

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни
«Фізика твердого тіла»
для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
Частина 2

Затверджено
на засіданні кафедри фізичного
матеріалознавства для електроніки
та геліоенергетики,
протокол №7 від 30.01.2019 р.

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізика твердого тіла» для студентів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка». Частина 2 / Уклад.: Р.В. Зайцев, М.В. Кіріченко, К.О. Мінакова, А.М. Дроздов. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 47 с.

Укладачі: Р.В. Зайцев,
М.В. Кіріченко,
К.О. Мінакова,
А.М. Дроздов

Рецензент доц. І.В. Федорін

Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики

ВСТУП

Методичні вказівки містять лабораторні роботи для студентів усіх спеціальностей.

Основна спрямованість методичних вказівок з предмету фізика твердого тіла – дати можливість студентам за допомогою досліду вивчити важливі фізичні явища. Опис лабораторних робіт не претендує на те, щоб створити у студентів повне уявлення про явища, які вивчаються. Таке уявлення може виникнути лише внаслідок опрацювання лекцій та підручників.

Велика увага в методичних вказівках з фізики твердого тіла для студентів технічних спеціальностей приділяється обробленню результатів вимірювання. Для успішного виконання робіт необхідна попередня самостійна підготовка, в першу чергу теоретична.

Кожна лабораторна робота розрахована на дві академічні години занять у лабораторії. Перед заняттям студент повинен підготувати протокол лабораторної роботи, вивчивши відповідний теоретичний матеріал.

Під час заняття студенти проводять необхідні виміри, виконують розрахунки, доводять звіт до висновку. Результати вимірювання обговорюються з викладачем і затверджуються.

Повністю оформлений звіт по лабораторній роботі потрібно подати викладачу до кінця заняття. Він повинен містити: титульний лист, номер лабораторної роботи та її назву, перелік приладів і обладнання, мету роботи, схему установки, розрахункові формули, таблицю результатів вимірів і розрахунки, висновки за результатами роботи. Графіки повинні бути виконані на міліметровому папері.

Якщо студент не встигає захистити лабораторну роботу до кінця заняття, дозволяється оформити звіт (графіки) з використанням комп'ютерних програм (Excel, Origin) до наступного заняття.

Лабораторна робота вважається виконаною після успішно проведеного захисту шляхом співбесіди студента з викладачем (захист звіту + оцінка за теоретичний матеріал).

Захист звіту: мета роботи + експериментальна методика + висновки.

Теоретичний матеріал: знання фізичних явищ, які вивчалися у даній лабораторній роботі (закони, формули).

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

ФОТОПРОВІДНІСТЬ

Мета роботи – дослідження фоторезистивного ефекту у напівпровідниках.

7.1 Загальні відомості

Фотопровідність – явище збільшення електропровідності речовин під дією світла.

Електропровідність напівпровідників обумовлена рухом під дією електричного поля вільних електронів та дірок. В загальному вигляді:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p), \quad (7.1)$$

де e – заряд електрона (абсолютна величина); n і p – концентрація вільних електронів та дірок; μ_n та μ_p – рухливість електронів та дірок.

Наявні в напівпровіднику при температурі T , яка відрізняється від 0°K , вільні електрони та дірки називаються **рівноважними**, якщо вони з'явилися за рахунок теплової енергії кристала. Позначимо їх концентрацію відповідно n_0 та p_0 . Тоді рівноважна провідність напівпровідників:

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p). \quad (7.2)$$

Її називають – **темною провідністю**. Освітлення напівпровідника призводить до появи **нерівноважних** електронів та дірок. Цей процес називається **фотогенерацією**. Вони з'являються в результаті поглинання електронами заповненої зони (або донорних рівнів) фотонів, енергія яких достатня для подолання забороненого проміжку енергій ($h\nu > \Delta E_a$ та $h\nu \geq \Delta E_a$) для переходів 1, 2 (рис. 7.1), зв'язаних з локальними рівнями; ($h\nu \geq \Delta E_g$) для міжзональних переходів 3 (рис. 7.1).

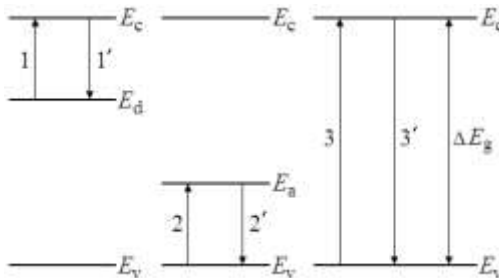


Рисунок 7.1

При вимиканні світла нерівноважні носії заряду зникають (рекомбінують). Ці процеси зображені переходами 1', 2' та 3' на рис. 7.1. Швидкість зникнення фотопровідності залежить від часу життя нерівноважних носіїв заряду (ННЗ).

Якщо концентрацію нерівноважних електронів та дірок, що з'явилися в результаті освітлення, позначити Δn та Δp , то повна провідність напівпровідника:

$$\sigma = e((n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p), \quad (7.3)$$

а її складова обумовлена дією світла, тобто фотопровідність:

$$\sigma_f = \sigma_0 - \sigma = e((\Delta n)\mu_n + (\Delta p)\mu_p) \quad (7.4)$$

Користуючись формулою енергії кванта $hc / \lambda = E$, можна визначити **довгохвильову границю фото ефекту**, тобто максимальну довжину хвилі, при якій світло являється ще фотоелектрично активним. Для власних напівпровідників:

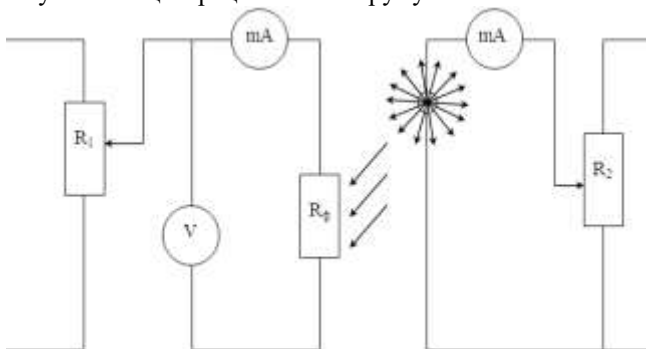
$$\lambda = hc / \Delta E_g, \quad (7.5)$$

для домішкових:

$$\lambda = hc / \Delta E_d. \quad (7.6)$$

Явище фотопровідності використовується у фоторезисторах, фотодіодах, фототранзисторах.

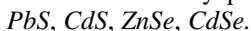
На відміну від вакуумних фотоелементів, де електрони залишають межі фотокатода, в фоторезисторах вони залишаються в об'ємі твердого тіла, збільшуючи концентрацію носіїв струму.



R_1 – потенціометр у колі фоторезистора; V – вольтметр для вимірювання напруги на фоторезисторі; μA – мікроамперметр для вимірювання сили струму фоторезистора; R_ϕ – фоторезистор; L – лампочка-освітлювач; mA – міліамперметр для вимірювання сили струму освітлювача; R_2 – потенціометр у колі освітлювача.

Рисунок 7.2

У фоторезисторів, внаслідок теплового руху, виникають електрони провідності. Кількість електронів при освітленні значно збільшується. В темряві фоторезистори поводять себе як ізолятори, а при освітленні – як провідники. Особливістю фоторезисторів є відсутність полярності, тобто фоторезистори однаково добре проводять струм в обох напрямках. При сталій освітленості фоторезистор поводить себе як активний опір. Фоторезистори виготовляють із напівпровідників з великим внутрішнім фотоелементом:



На основі явища фотогенерації виготовляють джерела струму, де світлова енергія перетворюється в електричну (сонячна батарея).

Схема лабораторної установки зображена на рис. 7.2.

7.2 Порядок виконання роботи

1. Визначити залежність фотопровідності від зовнішньої напруги при різних рівнях освітлення фото резистора.
2. Визначити залежність фотопровідності від падаючого на фоторезистор світлового потоку.

Прилади і обладнання.

Лабораторна установка для вимірів фотопровідності у напівпровідниках

Хід виконання.

1. При знятті ВАХ $I_{\phi}=f(U)$ при $E=\text{const}$ необхідно для заданої освітленості E за допомогою R_2 встановити певну силу струму освітлювача і підтримувати її сталою. Змінюючи напругу на фоторезисторі від 0 до 90 В через кожні 10 В записати величину фотоструму. Експериментальні дані занести до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

Напруга на фоторезисторі U , В	Сила струму фоторезистора I_{ϕ} , мкА		
	При $E_1=\dots$, лк	При $E_2=\dots$, лк	При $E_3=\dots$, лк

2. Після зняття ВАХ, R_1 і R_2 вивести на 0.

3. При знятті світлових характеристик $I_{\phi}=f(E)$ при $U=\text{const}$ необхідно за допомогою R_1 встановити на фоторезисторі задану напругу і підтримувати її сталою. Змінюючи освітленість E фоторезистора (необхідно змінювати силу струму освітлювача за допомогою R_2 згідно таблиці зв'язку $I_{\text{осв}}$ та E або графіка $I_{\text{осв}}=f(E)$ приведених на панелі установки), експериментальні дані занести до таблиці 7.2.

Таблиця 7.2

Освітленість фоторезистора E , лк	Сила струму фоторезистора I , мкА		
	При $U_1=...$, В	При $U_2=...$, В	При $U_3=...$, В

4. Після зняття світлових характеристик R_1 і R_2 вивести на 0, тумблер “Мережа” поставити в положення “ВИМКНЕНО” .

5. На основі експериментальних даних побудувати:

а) три ВАХ $I_{\phi}=f(U)$ та $I_t=f(U)$ при $E=\text{const}$ в одному квадранті, та пояснити хід експериментальних залежностей і фізичну суть тангенса кута нахилу лінійної частини характеристик;

б) три світлові характеристики $I_{\phi}=f(E)$ при $U=\text{const}$ в одному квадранті та пояснити хід експериментальних залежностей.

1.3 Контрольні запитання

1. Що називають фотопровідністю ?
2. Які обмеження існують для довжини хвилі світла, під дією якого виникає фотопровідність ?
3. Що таке фотогенерація?
4. Які існують напівпровідникові прилади принцип дії яких ґрунтується на явищі фотогенерації ?
5. Використовуючи енергетичну (зонну) діаграму напівпровідника, пояснити власну і домішкову фотопровідність.

