R_H = c \varepsilon_y / j_x H \quad (1.40)$$

носить назву постійної Холла ( $j_x$  - щільність струму уздовж вісі  $x$ ). У цих же умовах зв'язок між  $\varepsilon_y$  і  $j_x$  має вигляд

$$\mathbf{j}_x = (\sigma_0 + \Delta\sigma) \varepsilon_y, \quad (1.41)$$

де  $\sigma_0$  - провідність при  $H=0$ , а відносна зміна провідності в слабкому магнітному полі зазвичай виражається таким чином:

$$-\Delta\sigma/\sigma_0 = \zeta R_{H_0}^2 \delta_0^2 H^2/c^2. \quad (1.42)$$

Тут  $R_{H_0}$  - значення постійної Холла при  $H \rightarrow 0$ , а  $\zeta$  - коефіцієнт магнітоопору.

У разі невиродженого неоднорідного напівпровідника ( $n$  і  $p$  залежать від координат) у формулі (1.38) слід провести заміну

$$\varepsilon \rightarrow \varepsilon_n^* = \varepsilon + (kT/e) \text{grad} (\ln n), \quad (1.43)$$

а у формулі (1.39)

$$\varepsilon \rightarrow \varepsilon_p^* = \varepsilon - (kT/e) \text{grad} (\ln p). \quad (1.44)$$

Якщо магнітне поле велике (але не настільки, щоб було  $eH\hbar/mckT \gg 1$ , коли стають істотними квантові ефекти), вплив магнітного поля враховується (у тому випадку, коли довжини вільного пробігу носіїв не залежать від енергії) рівняннями

$$\mathbf{j}_n = \frac{ne\mu_n}{1 + (\mu_n H/c)^2} \{ \varepsilon - [\varepsilon \times H] \mu_n / c \}, \quad (1.45)$$

$$\mathbf{j}_p = \frac{pe\mu_p}{1 + (\mu_p H/c)^2} \{ \varepsilon + [\varepsilon \times H] \mu_p / c \}. \quad (1.46)$$

Первинний потік носіїв, що відхиляється потім магнітним полем, може бути створений не тільки шляхом додатка зовнішнього поля. Нехай як показано на рис. 1.8, одна грань ізольованого прямокутного зразка освітлюється світлом, так що виникають нерівноважні пари електронів і дірок, причому нерівномірно за обсягом.

У напрямку вісі  $x$  створюються дифузійні потоки, а під впливом магнітного поля, що відхиляє їх уздовж вісі  $y$ , виникає напруга фотоелектромагнітного (ФЕМ) ефекту  $V_{\text{ФЕМ}}$  між торцями зразка,

перпендикулярного вісі  $y$ . Будемо вважати досить великими розміри зразка в площині  $zy$ , так що від змінних  $z, y$  ніщо не залежить.

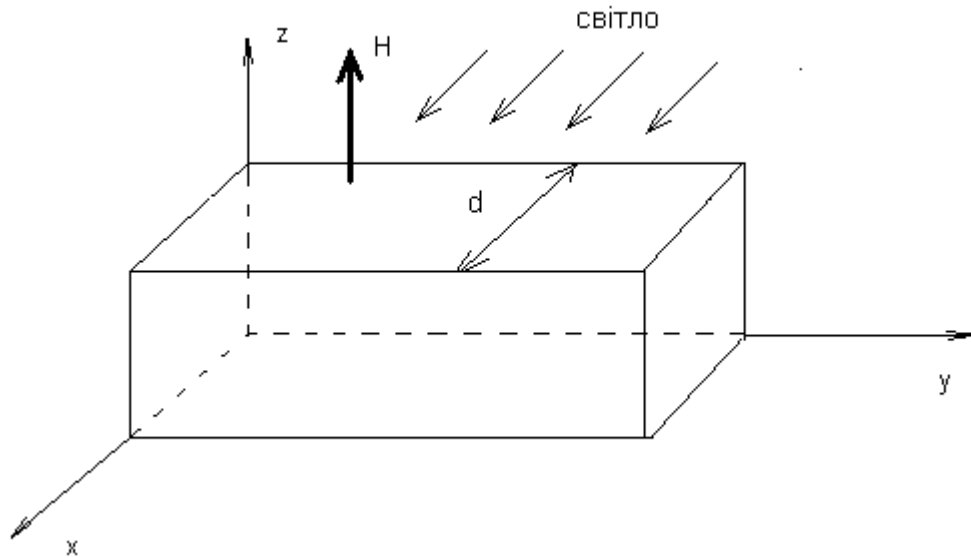


Рисунок 1.8 - Геометрія досвіду зі спостереження фотоелектромагнітного ефекту

У стаціонарних умовах:

$$\text{rot } \varepsilon = 0, \quad d\varepsilon_y/dx = 0,$$

тобто поле  $\varepsilon_y$  постійно скрізь. Розглянуту систему можна описати рівняннями

$$\frac{1}{e} \text{div} j_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{\Delta p}{\tau_p} = -\frac{1}{e} \text{div} j_p, \quad (1.47)$$

$$j_{nx} + j_{px} = 0. \quad (1.48)$$

Тут прийнято, що зміна заповнення рівнів прилипання пропорційна надмірним концентраціям вільних носіїв заряду. При малих магнітних полях можна у виразах для густин струму

$$j_n = j_n^* - [j_n^* \times H] \mu_{nH} / c, \quad j_n^* = ne \mu_n \varepsilon + e D_n \text{grad } n, \quad (1.49)$$

$$j_p = j_p^* + [j_p^* \times H] \mu_{pH} / c, \quad j_p^* = pe \mu_p \varepsilon - e D_p \text{grad } p, \quad (1.50)$$

знехтувати в першому наближенні членами з  $H$ . Далі визначимо  $\Delta_n, \Delta_p$  з одновимірної задачі з граничними умовами (генерація на поверхні  $x = 0$ ):

$$g = -j_{nx}/e + s_0 \Delta_n, \quad x = 0;$$

$$0 = j_{nx}/e + s_d \Delta_n, \quad x = d$$

Тепер щільність ФЕМ ефекту  $j_y$  можна знайти з рівняння:

$$j_y = e\epsilon_y(n\mu_n + p\mu_p) + D_n^* \frac{dn}{dx} \frac{eH(\mu_{nH} + \mu_{pH})}{c}, \quad (1.51)$$

