МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. Потебні
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

О. Ю. Небеснюк, З. А. Ніконова, А. О. Ніконова

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА КОМПОНЕНТІВ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Методичні рекомендації до практичних занять і виконання індивідуального завдання для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності «Мікро-та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікроелектронні інформаційні системи»

Затверджено
вченою радою ЗНУ
Протокол №11 від 30.04.2024

Запоріжжя
2024

УДК 621.315
Н153

Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А., Ніконова А. О. Методи дослідження матеріалів та компонентів мікро- та наноелектронної техніки : методичні рекомендації до практичних занять і виконання індивідуального завдання для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності «Мікро-та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікроелектронні інформаційні системи». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2024. 43 с.

У методичних рекомендаціях до практичних занять і виконання індивідуального завдання у систематизованому вигляді подано програмний матеріал дисципліни «Методи дослідження матеріалів мікро-та наноелектронної техніки». Окреслено тематику практичних занять та детальні методичні рекомендації по їх виконанню; описано вимоги до індивідуального завдання, наведені питання до самоконтролю та список рекомендованої літератури.

Для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності Мікро-та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікроелектронні інформаційні системи».

Рецензент

*В.В. Артемчук***,** доктор технічних наук, професор кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Запорізького національного університету

Відповідальний за випуск

Т.В. Критська, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 4
РОЗДІЛ 1 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ 5
Практична робота 1. Вимірювання питомого опору напівпровідникових пластин довільної форми (Метод Ван-дер-Пау) 6
Практична робота 2. Дослідження ефекту Холла в напівпровідниках 9
Практична робота 3. Оптичні методи дослідження матеріалів та компонентів мікро-та наносистемної техніки 13
Практична робота 4. Квантові точки 15
Практична робота 5. Спектроскопія. Визначення спектру речовин 24
Практична робота 6. Ультразвукова дефектоскопія. 27
Ефект Допплера 27
РОЗДІЛ 2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ 30
Тема 1.Електропровідність металів 35
Тема 2. Статистика електронів у металах 35
Тема 3. Електропровідність напівпровідників 36
Тема 4. Ефект Холла в напівпровідниках 37
Тема 5. Електричні властивості p-n-переходів 37
Тема 6. Ємність p-n переходу 38
ПИТАННЯ ДО ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ 39
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА 41
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА 42

ПЕРЕДМОВА

Дисципліна «Методи дослідження матеріалів та компонентів мікро- та наноелектронної техніки» входить до циклу професійної підготовки спеціальності «Мікро-та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікроелектронні інформаційні системи» з підготовки здобувачів ступеня вищої освіти магістра.

Метою викладання навчальної дисципліни "Методи дослідження матеріалів та компонентів мікро- та наноелектронної техніки" є навчити здобувачів освіти експериментальним методам виміру параметрів, які є основними для виробничого контролю якості матеріалів і структур, складають основу багатьох методів дослідження напівпровідників та інших перспективних матеріалів, що є базою для створення приладів мікро- та наноелектронної техніки.

Основними **завданнями** дисципліни є ознайомлення здобувачів освіти з основними методами вимірювання параметрів напівпровідникових кристалів та сполук, статистичної обробки отриманих результатів, формулювання аналітичних висновків за отриманими результатами вимірювань.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні досягти таких **компетентностей**:

- Здатність розв’язувати складні задачі і проблеми у галузі професійної діяльності з мікро- та наносистемної техніки або у процесі навчання, що передбачає проведення досліджень та/або здійснення інновацій та характеризується невизначеністю умов і вимог.
- Здатність проводити досліджень на відповідному рівні.
- Здатність ефективно використовувати складне контрольно-вимірювальне, технологічне та дослідницьке обладнання при дослідженнях та виробництві матеріалів, компонентів, приладів і пристроїв мікро- та наносистемної техніки різноманітного призначення.
- Здатність здійснювати тестування та діагностику приладів та обладнання, а також оброблення і аналіз отриманих результатів.
- Здатність аргументувати вибір методів розв’язання складних задач і проблем мікро- та наносистемної техніки, критично оцінювати отримані результати та аргументувати прийняті рішення.

Та **вміти:**

– Збирати необхідну інформацію, використовуючи науково-технічну літературу, бази даних та інші джерела, аналізувати і оцінювати її.

− Забезпечувати якість виробництва; обирати технології, що гарантують отримання необхідних характеристик твердотільних пристроїв; застосовувати сучасні методи контролю мікро- та наносистемної техніки.

− Досліджувати процеси у мікро- та наноелектронних системах, приладах й компонентах з використанням сучасних експериментальних методів та

обладнання, здійснювати статистичну обробку та аналіз результатів експериментів.

− Будувати і досліджувати фізичні, математичні і комп’ютерні моделі об’єктів та процесів мікро- та наноелектроніки.

− Проводити випробування, експериментальні та теоретичні дослідження властивостей матеріалів, наноструктур та технологій, компонентів та пристроїв мікро- та наносистемної техніки.

Набуті при вивченні даного курсу знання необхідні у виробничій практиці та подальшій дослідницької діяльності в галузі електроніки, автоматизації та електронних комунікацій.

РОЗДІЛ 1 ПРАКТИЧНІ РОБОТИ

Практична робота 1. Вимірювання питомого опору напівпровідникових пластин довільної форми (Метод Ван-дер-Пау)

Мета: опанувати методи вимірювання питомого опору напівпровідників.

Основні теоретичні положення

Ван-дер-Пау вирішив завдання вимірювання питомого опору і постійної Холу для напівпровідникових пластин будь-якої геометричної форми. Запропонований ним метод виявився простий у реалізації, тому отримав широке застосування. Суть методу полягає у наступному. На периферії плоско паралельної пластини товщиною d (до її торців) прикріплюють чотири контакти (див. рис). Через контакти 1 та 2 до зразка підводять електричний струм I_{12}, а між контактами 3 і 4 вимірюють напругу U_{34}. Відношення цих величин має одиниці електричного опору:

$$R_{12,34} = \frac{U_{34}}{I_{12}}$$

Тепер змінимо схему вимірювань : пропустимо струм між контактами 2 і 3, а напругу будемо вимірювати між контактами 1 та 4. В цьому випадку опір дорівнює :

$$R_{12,34} = \frac{U_{14}}{I_{23}}$$

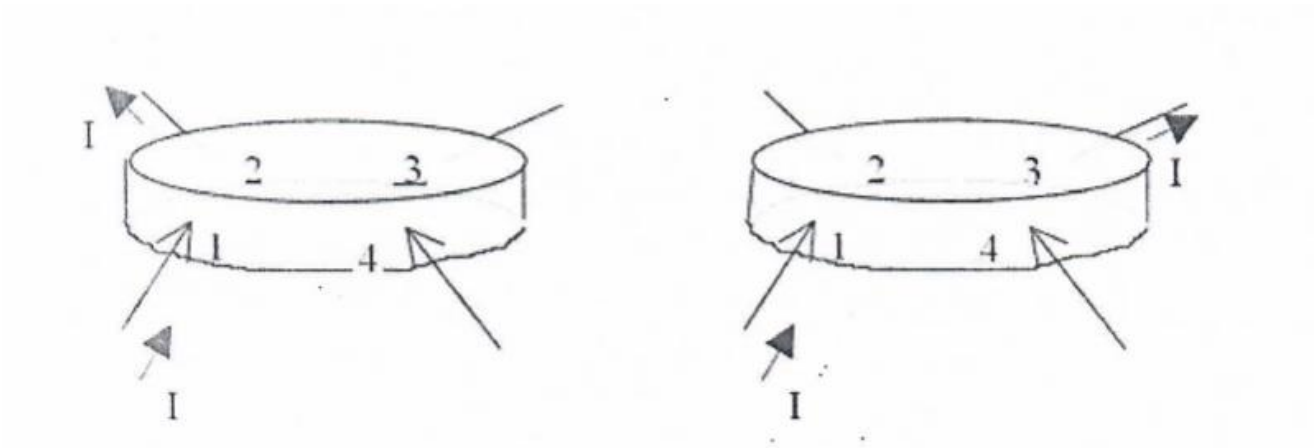


Рис.1 Розміщення зондів на зразку довільної геометричної форми при вимірюванні за методом Ван-дер-Пау

Ван-дер-Пау показав, що питомий опір в цьому випадку визначається із співвідношення:

$$\exp\left(-\frac{\pi d R_{12,34}}{\rho}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d R_{23,14}}{\rho}\right) = 1$$

Оскільки рівняння є трансцендентним, то Ван-дер-Пау запропонував ввести коефіцієнт f,що залежить від співвідношення $\frac{R_{12,34}}{R_{23,14}}$ (див. табл.1). Це дозволило представити рівняння у вигляді :

$$\rho = \left(\frac{\pi d}{ln2}\right)\left(R_{12,34} + R_{23,14}\right)f/2$$

Значення f наведено у таблиці, з якої видно, що f змінюється незначно, у той час як відношення $\frac{R_{12,34}}{R_{23,14}}$ змінюється на декілька порядків.

Таблиця 1. Значення f відповідно до співвідношення $\frac{R_{12,34}}{R_{23,14}}$

f	1.0	0.95	0.81	0.69	0.59	0.46	0.40	0.34	0.29	0.25
$\frac{R_{12,34}}{R_{23,14}}$	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000

При розміщенні зондів у вершинах квадрату систематична похибка описується рівнянням :

$$\delta = -(1.2ln2)ln\frac{2(1+r^4/s^4}{1+(1-\frac{r^2}{s^2})^2},$$

де s -сторона квадрату.



Завдання для самостійного виконання

Дано зразок круглої форми для визначення питомого опору за методом Ван-дер-Пау.

1. Розрахувати значення $R_{12,34}$ та $R_{23,14}$
2. Як що $d \ll s$, то визначити значення поправкової функції f.
3. Визначити значення питомого опору зразка.
4. Визначити значення питомої провідності зразка.
5. Розрахувати систематичну похибку
6. Оформити звіт та написати висновок.



Питання для самоконтролю

1. Питомий опір, позначення одиниці вимірювання.
2. Методи розрахунку питомого опору
3. Зондові методи для розрахунку питомого опору.
4. Безконтактні методи для визначення питомого опору.

Практична робота 2. Дослідження ефекту Холла в напівпровідниках

Мета: вивчення ефекту Холла у напівпровідниковому зразку та визначення постійної Холла.

📚 Основні теоретичні положення

Ефе́кт Хо́лла — явище, при якому виникає поперечна різниця потенціалів (ЕРС) під час розміщення провідника з постійним струмом у магнітному полі.

Ефект Холла відноситься до гальванічних ефектів, що виникають у речовині при одночасній дії електричного та магнітного полів. Виникнення поперечної ЕРС обумовлено дією сили Лоренца, що відхиляє заряджені частинки у напрямку, перпендикулярному напрямку струму та дії вектору індукції магнітного поля. Холл експериментально довів, що поперечна ЕРС:

$$U_H = R[B \cdot j]$$

де R- коефіцієнт, або постійна Холла; B-вектор індукції магнітного поля; j-вектор щільності електричного струму.