Література

1. Епифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977. – С. 67-89.

ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи – вивчити особливості поглинання світла напівпровідниками та його пояснення на основі зонної теорії.

8.1 Загальні відомості

При падінні пучка світла інтенсивністю J_0 на поверхню кристалу частина J_ρ його відбивається, частина J_α поглинається і частина J_τ пропускається. Зрозуміло, що $J_0 = J_\rho + J_\alpha + J_\tau$. Відношення відповідних інтенсивностей до інтенсивності падаючого променя дають коефіцієнти: відбивання $\rho = \frac{J_\rho}{J_0}$, поглинання $\alpha = \frac{J_\alpha}{J_0}$ і пропускання $\tau = \frac{J_\tau}{J_0}$. Всі ці коефіцієнти залежать від довжини хвилі.

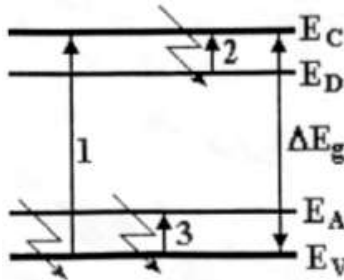


Рисунок 8.1

Для напівпровідників залежність коефіцієнта поглинання α від довжини хвилі λ в рамках зонної теорії просто пояснюється енергетичними міркуваннями. При поглинанні світла електроном енергія кванта передається йому повністю. Енергія електрона зростає, що на енергетичній зонній діаграмі (рис. 8.1) відображається переходами 1–3 на більш високі енергетичні рівні. Перехід 1 – *власне (фундаментальне) поглинання*, 2, 3 – *домішкове поглинання* (відповідно донорне і акцепторне). Такі переходи можливі тільки тоді, коли енергія фотона $E_\phi = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ не менша відповідного

енергетичного інтервалу: $\Delta E_g, E_d, E_A$. В протилежному разі поглинання не відбувається. Отже необхідною умовою поглинання є співвідношення $\frac{h \cdot c}{\lambda} \geq \Delta E_g$ для фундаментального поглинання і $\frac{h \cdot c}{\lambda} \geq \Delta E_d$, або $\frac{h \cdot c}{\lambda} \geq \Delta E_A$ для домішкового. Типова спектральна залежність коефіцієнта поглинання для напівпровідників зображена на рис. 8.2.

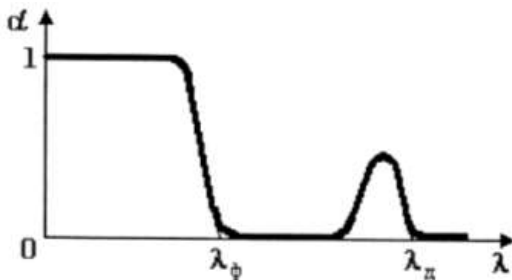


Рисунок 8.2

Тут $\lambda_\phi = \frac{h \cdot c}{\Delta E_g}$ – довгохвильова межа фундаментального поглинання, $\lambda_d = \frac{h \cdot c}{\Delta E_d}$, або $\lambda_A = \frac{h \cdot c}{\Delta E_A}$ – довгохвильова межа домішкового поглинання.

Довгохвильова межа поглинання – це така довжина хвилі, при якій випромінювання з більшою, ніж це значення довжини хвилі вже не поглинається. Таким чином, визначивши експериментально довгохвильову межу фундаментального поглинання, можна знайти ширину забороненої зони

$$\Delta E_g = \frac{h \cdot c}{\lambda_\phi}, \quad (11.1)$$

де λ_ϕ – це максимальна довжина хвилі в спектрі поглинання, тобто випромінювання з довжиною хвилі більшою ніж λ_ϕ не поглинається.

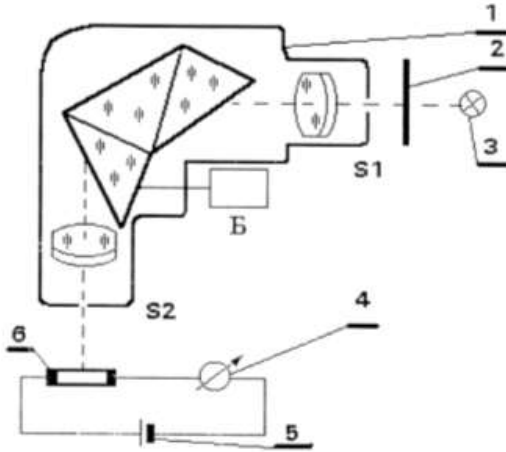
Слід зауважити, що домішкове поглинання можливе тільки при порівняно низьких температурах, коли атоми домішки ще не іонізовані за рахунок теплової енергії.

8.2 Порядок виконання роботи

1. Побудувати спектральну залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі $\alpha=f(\lambda)$;
2. Визначити ширину забороненої зони сульфіду кадмію та порівняти її з табличним значенням.

Прилади і обладнання.

Експериментальна установка, показана на рис. 8.3.



- 1 – монохроматор УМ-2; 2 – досліджуваний зразок (плівка CdS);
3 – джерело світла; 4 – мікроамперметр; 5 – джерело живлення;
6 – фотоприймач (фоторезистор ФСК-Г1).

Рисунок 8.3

Хід виконання.

1. Подати напругу на фотоприймач і записати значення темного струму.
2. Закріпити на корпусі освітлювача перед лампою чисту скляну пластинку і ввікнути лампу.
3. Поворотом барабана Б монохроматора досягти максимального струму фоторезистора в межах 90-100 мкА. При зашкалюванні мікроамперметра зменшити ширину входної $S1$ і вихідної $S2$ щілин, при недостатньому в максимумі сигналу – збільшити. При цьому бажано встановлювати приблизно однакові значення ширини обох щілин.

4. Зняти залежність інтенсивності J_0 падаючого світлового потоку (показання мікроамперметра) від кута повертання барабана (довжини хвилі). Залежність знімається в інтервалі кутів від 1000° до 3000° через 100° .

5. Замінити скляну пластинку досліджуваною плівкою, нанесеною на скляну підкладку.

6. Зняти залежність інтенсивності J світла, яке пройшло через плівку, від кута повертання барабана аналогічно п. 4.

7. Результати вимірів і розрахунків занести до таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

φ , градус	J_0 , мкА	J , мкА	λ , нм	α
1000				
.....				
3000				

8. За даними таблиці 8.2 побудувати допоміжний градуіровочний графік, і з його допомогою перевести значення кутів φ повертання барабана в довжину хвилі λ .

Таблиця 8.2

φ , градус	1000	1500	2000	2500	3000
λ , нм	418	465	515	582	665

9. Для кожної довжини хвилі розрахувати і записати в таблицю коефіцієнт поглинання α за формулою

$$\alpha = \frac{J_0 - J}{J_0 - J_T} . \quad (8.2)$$

10. Побудувати графік залежності $\alpha = f(\lambda)$ і по спаду визначити λ_ϕ (див. рис. 8.2)

11. За формулою (8.2) розрахувати ширину забороненої зони і порівняти одержане значення з табличним ($\Delta E_{g, \text{табл}} = 2,4 \text{ eV}$).

12. Зробити висновок.

2.3 Контрольні запитання

1. Дати визначення коефіцієнтів поглинання, пропускання і відбивання.

2. Пояснити в рамках зонної теорії спектральну залежність коефіцієнта поглинання.

3. Нехай коефіцієнт відбивання дорівнює 0. Намалювати спектральну залежність коефіцієнта пропускання напівпровідника.
4. Чому домішкове поглинання можливе при низьких температурах?
5. Що таке довгохвильова межа поглинання та як пояснити її існування?
6. Поясніть необхідність проведення вимірів з чистою скляною пластинкою.

Література

1. Елифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977. – С. 67-89.

ВЛАСТИВОСТІ ЯВИЩА ФОТОПРОВІДНОСТІ

Мета роботи – вивчити явище фотопровідності твердих тіл.

9.1 Загальні відомості

9.1.1 Вступ

Явище фотопровідності спостерігається в напівпровідниках та діелектриках при поглинанні світла і заключається в тому, що змінюється їх електропровідність. Як правило, електропровідність значно збільшується. В окремих випадках електропровідність збільшується в 10^6 раз і навіть більше.

Збільшення електропровідності твердого тіла при поглинанні світла в рамках зонної теорії пояснюється тим, що при цьому зростає концентрація вільних носіїв заряду. Досить часто це явище називають **внутрішнім фотоефектом**. Для пояснення фотопровідності використаємо спрощену енергетичну діаграму напівпровідника, яка показана на рис. 9.1. Стрілками з номерами позначені можливі енергетичні переходи електронів. Якщо стрілка спрямована вгору, то такий перехід називається **генерацією** і супроводжується поглинанням електроном енергії, а зворотній перехід (**рекомбінація**) – виділенням енергії.

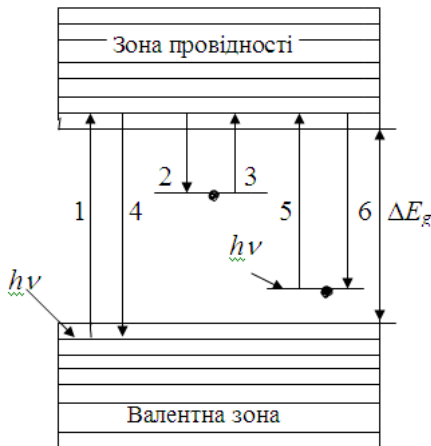


Рисунок 9.1

Якщо енергія фотона не менше ширини забороненої зони (тобто $h\nu \geq \Delta E_g$), то валентний електрон, поглинаючи такий фотон, має можливість

зробити перехід 1. Внаслідок цього у валентній зоні утворюється вільна дірка, а в зоні провідності – вільний електрон. Енергетичний перехід 1 в просторовому розумінні означає, що валентний електрон залишає свій атом і вільно переміщується по всьому об'єму кристала. Переміщуючись у кристалі вільний електрон може потрапити до електронної пастки (перехід 2) і буде там знаходитись деякий час.