Тут  $n = n_0 + \Delta_n$ ,  $D$  – коефіцієнт біполярної дифузії і

$$D_n^* = D \frac{n\tau_p + p\tau_n}{\tau_n(n+p)}. \quad (1.52)$$

### Рішення задач

1. Знайти рухливість електронів провідності в мідному провіднику, якщо при зміні ефекту Холла в магнітному полі з індукцією  $B = 100$  мТл напруженість поперечного електричного поля у даного н/п опинилася в  $\eta = 3,1 \cdot 10^3$  разів менше напруженості продольного електричного поля.
2. В деякому н/п, у якого рухливість електронів провідності в  $\eta = 2$  рази більша за рухливість дірок ефект Холла не спостерігався. Знайти відношення концентрацій дірок і електронів провідності у цьому н/п.
3. При зміні ефекту Холла в магнітному полі з індукцією  $B = 5$  кГс поперечна напруженість електричного поля у власному германію виявилася в  $\eta = 10$  разів менше продольної напруженості електричного поля. Знайти різницю рухливості електронів провідності і дірок у даному н/п.
4. В зразку n – типу щільність струму уздовж вісі  $x$  (см. рис 1.7)  $j_x = 0,1 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ . Магнітне поле по вісі  $z$   $H = 1000$  Е. В умовах розсіювання на коливаннях решітки  $\mu_{nH} = 1,18\mu_n$ . Визначити  $R_H$  та холловську напругу  $U_H$  якщо  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  та розмір зразка в напрямі вісі у дорівнює  $a = 0,5$  см.
5. Коефіцієнт Холла зразка домішкового кремнію дорівнює  $3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ , питомий опір зразка  $\rho = 9,93 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Визнати концентрацію і рухливість носіїв заряду, якщо заряди одного знака.
6. Питома провідність домішками кремнію дорівнює  $112 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Визначити рухливість дірок і їх концентрацію, якщо постійна Холла  $3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ . Прийняти, що напівпровідник має тільки діркову провідність.

7. Коефіцієнт Холла зразка домішкового кремнію дорівнює  $9,93 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ , питомий опір зразка  $\rho = 9,93 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Визначити концентрацію і рухливість носіїв заряду, вважаючи, що ці носії одного знака.
8. Зразок напівпровідника має коефіцієнт Холла  $R_H = 3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$  і питомий опір  $\rho = 8,93 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Для виявлення ефекту Холла зразок поміщається в магнітне поле з індукцією  $B = 0,5 \text{ Тл}$ . Визначити кут Холла.
9. Зразок напівпровідника  $30 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \times 1 \text{ мм}$  має опір  $500 \text{ Ом}$ . При переміщенні його в магнітне поле  $B = 0,5 \text{ Тл}$ , перпендикулярно площині пластини на гранях зразка виникає ЕРС Холла  $U_H = 5 \text{ мВ}$  при струмі через зразок  $10 \text{ мА}$ . Визначити рухливість Холу і щільність носіїв у напівпровіднику, вважаючи, що він p-типу. До якого значення зміниться ЕРС Холла, якщо в поле помістити зразок міді таких же розмірів і з таким самим струмом  $n_{cu} = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ?

## 5 КОНТАКТНІ ЯВИЩА

Елементи напівпровідникової інтегральної мікросхеми - діоди, транзистори, резистори, конденсатори - являють собою сукупність різних напівпровідникових структур. До таких напівпровідникових структур відносяться: контакти метал-напівпровідник, електронно-діркові переходи, структури метал-діелектрик-напівпровідник(МДН)

На електрофізичних властивостях різних контактів засновані принципи дії переважної більшості ІМС.

На межі розподілу між двома різними за типом електропровідності напівпровідниками або між напівпровідником і металом виникають потенційні бар'єри, що є наслідком перерозподілу концентрації рухомих носіїв заряду між контактуючими матеріалами. Електричні властивості граничного шару залежать як від значення, так і від полярності прикладеної зовнішньої напруги. Якщо граничні шари в напівпровідникових структурах мають нелінійними вольт-амперних характеристик, тобто якщо їх електричний опір при одній полярності напруги більше, ніж за інший, то такі шари називаються випрямляючими переходами.

Процеси, що протікають на поверхні напівпровідника, справляють істотний вплив на електричні параметри елементів інтегральних схем. Наявність локальних поверхневих енергетичних рівнів викликає утворення поверхневого електричного заряду. При цьому в приповерхневій області напівпровідника з'являється рівний за значенням і протилежний за знаком індукований заряд, тобто з'являються збагачені, збіднені або інверсійні приповерхневі шари. Виникненням інверсійних шарів значною мірою визначається ефект поверхневої провідності і утворення так званих каналів.

Канали можуть формуватися і під дією поперечного зовнішнього електричного поля. Модулюючи величину електропровідності каналу, керують величиною струму в польових транзисторах на основі МДН-структур.

Температурний потенціал:



$$\varphi_T = kT/q, \quad (1.53)$$

де  $k$ -постійна Больцмана

$$(k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К});$$

$T$ -абсолютна температура (при температурі  $T = 300\text{К}$  температурний потенціал має значення

$$\varphi_T = 0,026 \text{ В, или } 26 \text{ мВ}$$

$$q - \text{заряд електрона } (q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})$$

Потенціал, який характеризує рівень Фермі в напівпровіднику, дорівнює:

$$\varphi_F = \varphi_i - \varphi_{bp} = \varphi_i + \varphi_{bn}, \quad (1.54)$$

де  $\varphi_i$  - потенціал, відповідний середині забороненої зони напівпровідника;

$$\varphi_{bp} = \varphi_T \ln(p/n_i) \text{ и } \varphi_{bn} = \varphi_T \ln(n/n_i) \text{ об'ємні потенціали}$$

Таким чином, згідно з даними виразами, у власних напівпровідниках ( $n = p = n_i$ ) рівень Фермі розташований в середині забороненої зони, в електронних напівпровідниках ( $n > n_i$ ) - у верхній половині, а в діркових ( $p > n_i$ ) - у нижній половині забороненої зони.