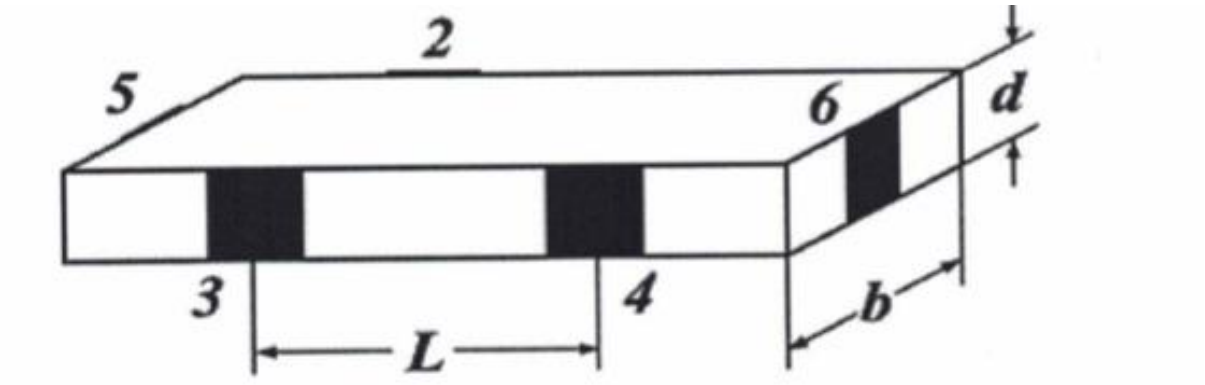


Рис. 2.-Схема зразку

Вимірювання проводять за допомогою зразка у вигляді паралелепіпеду, що має два торцевих контакту та три бокових. Контакти 5 та 6 необхідні для утворення струму через зразок. Постійне магнітне поле B прикладається перпендикулярно до великої грані зразка. Відповідно до ефекту Холла між контактами 2 та 3 утворюється холівська різниця потенціалів U_{23}. Оскільки з холівськими вимірюваннями одночасно проводять вимірювання питомої електропровідності зразку, то на боковій поверхні зразку є додатковий контакт 4, який разом з контактом 3 використовується для вимірювання вздовжного падіння напруги U_{23} на відстані L між контактами. Знаючи напругу U_{23},

відстань між контактами L, ширину b та товщину d зразку можливо розрахувати питому електропровідність σ :

$$\sigma = \frac{I \cdot L}{U_{34} \cdot b \cdot d}$$

Для напівпровідникових зразків необхідно враховувати, що струм I в них переноситься і електронами і дірками, тому розрахунок постійної Холла здійснюється за формулою :

$$R = \frac{s}{e}\frac{\mu_p^2 p - \mu_n^2 n}{(\mu_p p + \mu_n n)} \quad (1)$$

де $\mu_p p$ та $\mu_n n$ -відповідно рухливості та концентрації дірок та електронів; e-елементарний заряд; s-визначається механізмами розсіювання. Наприклад, при розсіюванні на теплових коливання решітки $s = \frac{3\pi}{8} \approx 1{,}18$, при розсіюванні на іонах домішки $s = \frac{316\pi}{512} \approx 1{,}93$. Для металів та вироджених напівпровідників $s = 1$.

У власному напівпровіднику концентрація електронів та дірок однакові, тобто $n = p = n_i$, тому постійна Холла розраховується за формулою :

$$R = \frac{1}{en_j}\frac{\mu_p - \mu_n}{(\mu_p + \mu_n)}, \quad (2)$$

для напівпровідників n та p-типів :

$$R = -\frac{1}{e_n}, R = \frac{1}{e_p}, \quad (3)$$

Установка на ефекті Холла реалізована на основі універсального лабораторного стенду і складається з наступних частин:

- електромагніт;
- камера для вимірювання ефекту Холла;
- з'єднувальні провідники;
- джерела живлення типу ТЕС 41, Б5-47;
- універсальні цифрові вольтметри типу В7-21А.

Зразок знаходиться у вакуумній камері де також розміщено термопару та нагрівач для реалізації теплових вимірювань. Усі контакти елементів вакуумної камери виведені через роз'єм на панель електромагніту. Стабілізоване джерело струму ТЕС 41 необхідне для живлення електромагніту. Робота з електромагнітом вимагає суворо дотримуватися правил ввімкнення та

включення струму через котушку. Тому що великі струми можуть призвести до пробою ізоляції котушки електромагніту.

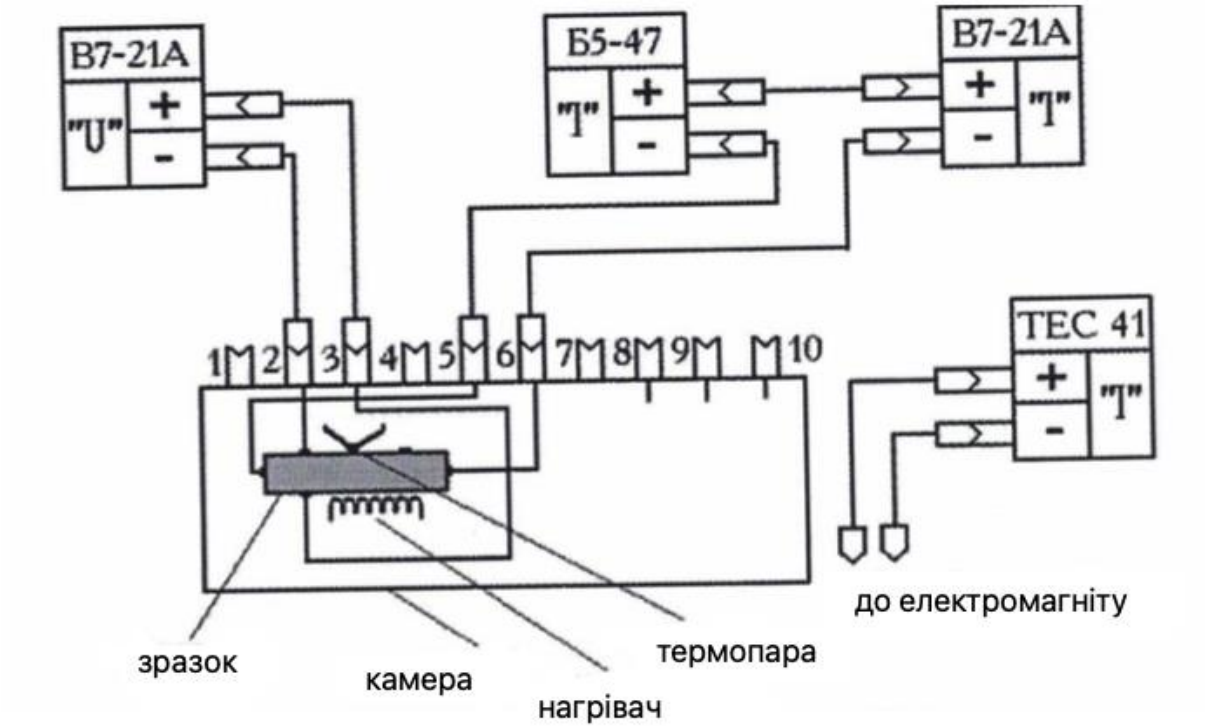


Рис. 3- Схема вимірювальної установки

Джерело Б5-47 створює вздовжний струм через зразок 5,6, що контролюється приладом Б7-21 (увімкненим в режимі амперметру). Поперечна різниця потенціалів вимірюється вольтметром В7-21А. При зміні поперечної різниці потенціалів необхідно враховувати, що при розташуванні зондів в одну лінію, не строго перпендикулярно до вісі струму, між ними виникає вздовжна напруга. Щоб уникнути цього впливу на точність вимірювання ЕРС Холла, поперечну напругу вимірюють при двох протилежних напрямках магнітного поля. Як що при зміні напрямку поля напруга змінює знак, то ЕРС Холла :

$$U_H = \frac{|U_{+23}|+|U_{-23}|}{2}, \tag{4}$$

де U_{+23}, U_{-23} – поперечні напруги при різних напрямках поля.

Як що при зміні напрямку поля напруга не змінює знак, то ЕРС Холла :

$$U_H = \frac{|U_{+23}|-|U_{-23}|}{2}. \tag{5}$$



Завдання для самостійного виконання

1.Зібрати схему відповідно до рисунку 3.
2. Встановити струм електромагніту 2 А.
3. Встановити струм через зразок 1…2 мА.
4. Виміряти поперечну напругу U_{+23}, U_{-23}.
5. Розрахувати U_H.
6. Розрахувати постійну Холла за формулою :

$$R = \frac{U_H b}{I \cdot B},$$

де U_H -вимірюється в Вольтах; b-ширина зразка, м (b=5,72 *10^{-3}, м); I-в амперах, B-в теслах.

Індукція магнітного поля визначається за формулою :

$$\mathrm{B} = k \cdot I_M$$

де I_M-струм електромагніту в амперах; k=0,1Тл/А -постійна електромагніту.
7. Розрахувати концентрацію носіїв в зразку за формулою 2, використовуючи значення рухливостей для електронів μ_n=0,38 м^2/Вс та дірок μ_p=0,18 м^2/Вс.
8. Дослідити залежність ЕРС Холла від величини індукції магнітного поля. Повторити вимірювання для значень струму магніту в інтервалі від 0,5 до 2 А через 0,125 А. Результати занести до таблиці.

№ вимірювання	$\mathrm{I_M}$, А	B, Тл	U_{+23}, мВ	U_{-23}, мВ	U_H, В

9. Побудувати залежність U_H(B).
10. Оформити звіт.



Питання для самоконтролю

1. Якою є причина виникнення холлівської різниці потенціалів?
2. Що називається сталою Холла? В яких одиницях вона вимірюється?
3. Як можна використовувати ефект Холла для визначення індукції магнітного поля?
4. Як зміниться холлівська напруга при зміні напряму струму в датчику на протилежний?
5. Як зміниться холлівська напруга при зміні напряму вектора магнітної індукції на протилежний?

Практична робота 3. Оптичні методи дослідження матеріалів та компонентів мікро-та наносистемної техніки

Мета: дослідити процеси заломлення світла в різних середовищах.

📚 Основні теоретичні положення

Оптичні методи аналізу засновані на вимірюванні оптичних властивостей речовини (випромінювання, поглинання, розсіювання, відбивання, заломлення, поляризації світла), які проявляються при взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною.



Завдання для самостійного виконання

1. Дослідити процеси заломлення світла, використавши програмну симуляцію https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_uk.html
2. Вкладка «Вступ». Досліджуйте заломлення світла між двома середовищами з різними коефіцієнтами заломлення. Виміряйте кути відбиття та заломлення для 3 матеріалів та їх інтенсивність.
3. Визначте показник заломлення невідомого матеріалу.
4. Перевірте закон Снеліуса.
5. Вкладка «Призми». Експериментуйте з призмами різних форм і матеріалів і досліджуйте розсіювання білого світла.
6. Перевірте збираючу та розсіюючу лінзи та отримайте веселку.
7. Вкладка «Додаткові інструменти» Для 3 довжин хвиль лазеру виміряйте кути падіння, заломлення та відбиття світла та швидкість розповсюдження хвилі.
8. Отримайте часові діаграми та порівняйте фазу та амплітуду падаючого та відбитого променів.
9. Повторіть пункти 7 та 8 для 2 інших середовищ.
10. Зробіть висновки та оформіть звіт.