Якщо глибина пастки, тобто відстань цього локального енергетичного стану від дна зони провідності $\gg kT$, то цей час буде досить тривалим (десятки секунд і навіть годин). Звільнення електронів з пастки відбувається, або за рахунок теплових коливань ґратки, або при поглинанні довгохвильового випромінювання (перехід 3). Вільно “блукаючий” електрон може зустріти на своєму шляху також вільну дірку і тоді відбувається процес рекомбінації, внаслідок якого зменшується число вільних носіїв заряду на один електрон і на одну дірку (перехід 4).

Процес збільшення кількості вільних носіїв заряду при поглинанні світла називається *генерацією вільних носіїв заряду*, а їх зникнення – *рекомбінацією*. Позначимо швидкість генерації через G . Це число пар електронів та дірок, які утворюються в одиниці об'єму за одну секунду. А через R позначимо число пар, що рекомбінують в одиниці об'єму за 1 сек. Тоді при досить тривалому сталому освітленні напівпровідника встановлюється динамічна рівновага і буде виконуватись рівність $R = G$. Якщо в деяку мить освітлення напівпровідника припинити, то $G = 0$ і внаслідок рекомбінації концентрація вільних носіїв буде поступово зменшуватись і разом з тим буде зменшуватись електропровідність. Через тривалий час встановиться так звана *темнова електропровідність*, при якій концентрація вільних носіїв буде термодинамічно рівноважною. Ця концентрація визначається температурою і шириною забороненої зони або енергетичним станом донорних та акцепторних домішок.

Якщо позначимо через n_0 – концентрацію вільних рівноважних електронів, а через p_0 – концентрацію вільних рівноважних дірок, то при поглинанні світла будемо мати:

$$n = n_0 + \Delta n; \quad p = p_0 + \Delta p, \quad (9.1)$$

де Δn і Δp збільшення відповідної концентрації за рахунок поглинання світла. Δn і Δp – концентрація нерівноважних вільних носіїв зарядів. Очевидно, що величини Δn і Δp залежать від інтенсивності світла, що поглинається напівпровідником.

Поглинання світла, що супроводжується електронним переходом 1, називається *фундаментальним*, а виникаючу фотопровідність – *власною фотопровідністю*. Часто фотопровідність виникає при поглинанні світла домішковими атомами, чи іншими дефектами кристалічної ґратки. В цьому випадку енергія фотона $h\nu$ буде меншою від ширини забороненої зони ΔE_g , а фотопровідність буде або тільки електронною, або дірковою. Утворення

вільних електронів при домішковому поглинанні показано на рис. 9.1 переходом 5, а перехід 6 – це їх рекомбінація. У фотопровідниках енергія рекомбінації перетворюється в теплові коливання. В деяких матеріалах процес рекомбінації нерівноважних носіїв заряду супроводжується випромінюванням світла. Таке явище називається *люмінесценцією*, а матеріали *люмінофорами* (кристалофосфорами, чи просто фосфорами).

Явище фотопровідності має практичне застосування. Із напівпровідників виготовляють фоторезистори, які застосовуються для реєстрації світлових сигналів (часом досить слабих). **Фоторезистор** в електротехнічному розумінні – це опір, величина якого зменшується при освітленні видимим, або невидимим світлом. Для виготовлення фоторезисторів застосовуються: сульфід кадмію (*CdS*), селенід кадмію (*CdSe*), сульфід свинцю (*PbS*), селенід свинцю (*PbSe*), антимонід індію (*InSb*), арсенід галію (*GaAs*) та інші напівпровідникові сполуки. Застосовуються також елементарні напівпровідники кремній (*Si*) та германій (*Ge*). Кожний матеріал має свої властивості, які надають фоторезистору чутливість до конкретного спектрального діапазону.

Параметри фоторезистора являються:

- 1) робоча напруга U_p ;
- 2) темновий опір R_T ;
- 3) темновий струм I_T , при робочій напрузі;
- 4) світловий опір $R_{св}$, при певній освітленості;
- 5) кратність зміни опору $K = R_{св} / R_T$;
- 6) струмова інтегральна чутливість $S_{інт}$, – відношення фотоструму до потоку випромінювання відомого спектрального складу;
- 7) спектральний діапазон фоточутливості та довжина хвилі λ_{max} , на яку приходиться максимум чутливості;
- 8) час зростання струму $\tau_{0,1-0,9}$ та час спаду $\tau_{0,9-0,1}$ в сек., $0,1 \div 0,9$ означає, що фотострум змінюється в інтервалі від $0,1 I_0$ до $0,9 I_0$, де I_0 – значення фотоструму, яке досягається при сталому освітленні на протязі довгого часу (струм насичення).

Існує досить багато різноманітних типів фоторезисторів з різним значенням вказаних параметрів.

Так, наприклад, на основі сульфід кадмію існують фоторезистори ФСК-0, ФСК-1, ФСК-Г1, ФСК-П1 і т.п. десь біля 40 типів.

Фоторезистори мають декілька характеристик:

- 1) **вольт-амперна (ВАХ) характеристика** – залежність струму від напруги при сталій освітленості;
- 2) **люкс-амперна (ЛАХ) характеристика** – залежність струму від освітленості при сталій напрузі;
- 3) **кінетичні характеристики**: кінетика зростання фотоструму при вмиканні світла та кінетика спаду фотоструму при вимиканні світла.

9.1.2 Час життя нерівноважних носіїв заряду

Нерівноважні носії заряду зустрічаючись з носіями протилежного знаку рекомбінують. Нехай u_n – середня швидкість електрона відносно дірки, а g_n – переріз (площа) захоплення електрона при зустрічі з діркою, концентрація дірок – p . Тоді середнє число зустрічей електрона за 1 сек буде $g_n \cdot u_n \cdot p$, а середній час життя $\tau_n = 1/(g_n \cdot u_n \cdot p)$.

Добуток ефективної площі захоплення на середню швидкість $g \cdot u_n = \gamma_n$ називається **коефіцієнтом рекомбінації нерівноважних електронів**. Тоді $\tau_n = 1/(\gamma_n \cdot p)$. Цей параметр не може бути характерним для даного матеріалу, оскільки величина p залежить від інтенсивності освітлення, температури, концентрації дефектів та домішок і т.п.

Збільшення концентрації носіїв заряду при освітленні, та їх зменшення після припинення освітлення супроводжується відповідними змінами електропровідності, а отже і струму через зразок напівпровідника. Криві зростання або спаду нерівноважної електропровідності при зміні освітленості називаються **релаксаційними кривими фотопровідності**. Схематично ці криві показані на рис. 9.2.

Розрізняють **два крайніх випадки релаксації**:

- 1) при малих рівнях збудження, коли $\Delta n \ll n_0$;
- 2) при великих рівнях збудження, коли $\Delta n \gg n_0$,

де n_0 – рівноважна концентрація електронів напівпровідника в темряві.

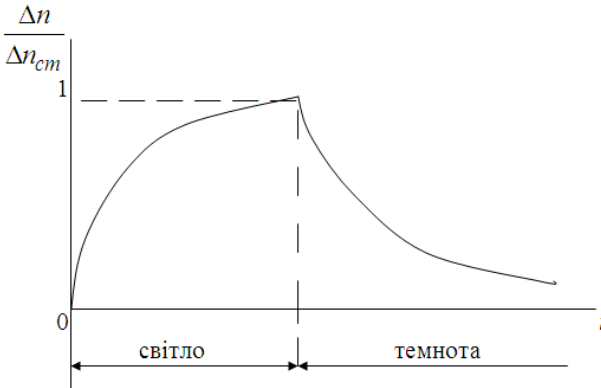


Рисунок 9.2

Розглянемо другий випадок. Запишемо диференціальне рівняння зміни з часом концентрації нерівноважних носіїв заряду:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = \beta \cdot k \cdot I - \gamma(\Delta n)^2, \quad (9.2)$$

де $G = \beta \cdot k \cdot I$ – швидкість генерації; $R = \gamma(\Delta n)^2$ – швидкість рекомбінації (рекомбінація квадратична тому, що $R \approx (\Delta n)^2$); k – коефіцієнт поглинання світла ($1/\text{м}$); I – інтенсивність світла, яким освітлюється напівпровідник; β – квантовий вихід, тобто число вільних електронів, які з’являються при поглинанні одного фотона, якщо I дорівнює числу фотонів, які падають за 1с на 1 м^2 поверхні напівпровідника; γ – коефіцієнт рекомбінації ($\text{м}^3/\text{с}$) (його визначення зроблено вище).

Якщо освітлення вимкнути, то $\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\gamma(\Delta n)^2$.

Розділимо змінні і інтегруємо: $\frac{d(\Delta n)}{(\Delta n)^2} = -\gamma \cdot dt \Rightarrow -\frac{1}{\Delta n} = -\gamma \cdot t + C$.

У початковий момент часу, коли $t = 0$, то $\Delta n = \Delta n_0$. Тоді $C = -\frac{1}{\Delta n_0}$.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta n} &= \gamma \cdot t + \frac{1}{\Delta n_0} \Rightarrow \Delta n_0 = \Delta n_0 \cdot \Delta n \cdot \gamma \cdot t + \Delta n \Rightarrow \\ &\Rightarrow \Delta n = \frac{\Delta n_0}{1 + \gamma \cdot \Delta n_0 \cdot t}. \end{aligned} \quad (9.3)$$

Тобто, при квадратичній рекомбінації (бімолекулярна рекомбінація) число нерівноважних носіїв заряду зменшується з часом за гіперболічним законом. Оскільки фотопровідність (чи фотострум) пропорційна величині Δn , можна вважати, що фотострум через зразок напівпровідника при сталій напрузі на ньому буде зменшуватись з часом теж за гіперболічним законом, тобто:

$$I_\phi = \frac{I_0}{1 + At}, \quad (9.4)$$

де I_0 – стаціонарне значення фотоструму, яке досягається при довготривалому освітленні, A – коефіцієнт пропорційності. Цю формулу можна переписати в такому вигляді

$$\frac{I_0}{I_\phi} - 1 = At \quad (9.5)$$

Якщо отримати експериментальну залежність спаду фотоструму від часу і побудувати залежність $\frac{I_0}{I_\phi} - 1 = At$ в координатах, як показано на

рис. 9.3, то в разі квадратичної рекомбінації на цьому графіку повинна бути пряма лінія. Відомо, що сила струму

$$I = jS, \quad (9.6)$$

де j – густина струму; S – площа поперечного перерізу провідника.