Рівень Фермі однаковий у всіх частинах рівноважної системи, якою б різнорідною вона не була, тобто  $\varphi_F = \text{const}$ .

Закон повного струму в напівпровіднику  $n$ -типу:

$$j_n = q(n\mu_n\xi + D_n dn/dx);$$

в напівпровіднику  $p$ -типу:

$$j_p = q(p\mu_p\xi + D_p dp/dx), \quad (1.55)$$

де  $dn/dx$  та  $dp/dx$  - градієнт концентрацій дірок і електронів;  $\mu_p, \mu_n$  - рухливості дірок і електронів відповідно;  $D_n$  і  $D_p$  - коефіцієнти дифузії дірок і електронів;  $\xi$  - напруженість зовнішнього електричного поля.

Співвідношення Ейнштейна, що показує зв'язок між коефіцієнтом дифузії і рухливістю носіїв зарядів полупроводнике  $n$ -і  $p$ -типу відповідно:

$$\begin{aligned} D_n &= \varphi_T \mu_n; \\ D_p &= \varphi_T \mu_p. \end{aligned} \quad (1.56)$$

Рівняння Пуассона, що дозволяє визначити розподіл потенціалу в середовищі:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon}, \quad (1.57)$$

Де  $\varphi$  - потенціал,  $x$  – координата;  $\rho(x)$  - об'ємна щільність заряду;  $\varepsilon$  - діелектрична проникність середовища, для напівпровідника;

$$\varepsilon = \varepsilon_x \varepsilon_o \quad (1.58)$$

Де  $\varepsilon_x$  - відносна діелектрична проникність напівпровідника,  $\varepsilon_o$  - електрична стала  $\varepsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

### Рішення задач

1. Маємо сплавний р-п перехід з  $N_d = 10^3 / \text{Na}$ , причому на кожні  $10^8$  атомів припадає один атом домішки. Визначити контактну різницю потенціалів ( $T = 300 \text{ K}$ ). Щільність атомів  $N$  і іонізованих атомів  $n_i$  відповідно прийняти  $4,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  і  $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .
2. Визначити ширину р-п переходу в кремнії при температурі  $350 \text{ K}$  за відсутності зовнішньої напруги, якщо концентрація дірок і електронів відповідно  $1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$   $2,0 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ .
3. Визначити максимальну напруженість електричного поля р-п переходу в кремнії, якщо концентрація донорної і акцепторної домішок  $1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Ширина р-п переходу  $0,3 \text{ мкм}$ . Домішка повністю іонізована.
4. При зміні прямої напруги на  $\Delta U = 0,1 \text{ В}$  прямий струм германієвого діода змінюється на  $\Delta I_{пр} = 10 \text{ мА}$ , а при зміні зворотної напруги на  $\Delta U_{обр} = 10 \text{ В}$ , зворотний струм змінюється на  $40 \text{ мкА}$ . Визначити диференційні опори діода при прямої та зворотної напрузі.
5. Визначити у скільки разів збільшується зворотний струм насичення, якщо температура збільшується: а) від  $20$  до  $80 \text{ }^\circ \text{C}$  для германієвого діода, б) від  $20$  до  $150 \text{ }^\circ \text{C}$  для кремнієвого діода.
6. У германієвих р-п переходів питома провідність р-області  $\sigma_p = 10^4 \text{ См/м}$

і питома провідність n-області  $10^2$  См / м. Рухливості електронів і дірок відповідно рівні  $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ . Концентрація власних носіїв в германії при  $T = 300 \text{ К}$ ,  $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Обчислити контактну різницю потенціалів.

7. Визначити ширину p-n переходу в кремнії при  $T = 300 \text{ К}$  при відсутності зовнішньої напруги, якщо концентрація домішок в n- і p- областях відповідно  $N_d = 0,1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ;  $N_a = 20 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Вважати домішки іонізованими.
8. У рівноважному стані висота потенційного бар'єра сплавного p-n переходу дорівнює  $0,2 \text{ В}$ , концентрація акцепторних домішок  $N_a = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Потрібно: а) обчислити ширину p-n переходу для зворотних напруг, рівних  $0,1$  і  $10 \text{ В}$ ; б) для прямої напруги  $0,1 \text{ В}$ ; в) знайти бар'єрну ємність, відповідну зворотним напруженням, рівним  $0,1$  і  $10 \text{ В}$ , якщо площа переходу  $1 \text{ мм}^2$ .
9. Визначити дифузійну ємність і висоту потенційного бар'єру p-n переходу германієвого діода, якщо  $\rho_p = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_n = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Зворотний струм насичення  $I_0 = 5 \text{ мкА}$ ;  $U_{пр} = 0,2 \text{ В}$ ;  $\tau = 100 \text{ мкс}$ .
10. У германієвого діода p-n перехід має площу поперечного перерізу  $10^6 \text{ м}^2$ . Відстань від кордону до кожного контакту  $0,1 \text{ мм}$ . Питомий опір p-області  $4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і час життя неосновних носіїв зарядів p-області  $2,08 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і час життя  $\tau_p = 150 \text{ мкс}$ . Визначити зворотний струм насичення діода, якщо рухливість електронів  $\mu_n = 0,3 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ , рухливість дірок  $\mu_p = 0,15 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $n_i = 2,5 \cdot 10^{19}$  при  $300 \text{ К}$ .
11. У германієвому p-n переході питомі опори:  $\rho_p = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і  $\rho_n = 2,08 \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $\mu_p = 0,15 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $\mu_n = 0,3 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $n_i = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Час життя неосновних носіїв заряду  $\tau_n = 75 \text{ мкс}$   $\tau_p = 150 \text{ мкс}$ . Площа поперечного перетину  $S = 10^{-6} \text{ м}^2$  ( $T = 300 \text{ К}$ ). Визначити щільність зворотного струму насичення.
12. Чому дорівнює контактна різниця потенціалів контакту метал - напівпровідник, якщо робота виходу із металу дорівнює  $3 \text{ еВ}$ , електронна

спорідненість напівпровідника 1,2 еВ. Рівень Фермі відстає від зони провідності на 0,4 еВ.