Питання для самоконтролю

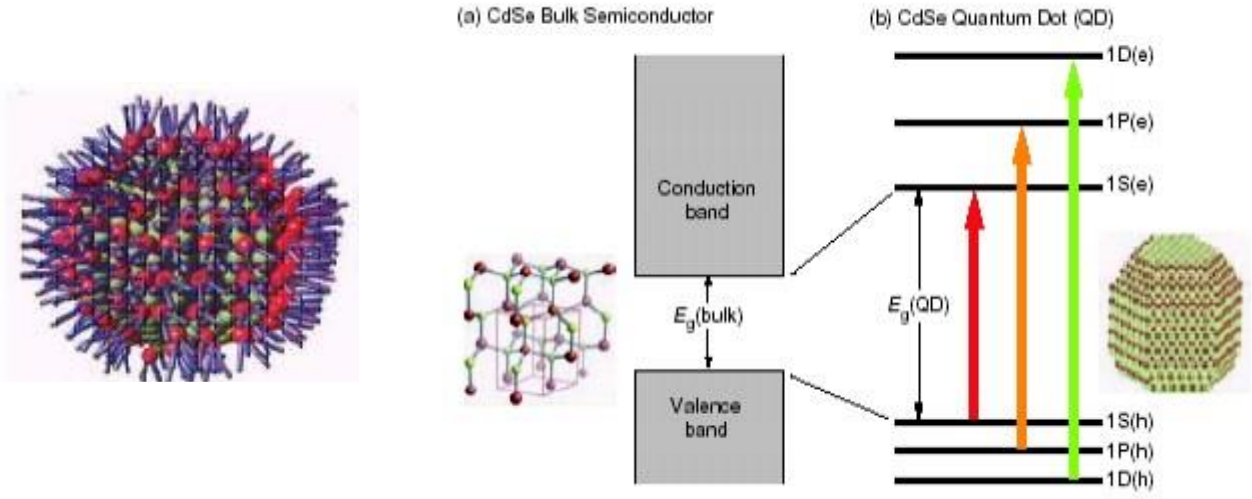
1. Поясніть, як світло заломлюється на межі розділу двох середовищ і, що визначає кут.
2. Поясніть закон Снелліуса.
3. Опишіть, як швидкість і довжина хвилі світла змінюється в різних середовищах.
4. Опишіть ефект зміни довжини хвилі від кута заломлення.
5. Поясніть, як призма створює веселку.

Практична робота 4. Квантові точки

Мета: ознайомитись з роботою електронного мікроскопу, опанувати методику розрахунку параметрів квантових точок.

📚 Основні теоретичні положення

Колоїдні квантові точки - напівпровідникові нанокристали з розміром в діапазоні 2-10 нанометрів, що складаються з 10^3 - 10^5 атомів, створені на основі неорганічних напівпровідникових матеріалів Si, InP, CdSe і т.п., покриті моношаром стабілізатора рис.4. Квантові точки за своїми розмірами більші за традиційні для хімії молекулярні кластери (~ 1 нм при вмісті не більше 100 атомів). Колоїдні квантові точки поєднують фізичні та хімічні властивості молекул з оптоелектронними властивостями напівпровідників.



а) б)

Рис.4 1 (а) Квантова точка, покрита "шубою" стабілізатора, (б) трансформація зонної структури напівпровідника при зменшенні розміру

Квантово-розмірні ефекти відіграють ключову роль в оптоелектронних властивостях квантових точок. Енергетичний спектр квантової точки принципово відрізняється від об'ємного напівпровідника. Електрон у нанокристали поводиться як у тривимірній потенційній "ямі". Є кілька стаціонарних рівнів енергії для електрона та дірки з характерною відстанню між ними $\hbar^2 / (2md^2)$, де d – розмір нанокристалу (квантової точки) (рис.4 б).

Таким чином, енергетичний спектр квантової точки залежить від її розміру. Аналогічно переходу між рівнями енергії в атомі при переході носіїв заряду між енергетичними рівнями в квантовій точці може випромінюватись або поглинатися фотон. Частотами переходів, тобто довжиною хвилі поглинання або люмінесценції легко керувати, змінюючи розміри квантової точки (рис.5). Тому квантові точки іноді називають "штучними атомами". У термінах напівпровідникових матеріалів можна назвати можливістю контролю ефективної ширини забороненої зони.

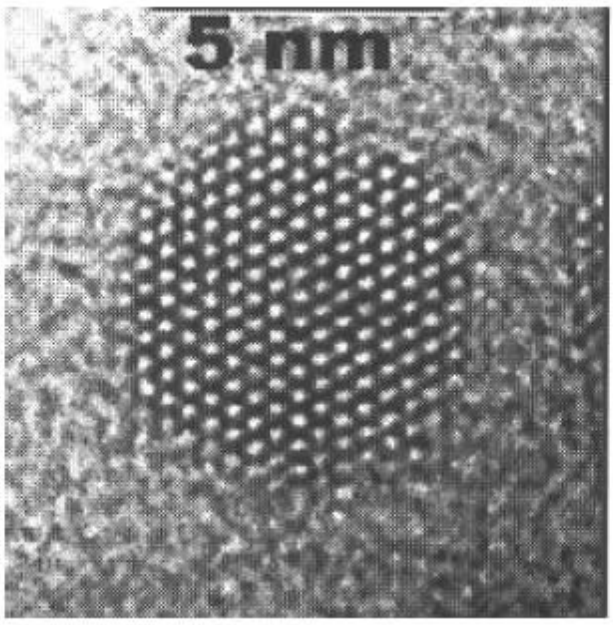


Рис.5 Люмінесценція зразків квантових точок CdSe з розміром в діапазоні 2.0-5.5 нм, виготовлені у вигляді золів. Вгорі – без підсвічування, внизу – підсвічування ультрафіолетовим випромінюванням

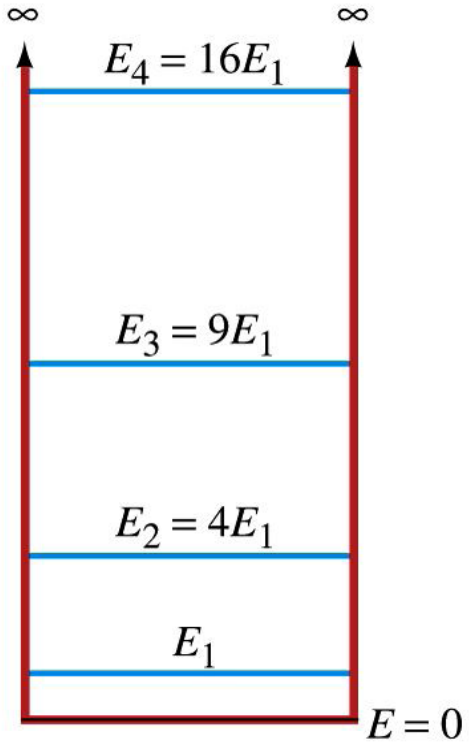
Є ще одна важлива властивість, що відрізняє колоїдні квантові точки від традиційних напівпровідникових матеріалів – можливість існування у вигляді розчинів, чи точніше у вигляді золів. Ця властивість забезпечує широту можливостей маніпулювання такими об'єктами та робить їх привабливими для технологій.

Залежність енергетичного діапазону від розміру дає великий потенціал для практичного застосування квантових точок. Квантові точки можуть знайти застосування в оптоелектричних системах, таких як світловипромінюючі діоди та плоскі світловипромінюючі панелі, лазери, осередки сонячних батарей та фотоелектричних перетворювачів, як біологічні маркери, тобто. скрізь, де потрібно варіювати оптичні властивості, що перебудовуються по довжині хвилі. Здатність існувати у вигляді золів (розчинів) дозволяє легко отримувати покриття із плівок квантових точок дешевими методами, наприклад spin-coating, або наносити квантові точки за допомогою струменевого друку на будь-які поверхні. Всі ці технології дозволяють уникнути при створенні пристроїв на основі квантових точок дорогих вакуумних технологій, традиційних для мікроелектронної техніки. Також за рахунок розчинних

технологій можна вводити квантові точки в відповідні матриці і створювати композитні матеріали.



На цій фотографії, отриманої за допомогою електронного мікроскопа, показано реальну картину ансамблю квантових точок на основі фосфіду InP. Електрони всередині кожного монокристала замкнені у потенційній ямі, їх рух обмежений у всіх напрямках.



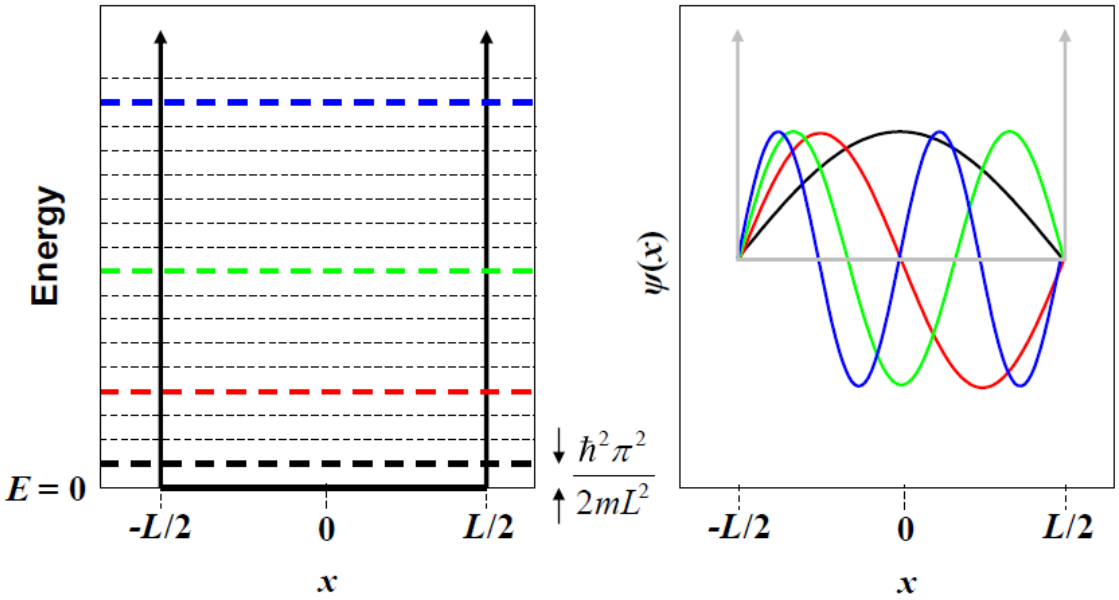


Рис.6- Потенційна яма та розподіл хвильових функцій

З прийнятною точністю систему можна моделювати як нескінченно глибоку потенційну яму. Енергія пов'язаних станів усередині такої структури має вигляд :

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\pi^2}{L^2}n^2 = E_L n^2 \tag{1}$$

де введено позначення :

$$E_L = \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\pi^2}{L^2} \tag{2}$$