За електронною теорією:

$$j = en\mu_n E \quad (9.7)$$

де e – заряд електрона, n – концентрація електронів, μ_n – рухливість електронів, E – напруженість електричного поля.

Якщо довжина провідника l , а напруга на ньому U , то наближено можна вважати:

$$E = \frac{U}{l}. \quad (9.8)$$

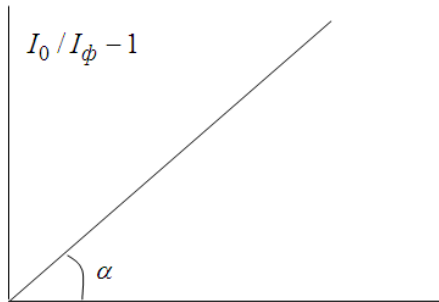


Рисунок 9.3

Таким чином фотострум у напівпровіднику (чи в фоторезисторі)

$$I_\phi = e \cdot \Delta n \cdot \mu_n \cdot S \cdot \frac{U}{l} \quad (9.9)$$

– для домішкової електронної фотопровідності, а

$$I_0 = e \cdot \Delta n_0 \cdot \mu_n \cdot S \cdot \frac{U}{l}. \quad (9.10)$$

Тоді очевидно, що повинна виконуватись рівність:

$$\frac{\Delta n_0}{\Delta n} = \frac{I_0}{I_\phi}. \quad (9.11)$$

Ця рівність дає можливість по вимірюванням фотоструму в фоторезисторі робити висновки про величину концентрації нерівноважних носіїв заряду.

У даній роботі вивчаються властивості фоторезистора ФСК-Г1, який має такі геометричні параметри: $l = 4$ мм, $S = 5$ мм², $\mu_n \approx 10^{-2}$ м²/(В·С), $U = 50$ В.

Використовуючи дані графіка на рис. 9.3, де $tg \alpha = A$, а також те, що $A = \gamma \cdot \Delta n_0$ і визначаючи Δn_0 за формулою для I_0 можна визначити n_0 .

Наприклад. Дослідним шляхом встановили, що $A = 0,2c^{-1}$, а $I_0 = 200 \text{ мкА} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ А}$. Тоді

$$\begin{aligned} \Delta n_0 &= I_0 l / (e \cdot \mu_n \cdot S \cdot U) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta n_0 &= 2 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 10^{-3} / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 50) = \\ &= 8 \cdot 10^{-7} / (4 \cdot 10^{-25}) = 2 \cdot 10^{18} \left(\frac{1}{\text{м}^3} \right) \end{aligned}$$

Перевіримо розмірність

$$\begin{aligned} [\Delta n_0] &= A \cdot \text{м} / \left(\text{Кл} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{В} \right) = A \cdot \text{м} / \left(\frac{\text{Кл}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{В}}{\text{В}} \cdot \text{м}^4 \right) = \\ &= A \cdot \text{м} / (A \cdot \text{м}^4) = \text{м} / \text{м}^4 = \text{м}^{-3} \end{aligned}$$

– це розмірність концентрації електронів.

Отримуємо, що: $0,2c^{-1} = \gamma \cdot 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3} \Rightarrow \gamma = 10^{-19} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Знаючи γ і розраховуючи Δn по (9.9) для конкретного моменту часу, за формулою

$$\tau = 1 / (\gamma \cdot \Delta n) \quad (9.12)$$

можна обчислити середнє значення часу життя нерівноважного носія заряду.

9.1.3 Залежність фотопровідності від інтенсивності світла, що поглинається

При стаціонарних умовах збудження фотопровідності величина Δn буде сталою. В цьому випадку $d(\Delta n)/dt = 0$.

Тоді із (9.2) отримуємо:

$$\beta \cdot \kappa \cdot I - \gamma (\Delta n)^2 = 0, \quad (9.13)$$

або

$$\Delta n^2 = \frac{\beta \cdot \kappa \cdot I}{\gamma}. \quad (9.14)$$

Якщо взяти до уваги, що величина стаціонарного струму $I_\phi \approx \Delta n$, то отримуємо залежність стаціонарного фотоструму від величини інтенсивності світла, яке поглинається зразком. Отримуємо, що квадрат фотоструму (при квадратичній рекомбінації) буде прямо пропорційний освітленості зразка.

При цьому вважаємо, що між освітленістю та поглинанням існує прямопропорційна залежність.

Цю залежність легко перевірити експериментально. Для цього необхідно виміряти фотострум через зразок напівпровідника (через фоторезистор ФСК-Г1) при сталій напрузі при різних освітленостях, а потім побудувати графік залежності квадрату фотоструму від величини освітленості. Якщо ця залежність буде близькою до прямої лінії, то це буде доказом квадратичної рекомбінації. Необхідною умовою квадратичної рекомбінації, як уже вказувалось, є нерівність $\Delta n \gg n_0$. Ця нерівність еквівалентна тому, що фотострум буде значно більшим від темнового струму. Для фоторезистора ФСК-Г1 ця умова починає виконуватись уже при досить малих значеннях освітленості.

9.2 Порядок виконання роботи

9.2.1 Завдання 1

1. Дослідити залежність струму, що протікає через фоторезистор від освітленості.
2. Розрахувати концентрацію Δn_0 , коефіцієнт рекомбінації γ та середній час життя τ нерівноважних носіїв заряду.

Прилади і обладнання.

1. Монохроматор УМ-2.
2. Джерело постійного струму з вихідною напругою $0-100$ В.
3. Вольтметр М-2018 (V1).
4. Цифровий вольтметр В7-22А (V2).
5. Резистор 13 кОм (R_0).
6. Фоторезистор ФСК-Г1 (R_1).

Хід виконання.

1. Ознайомитися з електричною та монтажною схемами лабораторної установки, які представлені на рис. 9.4 та 9.5, відповідно.

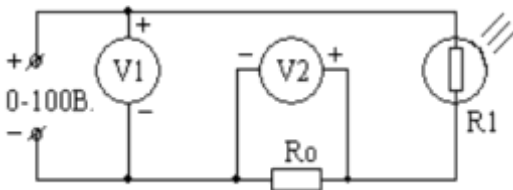


Рисунок 9.4.

Струм, що протікає через фоторезистор, викликає на опорі R_0 падіння напруги. Цю напругу вимірює цифровий вольтметр В7-22А.

За законом Ома легко розрахувати струм через фоторезистор $I=U/R$.

Оскільки R_0 – стала величина, то показання вольтметра будуть прямопропорційні величині струму через фоторезистор. Опір R_0 досить малий порівняно з опором R_1 і тому падіння напруги на ньому незначне в порівнянні з напругою на ФСК-Г1. R_0 також значно менший від опору вольтметра В7-22А.

Загальний вигляд стенду показано на фотографії (рис. 9.5). Світло від лампи через білий папір падає на вхідну щілину монохроматора. Далі світло розповсюджується через оптичну систему монохроматора до вихідної щілини. За цією щілиною закріплено фоторезистор ФСК-Г1. За допомогою монохроматора на вихідну щілину спрямовується червона частина спектру. При необхідності можна проводити виміри для будь-якої частини спектру.



Рисунок 9.5

2. Зняти залежність темного струму від напруги. Напругу змінювати від 0 до 100 В, через кожні 10 В. Струм через фоторезистор розрахувати за показаннями вольтметра В7-22А (при цьому використати діапазон $0\div 0.2$ В).

3. Ввімкнути лампу монохроматора і при сталому світловому потоці, що падає на фоторезистор, зняти залежність фотоструму від напруги, тобто вольт-амперну характеристику (діапазон вольтметра В7-22А $0\div 0.2$ В).

4. Порівняти темновий стум і фотострум при однаковій напрузі. Знайти у скільки разів змінився струм при освітленні.

5. Зняти залежність стуму через ФСК-Г1 від часу при вмиканні світла і при вимиканні. Значення струму (напруги) знімати з вольтметра В7-22А через такі проміжки часу (в секундах):

0, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300.

Світло слід вмикати після тривалої витримки фоторезистора в темряві (10 хв.)

6. Перевірити чи виконується гіперболічна залежність струму від часу (9.5). Для цього потрібно побудувати графік так, як показано на рис. 9.3. Якщо буде лінія наближена до прямої, то можна робити висновок, що гіперболічна залежність виконується.

7. З графіка $I_0 / I_\phi - 1 = At$ знайти A . Знаючи I_0 , обчислити за (9.10) Δn_0 , а потім коефіцієнт рекомбінації γ із співвідношення $A = \gamma \cdot \Delta n_0$. Для цього ж моменту часу визначити середню тривалість життя нерівноважних носіїв заряду за формулою $\tau = 1 / (\gamma \cdot \Delta n)$.

8. Встановити напругу на фоторезисторі 80 В і провести виміри фотоструму поступово змінюючи освітлення фоторезистора. Зменшення світлового потоку, що подається через вхідну щілину монохроматора на фоторезистор досягається встановленням перед нею листа тонкого білого паперу. Кожний новий лист зменшує світловий потік в певне число разів. Нехай 1 лист зменшує світловий потік в n раз. Позначимо світловий потік Φ_0 , а фотострум I_0 . Після того як покладемо один лист фотострум стане I_1 , а світловий потік буде Φ_0 / n , коли буде два листа, то $\Phi_2 = \Phi_0 / n^2$, а струм I_2 і т.д. При кожному зменшенні світлового потоку для запису стаціонарного значення фотоструму потрібно чекати декілька хвилин до тих пір поки фотострум перестане змінюватись.

9. Побудувати графіки залежностей $I_\phi = f(\sqrt{\Phi})$ та $I_\phi = f(\Phi)$.

Перша залежність повинна мати вигляд прямої лінії, а друга – параболи. В цьому випадку слід зробити висновок про квадратичну рекомбінацію нерівноважних носіїв заряду. Значення n вказує викладач, який проводить заняття.

10. Зробити висновки.

9.2.2 Завдання 2

1 Дослідити залежність струму, що протікає через фоторезистор від освітленості.