13. У скільки разів потенціал в точці інверсії провідності в кремнії р-типу більше ніж в германії р-типу, якщо концентрації дірок в об'ємі цих напівпровідників однакові та дорівнюють  $p = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , концентрації носіїв заряду у власному германії та кремнії при кімнатній температурі дорівнюють відповідно:  $n_{i\text{Ge}} = 2,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_{i\text{Si}} = 1,05 \cdot 10 \text{ см}^{-3}$
14. Чому дорівнює висота потенційного бар'єра  $\phi_k$  в діоді Шотки електронний германій – золото. Зобразити зонну діаграму контакту при термодинамічній рівновазі. Питомий опір напівпровідника  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
15. Чому дорівнює електричне поле  $E$  та потенціал  $\phi$  в бар'єрі Шотки – Si – Au при напрузі  $U = -5 \text{ В}$  на відстані  $z = 1,2 \text{ мкм}$  від межі розподілу кремній – золото.  $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .
16. Чому дорівнює контактна різниця потенціалів метал – напівпровідник р-типу якщо робота виходу з металу = 3,2 еВ, електронна спорідненість = 1,4 еВ. Рівень Фермі відстоїть від середини забороненої зони на 0,5 еВ. Ширина заборонена зона = 2,2 еВ.

## 6 ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

### Електронно-дірковий перехід

Електронно-дірковий перехід (р-п-перехід) - це контакт двох напівпровідників з різним типом провідності.

Питомий опір матеріалу р-типу визначається:

$$\rho_p = (qN_a\mu_p)^{-1}. \quad (2.1)$$

Тоді:

$$N_a = (q\rho_p\mu_p)^{-1}. N_a = (q\rho_p\mu_p)^{-1}. \quad (2.2)$$

Аналогічно концентрація донорів

$$N_d = (q\rho_n\mu_n)^{-1}. N_d = (q\rho_n\mu_n)^{-1}. \quad (2.3)$$

При відомих значеннях  $N_a$  і  $N_d$  вираз для дифузійного потенціалу (контактної різниці потенціалів) може бути представлено у вигляді:

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln(N_a N_d / n_i^2). \varphi_0 = \varphi_T \ln(N_a N_d / n_i^2). \quad (2.4)$$

Вольт-амперна характеристика ідеального р-п-переходу може бути описана наступним виразом:

$$I = I_0 [\exp(U/\varphi_T) - 1], I = I_0 [\exp(U/\varphi_T) - 1], \quad (2.5)$$

де  $I_0$  - струм насичення;  $U$  - прикладена напруга. Струм насичення  $I_0$  визначається наступним виразом:

$$I_0 = qA \left( \frac{D_p \rho_n}{L_p} + \frac{D_n \rho_p}{L_n} \right), \quad (2.6)$$

Де  $A$  - площа р-п-переходу.

Коли  $N_a \gg N_d$ , зворотний струм насичення визначається співвідношенням:

$$I_0 = \frac{qA n_i^2 D_p}{W N_d}, \quad (2.7)$$

де  $W$  - ширина р-п-переходу.

Залежність струму насичення від температури для р-п-переходу, сформованого на кремнії, визначається виразом:

$$I_0 = kT^{1.5} \cdot e^{-1.21/2\varphi_i}, I_0 = kT^{1.5} \cdot e^{-1.21/2\varphi_i}, \quad (2.8)$$

Диференційний опір р-п - переходу може бути визначено за формулою:

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{\varphi_T}{I_0 + I} \text{ или } r = \frac{\varphi_T}{I}, \quad (2.9)$$

Визначення бар'єрної ємності р-п - переходу. Величина питомої ємності різкого р-п - переходу в загальному випадку розраховується за формулою:

$$C_b = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s\varepsilon_o N_a N_d}{2(N_a + N_d)}} \sqrt{\frac{1}{\varphi_0 - U}}, \quad (2.10)$$

При цьому товщина збідненого шару (ширина р-п-переходу) визначається виразом:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_o(\varphi_0 - U)}{qN_j}}, \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{N_j} = \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}. \quad (2.12)$$

Для лінійно-сплавних переходів:

$$C_b = \sqrt[3]{\frac{qa(\varepsilon_s\varepsilon_o)^2}{12(\varphi_0 - U)}}, \quad (2.13)$$

де а - градієнт концентрації домішок.

Товщина збідненого шару в цьому випадку знаходиться за формулою:

$$W = \sqrt[3]{\frac{12\varepsilon_s\varepsilon_o(\varphi_0 - U)}{qa}}. \quad (2.14)$$

Визначення напруги пробою  $U_{пр}$  для несиметричного різкого р-п-переходу. Величина максимального значення напруженості електричного поля в р-п-переході визначається за формулою:

$$\xi_m = -\frac{qN_a W_p}{\varepsilon_s\varepsilon_o} = -\frac{qN_d W_n}{\varepsilon_s\varepsilon_o}. \quad (2.15)$$

При заданому значенні  $\xi_m$  товщина збідненого шару р-п-переходу може бути знайдена  $W = W_n + W_p$ , де

$$W_n = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_o \xi_m}{q N_d} \text{ и } W_n = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_o \xi_m}{q N_a}. \quad (2.16)$$

Звідси товщина збідненого шару p-n-переходу дорівнює:

$$W = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_o \xi_m (N_a + N_d)}{q N_a N_d}. \quad (2.17)$$

Напруга пробою для різкого несиметричного переходу можна знайти за формулою:

$$U_{\text{пр}} = \frac{\xi_m W}{2}. \quad (2.18)$$

### Структура метал-напівпровідник

Швидкість дрейфу носіїв заряду в збідненій області напівпровідника можна знайти за формулою:

$$v_d = \mu \xi_0, v_d = \mu \xi_0, \quad (2.19)$$

де  $\xi_0$  - максимальне значення напруженості електричного поля в напівпровіднику в області бар'єру Шоттки.