Переходи між рівнями призводять до зміни енергії :

$$\Delta E_{n+1,n} = \frac{\hbar^2}{2m_e}\frac{\pi^2}{L^2}((n+1)^2 - n^2) = \frac{\hbar^2}{2m_e}\frac{\pi^2}{L^2}(2n+1) \tag{3}$$

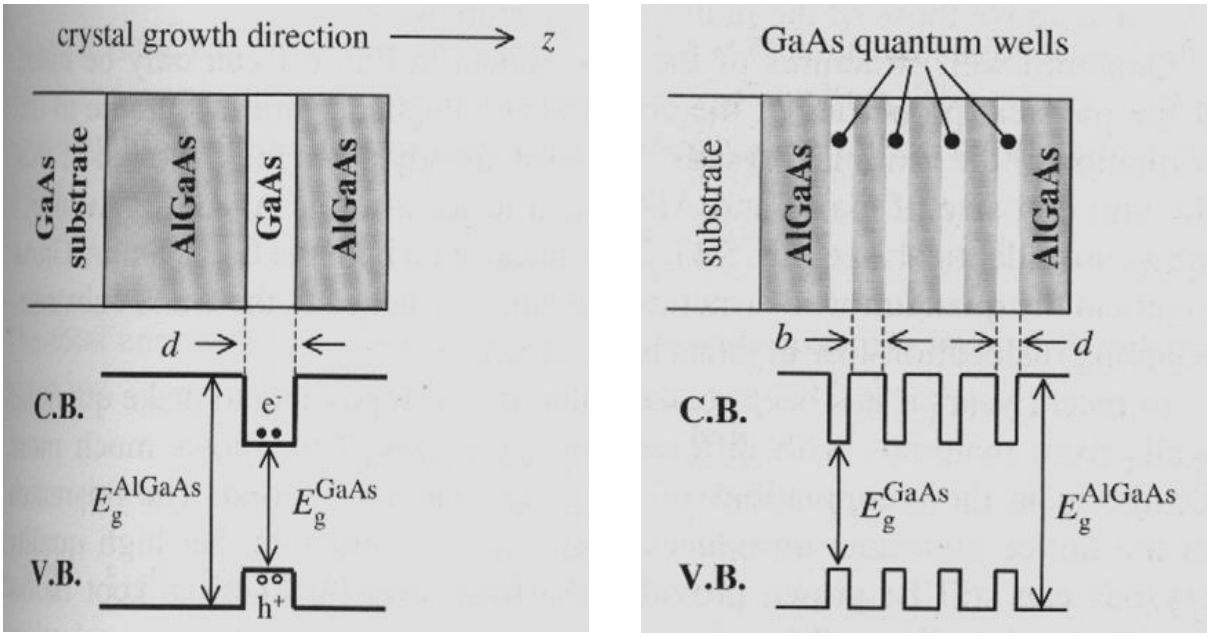
У деяких умовах відбувається випромінювання фотона із частотою :

$$\Delta E_{n+1,n} \Big/ h = \nu$$

Здійснюючи переходи між рівнями, можна досягти випромінювання з потрібною нам частотою, причому потужність такого генератора визначається кількістю квантових точок на одиниці площі, що призводить до значної енергії генерації.

З іншого боку, можливе формування таких квантових ям шляхом послідовного напилення напівпровідників з різними ширинами заборонених зон, як показано на рисунку. Природно, у такому разі виникає потенційна квантова яма з кінцевої глибиною, енергетичні рівні якої не описуються такою

простою формулою як (1). Мало того, невідомо заздалегідь, скільки рівнів поміститься у потенційну яму.



Якщо для отримання рівнів енергії у нескінченно глибокої потенційної ямі необхідна єдина концепція - уявлення про хвильової природі електрона, то для потенційної ями з кінцевої глибиною необхідно вирішити рівняння Шредингера разом із граничними умовами, які, своєю чергою, визначаються геометрією завдання.

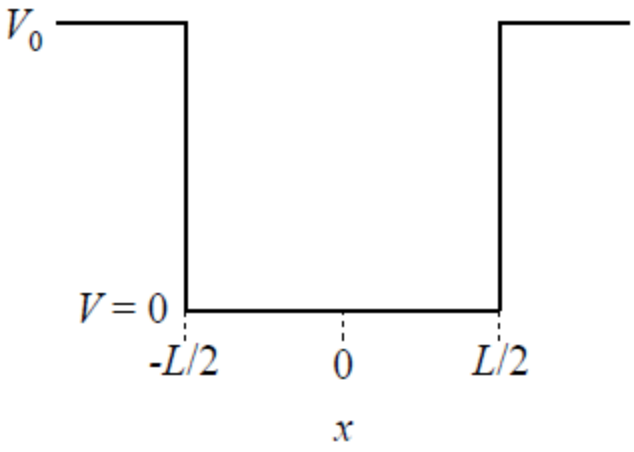


Рис.7-Потенційної ями з кінцевої глибиною

Рівняння Шредінгера для заданого потенціалу :

$$\left(\frac{-\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} - V(x)\right)\psi(x) = E\psi(x) \qquad (5)$$

де $V(x)$ потенціал (рис.7)

Рівняння Шредінгера для кожної області виглядають так :

область I: $x < -\frac{L}{2}$ $$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\Psi_I(x)}{dx^2} + V_0\Psi_I(x) = E\Psi_I(x) \quad (6)$$

область II : $\frac{L}{2} \le x \le -\frac{L}{2}$ $$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\Psi_{II}(x)}{dx^2} + 0\cdot\Psi_{II}(x) = E\Psi_{II}(x) \quad (7)$$

область III : $x > \frac{L}{2}$ $$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\Psi_{III}(x)}{dx^2} + \infty\cdot\Psi_{III}(x) = E\Psi_{III}(x) \quad (8)$$

Той факт, що результуюча хвильова функція має бути безперервною у всьому просторі, означає, що її шматки $\Psi_I(x), \Psi_{II}(x), \Psi_{III}(x)$ безперервні кожен у своїй області і, крім того, у прикордонних точках, де стикуються області, значення відповідних шматків хвильової функції ліворуч і праворуч мають збігатися. Тому граничними умовами у точках $x = -\frac{L}{2}$ та $x = \frac{L}{2}$ є наступні співвідношення :

$$\begin{aligned} \Psi_I\left(-\frac{L}{2}\right) &= \Psi_{II}\left(-\frac{L}{2}\right) \\ \Psi_{II}\left(\frac{L}{2}\right) &= \Psi_{III}\left(\frac{L}{2}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

Оскільки це рівняння другого порядку, то поряд з безперервністю хвильових функцій ми повинні врахувати умову безперервності перших похідних.

$$\begin{aligned} \Psi'_I\left(-\frac{L}{2}\right) &= \Psi'_{II}\left(-\frac{L}{2}\right) \\ \Psi'_{II}\left(\frac{L}{2}\right) &= \Psi'_{III}\left(\frac{L}{2}\right) \end{aligned} . \quad (10)$$

Рішення у трьох областях подається у вигляді :

$$\Psi(x) = \begin{cases} Ce^{\alpha x}, & x < -\frac{L}{2} \\ A\sin(kx) + B\cos(kx), & -\frac{L}{2} \le x \le \frac{L}{2} \\ De^{-\alpha x}, & x > \frac{L}{2} \end{cases}, \quad (11)$$

де

$$\alpha = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}} , \quad (12)$$

$$\text{та } k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} . \quad (13)$$

До рішення (11) входять чотири константи, які повністю визначаються чотирма граничними умовами, але лише за умови, що штучно обмежуємо нашу

увагу на симетричному $A=0$ чи антисиметричному $B=0$ випадку всередині потенційної ями. Якщо подивитися на рис. 3 (права частина) можна бачити як симетричні (червоний і зелений), так і антисиметричні хвильові функції. Обмежимо свою увагу на симетричній частині, хоча для повної картини потрібне вивчення всього спектру.

Отже, симетричне рішення виглядає так :

$$\Psi(x)=\begin{cases} e^{\alpha x}, & x<-\dfrac{L}{2} \\ B\cos(kx), & -\dfrac{L}{2}\le x\le \dfrac{L}{2} \\ e^{-\alpha x}, & x>\dfrac{L}{2} \end{cases} \qquad (14)$$

Природно, через симетричність $C=D=1$. Те, що ці константи (для простоти) рівні одиниці - неправильно, проте, на значення енергії це припущення не впливає. Насправді ці постійні визначаються за умови нормування. Далі використовуємо умову безперервності хвильової функції та її першої похідної (9-10).

$$\begin{aligned} &\Psi_{II}\left(\frac{L}{2}\right)=\Psi_{III}\left(\frac{L}{2}\right) \\ &B\cos\left(k\frac{L}{2}\right)()=e^{-\alpha\left(\frac{L}{2}\right)} \end{aligned} \qquad (15)$$

та

$$\begin{aligned} &\Psi'_{II}\left(\frac{L}{2}\right)(l)=\Psi'_{III}\left(\frac{L}{2}\right) \\ &-Bk\sin\left(k\frac{L}{2}\right)=-\alpha e^{-\alpha\left(\frac{L}{2}\right)} \end{aligned} \quad . \qquad (16)$$

Теперь розділимо (16) на (15).

$$\frac{Bk\sin\left(k\frac{L}{2}\right)}{B\cos\left(k\frac{L}{2}\right)}=\frac{\alpha e^{-\alpha\left(\frac{L}{2}\right)}}{e^{-\alpha\left(\frac{L}{2}\right)}} \qquad (17)$$

$$tan\left(k\frac{L}{2}\right)=\frac{\alpha}{k}$$

Пригадаємо, що ,

$$E_L=\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\pi^2}{L^2},$$

тоді

$$k\frac{L}{2}=\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}\frac{L}{2}=\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{2mEL^2}{\hbar^2\pi^2}}=\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{E}{E_L}}$$

та

$$\frac{\alpha}{k}=k=\frac{\sqrt{\frac{2m(V_0-E)}{\hbar^2}}}{\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}}\sqrt{\frac{V_0-E}{E}}=\sqrt{\frac{V_0}{E}-1}=\sqrt{\frac{\left(V_0/E_L\right)}{\left(E/E_L\right)}-1}=\sqrt{\frac{a}{z}-1},$$