2 Розрахувати концентрацію Δn_0 , коефіцієнт рекомбінації γ та середній час життя τ нерівноважних носіїв заряду.

Прилади і обладнання.

1. Цифровий мультиметр DT-830В – 3 шт.
2. Кремнієвий фотоелемент (фотодіод) – 1 шт.
3. Досліджуваний фоторезистор ФСК-7 – 1 шт..
4. Джерело постійного струму АС-DC з вихідною напругою 6 В – 1 шт.
5. Секундомір – 1 шт..
6. З'єднувальні провідники.

Хід виконання.

1. Зібрати робочу схему згідно з монтажною (рис. 9.6).

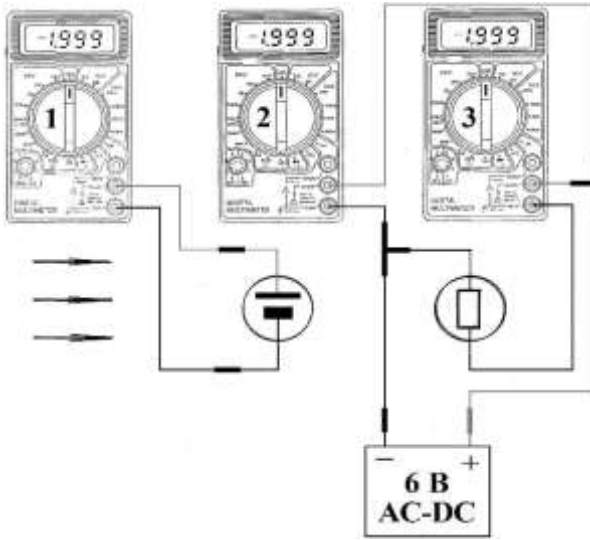


Рисунок 9.6

2. Виставити межі вимірювань на приладах DT-830B: 1 – „2000 mV”, 2 – „50 V”, 3 – „2000 μ A”.

3. Стороннім джерелом світла освітлювати фоторезистор на протязі 10÷15 хвилин. Після закінчення 10÷15 хвилин записати стаціонарне значення фотоструму I_0 , яке досягається при довготривалому освітленні. Ввімкнути секундомір та одночасно з цим закрити фоторезистор від джерела світла. В зазначені у табл. 9.1 моменти часу Δt амперметром (прилад 3) провести вимірювання фотоструму I_ϕ .

4. Побудувати графік залежності $\frac{I_0}{I_\phi} - 1 = f(t)$.

5. З графіка, вважаючи що залежність між $\frac{I_0}{I_\phi} - 1$ та t лінійна, та на

підставі формули (9.5) визначити коефіцієнт пропорційності A .

6. Знаючи I_0 , за формулою (9.10) обчислити концентрацію нерівноважних носіїв заряду Δn_0 для конкретного моменту часу. Геометричні параметри фоторезистора ФСК-7 такі: $l = 8$ мм, $S = 10$ мм², $\mu_n \approx 10^{-2}$ м²/(В·С), $U = 50$ В.

Таблиця 9.1

№, п/п	Δt , с	t , с	I_{ϕ} , μA	$\frac{I_0}{I_{\phi}} - 1$	A , с^{-1}	Δn_0 , $1/\text{м}^3$	γ , $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	τ , с
1	0	0						
2	5	5						
3	10	15						
4	15	30						
5	30	60						
6	60	120						
7	90	210						
8	120	330						
9	150	480						

7. Розрахувати коефіцієнт рекомбінації γ із співвідношення $A = \gamma \cdot \Delta n_0$.

8. За формулою (9.12) розрахувати середній час життя τ нерівноважних носіїв заряду.

9. Зробити висновки.

9.3 Контрольні запитання

1. Дати визначення явища фотопровідності.
2. Що таке рівноважні та нерівноважні носії заряду?
3. Що таке коефіцієнт рекомбінації?
4. Що таке швидкість генерації та рекомбінації носіїв заряду?
5. Від чого залежить середній час життя нерівноважних носіїв заряду?
6. Чи може впливати величина освітленості на час життя нерівноважних носіїв заряду?
7. Як впливає величина освітленості фоторезистора на його швидкодію при вмиканні та вимиканні світла?

Література

1. Елифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.
2. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М., 1976.
3. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М., 1963.

КОНТАКТНІ ЯВИЩА В НАПІВПРОВІДНИКАХ

Мета роботи – ознайомитися з контактними явищами у напівпровідниках.

10.1 Загальні відомості

10.1.1 Контакт двох металів. Товщина контактного шару.

Розглянемо два метали з різними роботами виходу електронів A_1 і A_2 , а також різними енергіями Фермі E_{F1} і E_{F2} . Зонні діаграми показані на рис. 10.1.

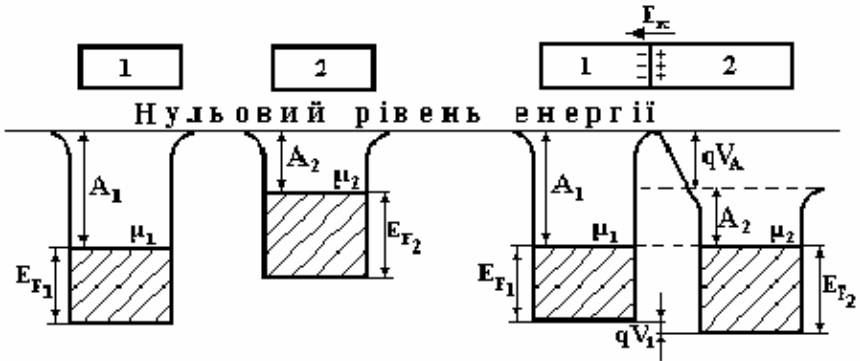


Рисунок 10.1

Після утворення контакту між металами відбуваються переходи електронів з одного металу в інший (в нашому випадку із 2-го в 1-ий) поки рівні Фермі μ_1 і μ_2 не стануть однаковими. Виникає контактне поле E_k , яке перешкоджає подальшому переходу електронів. Настає стан динамічної рівноваги. Між металами виникає контактна різниця потенціалів (КРП) V_k , зумовлена різницею работ виходу електронів (зовнішня КРП):

$$V_A = \frac{A_1 - A_2}{q} \quad (10.1)$$

і різницею рівнів Фермі (внутрішня КРП):

$$V_i = \frac{E_{F2} - E_{F1}}{q} \quad (10.2)$$

Результуюча КРП дорівнює сумі

$$V_K = V_A + V_i \quad (10.3)$$

Оцінимо товщину d подвійного електричного шару (рис. 10.2) і зміну концентрації електронів Δn в області контакту.

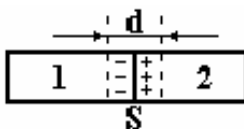


Рисунок 10.2

Будемо розглядати область контакту як плоский конденсатор з площею пластин (площею контакту) S і зарядом $q \cdot \Delta n \cdot S \cdot d/2$. Skorистаємось формулою електроємності плоского конденсатора і означенням електроємності. Одержуємо

$$C = \frac{q \cdot \Delta n \cdot S \cdot d}{2 \cdot V_k} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot S}{d}$$

звідки знаходимо

$$\Delta n = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot V_k}{q \cdot d^2}. \quad (10.4)$$

Для кількісної оцінки максимально можливого значення Δn приймемо мінімально можливе значення $d = 3 \cdot 10^{-10}$ м, що складає приблизно одну міжатомну відстань, $\varepsilon = 1$, $\varepsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $V_k = 1$ В.

$$\Delta n = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot V_k}{q \cdot d^2} \approx \frac{2 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (3 \cdot 10^{-10})^2} \approx 10^{27} \text{ м}^{-3}.$$

Прийнявши мінімальне значення концентрації електронів в метали $n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$, одержуємо максимальну відносну зміну концентрації 10%.

Врахувавши цей результат і той експериментальний факт, що довжина вільного пробігу електронів складає десятки і сотні міжатомних відстаней, тобто набагато більше від d , можемо зробити висновок, що електропровідність (опір) контакту двох металів мало відрізняється від електропровідності (опору) об'єму металів.

10.1.2 Контакт метал-напівпровідник і його випрямляючі властивості. Омичний контакт.

Розглянемо контакт метала з роботою виходу електронів A_m і донорного (електронного) напівпровідника з роботою виходу A_n . Якщо $A_m < A_n$ то електрони будуть переходити із напівпровідника в метал, поки рівні Фермі не стануть однаковими (рис. 10.3). КРП також складає декілька вольт.

Для одержання такої КРП необхідно, щоб із напівпровідника із одиниці об'єму в метал перейшла приблизно та ж кількість електронів $\sim 10^{27} \text{ м}^{-3}$. Концентрація ж електронів в домішкових напівпровідниках

$n_0 = N_d \approx 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Тому тепер електрони повинні перейти із області напівпровідника товщиною приблизно 1000 міжатомних відстаней ($d \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$), що набагато більше довжини їх вільного пробігу. Окрім того в напівпровіднику формується досить широка область, збіднена на основні носії заряду. Тому електропровідність такого контакту набагато менша, ніж об'єму напівпровідника, а тим більше ніж металу. Такий контакт називається запи́рим.

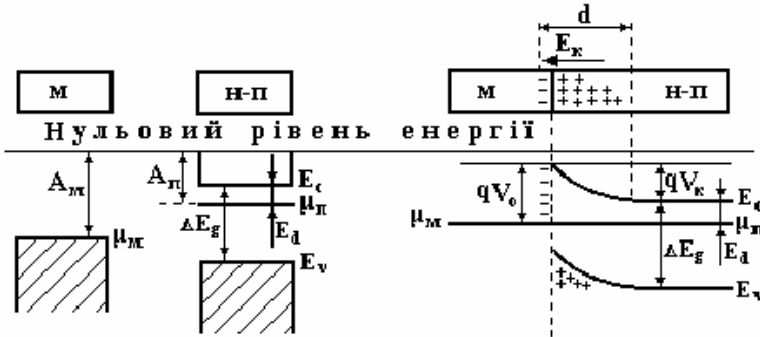


Рисунок 10.3

Напруженість контактного електричного поля направлена від напівпровідника в метал, а по величині ($E_K = V_K/d \approx 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$) набагато менша від напруженості внутрішнього поля кристалу напівпровідника. Тому в області контакту структура енергетичних зон напівпровідника не змінюється, а енергетичні рівні зазнають викривлення, в нашому випадку загинаються вверх. Упевнимось у цьому на такому уявному експерименті. Нехай нам потрібно перемістити електрон через контакт із об'єму напівпровідника в метал. Для цього му повинні рухати його в напрямку напруженості контактного поля E_K , яке буде перешкоджати такому рухові. Дійсно, оскільки заряд електрона від'ємний, на нього діє сила, направлена проти вектора напруженості електричного поля. Отже ми повинні виконати певну роботу, яка викликає зростання потенціальної енергії електрона. А це і означає загинання енергетичних зон вверх, що і відображено на рис. 10.3.