Контактна різниця потенціалів, що виникає на контакті металу з напівпровідником дорівнює

$$e\varphi_k = \Phi_M - \Phi_P \quad (2.21)$$

Максимальне значення напруженості електричного поля в напівпровіднику розраховується за формулою:

$$\xi = 2(\varphi_0 - U)/W, \xi = 2(\varphi_0 - U)/W, \quad (2.22)$$

де  $W$  - товщина збідненого шару напівпровідника,

$U$  - напруга зсуву

В умовах рівноваги  $W$  визначається виразом:

$$W = \sqrt{\frac{2\varphi_0 \varepsilon_s \varepsilon_o}{qN}}, \quad (2.23)$$

де  $N$  - концентрація основних носіїв заряду в напівпровіднику.

Якщо  $v_D \gg v_R$  то справедлива теорія термоелектронної емісії.

У тому випадку, коли  $v_D \ll v_R$  визначальним є процес дифузії.

Бар'єрна ємність контакту метал-напівпровідник визначається за формулою:

$$C = A \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 q N}{2(\phi_0 - U)}} \quad (2.24)$$

де  $A$  - площа контакту метал-напівпровідник.

### Приклад розрахунку необхідних електрофізичних характеристик напівпровідникової структури

Методом дифузії було сформовано електронно-дірковий перехід в кремнії таким чином, що питомі опори електронної та діркової областей становлять величини  $\rho_{ni}$  і  $\rho_{pi}$  відповідно.

Вихідні данні:

Питомий опір діркової області дорівнює :

$$\rho_p = 0,25 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

Питомий опір електронної області дорівнює:

$$\rho_n = 45,8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

Пряма напруга  $U=0,8\text{В}$

Зворотня напруга  $U_{обр} = 4 \text{ В}$

Величина максимального електричного поля переходу  $\xi_m = 4,1 \cdot 10^6 \text{ В/м}$

Площа поперечного перерізу р-n-переходу  $A = 1,6 \text{ мм}^2$

Температура  $T=270\text{К}$

Коефіцієнт дифузії електронів:

$$D_n = 34,6 \text{ см}^2/\text{с}$$

Коефіцієнт дифузії дірок:

$$D_p = 12,3 \text{ см}^2/\text{с}$$

Власна концентрація носіїв заряду:



$$n = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

Ширина забороненої зони:

$$E_g = 1,124 \text{ эВ}$$

Визначити:

I.

- 1) Величину контактної різниці потенціалів при кімнатній температурі;
- 2) Побудувати енергетичну діаграму *p-n*-переходу в рівноважному стані, а також при заданій величині прямої напруги  $U$ , В;
- 3) Побудувати теоретичну вольт-амперну характеристику (розглядається рух усіх носіїв заряду через *p-n*-перехід);
- 4) Величину диференційного опору *p-n*-переходу при  $U$ ; Т.

II.

- 1) Концентрацію основних та неосновних носіїв заряду;
- 2) Ширину *p-n* переходу
- 3) Бар'єрну ємність *p-n* переходу
- 4) Напругу пробою, припускаючи, що він настає при напруженості поля  $\xi_m$ , В / м;
- 5) Побудувати енергетичну діаграму *p-n*-переходу при заданій величині зворотної напруги  $U$ , В;

Для визначення контактної різниці потенціалів за формулою (2.4) необхідно знайти концентрації електронів і дірок за формулами (2.2) і (2.3). Для цього спочатку знаходимо рухливості електронів і дірок із співвідношення Ейнштейна і температурний потенціал:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 270}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,023 \text{ В};$$

$$\mu_n = \frac{D_n}{\varphi_T} = \frac{34,6}{0,023} = 1504,35 \frac{\text{см}^2}{\text{сВ}};$$

$$\mu_p = \frac{D_p}{\varphi_T} = \frac{12,3}{0,023} = 534,78 \frac{\text{см}^2}{\text{сВ}};$$

$$N_a = \frac{1}{q\rho_p\mu_p} = \frac{1}{1,6 \cdot 0,25 \cdot 534,78 \cdot 10^{-19}} = 4,67 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$N_d = \frac{1}{q\rho_n\mu_n} = \frac{1}{1,6 \cdot 45,8 \cdot 1504,35 \cdot 10^{-19}} = 9,07 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = 0,023 \ln \left( \frac{4,67 \cdot 10^{16} \cdot 9,07 \cdot 10^{13}}{1,45^2 \cdot 10^{20}} \right) = 0,546 \text{В.}$$

Енергетична діаграма р-п - переходу в рівноважному стані представлена на малюнку 2.1 а, а енергетична діаграма р-п - переходу при заданому значенні величини прямого напруги - на малюнку 2.1, б.

Для стану рівноваги величина викривлення меж зон:

$$\Delta\varepsilon_k = q\varphi_k = q\varphi_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,546 = 0,87 \cdot 10^{-19} \text{ КЛВ.}$$

При наявності прямого напруги:

$$\Delta\varepsilon_k = q|\varphi_k - U| = q|\varphi_0 - U| = 1,6 \cdot 10^{-19} |0,546 - 0,8| = 0,41 \cdot 10^{-19} \text{ КЛВ.}$$