де ми ввели позначення :

$$a=\frac{V_0}{E_L}\qquad\text{і}\qquad z=\frac{E}{E_L}$$

Таким чином, енергія визначається із рішення рівняння:

$$tan\left(\frac{\pi}{2}\sqrt{z}\right)=\sqrt{\frac{a}{z}-1}\ \ . \tag{18}$$

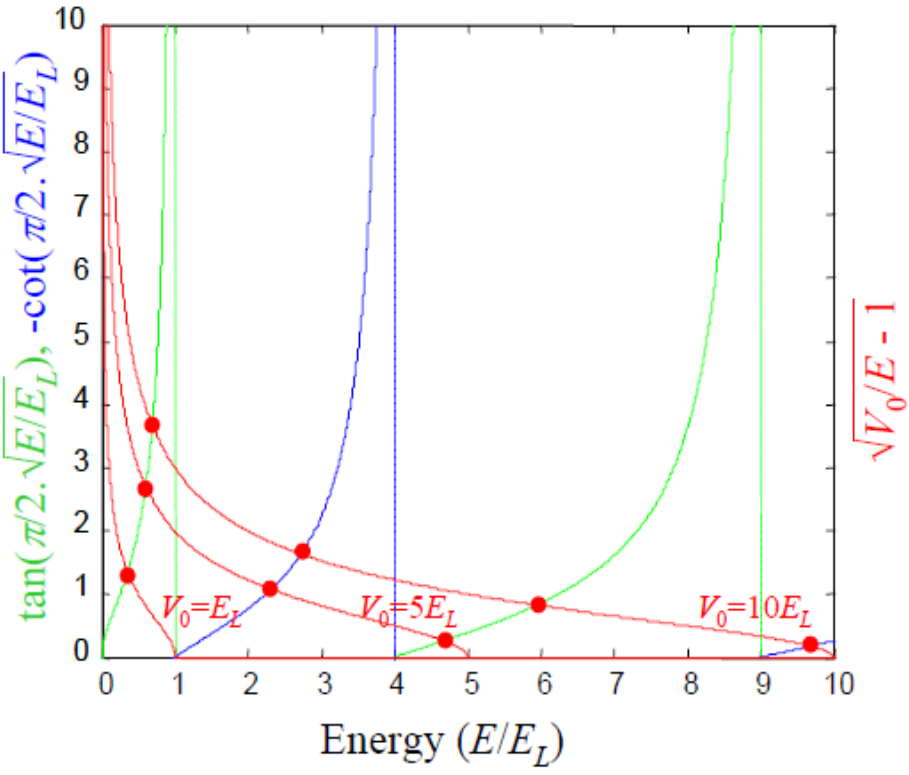


Рис. 8-Рішення для симетричної та антисиметричної хвильової функції

На рисунку 8 зображені рішення (червоні точки) як для симетричного (перетин зелених з червоними лініями), так і для антисиметричного рішення. Зазначимо, червоні лінії – права частина (18) при різних параметрах $a=\frac{V_0}{E_L}=1,5,10$, а зелені-ліва частина (18).



Завдання для самостійного виконання

1. Переглянути відео «Як працює електронний мікроскоп?». https://www.youtube.com/watch?v=YukL0bLh088
2. Провести розрахунок параметрів квантових точок.
   Константи:
   Швидкість світла $c = 2.997924580 \cdot 10^8 m/s$
   Постійна Планка $h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} J \cdot s = 4.136 \cdot 10^{-34} eV \cdot s$
   $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.582 \cdot 10^{-16} eV \cdot s$
   Власна енергія. $mc^2 = 0.511 MeV \cdot s = 0.511 \cdot 10^6 eV \cdot s$
3. Кожен здобувач освіти отримує значення a: від $a = 4.25$ до $a = 9$ з кроком 0.25 (тобто другий студент має 4.5 і т.інш.).
4. У всіх глибина квантової ями $V_0 = 1 eV$. За заданим значенням a знаходимо $E_L = a \cdot 1 eV$ і, використовуючи $E_L = \frac{\hbar^2}{2m}\frac{\pi^2}{L^2}$ і глибину потенційної ями, обчислюємо L .
5. Знаходимо рівні енергії, вирішуємо рівняння (18). На одному аркуші будуємо графіки двох функцій $tan\left(\frac{\pi}{2}\sqrt{z}\right)$ та $\sqrt{\frac{a}{z}-1}$. Потім визначаємо точки перетину цих двох графіків z_1 та z_2. Далі знаходимо значення рівнів енергії $E_1 = z_1 E_L$ та $E_2 = z_2 E_L$.
6. Визначаємо частоту та довжину хвилі світла на цьому переході $h\nu = E_2 - E_1$.
   В оформленні докладно наводимо всі обчислення та графічне рішення у вигляді файлу чи роздруківки.
7. Підводимо підсумки та оформлюємо звіт.



Питання для самоконтролю

1. Поясніть роботу електронного мікроскопу
2. Що таке «квантові точки»?
3. Застосування колоїдних квантових точок

Практична робота 5. Спектроскопія. Визначення спектру речовин

Мета: опанувати спектроскопічні методи аналізу речовин.

Основні теоретичні положення

Спектроскопічні методи аналізу речовин – це найпоширеніші та інформативніши методи, які застосовуються для ідентифікації, визначення кількості та структури речовин, вивчення механізмів перебігу хімічних реакцій тощо. Їх основа – це дослідження спектрів поглинання або випромінювання речовинами електромагнітних хвиль. Саме такі спектри являють собою сукупність значень певних величин, що характеризують систему та процеси, які в ній відбуваються. Спектроскопічні методи, крім самостійного використання в аналітичних дослідженнях, широко застосовуються для детектування (ідентифікації, визначення кількості та структурної організації тощо) ряду речовин при використанні інших аналітичних методів, зокрема хроматографічних, електрофоретичних, імунних, радіологічних та ін.

Спектроскопія (від лат. *Spectrum* – образ, уявлення і грец. *Skopeo* – дивлюся), розділ фізики, що вивчає закономірності взаємодії електромагнітного випромінювання (світла) з хімічною речовиною. Такі взаємодії можуть супроводжуватися поглинанням, випромінюванням або розсіюванням електромагнітного випромінювання.

Під час проведення спектрального аналізу користуються спеціальними таблицями або атласами спектральних ліній, у яких наведено точне розміщення ліній спектра кожного хімічного елемента або довжини хвиль, що їм відповідають. За допомогою спектрального аналізу було відкрито нові хімічні елементи – Рубідій і Цезій. Цікава історія відкриття Гелію. Спочатку його було виявлено під час аналізу спектра сонячного випромінювання в 1868 р., звідки й походить його назва (від грец. «*Геліос*» – Сонце).

Основні переваги спектрального аналізу – дуже висока чутливість, простота й швидкість проведення – зумовлюють його широке використання в металургії й машинобудуванні, хімії й геології, медицині й біології та багатьох інших галузях науки й техніки.

Одним із приладів, за допомогою якого досліджують спектри – спектроскоп. Основними елементами спектроскопа є коліматор 1, зорова труба 2, трикутна призма 3. У коліматорі є щілина 4, через яку проходить світло від досліджуваного джерела світла S. Проходячи крізь призму, світло заломлюється й дає спектр, який спостерігається крізь окуляр 5 зорової труби. Для захисту призми від стороннього світла її прикривають кришкою. За допомогою мікрометричного гвинта 6 можна зміщувати зорову трубу в горизонтальній площині та визначати довжину світлової хвилі, яка відповідає певній лінії спектра.

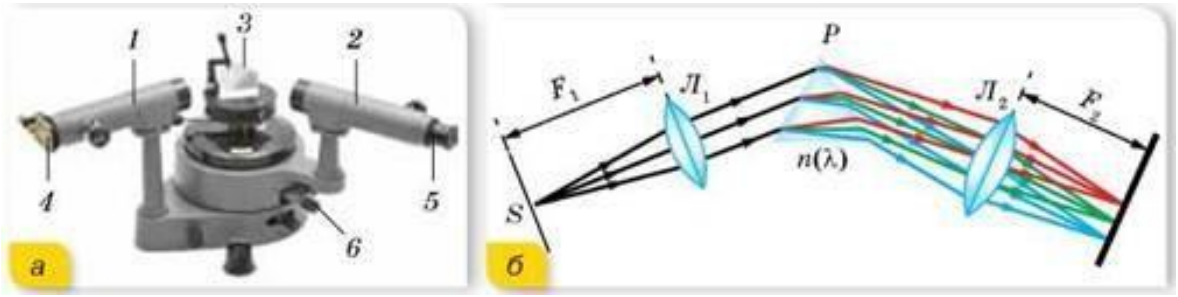


Рис.9- Будова спектроскопа (а) та хід променів у ньому (б)

Потрапляючи через об'єктив у зорову трубу, усі паралельні промені дають зображення щілини у фокальній площині об'єктива, а оскільки промені різних частот (кольорів) паралельні різним побічним осям, кожне зображення щілини (лінія певної частоти) буде на певному місці. Якщо спектроскоп призначено для вимірювань, то на зображення ліній за допомогою спеціального пристрою накладається зображення шкали з поділками, що дає змогу точно визначити положення лінії у спектрі.

Якщо замість зорової труби поставити лінзу та фотопластинку (або інший світлочутливий матеріал), то можна зафіксувати зображення спектрадля подальшого дослідження. Такий прилад називають спектрографом,фотографію спектра — спектрограмою.



Завдання для самостійного виконання

1. Переглянути відео та познайомитися з принципом роботи спектроскопа. https://www.youtube.com/watch?v=YkVcVk4y_c4
2. За допомогою спектроскопа провести дослідження спектру запропонованих речовин. https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=atom_spektroskop&l=ua
3. Визначити стан речовини та, за шкалою електромагнітного випромінювання, визначити в якому діапазоні лежить цей спектр.
4. Вирішити запропоновані задачі.
5. Оформити звіт.



Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення «спектр», «спектральний аналіз».
2. Що таке дисперсія світла?
3. Принцип роботи спектроскопа.
4. Види спектрів.
5. Спектроскопія. Переваги та недоліки методу.

Практична робота 6. Ультразвукова дефектоскопія. Ефект Допплера

Мета: опанувати ультразвукові методи дослідження матеріалів та компонентів мікро- та нанаосистемної техніки.

Основні теоретичні положення

Ультразвуковий метод контролю відноситься до неруйнівних методів. Цей метод широко застосовують для контролю зварних з'єднань з низьколегованих та низьковуглецевих сталей, алюмінію, міді та їх сплавів. Для збудження ультразвукових коливань використовується п'єзоелектричний ефект, сутність якого полягає в тому, що при розтягуванні та стиску деяких кристалів у певному напрямку на їх поверхні виникає електричний заряд. Електричні коливання від генератора високої частоти за допомогою п'єзокристалів перетворюються на механічні коливання частотою до 500 та 1000 МГц..

Для проведення ультразвукового контролю застосовуються спеціальні ультразвукові дефектоскопи, які забезпечують випромінювання ультразвукових коливань, прийом та реєстрацію відбитих сигналів і визначення координат виявлення дефектів. Ультразвуковий дефектоскоп складається з електронного блоку (власне дефектоскоп), набору п’єзоелектричних перетворювачів ПЕП, з'єднувальних кабелів та різних допоміжних пристроїв.

Дефектоскоп має широкий діапазон застосувань, таких як вимірювання відстані за допомогою ультразвукових відбиття, використання потужних ультразвукових коливань для видалення накипу, використання «ультразвукового ножа для руйнування та дроблення ракових змін, конкременту в організмі людини.

Дефектоскоп випромінює ультразвук до об'єкта дослідження (наприклад, промислові матеріали, тіло людини), а потім використовує його відображення, , щоб отримати інформацію про об'єкт та обробити її для формування зображення.