Нехтуючи товщиною контактної області в металі в одну міжатомну відстань, можемо вважати, що вся контактна область поширюється в напівпровідник. Із формули (10.4), враховуючи, що кількість електронів, які зазнають переходу, дорівнює концентрації донорної домішки $\Delta n = N_d$, знаходимо товщину контактної області

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot V_K}{q \cdot N_d}}. \quad (10.5)$$

В рівноважному стані, тобто без зовнішньої напруги, для переходу електронів із напівпровідника в метал потрібно подолати потенціальний бар'єр $q \cdot V_K$, а для протилежного переходу $-q \cdot V_0$. Потоки електронів однакові. Струм через контакт відсутній.

Проаналізуємо поведінку контакту при підключенні зовнішньої напруги.

1) **Запираюче (зворотне) ввімкнення контакту** буде тоді, коли напруженість E зовнішнього електричного поля співпадає за напрямком з напруженістю контактної області E_K (рис. 10.4), тобто (+) зовнішньої батареї напругою V з'єднаний з напівпровідником, а (-) з металом. Всі енергетичні рівні напівпровідника опускаються вниз на величину $q \cdot V$.

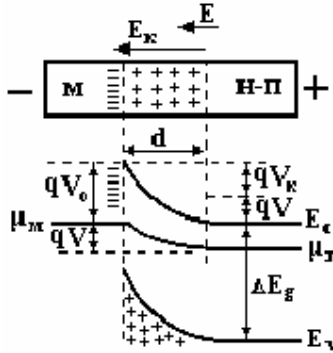


Рисунок 10.4

Висота бар'єру для потоку електронів (основних носіїв) із напівпровідника в метал зростає і стає рівним $q \cdot (V_K + V)$. Цей потік значно зменшується. Потік же електронів із металу в напівпровідник не змінюється, так як для них висота бар'єру залишається такою ж $q \cdot V_0$. Зростає також ширина контактної області

$$d_{зг} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (V_K + V)}{q \cdot N_d}}. \quad (10.6)$$

Таким чином, зменшення потоку основних носіїв заряду (електронів) і розширення збідненого на вільні носії заряду контактної області приводить до різкого зменшення електропровідності контакту. Через нього протікає невеликий зворотній струм зумовлений неосновними носіями заряду (дірками), концентрація яких дуже мала (рис. 10.5)

$$i_{зг} = i_s \left(e^{-\frac{qV}{kT}} - 1 \right). \quad (10.7)$$

де i_s – струм насичення, який визначається концентрацією основних носіїв заряду. При збільшенні зовнішньої напруги V зворотній струм зростаючи по експоненті швидко виходить на насичення.

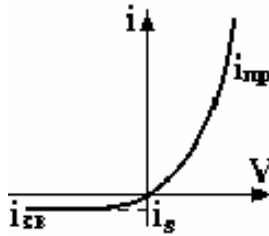


Рисунок 10.5

2) **Пряме ввімкнення** має місце тоді, коли напруженість зовнішнього поля протилежна контактному, тобто напівпровідник з'єднується з (-) зовнішньої батареї, а метал з (+). Тепер всі енергетичні рівні напівпровідника опускаються вниз на величину $q \cdot V$. Висота потенціального бар'єру для основних носіїв заряду (електронів) із напівпровідника в метал зменшується до величини $q \cdot (V_k - V)$, прямий струм швидко зростає (див. рис. 10.6).

$$i_{np} = i_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right). \quad (10.8)$$

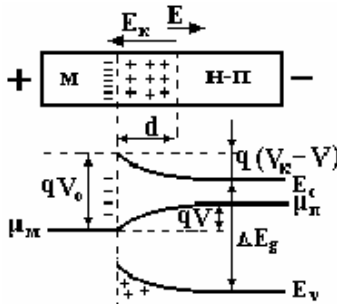


Рисунок 10.6

Концентраційного обмеження, як це було при зворотному ввімкненні, немає. Крім того зменшується ширина високоомної контактної області

$$d_{np} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (V_k - V)}{q \cdot N_d}}, \quad (10.9)$$

що також приводить до зростання електропровідності.

Таким чином розглянутий контакт має властивість односторонньої електропровідності, тобто має випрямляючі властивості: пропускати струм в одному напрямку і практично не пропускати в зворотному. Ця властивість характеризується коефіцієнтом випрямлення – це відношення прямого струму до зворотного при однаковій зовнішній нарузі. Для контактів метал-напівпровідник, або ще їх називають діодами Шотткі, цей коефіцієнт не дуже великий, порівнюючи з p - n -переходами і лежить в межах $10^4 \div 10^5$. Але вони мають досить малий час перемикання з прямого ввімкнення на зворотне, порядку $10^{-10} \div 10^{-11}$ сек, що дає можливість використовувати їх у швидкодіючих ЕОМ.

Для виготовлення електричних контактів до напівпровідникових приладів необхідно формувати не випрямляючі, або омичні контакти, які б не впливали на роботу цих приладів. Такі контакти створюються з такими металами, коли відбувається збагачення приконтактної області напівпровідника основними носіями заряду. Як правило використовується той же метал, яким легований напівпровідник. Наприклад, p - $Ge - In$, n - $Ge - Sb$, n - $Si - Ni$, і т.д. В протилежному разі утворюються випрямляючі контакти, розглянуті вище.

10.1.3 Контакт двох напівпровідників з різним типом провідності. p - n -перехід і його випрямляючі властивості.

Розглянемо контакт напівпровідників з різним типом провідності спочатку у рівноважному стані (без зовнішньої батареї). При утворенні контакту будуть відбуватись дифузійні переходи основних носіїв заряду в сусідні області: електронів із n -напівпровідника в p -напівпровідник, дірок навпаки. Такі переходи зумовлені градієнтом концентрації носіїв заряду одного знаку. Дійсно, згідно формули

$$np = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (m_n m_p)^{3/2} \cdot e^{-\frac{\Delta E_g}{kT}} = \sqrt{N_c N_v} \cdot e^{-\frac{\Delta E_g}{kT}} \quad (10.10)$$

де N_c і N_v – ефективна концентрація станів у зоні провідності і у валентній зоні відповідно; m_n і m_p – ефективні маси електронів і дірок; добуток концентрацій електронів і дірок визначається степенню легування, шириною забороненої зони і температурою. Наприклад, для германію при температурі 300 К цей добуток дорівнює 10^{38} м^{-3} . При помірній степені легування $n_n = p_p = N_d = N_a = 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Тоді концентрація неосновних носіїв буде дорівнювати $n_p = p_n = 10^{38}/10^{22} = 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Отже концентрації однойменних зарядів в сусідніх областях відрізняються на 6 порядків. Таким чином p -напівпровідник буде збагачуватись електронами і заряджатись негативно, а n -напівпровідник – дірками і заряджатись позитивно. Такі переходи будуть продовжуватись до встановлення динамічної рівноваги поки рівні Фермі не стануть однаковими (рис. 10.7).

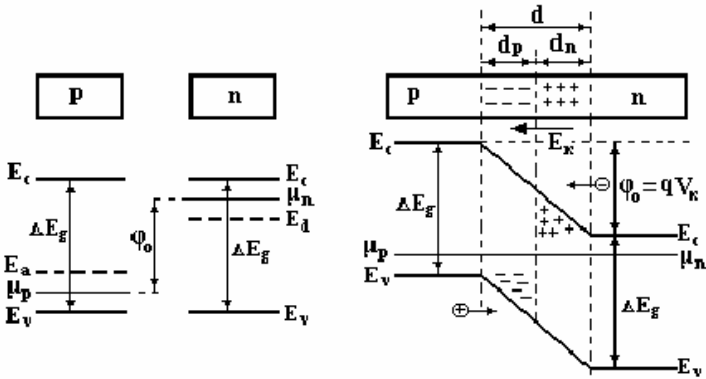


Рисунок 10.7

Виникає потенціальний бар'єр $\phi_0 = \mu_n - \mu_p = q \cdot V_K$. Знайдемо його, скориставшись формулами:

$$n_n = N_c e^{\frac{\mu_n}{kT}} ; \quad n_p = N_c e^{\frac{\mu_p}{kT}} \Rightarrow \frac{n_n}{n_p} = e^{\frac{\mu_n - \mu_p}{kT}} \Rightarrow$$

$$V_K = \frac{\mu_n - \mu_p}{q} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \frac{p_p}{p_n} . \quad (10.11)$$

Видно, що КРП V_K не може перевищувати ширину забороненої зони і тим більша, чим більше відношення концентрації основних носіїв заряду до концентрації неосновних, тобто чим більше ступінь легування напівпровідників. Контактний шар простягається в область обох напівпровідників. На основі формули (10.5) одержуємо

$$d = d_n + d_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot V_K}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)} . \quad (10.12)$$

1) Запираюче (зворотнє) ввімкнення контакту.

Коли до контакту прикладена зовнішня напруга в зворотному напрямку, енергетичні рівні p -напівпровідника піднімаються, а n -напівпровідника опускаються (рис. 10.8).