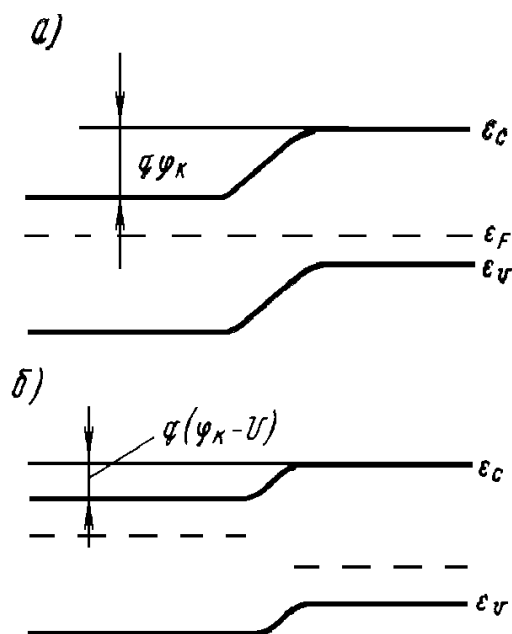


Рисунок 2.1 - Енергетична діаграма р-п-переходу (а - в рівноважному стані; б - при наявності прямої напруги)

Вольт-амперна характеристика ідеального р-п-переходу може бути описана виразом (2.5). Для цього розрахуємо спочатку струм насичення по (2.8):

$$I_0 = kT^{1,5} \cdot e^{-1,21/2\varphi_i} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 270^{1,5} \cdot 2,713^{-1,21/0,046} = 2,44 \cdot 10^{-31} \text{ A};$$

$$I = I_0 [e^{U/\varphi_T} - 1];$$

Таблиця 1 - Таблиця вольт-амперної характеристики р-п-переходу

U, В	-1	-0,5	-0,1	0	0,1	0,5	1
I, А	$-2,44 \cdot 10^{-31}$	$-2,44 \cdot 10^{-31}$	$-2,4 \cdot 10^{-31}$	0	$1,85 \cdot 10^{-29}$	$6,46 \cdot 10^{-22}$	$1,71 \cdot 10^{-12}$



Рисунок 2.2 - Вольт-амперна характеристика р-п-переходу

Величину диференційного опору р-п-переходу можна розрахувати по формулі (2.9):

$$r = \frac{\varphi_T}{I} = \frac{0,023}{1,85 \cdot 10^{-29}} = 1,24 \cdot 10^{27} \text{ Ом.}$$

II.

- 1) Концентрацію неосновних носіїв заряду знайдемо з закону діючих мас.
- 2) Ширину р-п переходу можна розрахувати з формули 2.17
- 3) Бар'єрну ємність р-п переходу знайдемо з формули 2.10
- 4) Напругу пробою знайдемо з формули 2.18
- 5) Побудувати енергетичну діаграму

$$\Delta\varepsilon_k = q|\varphi_k + U| = q|\varphi_0 + U| = 1,6 \cdot 10^{-19} |0,546 + 4| = 7,27 \cdot 10^{-19} \text{ КлВ.}$$

### Приклад розрахунку необхідних електрофізичних характеристик структури метал – напівпровідник

Контакт метал-напівпровідник. Розрахувати і побудувати ВАХ контакту метал-напівпровідник на основі кремнію з концентрацією домішки, яка дорів-

нює  $N$ , при заданій температурі  $T$ .

Вихідні дані:

Температура  $T = 270\text{К}$ ;

Концентрація домішки  $N = 6 \cdot 10^{24}\text{см}^{-3}$ ;

Робота виходу електронів з металу ( $\varphi_M$ )  $\varphi_M = 4,75\text{эВ}$ ;

Напруга зсуву  $U_{см} = 1,5$ .

При цьому необхідно визначити:

- 1) Висоту бар'єру Шотткі;
- 2) Товщину збідненого шару напівпровідника  $W$  в рівноважному стані;
- 3) Величину дифузійної та дрейфової складової швидкості електронів при протіканні струму через контакт метал-напівпровідник, на основі чого вибрати вираз для розрахунку ВАХ;
- 4) Бар'єрну ємність контакту метал-напівпровідник при зворотній напрузі зсуву  $U_{см}$ ;
- 5) Побудувати енергетичну діаграму

Рішення:

- 1) Визначити висоту потенційного бар'єру за формулою (2.21)
- 2) Товщину збідненого шару напівпровідника  $W$  в рівноважному стані ви- значаємо виразом (2.23)
- 3) Дрейфову складову швидкості електронів знайдемо за формулою:

$v = \mu E$ , где  $E$  знаходиться з наступного співвідношення

$$\frac{E}{\varphi_M} = 0,95 \Rightarrow E = 0,95\varphi_M = 0,95 \cdot 4,75 = 4,5125;$$

$$v_n = \mu_n E = 1504,35 \cdot 4,5125 = 6788,4 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{\text{с} \cdot \text{В}};$$

$$v_p = \mu_p E = 534,78 \cdot 4,5125 = 2413,2 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{\text{с} \cdot \text{В}};$$

$$v_R = \frac{A \cdot T^2}{q N_c} = \frac{2,2 \cdot 270^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{19}} = 1,67 \cdot 10^4.$$

Коефіцієнти дифузії знайдемо за формулами:

$$D_n = \mu_n \varphi_T = 1504,35 \cdot 0,023 = 34,6;$$

$$D_p = \mu_p \varphi_T = 534,78 \cdot 0,023 = 12,3$$

Вольт-амперна характеристика може бути описана наступним виразом:

$$I = I_{др} + I_{диф} \text{ де}$$

$$I_{дф} = I_0 e^{U/\varphi_T} \text{ - дифузійна складова струму, а}$$

$$I_{др} = -I_0 \text{ - дрейфова складова}$$

- 4) Бар'єрну ємність контакту метал-напівпровідник при зворотної напрузі зсуву знаходимо за формулою (2.24)
- 5) Побудувати енергетичну діаграму

## Варіанти завдань

### Завдання 1.

Методом дифузії було сформовано електронно-дірковий перехід в напівпровіднику таким чином, що питомі опори електронної та діркової областей становлять величини  $\rho_{n1}$  і  $\rho_{p1}$  відповідно. Величина максимального електричного поля переходу  $\xi_m = 4,1 \cdot 10^6$  В/м. Площа поперечного перетину р-n-переходу  $A = 1,6$  мм<sup>2</sup>. Температура  $T=270$ К

Вихідні данні:

№ вар.	Напівпровідник	Питомий опір n- обл..	Питомий опір p – обл..	Пряма напруга U, В	Зворотня напруга U <sub>звор</sub> , В
1	Si	0,34	48,2	0,6	2
2	Ge	43,2	0,91	0,7	3
3	GaAs	29,4	0,02	0,8	4
4	InSb	48,1	0,36	0,9	5
5	Si	0,28	39,8	1,0	2
6	Ge	0,84	41,2	1,1	3
7	GaAs	41,6	0,23	1,2	4
8	InSb	0,53	39,98	1,3	5
9	Si	0,57	39,74	1,2	2
10	Ge	0,35	44,5	1,1	3
11	GaAs	26,7	0,03	1,0	4
12	InSb	42,6	0,7	0,9	5
13	Si	0,9	38,32	0,8	2
14	Ge	36,7	0,5	0,7	3
15	GaAs	0,25	39,3	0,6	4
16	Si	0,34	43,2	0,7	5
17	Ge	43,2	0,09	0,8	2
18	GaAs	29,4	0,07	0,9	3
19	InSb	48,1	0,6	1.0	4

20	Si	0,28	37,8	1,1	5
21	Ge	0,84	41,2	1,2	2
22	GaAs	41,6	0,23	0,9	3
23	InSb	0,53	34,98	0,8	4
24	Si	0,57	39,74	0,7	5
25	Ge	0,35	40,5	0,7	2
26	GaAs	0,21	43,29	0,6	3
27	InSb	0,37	41,98	1,2	4
28	Si	49,5	0,11	1,1	5
29	Ge	42,9	0,37	1,0	2
30	GaAs	38,4	0,23	0,9	3

Визначити:

Величину контактної різниці потенціалів при кімнатній температурі;

Концентрацію основних та неосновних носіїв заряду;

Величину диференційного опору  $p$ - $n$ -переходу при  $U$ ;  $T$ .

Ширину  $p$ - $n$  переходу;

Бар'єрну ємність  $p$ - $n$  переходу;

Напругу пробую, припускаючи, що він настає при напруженості поля  $\xi_m$ , В / м;

Побудувати енергетичну діаграму  $p$ - $n$ -переходу в рівноважному стані, а також при заданій величині прямої напруги  $U$ , В;

Побудувати енергетичну діаграму  $p$ - $n$ -переходу при заданій величині зворотної напруги  $U$ , В;

Побудувати теоретичну вольт-амперну характеристику (розглядається рух усіх носіїв заряду через  $p$ - $n$ -перехід).

## Завдання 2.

Контакт метал-напівпровідник. Розрахувати і побудувати ВАХ контакту метал-напівпровідник на основі напівпровідника з концентрацією домішки, яка дорівнює  $N$ , при заданій температурі  $T = 270\text{K}$ .

Вихідні дані:

№ вар.	Напівпровідник	Концентрація домішки, $\text{см}^{-3}$	Метал	Напруга зсуву, В
1	Si	$6 \cdot 10^{24}$	Mg	1,5
2	Ge	$2,1 \cdot 10^{21}$	Al	1,4
3	GaAs	$4,3 \cdot 10^{23}$	Ni	1,3
4	InSb	$8,2 \cdot 10^{23}$	Cu	1.2
5	Si	$3 \cdot 10^{24}$	Ag	1.1
6	Ge	$6,5 \cdot 10^{21}$	Au	1,0
7	GaAs	$2,9 \cdot 10^{22}$	Pt	0,9
8	InSb	$4 \cdot 10^{23}$	Mg	0,8
9	Si	$7,3 \cdot 10^{24}$	Al	0,7
10	Ge	$4,2 \cdot 10^{23}$	Ni	0,7
11	GaAs	$7,1 \cdot 10^{22}$	Cu	0,8
12	InSb	$3,9 \cdot 10^{21}$	Ag	0,9
13	Si	$7,4 \cdot 10^{22}$	Au	1,1
14	Ge	$2,6 \cdot 10^{24}$	Pt	1,2
15	Si	$6 \cdot 10^{24}$	Mg	1,5
16	Ge	$2,1 \cdot 10^{21}$	Al	1,4
17	GaAs	$4,3 \cdot 10^{23}$	Ni	1,3
18	InSb	$8,2 \cdot 10^{23}$	Cu	1.2
19	Si	$3 \cdot 10^{24}$	Ag	1.1
20	Ge	$6,5 \cdot 10^{21}$	Au	1,0
21	GaAs	$2,9 \cdot 10^{22}$	Pt	0,9



22	InSb	$4 \cdot 10^{23}$	Mg	0,8
23	Si	$7,3 \cdot 10^{24}$	Al	0,7
24	Ge	$4,2 \cdot 10^{23}$	Ni	0,7
25	GaAs	$9 \cdot 10^{20}$	Al	1,3
26	InSb	$8,2 \cdot 10^{23}$	Cu	1,2
27	Si	$3 \cdot 10^{24}$	Ag	1,1
28	Ge	$6,5 \cdot 10^{21}$	Au	1,0
29	GaAs	$2,9 \cdot 10^{22}$	Pt	0,9
30	InSb	$4 \cdot 10^{23}$	Mg	0,8

При цьому необхідно визначити:

Висоту бар'єру Шотткі;

Товщину збідненого шару напівпровідника W в рівноважному стані;

Величину дифузійної та дрейфової складової швидкості електронів при протіканні струму через контакт метал-напівпровідник, на основі чого вибрати вираз для розрахунку ВАХ;

Бар'єрну ємність контакту метал-напівпровідник при зворотній напрузі зсуву  $U_{см}$ ;