За допомогою ПЕП передається короткий ультразвуковий сигнал в контрольований об'єкт, отримавши на приймач відбитий сигнал, вимірюється час проходження звукового сигналу від ПЕП до поверхні, що відбиває і назад. Це можливо лише тоді, коли є чітко визначений стартовий час та кінцевий час. Якщо швидкість звуку в об'єкті контролю відома, тоді, використовуючи прості обчислення, можна визначити відстань до поверхні, що відображає, таким чином ,точне положення дефекту в об'єкті контролю, рис. 10.

Вимірювання часу починається з подачею електричного імпульсу передачі – імпульсу збудження. Це дуже короткий електричний розряд, що викликає звуковий імпульс у п'єзоелементі перетворювача. Звуковий імпульс проходить через матеріал і при відображенні від дефекту або протилежної поверхні матеріалу повертається до перетворювача.

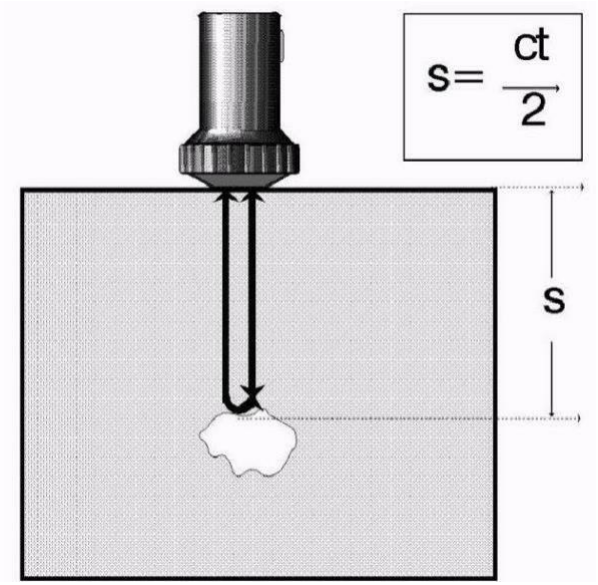


Рис. 10 - Принцип вимірювання часу та шляхи імпульсу

Отримані коливання перетворюються на електричний імпульс, який зупиняє вимір часу. Відстань до поверхні, що відбиває, можна розрахувати за формулою :

$$s = \frac{ct}{2}$$

де s – шлях звукового імпульсу [мм]; с – швидкість звуку у матеріалі [км/с]; t – час проходження імпульсу [с].

Якщо тепер час проходження та амплітуду імпульсу відобразити у графічному вигляді, вийде спрощена модель універсального ультразвукового дефектоскопа (рис. 11).

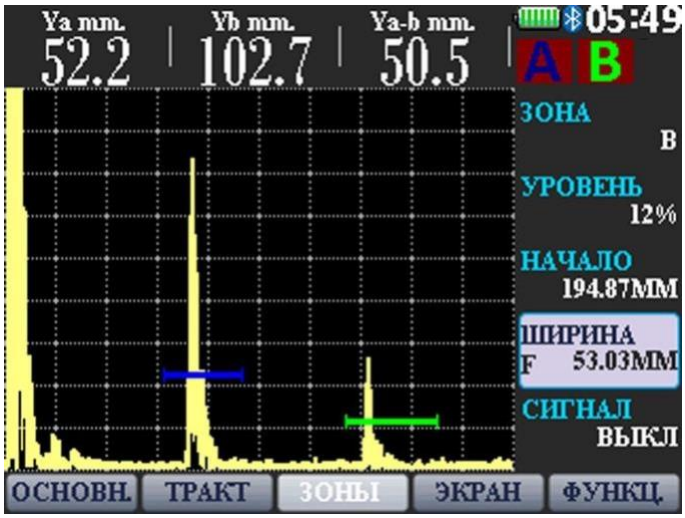


Рис. 11- Графічне відображення отриманих ультразвукових сигналів у модульному вигляді

Перевагою ультразвукової дефектоскопії є можливість контролю при односторонньому доступі до виробу, простота та висока продуктивність методу, велика проникаюча здатність, що дозволяє виявити внутрішні дефекти у великогабаритних виробах, можливість автоматизувати процес контролю, повна безпека для оператора та навколишніх робітників, висока чутливість.



Завдання для самостійного виконання

1. Дослідити ефект Допплера за допомогою симуляції https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=kv_dopple r&l=ua
2. Дослідити як впливає відстань до джерела звуку та частота звуку на їх сприйняття спостерігачем.
3. Дослідити як впливає швидкість руху спостерігача на сприйняття звуку.
4. Побудувати відповідні характеристики.
5. Зробити висновки та оформити звіт.



Питання для самоконтролю

1. Ультразвук, та його застосування в промисловості.
2. Ультразвукова дефектоскопія. Методика, переваги та недоліки.
3. Ефект Допплера.
4. П’єзоефект. Прямий та зворотній п’єзоефект.

РОЗДІЛ 2 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Індивідуальне завдання виконується у вигляді письмової роботи з обов'язковим публічним захистом на останньому навчальному тижні. Представляє собою дослідницьку роботу за наданою тематикою та розрахункові завдання. Задачі здобувачі освіти вирішують за варіантами (таблиця1).



Тематика індивідуальних завдань

1. Методи дослідження структури кристалів (рентгенівська дифракція, електронна дифракція).
2. Методи дослідження складу поверхні і тонких плівок (зворотне розсіювання швидких іонів, ВИМС, оже-електронна спектроскопія).
3. Методи отримання тонких провідних плівок в технології виробів мікроелектроніки.
4. Історія відкриття і дослідження надпровідності, застосування надпровідників.
5. Високотемпературні надпровідники і перспективи їх застосування.
6. Історіявивчення напівпровідникових матеріалів.
7. Методи вирощування монокристалів.
8. Поняття про епітаксію, методи отримання епітаксійних плівок.
9. Ефект Холла і його використання для вивчення властивостей матеріалів.
10. Ефект Ганна і прилади на його основі.
11. Аморфні напівпровідники і прилади на їх основі.
12. Органічні напівпровідники і можливості їх застосування в електронній техніці.
13. Широкозонні напівпровідники і прилади на їх основі.
14. Поняття про гетеропереходах. Створення гетеропереходов і їх застосування в приладах.
15. Матеріали для перетворення світлової енергії в електричну.
16. Тверді розчини на основі напівпровідникових з'єднань A_3B_5 та їх застосування.
17. Властивості і застосування напівпровідникових з'єднань A_2B_6.
18. Матеріали для оптоелектроніки.
19. Пористий кремній: отримання і застосування.
20. Матеріали для напівпровідникових лазерів.
21. Квантові ями, нитки і точки: що це таке?
22. Полімерні діелектрики для нових приладів електронної техніки.
23. Ситалли і їх застосування у виробах електронної техніки.
24. Скло як активне середовище для генерації лазерного випромінювання.
25. Вуглецеві нанотрубки: властивості, отримання та застосування в електронних приладах.
26. Рідкі кристали та їх застосування в системах відображення інформації.
27. Матеріали для акустоелектричних приладів.
28. Матеріали для волоконно-оптичних ліній зв'язку.
29. П'єзоелектрична кераміка і її застосування.
30. Матеріали для магнітоелектроніки.



Задачі за темами та варіантами

Таблиця 1. Номери розв'язуваних задач за темами

Тема / Варіант	1	2	3	4	5	6
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28	1.1	2.2	3.3	4.1	5.2	6.3
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29	1.2	2.3	3.1	4.2	5.3	6.1
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30	1.3	2.1	3.2	4.3	5.1	6.2

Таблиця 2. Початкові дані по металах для задач № 1 і 2 (T = 300 K)

Варіант	Метал	M, *г / моль*	D, *кг / дм*^{3}	n_0	$(\rho_0\times10^8)$*, *Ом м*	$(\alpha\times10^3)$*, *1/град*
1	Li	6.94	0.534	1	8.4	4.4
2	Na	23.0	1.01	1	4.5	5.0
3	Mg	24.3	1.74	2	4.4	4.2
4	Al	27.0	2.70	3	2.7	4.2
5	K	39.1	0.87	1	6.25	5.8
6	Ca	40.1	1.55	2	4.17	4.6
7	V	50.9	5.96	1	26	2.8
8	Hr	52.0	7.19	1	19	5.9
9	Fe	55.8	7.87	3	8.71	6.6
10	Ni	58.7	8.91	1	10.3	4.3
11	Cu	63.5	8.93	1	1.62	4.3
12	Zn	65.4	7.14	2	5.92	3.5
13	Ga	69.7	5.91	3	8.1	5.2
14	Rb	85.5	1.53	1	11.6	5.3
15	Nb	92.9	8.58	1	13.1	4.0
16	Mo	95.9	10.2	1	5.03	4.7
17	Pd	107	12.2	1	9.1	3.8
18	Ag	108	10.5	1	1.47	4.0
19	Cd	112	8.65	2	7.3	4.3
20	In	115	7.31	3	8.2	5.1

21	Sn	119	7.28	4	5.92	3.5
22	Sb	122	6.62	5	42	3.8
23	Cs	133	1.87	1	20	4.8
24	Ta	181	16.6	1	32	3.6
25	W	184	19.3	1	5.5	4.6
26	Ir	192	22.4	2	6.15	3.7
27	Pt	195	21.4	1	10.7	3.9
28	Au	197	19.3	1	2.06	4.5
29	Tl	204	11.8	3	18.6	2.3
30	Pb	207	11.3	4	20	3.4