Висота потенціального бар'єру зростає на величину qV . Збільшується також ширина контактної області

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot (V_K + V)}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)} \quad (10.13)$$

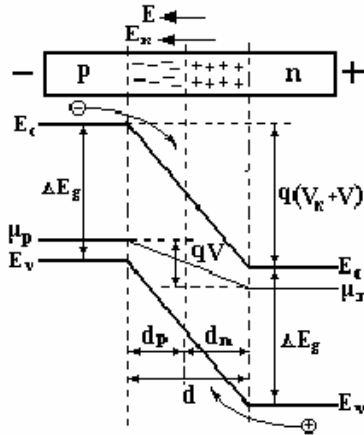


Рисунок 10.8

Через p - n -перехід буде протікати зворотній струм, зумовлений неосновними носіями заряду, потік яких практично не змінюється, так як для них не було і не виник потенціальний бар'єр. Величина цього потоку обмежується концентрацією і дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду. Потік же основних носіїв заряду зменшується, так як для них величина потенціального бар'єру зросла на величину qV . Через контакт протікає невеликий зворотній струм, який змінюється по такому ж закону, як і для контакту метал-напівпровідник (10.7).

2) Пряме ввімкнення контакту.

При прямому ввімкненні, коли напруженість зовнішнього електричного поля протилежна контактному, енергетичні рівні p -напівпровідника опускаються, а n -напівпровідника піднімаються (рис. 10.9).

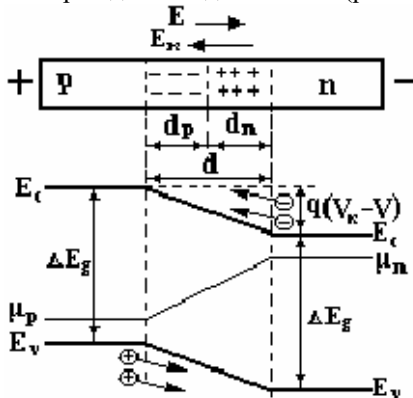


Рисунок 10.9

Висота потенціального бар'єру для основних носіїв заряду зменшується на величину qV . Тому їх потік через контакт різко зростає. Зменшується ширина збідненої контактної області,

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot (V_x - V)}{q} \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)} \quad (10.14)$$

що також приводить до зростання прямого струму. Закон його зміни також описується формулою (10.8), а вольт-амперна характеристика має вид рис. 10.10.

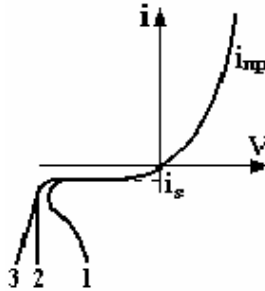


Рисунок 10.10

3) Принцип роботи біполярного транзистора.

Транзистор був винайдений у 1948 році і уявляє собою трьохелектродний напівпровідниковий прилад з двома $p-n$ -переходами (рис. 10.11): емітерним і колекторним.

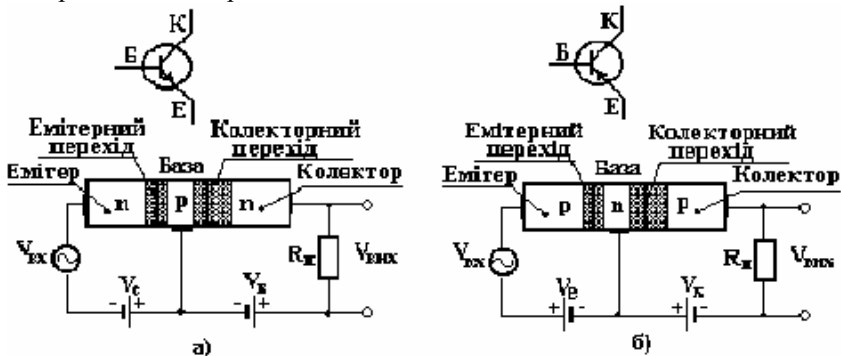


Рисунок 10.11

На рис. 10.11, а) приведене ввімкнення транзистора $n-p-n$ типу, а на рис. 10.11, б) – $p-n-p$ типу по схемі із загальною базою. Емітерний перехід батареєю V_e вмикається в прямому напрямку. Тому електричний опір емітерного кола невеликий, а отже навіть при малій напрузі вхідного сигналу

$V_{вх}$ через емітерний перехід протікає значний струм. Основні носії заряду із емітера інжектуються (уприскуються) в базу, де вони являються неосновними носіями заряду.

Колектрний перехід батареєю $V_{к}$ зміщується в зворотному напрямку. Опір колекторного контуру великий, що дає можливість вмикати в нього великий опір навантаження $R_{н}$, з якого і знімається вихідна напруга $V_{вих}$.

На рис. 10.12 показана зонна діаграма $n-p-n$ транзистора.

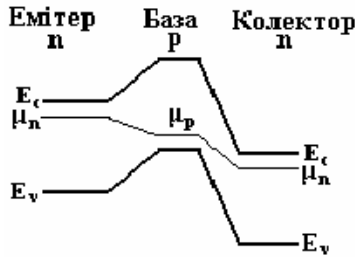


Рисунок 10.12

Електрони із емітерної області, долаючи зменшений потенціальний бар'єр, інжектуються в базу, де частково рекомбінують, викликаючи протікання незначного базового струму. Але конструктивно базу область роблять тонкою ($10 \div 200$ мкм), і тому більшість електронів досягають колекторного переходу. Тут для них потенціальний бар'єр відсутній. Більш того, Контактне і зовнішнє електричні поля прискорюють їх перехід в колекторну область, як би витягують із бази. У колекторі електрони являються основними носіями, і тому ймовірність їх рекомбінації з неосновними (дірками) мала, оскільки концентрація дірок невелика. В колекторному контурі протікає струм $I_{к} = I_{е} - I_{б}$. Але струм бази набагато менший, ніж струм емітера, тому можна вважати, що. Таким чином, транзистор дав можливість примусити протікати по високоомному колекторному колу приблизно такий же струм, як і по низькоомному емітерному колу. У відповідності із законом Ома $V_{вх} = I_{е} \cdot R_{вх}$; $V_{вих} = I_{к} \cdot R_{н}$. А так як $R_{н} \gg R_{вх}$ і $I_{к} \approx I_{е}$, $V_{вих} \gg V_{вх}$. Одержали підсилення напруги, яке характеризується коефіцієнтом підсилення $k_v = V_{вих} / V_{вх} \gg 1$. Схема із загальною базою дає також підсилення потужності, що характеризується коефіцієнтом

$$k_p = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{I_{к} \cdot V_{вих}}{I_{е} \cdot V_{вх}} \approx k_v \gg 1. \quad (10.15)$$

Підсилення струму ця схема не дає.

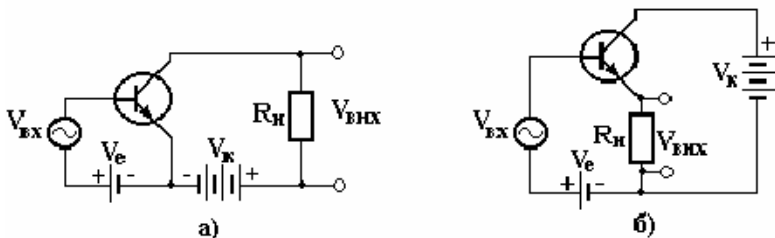


Рисунок 10.13

Схема ввімкнення транзистора з загальним емітером (рис. 10.13, а) дає підсилення напруги, струму і потужності, а ввімкнення з загальним колектором (емітерний повторювач) (рис. 10.13, б) використовується для узгодження каскадів електричних схем по вхідному і вихідному опорам, так як для неї характерне співвідношення $R_{вх} \gg R_{вих}$.

10.2 Порядок виконання роботи

1. Дослідити залежність сили струму крізь p - n -перехід від прикладеної напруги.
2. Дослідити залежність колекторного струму I_k від напруги на колекторі V_k при фіксованих значеннях базового струму I_b .

Прилади і обладнання.

1. Напівпровідниковий діод.
2. Транзистор.
3. Лабораторний стенд для вивчення контактних явищ у напівпровідниках.

Хід виконання.

1 Дослідити залежність сили струму I крізь p - n -перехід від прикладеної напруги V .

В роботі використовується напівпровідниковий діод. Рівень напруги на діоді регулюється за допомогою потенціометра, а полярність можна змінити, якщо вилучити діод з кола й знов підключити його в протилежному напрямі.

Необхідно провести вимірювання та показати графічно залежність струму від напруги при прямому та зворотному зміщенні на діоді. Графік прямого струму треба розташувати в першому квадранті, а графік зворотного струму в третьому квадранті, як на рис. 10.14.

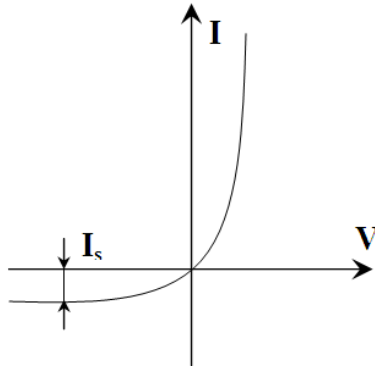


Рисунок 10.14 - Залежність сили струму I крізь p - n -перехід від прикладеної напруги V (вольтамперна характеристика)

2 Дослідити залежність колекторного струму I_k від напруги на колекторі V_k при фіксованих значеннях базового струму I_b .

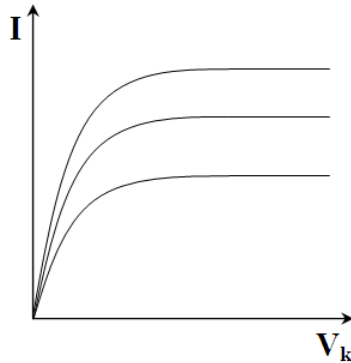


Рисунок 10.15

Залежність колекторного струму від колекторної напруги знімається три рази, кожен раз для нового значення струму бази, які задаються викладачем. Результати треба показати на одному спільному графіку (рис. 10.15) Потім необхідно розрахувати коефіцієнт підсилення струму β при значенні колекторної напруги $V_k = 10 \text{ V}$:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \quad (10.16)$$

10.3 Контрольні запитання

1. Які фізичні процеси приводять до утворення контактної різності потенціалів?
2. Проаналізувати особливості вольт-амперної характеристики $p-n$ -переходу.
3. Пояснити принцип використання транзистора для підсилення сигналів.
4. Як визначається коефіцієнт підсилення струму для схеми із загальним емітером?