Побудувати енергетичну діаграму

## ЛІТЕРАТУРА

1. Фізика електронних процесів. Конспект лекцій. Частина 1. Ніконова А. О., Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А.: ЗДІА, 2017, 60с.
2. Фізика електронних процесів. Конспект лекцій. Частина 2. Ніконова А. О., Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А.: ЗДІА, 2018, 82с.
3. Попик Ю. В. Фізика напівпровідників : підруч. для студ. вищ. навч. закл. затв. МОНУ. Ужгород : ТОВ "ІВА", 2014. 820с., 1 прим.
4. Бонч-Бруевич В. Л. С. Г. Калашников. Фізика напівпровідників: учеб. пособие для вузов . М. : Наука, 1990. 685 с., 21 прим.
5. Савчин В. П., Шувар Р. Я. Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах : навч. посіб. рек. МОНУ. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2008, 1 прим.
6. Прохоров Е. Д. Твердотіла електроніка : навч. посіб. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2007, 1 прим.
7. Пека Г. П., Стріха В. І. Поверхневі та контактні явища у напівпровідниках : підруч Київ : Либідь, 1992, 24 прим.
8. Попик Т. Ю., Хархаліс Л. Ю., Попик Ю. В. Фізика напівпровідників : лабораторний практикум (навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл.) Ужгород : ІВА, 2015, 1 прим.
9. Орешкин П. Т. Фізика напівпровідників и диелектриков : учеб. пособие для специальности "Полупроводники и диелектрики" вузов. – <http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Yanovskiy/0035809.djvu>
10. All about Circuits (Electrical Engineering & Electronics Community) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.allaboutcircuits.com>
11. Electronics Tutorials (Basic Electronics Tutorials and Revision) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.electronics-tutorials.ws>
12. Electronics Hub (Projects, tutorials, Courses) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.electronicshub.org>
- 13.

## УНІВЕРСАЛЬНІ ФІЗИЧНІ СТАЛІ

Заряд електрона  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл

Маса спокою електрона  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг =  $9,1 \cdot 10^{-28}$  г

Стала Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К

Стала Планка  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;

$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж·с}$$

Діелектрична стала  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м =  $8,85 \cdot 10^{-14}$  Ф/см

$kT$  (при  $T = 300$  К) = 0,0259 еВ

$kT$  (при  $T = 77$  К) = 0,0066 еВ

Потенціал у Вольтах (В) чисельно дорівнює енергії в електрон-вольтах (еВ)

$$1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

## РОБОТА ВИХОДУ З МЕТАЛІВ (еВ)

Mg	Al	Ni	Cu	Ag	Au	Pt
3,4	4,1	4,5	4,4	4,7	5	5,3

Параметр		Позначення	Si	Ge	GaAs	
Ширина забороне- ної зони, еВ	300 К	$E_g$	1,12	0,66	1,43	
	0 К		1,21	0,8	1,56	
Рухливість при 300К, $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	електронів	$T = 300 \text{ К}$	$\mu_n$	1500	3900	8500
		$T = 77 \text{ К}$				
	дірок	$T = 300 \text{ К}$	$\mu_p$	600	1900	400
		$T = 77 \text{ К}$				
Ефективна маса, $m^*/m_0$	електронів	$m_{dn}^*$	1,08	0,56	0,068	
	дірок	$m_{dp}^*$	0,56	0,35	0,45	
Ефективна щіль- ність станів у зоні провідності, $\text{cm}^{-3}$	$T = 300 \text{ К}$	$N_c$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	
	$T = 77 \text{ К}$		$3,6 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{19}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	
Ефективна щіль- ність станів у ва- лентній зоні, $\text{cm}^{-3}$	$T = 300 \text{ К}$	$N_v$	$1,02 \cdot 10^{19}$	$6,11 \cdot 10^{18}$	$7 \cdot 10^{18}$	
	$T = 77 \text{ К}$		$1,4 \cdot 10^{18}$	$6,9 \cdot 10^{18}$	$9,8 \cdot 10^{17}$	
Діелектрична стала		$\epsilon_s$	11,8	16	13,2	
Електронна спорідненість		$\chi$	4,05	4	4,07	
Власна концентра- ція носіїв, $\text{cm}^{-3}$	$T = 300 \text{ К}$	$n_i$	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$	
	$T = 77 \text{ К}$		$3 \cdot 10^{-20}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-33}$	
Час життя носіїв, с		$\tau$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	
Дебаєвська довжина, мкм		$L_d$	24	0,68	2250	
Показник заломлення		$n$	3,44	4	3,4	
Температурний коефіцієнт		$\alpha$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	
Стала решітки, нм		$a, b, c$	5,43	5,65	5,65	
Температура плавлення, С		$T$	1415	936	1238	

Параметр		Позначення	InSb	4H-SiC	GaN
Ширина забороне- ної зони, eV	300 K	$E_g$	0,18	3	344
	0 K		0,23		3,5
Рухливість при 300K, $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$	електронів	T = 300 K	$\mu_n$	78000	8500
		T = 77 K			
	дірок	T = 300 K	$\mu_p$	1700	
		T = 77 K		5000	
Ефективна маса, $m^*/m_0$	електронів	$m_{dn}^*$	0,013	0,6	0,19
	дірок	$m_{dp}^*$	0,6	1	0,6
Ефективна щіль- ність станів у зоні провідності, $\text{cm}^{-3}$	T = 300 K	$N_c$	$3,7 \cdot 10^{16}$		
	T = 77 K		$5,1 \cdot 10^{15}$		
Ефективна щіль- ність станів у ва- лентній зоні, $\text{cm}^{-3}$	T = 300 K	$N_v$	$1,16 \cdot 10^{19}$		
	T = 77 K		$1,5 \cdot 10^{18}$		
Діелектрична стала		$\epsilon_s$	17,7	10,2	12,2
Електронна спорідненість		$\chi$	4,6		
Власна концентра- ція носіїв, $\text{cm}^{-3}$	T = 300 K	$n_i$	$2 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-10}$
	T = 77 K		$1,2 \cdot 10^{10}$		
Час життя носіїв, c		$\tau$	$1 \cdot 10^{-8}$		
Дебаєвська довжина, мкм		$L_d$			
Показник заломлення		n	3,75	2,6	2,4
Температурний коефіцієнт		a	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5,59 \cdot 10^{-6}$
Стала решітки, нм		a, b, c	6,48	0,308(a) 1,511(c)	0,318(a) 0,5166(c)
Температура плавлення, C		T	525	2830	2530