***** $\rho_0 = (\rho_0 \times 10^{8}) \cdot 10^{-8}$ *Ом м*; $\alpha = (\alpha \times 10^{3}) \cdot 10^{-3}$ 1/*град*.

Таблиця 3 . Початкові дані по напівпровідниках для задач № 3–6

Ва-ріант	Напів-провідник	*Eg*, еВ	$\frac{m_n}{m_0}$*	$\frac{m_p}{m_0}$*	μ_n $м^2/(В\,с)$	μ_p $м^2/(В\,с)$	τ_n, с	τ_p, с	*T***, ^oK	N_C, , $м^{-3}$	N_V, , $м^{-3}$
1	АЛМАЗ	5,40	0,2	0,4	0,4	0,5	10^{-6}	10^{-6}	800	$9.73\cdot10^{24}$	$2.75\cdot10^{25}$
2	ZnS	3,70	0,3	0,5	0,017	0,0005	10^{-3}	10^{-3}	750	$1.62\cdot10^{25}$	$3.49\cdot10^{25}$
3	GaN	3,40	0,2	0,6	0,038	0,02	10^{-6}	$5\cdot10^{-6}$	700	$7.96\cdot10^{24}$	$4.14\cdot10^{25}$
4	SiC	3,00	0,6	1,0	0,03	0,005	10^{-9}	$1\cdot10^{-9}$	650	$3.70\cdot10^{25}$	$7.96\cdot10^{25}$
5	ZnSe	2,60	0,17	0,6	0,03	0,0015	$5\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	600	$4.95\cdot10^{24}$	$3.28\cdot10^{25}$
6	CdS	2,53	0,2	0,7	0,03	0,005	$1\cdot10^{-3}$	10^{-3}	550	$5.54\cdot10^{24}$	$3.63\cdot10^{25}$
7	AlP	2,43	0,35	0,45	0,008	0,003	$5\cdot10^{-6}$	10^{-5}	500	$1.11\cdot10^{25}$	$1.62\cdot10^{25}$
8	ZnTe	2,28	0,15	0,65	0,034	0, 02	$5\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	450	$2.67\cdot10^{24}$	$2.40\cdot10^{25}$
9	GaP	2,26	0,36	0,4	0,02	0,01	10^{-8}	10^{-7}	400	$8.31\cdot10^{24}$	$9.73\cdot10^{24}$
10	CdSe	1,74	0,13	0,45	0,06	0,006	10^{-2}	10^{-2}	350	$1.48\cdot10^{24}$	$9.50\cdot10^{24}$
11	AlSb	1,58	0,3	0,4	0,04	0,02	$5\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-6}$	300	$4.10\cdot10^{24}$	$6.32\cdot10^{24}$
12	GdTe	1,51	0,11	0,4	0,1	0,01	10^{-7}	10^{-7}	300	$9.11\cdot10^{23}$	$6.32\cdot10^{24}$
13	GaAs	1,43	0,067	0,5	0,85	0,04	10^{-9}	10^{-8}	300	$4.33\cdot10^{23}$	$8.83\cdot10^{24}$
14	InP	1,35	0,06	0,2	0,5	0,06	10^{-6}	$2\cdot10^{-6}$	300	$3.67\cdot10^{23}$	$2.23\cdot10^{24}$
15	Si	1,12	1,05	0,56	0,15	0,05	$3\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-6}$	300	$2.69\cdot10^{25}$	$1.05\cdot10^{25}$
16	GaSb	0,72	0,05	0,4	0,5	0,14	10^{-6}	10^{-6}	300	$2.79\cdot10^{23}$	$6.32\cdot10^{24}$
17	Mg_2Si	0,70	0,46	0,87	0,04	0,007	$3\cdot10^{-6}$	$3\cdot10^{-6}$	300	$7.79\cdot10^{24}$	$2.03\cdot10^{25}$
18	Ge	0,67	0,57	0,37	0,39	0,19	$5\cdot10^{-6}$	10^{-5}	300	$1.07\cdot10^{25}$	$5.62\cdot10^{24}$
19	Mg_2Ge	0,60	018	0,31	0,05	0,01	$5\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-6}$	300	$1.91\cdot10^{24}$	$4.31\cdot10^{24}$
20	ZnSb	0,50	0,15	0,42	0,1	0,05	$2\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-5}$	216	$8.86\cdot10^{23}$	$4.15\cdot10^{24}$
21	PbS	0,39	0,25	0,25	0,06	0,07	10^{-5}	$4\cdot10^{-5}$	216	$1.91\cdot10^{24}$	$1.91\cdot10^{24}$
22	InAs	0,36	0,027	0,41	3,0	0,04	$5\cdot10^{-10}$	$6\cdot10^{-8}$	120	$2.80\cdot10^{22}$	$1.66\cdot10^{24}$
23	Te	0,34	0,13	0,4	0,09	0,06	$3\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-5}$	120	$2.96\cdot10^{23}$	$1.60\cdot10^{24}$
24	PbTe	0,32	0,034	0,032	0,2	0,10	10^{-6}	$2\cdot10^{-6}$	120	$3.96\cdot10^{22}$	$3.62\cdot10^{22}$
25	Mg_2Sn	0,30	1,17	1,28	0,025	0,02	$4\cdot10^{-6}$	$4\cdot10^{-6}$	77	$4.11\cdot10^{24}$	$4.70\cdot10^{24}$
26	PbSe	0,27	0,054	0,05	0,1	0,06	$3\cdot10^{-6}$	$3\cdot10^{-6}$	77	$4.08\cdot10^{22}$	$3.63\cdot10^{22}$
27	InSb	0,18	0,014	0,4	2	0,1	10^{-8}	$5\cdot10^{-8}$	77	$5.38\cdot10^{21}$	$8.22\cdot10^{23}$
28	$Cd_{0,2}H_{0,8}Te$	0,16	0,012	0,43	1,6	0,019	10^{-7}	10^{-7}	77	$4.27\cdot10^{21}$	$9.16\cdot10^{23}$
29	$Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$	0,10	0,011	0,012	4,0	3,4	10^{-7}	10^{-7}	77	$3.75\cdot10^{21}$	$4.27\cdot10^{21}$
30	Cd_3As_2	0,10	0,46	0,12	0,05	0,03	10^{-6}	10^{-6}	77	$1.01\cdot10^{24}$	$1.35\cdot10^{23}$

* $m_n = (m_n/m_0)\cdot 9{,}1\cdot10^{-31}$ *кг*; $m_з = (m_з/m_0)\cdot 9{,}1\cdot10^{-31}$ *кг*.

**Температура плавлення CO_2= 216 *K*; кипіння кріптону = 120 *K*, кипіння азоту = 77 *K*.



Умовні позначення

t – час, x – координата (товщина), S – площа перетину;
$c = 3 \cdot 10^8$ *м/с* – швидкість світла;
$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ *Кл* – модуль заряду електрона, заряд дірки;
$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ *Дж с* – стала Планка;
$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *Дж/К* $= 8{,}62 \cdot 10^{-5}$ *еВ/К* – стала Больцмана; T – температура;
$m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ *кг* – маса спокою вільного електрона;
m_n – ефективна маса електрона, m_p – ефективна маса дірки;
$\boldsymbol{\varepsilon}$ – відносна діелектрична проникність, $\boldsymbol{\varepsilon}_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ *Ф/м* – електрична стала;
E – напруженість електричного поля;
E – енергія електрона (дірки), E_g – ширина забороненої зони,
E_F – енергія Фермі;
U – напруга, різниця потенціалів, $\boldsymbol{\varphi}_0$ – контактна різниця потенціалів;
j – густина струму, j_s – густина струму насичення;
C – ємність p-n-переходу, $\boldsymbol{\delta}$ – ширина області об'ємного заряду;
L_n – дифузійна довжина електронів, L_p – дифузійна довжина дірок;
N_v – ефективна густина станів у валентній зоні, N_c – в зоні провідності;
N_a – концентрація акцепторів, N_d – концентрація донорів;
n – концентрація електронів, p – концентрація дірок;
n_i – концентрація власних електронів, p_i – концентрація власних дірок;
n_n – концентрація основних електронів, p_p – концентрація основних дірок;
n_p – концентрація неосновних електронів, p_n– концентрація неосновних дірок;
$\boldsymbol{\mu}_n$ – рухливість електронів, $\boldsymbol{\mu}_p$ – рухливість дірок;
$\boldsymbol{\tau}_n$ – час життя електронів, $\boldsymbol{\tau}_p$ – час життя дірок;
$\boldsymbol{\rho}_0$– питомий опір при $T = 300$ *K*, $\boldsymbol{\rho}_i$ – власний питомий опір;
$\boldsymbol{\gamma}$ – питома електропровідність;
D_n – коефіцієнт дифузії електронів, D_p – коефіцієнт дифузії дірок;
Δn – концентрація нерівноважних електронів;
Δp – концентрація нерівноважних дірок.

Примітка. В процесі обчислення в функцію експоненти підставляти ширину забороненої зони E_g в *еВ*, а постійну Больцмана $k = 8{,}62 \cdot 10^{-5}$ *еВ/К*. В інших випадках постійна Больцмана $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *Дж/К*.

 **Задачі** (***N*** **–** номер варіанта)

Тема 1. Електропровідність металів

1.1. До провідника довжиною 1 *м* і площею поперечного перерізу 0,1 $мм^2$, який виконано з даного металу, прикладена напруга 0,1 *В*. Температура провідника (300+20***N***)*К*. Визначити:

а) швидкість дрейфу електронів;

б) її відношення до середньої теплової швидкості;

в) опір провідника при зазначеній температурі.

1.2. До провідника довжиною 1 *км* і площею поперечного перерізу 1,5 $мм^2$, який виконано з даного металу, прикладена різниця потенціалів 220 *В*. Температура провідника (300+20***N***) *К*. Визначити:

а) час, протягом якого електрон пройде по даному провіднику;

б) у скільки разів швидше електрон пролетить цю відстань у вакуумі при такій же самої напрузі;

в) опір провідника при зазначеній температурі.

1.3. У провіднику з площею поперечного перерізу 1 $мм^2$ і довжиною (1000+50***N***)*м*, який виконано з даного металу, протікає струм під дією напруги 10 *В* при температурі (300+20***N***) *К*. Визначити:

а) швидкість дрейфу електронів;

б) середню теплову швидкість електронів;

в) опір провідника при зазначеній температурі.

Тема 2. Статистика електронів у металах

2.1. У зразку, який виконано з даного металу, деякий енергетичний рівень*а* температури 300 *К* розташований на $0{,}1\sqrt[3]{N}$ вище рівня Фермі.

Визначити:

а) концентрацію вільних електронів у металі;

б) значення енергії Фермі та заданого енергетичного рівня;

в) ймовірність заповнення електронами заданого енергетичного рівня;

г) чому дорівнює ймовірність заповнення електронами заданого енергетичного рівня, якщо температура збільшиться до (300+20*N*) *К*;

д) накреслити в масштабі зонну діаграму метала, на якій указати числові значення рівня Фермі та заданого енергетичного рівня.

2.2 У зразку, який виконано з даного металу, ймовірність перебування електрона на енергетичному рівні, розташованому на $0{,}1\sqrt[3]{N}$ Фермі, дорівнює 1%.

Визначити:

а) концентрацію вільних електронів у металі;

б) значення енергії Фермі та заданого енергетичного рівня;

в) температуру зразка;

г) ймовірність заповнення електронами заданого енергетичного рівня при 300 *К*;

д) накреслити в масштабі зонну діаграму металу, на якій указати числові значення рівня Фермі та заданого енергетичного рівня.

2.3 Зразок, який виконано з даного металу, знаходиться при температурі (300+20*N*) *К*.
Визначити:
а) значення енергії Фермі;
б) концентрацію вільних електронів у металі;
в) інтервал енергій (значення рівнів E_1 і E_2), якому відповідає функція розподілу Фермі-Дірака з інтервалу від 10% до 90%;
в) ймовірність заповнення електронами визначених рівнів E_1 і E_2 при 300 *К*;
д) накреслити в масштабі зонну діаграму метала, на якій указати числові значення рівня Фермі та енергії рівнів E_1 і E_2.

Тема 3. Електропровідність напівпровідників

3.1. Напівпровідник, який знаходиться при заданій температурі, легіровано донорною домішкою і має питомий опір $0{,}01 \cdot N$ *Ом м*.
До напівпровідника прикладено електричне поле напруженістю 100 *В/м.* Визначити:
а) концентрацію основних і неосновних носіїв струму;
б) положення рівня Фермі;
в) накреслити в масштабі зонну діаграму напівпровідника, на якій указати числові значення рівнів E_V, E_C, E_F ;
г) густину струму скрізь напівпровідник.

3.2. Не легірований напівпровідник знаходиться при заданій в табл. 3 температурі. До напівпровідника прикладено електричне поле напруженістю 100*В/м.* Визначити:
а) питомий опір напівпровідника;
б) положення рівня Фермі;
в) накреслити в масштабі зонну діаграму напівпровідника, на якій указати числові значення рівнів E_V, E_C, E_F ;
г) густину струму скрізь напівпровідник.

3.3. Напівпровідник *р*-типу, який знаходиться при заданій температурі, містить мілку домішку-акцептор з концентрацією $6 \cdot 10^{20}$ $м^{-3}$. Після введення деякої кількості донорів тип провідності змінився на протилежний, а питомий опір став рівним 0,1 *Ом м*. До напівпровідника прикладене електричне поле напруженістю 100 *В/м.* Визначити:
а) необхідну концентрацію уведеної донорної домішки в зразку;
б) положення рівня Фермі після уведення донорної домішки;
в) накреслити в масштабі зонну діаграму напівпровідника, на якій вказати числові значення рівнів E_V, E_C, E_F ;

г) густину струму крізь напівпровідник**.**

Тема 4. Ефект Холла в напівпровідниках

4.1. Зразок напівпровідника у формі паралелепіпеда з розмірами 50*мм* × 5*мм* × 1*мм* поміщений у магнітне поле з індукцією 0,5 *Тл*, вектор якої перпендикулярний площині зразка. Під дією подовжньої напруги 0,4 $\sqrt[3]{N}$ *В* по ньому протікає струм 20 *мА*, обумовлений носіями одного знака. Визначена уздовж ширини зразка ЕРС Холла складає 6 $\sqrt[3]{N}$ *мВ*. Знайти:
а) питому електропровідність напівпровідника;
б) концентрацію носіїв струму;
в) рухливість носіїв струму.

4.2. Через напівпровідник з питомим опором $5\cdot10^{-4}\sqrt[3]{N}$ *Ом м*, що характеризується коефіцієнтом Холла $3\cdot10^{-4}$ $м^3/Кл$ пропускають електричний **с**трум, **з**умовлений носіями одного знаку, густиною 10/ $\sqrt[3]{N}$ $мА/мм^2$ у поперечному магнітному полі з індукцією 2 *Т*. Визначити:
а) напруженість холлівського поля;
б) напруженість зовнішнього електричного поля, необхідного для створення заданої густини струму;
в) рухливість носіїв струму.

Прямокутна плівка напівпровідника *n*-типу розмірами 20 *мм* × 10 *м* із рухливістю електронів 0,1 $м^2/В\ с$ розташована в площині, перпендикулярній магнітному полю Землі з індукцією 44 $\sqrt[3]{\boldsymbol{N}}$ *мТл.* Виміряна уздовж ширини ЕРС Холла складає 1/$\sqrt[3]{\boldsymbol{N}}$ *мВ*. Визначити:
а) різницю потенціалів, прикладену уздовж довжини плівки;
б) дрейфову швидкість електронів.

Тема 5. Електричні властивості p-n-переходів

5.1. Маємо *p*-*n*-перехід з концентрацією донорної домішки 10^{23} $м^{-3}$ та концентрацією акцепторної домішки 10^{22} $м^{-3}$. Для заданого напівпровідника призаданій температурі визначити:
а) контактну різницю потенціалів;
б) напругу, при якій густина прямого струму буде в 1000·*N* разів більше густини струму насичення.

Питомий опір *p*-області *p*-*n*-переходу 0,02 *Ом·м.* та питомий опір *n*- області 0,01 *Ом·м*. Для заданого напівпровідника при заданій температурі обчислити:
а) висоту потенційного бар'єра *p*-*n*-переходу;
б) напругу, за якої густина прямого струму буде в 2000·*N* разів більше густини струму насичення.

5.2. Маємо *p*-*n*-перехід з концентрацією донорної домішки 10^{23} $м^{-3}$ та

концентрацією акцепторної домішки 10^{22} $м^{-3}$. Для заданого напівпровідника призаданій температурі визначити:

а) густину зворотного струму насичення;
б) відношення діркової складової цього струму до електронного;
в) напругу, за якої густина прямого струму буде 10^5 $А/м^2$.

Тема 6. Ємність p-n переходу

6.1. При заданій температурі у незміщеному різкому *p-n*-переході перетином 1 $мм^2$ з відносною діелектричною проникністю 13 концентрація донорної домішки 10^{23} $м^{-3}$ та концентрація акцепторної домішки 10^{22} $м^{-3}$. Знайти:
а) ширину *p-n*-переходу;
б) бар'єрну ємність *p-n*-переходу;
в) напругу, за якої бар'єрна ємність зменшиться в 2 рази.

6.2. У різкому *p-n*-переході перетином 0,01 $см^2$ і відносною діелектричною проникністю 13 за заданої в табл.3 температури концентрація донорної домішки 10^{23} $м^{-3}$ та концентрація акцепторної домішки 10^{22} $м^{-3}$. При напругах 0 і –5 $В$ знайти:
а) ширину *p-n*-переходу;
б) бар'єрну ємність *p-n*-переходу.

6.3. За заданої температури у різкому *p-n*-переході перетином 1 $мм^2$ і відносною діелектричною проникністю 13 концентрація донорної домішки 10^{23} $м^{-3}$ та концентрація акцепторної домішки 10^{22} $м^{-3}$. Пробивна напруга в 50 разів більше контактної різниці потенціалів. За напруги рівної нулю і пробивнійнапрузі знайти:
а) ширину *p-n*-переходу;
б) бар'єрну ємність *p-n*-переходу.

ПИТАННЯ ДО ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ

1. Види хімічного зв'язку в речовинах. Класифікація матеріалів електроніки.
2. Аморфні та поліморфні матеріали.
3. Основа зондового методу вимірювання питомого опору.
4. Двохзондовий метод вимірювання опору.
5. Чотиризондовий метод вимірювання питомого опору.
6. Чотиризондовий метод визначення питомого опору напівпровідників дня напівскінченного зразку. Компенсаційний метод.
7. Метод Ван-дер-Пау.
8. Метод опору розтікання.
9. Мостовий метод вимірювання питомого опору
10. Безконтактний метод вимірювання питомого опору на основі коливального контуру
11. Індуктивний метод вимірювання питомого опору.
12. Сучасні методи та обладнання для визначення поверхневого опору.
13. Вимірювання параметрів напівпровідників на основі ефекту Холла.
14. Основні параметри електричного та магнітного полів. Метод струму Холла.
15. Метод магнітоопору.
16. Стаціонарні та нестаціонарні методи визначення параметрів нерівноважних носіїв заряду. Рівняння безперервності.
17. Метод згасання провідності для вимірювання часу життя носіїв заряду
18. Метод рухливого світлового зонда для вимірювання дифузійної довжини
19. Метод фото електромагнітного ефекту для вимірювання часу життя носіїв заряду
20. Метод модуляції провідності у точковому контакті
21. Ідеальні МДН -структури. Енергетичні діаграми різних режимів.
22. Метод високочастотних вольт-фарадних характеристик МДН-структур.
23. Метод низькочастотних вольт-фарадних характеристик МДН-структур.
24. Класифікація спектрів. Спектральний аналіз
25. Класифікація методів спектрального аналізу.
26. Застосування спектрального аналізу.
27. Прилади та методи проведення спектрального аналізу речовин.
28. Джерела випромінювання для дослідження оптичних характеристик напівпровідників. Основні параметри.
29. Фотометрія.
30. Реєстрація сигналів при вимірюванні оптичних та люмінесцентних характеристик напівпровідників.

31. Класифікація фотометрів.
32. Фотометричні методи дослідження.
33.Лазери. Класифікація. Метод лазерної спектроскопії.
34.Електронний мікроскоп.
35.Рентгенівські методи дослідження матеріалів
36.Ультразвук. Характеристики ультразвукових хвиль
37.Ультразвукова дефектоскопія.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Основна:

1. Майструк Е.В., Козярський І.П., Козярський Д.П. Фізико-хімічні основи напівпровідникового матеріалознавства : навч. посіб. Чернівці : Чернівецький національний університет, 2020. 120 с.
2. Крилик, Л. В., Селецька О.О. Матеріали електронної техніки : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. 120 с.
3. Формування та дослідження наноструктурованих матеріалів для фотовольтаїки: монографія / заг. ред. д.т.н., проф. Левінзон Д.І. Запоріжжя : Інженерний навчально-науковий інститут ЗНУ, 2018. 320 с.

Додаткова:

1. Головко Ю.В., Червоний І.Ф., Швець Є.Я., Матеріали і компоненти електроніки : навч. посіб. Запоріжжя : Запорізька державна інженерна академія, 2011. 278 с.
2. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., В.І. Ільченко, Ю.І. Якименко. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Київ: Вища школа, 2010. 157 с.
3. Nebesniuk O.Y. , Nikonova Z.A. , Nikonova A.A. , Khrypko S.L. Impact of defects on quality contact systems for photoelectric converters. *Journal of nano- and electronic physics.* 2019. Vol.11. P.21- 25.
4. Nebesniuk O.Y. , Nikonova A.A. , Nikonova Z.A. The influence of technological factors on photoconverters′ electrophysical characteristics. *Journal of nano- and electronic physics.* 2020. Vol. 12. P. 12-17.
5. Nebesniuk O.Y. , Nikonova Z.A. , Nikonova A.A. Technological Aspects of Formation of Energy-efficient Photovoltaic Solar Energy Converters. *Journal of nano- and electronic physics.* 2021. Vol. 13. P. 33-39.
6. Nebesniuk O.Y. , Nikonova Z.A. , Nikonova A.A. Technological Features of Real Contact Systems' Production for Nanosystem Equipment. *Journal of nano- and electronic physics.* 2022. Vol. 14. P.14-19
7. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Якименко Ю.І.. Нанофізика наноматеріали, наноелектроніка. Київ : Наукова думка, 2012. 300 с.

Інформаційні ресурси:

1. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: http://library.znu.edu.ua/ (дата звернення: 11.04.2024).
2. Система електронного забезпечення навчання ЗНУ. URL: https://moodle.znu.edu.ua/ (дата звернення: 23.03.2024).
3. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. URL: http://www.nbuv.gov.ua/ (дата звернення: 11.03.2024).
4. Цифрова повнотекстова база даних англомовної наукової періодики JSTOR: https://www.jstor.org/ (дата звернення: 25.03.2024).

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Світанько М.В., Верьовкін Л.Л., Хрипко С.Л. Методи дослідження матеріалів та компонентів мікро- та наноелектронної техніки: конспект лекцій для студентів ЗДІА спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» денної та заочної форм навчання. Запоріжжя : Запорізька державна інженерна академія, 2018. 40 с.
2. ДСТУ 3008-2015. Державний стандарт України. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Чинний від 2017-07-01. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2017. 31с.
3. Фізичне матеріалознавство. Ч. 4 : Напівпровідники : навч. посіб. / за ред. Ю. М. Поплавко. Київ, 2011. 333 с.

Навчально-методичне видання
(українською мовою)

Небеснюк Оксана Юріївна
Ніконова Зоя Андріївна
Ніконова Аліна Олександрівна

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ТА КОМПОНЕНТІВ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Методичні рекомендації до практичних занять і виконання індивідуального завдання для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності «Мікро-та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікроелектронні інформаційні системи»

Рецензент *В. В. Артемчук*
Відповідальний за випуск *Т.В. Критська*
Коректор *О.Ю.Небеснюк*