Література

1. Епифанов Г.М. Физика твёрдого тела. – М.: Высшая школа, 1977.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11

РЕЄСТРАЦІЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мета роботи – вимірювання активності препарату KCl .

11.1 Загальні відомості

11.1.1 Вступ

Радіоактивністю називають перетворення нестійких ізотопів одного хімічного елемента в ізотоп іншого елемента.

Цей процес супроводжується випусканням елементарних часток, або ядер.

До основних типів радіоактивних перетворень відносяться:

- а) α – розпад;
- б) β – розпад (у тому числі K -захват);
- в) спонтанне ділення радіоактивних ядер;
- г) протонна радіоактивність.

Кількість атомів, що не розпалися у радіоактивному препараті зменшується з часом, по **закону радіоактивного розпаду**.

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (11.1)$$

де N_0 – кількість атомів, що були в початковий момент часу $t = 0$;

N – кількість атомів, що не розпалися, у момент часу t ;

λ – **стала розпаду**, характерна для даної радіоактивної речовини величина, що показує яка частина наявних атомів розпадається в одиницю часу.

Час, за який розпадається половина початкової (первісної) кількості атомів, називається **періодом напіврозпаду** T .

Величину T легко визначити з умови:

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T},$$

звідкіля

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (11.2)$$

Період напіврозпаду для відомих радіоактивних речовин знаходиться в межах від $3 \cdot 10^{-7}$ с. до $5 \cdot 10^{15}$ років.

11.1.2 Активність препарату і одиниці виміру.

Число розпадів ядер атомів, що відбувається за одиницю часу називають **активністю препарату**. У міжнародній системі одиниць (СІ) активність виміряється числом розпадів за секунду. Одиницею активності в цій системі є один розпад/с Бк (Бекерель). Застосовуються також позасистемні одиниці: розпад/хв і Кюрі. Одиниця активності, названа Кюрі, визначається як активність такого препарату, у якому відбувається $3,700 \cdot 10^{10}$ актив розпаду в секунду. Похідні від Кюрі одиниці активності: мілікюрі (10^{-3} Кюрі) і мікрокюрі (10^{-6} Кюрі). Для виміру активності потужних радіоактивних препаратів застосовуються кратні від Кюрі одиниці: кілокіюрі (10^3 Кюрі) і мегакіюрі (10^6 Кюрі).

11.1.3 Зв'язок активності препарату з масою активного ізотопу в ньому.

Радіоактивні ізотопи можуть застосовуватися не тільки в чистому виді, але і разом з нерадіоактивними речовинами. Тому про кількість радіоактивної речовини судять не по масі препарату, а по його активності.

З визначення активності препарату випливає, що вона дорівнює похідній dN/dt , користуючись законом радіоактивного розпаду, отримуємо:

$$n = \left| \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \right| \quad (11.3)$$

Число атомів радіоактивного ізотопу в препараті в даний момент часу дорівнює:

$$N = \frac{M}{m} \quad (11.4)$$

де M – маса радіоактивного ізотопу в препараті; m – маса радіоактивного атома.

Маса одного атома може бути визначена зі співвідношення:

$$m = \frac{A}{N_A} \quad (11.5)$$

де A – атомна маса радіоактивного ізотопу, N_A – число Авогадро.

З урахуванням співвідношень (11.4) і (11.5) рівність (11.3) можна записати у виді:

$$n = \frac{\lambda M N_A}{A} \quad (11.6)$$

Рівність (10.5) визначає зв'язок активності препарату з масою радіоактивного ізотопу в ньому.

11.1.4 Вимір активності препарату абсолютним методом

Метод визначення активності джерела заснований на безпосередньому рахунку числа часток, випромінюваних препаратом, називається *абсолютним методом*.

Число радіоактивних часток, випущених джерелом в усі сторони (тобто в тілесний кут 4π в одиницю часу) не дорівнює числу часток, які попадають у лічильник по двом причинам.

По-перше, у робочий об'єм лічильника можуть попадати лише частки, що випускаються радіоактивним джерелом у напрямку вікна лічильника. По-друге, по шляху з радіоактивного шару в робочий об'єм лічильника потік радіоактивних часток частково поглинається в шарі повітря між препаратом і лічильником і, також, у матеріалі віконця лічильника.

Позначимо шукану активність препарату через n і введемо коефіцієнт K , що показує яка частина часток, випущених препаратом, попадає в лічильник. Тоді:

$$n = \frac{n_1}{K} \quad (11.7)$$

де n_1 – число часток, що фактично потрапили в робочий об'єм лічильника в одиницю часу.

Число часток n_1 визначається експериментально за допомогою радіометричної установки. Число n'' імпульсів, зареєстрованих установкою в одиницю часу буде відрізнятися від числа n_1 часток, що потрапили в робочий об'єм лічильника з препарату. Це зв'язано з тим, що лічильнику властиві проміжки часу повної нечутливості. Цей час τ називають «*мертвим часом*» лічильника. З іншої сторони в число імпульсів n_1 входить деяке число імпульсів n_ϕ , що викликано різними сторонніми впливами (наприклад, космічним випромінюванням). Це так званий *фон лічильника*.

З обліком «мертвого часу» лічильника швидкість рахунку буде дорівнює

$$n' = \frac{n''}{1 - n''\tau} \quad (11.8)$$

Число часток, зареєстрованих лічильником з урахуванням “мертвого часу” і фону буде дорівнювати

$$n_1 = n' - n_\phi \quad (11.9)$$

Активність лічильника розраховується за (11.7) з урахуванням (11.8) і (11.9).

11.1.5 Сцинтиляційний лічильник

Сцинтиляційний метод реєстрації часток – один з найстаріших методів. Широке розповсюдження він отримав після створення фотоелектронних помножувачів – приладів, що володіють здібністю реєструвати слабкі спалахи світла. **Сцинтиляційний лічильник** складається зі **сцинтилятора** та **фотоелектронного помножувача (ФЕП)**.

Сцинтиляторами називають такі речовини, які під дією заряджених часток випромінюють фотони у видимій частині спектру. У сцинтиляторі спалахи світла з'являються не тільки під дією заряджених часток, але й під дією гамма-випромінювання та нейтронів.

Друга складова сцинтиляційного лічильника – **ФЕП**. Фотони світла, попадаючи на фотокатод ФЕП, в результаті фотоэффекту вибивають електрони. Під дією зовнішнього електричного поля електрони спрямовуються на діоди ФЕП, де відбувається вторинна електронна емісія, в результаті якої на анод ФЕП приходить у десятки та сотні тисяч разів більша кількість електронів. Таким чином народжується електричний імпульс, який потім реєструється відповідними електронними схемами.

Робота виконується на установці, що складається з сцинтиляційного лічильника, джерела живлення, свинцевого боксу. Блок-схема установки показана на рисунку 11.1.

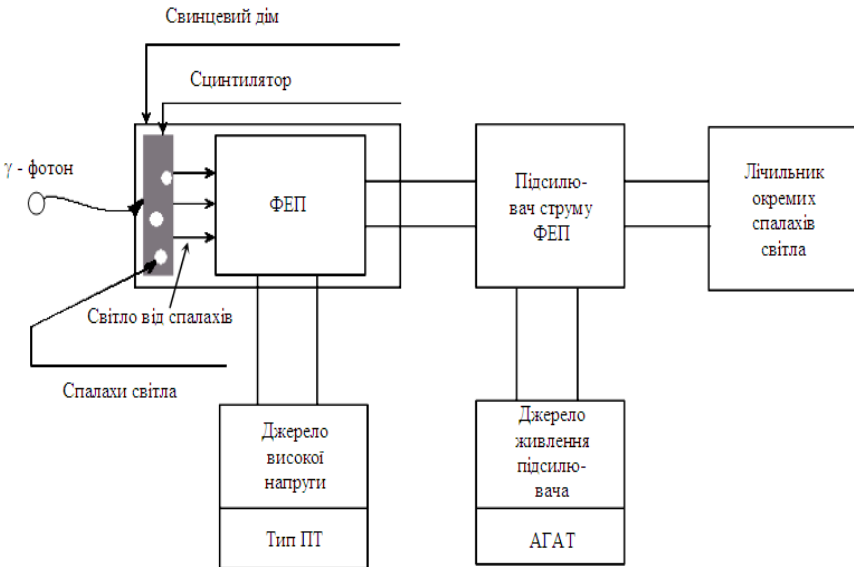


Рисунок 11.1

11.2 Порядок виконання роботи

Виміряти активність препарату KCl .

Прилади і обладнання.

1. Сцинтиляційний лічильник.
2. Джерело живлення.
3. Свинцевий бокс.

Хід виконання.

Робота виконується на установці, що складається з сцинтиляційного лічильника, джерела живлення, свинцевого боксу.

1. Ввімкнути установку.
2. Виміряти фон лічильника. Для цього треба подати на лічильник напругу 1250 В. Зняти показання лічильника у відсутності джерела випромінювання при закритому вікні свинцевого боксу.

Виміряти швидкість рахунку. Для цього:

- а) покласти джерело випромінювання на відкрите вікно свинцевого боксу;
- б) зробити вимір швидкості рахунку n'' аналогічно виміру фону лічильника при закритому вікні свинцевого боксу;
- в) результати вимірів занести в таблицю 11.1 з обліком «мертвого часу» і фону. («Мертвий час» лічильника вважати рівним $\tau = 5 \cdot 10^{-6}$ с);

Таблиця 11.1

Тривалість виміру t , с	Число зареєстрованих імпульсів		Фон лічильника $n_\phi = \frac{N_\phi}{t}$	Швидкість рахунку з препаратом $n'' = \frac{N_{np}}{t}$	Швидкість рахунку з обліком «мертвого часу» $n' = \frac{n''}{1 - n'\tau}$	Швидкість рахунку з урахуванням фону $n = n' - n_\phi$	Активність препарату n
	Без препарату N_ϕ	З препаратом N_{np}					

г) тривалість виміру усереднити.

Обчислити по (11.7) активність препарату. (Вважати коефіцієнт $K = 0,1$, $A = 40$, $\lambda = 1,3 \cdot 10^9$ років).

Використовуючи співвідношення (11.6) визначити масу M радіоактивного ізотопу в препараті.

11.3 Контрольні запитання

1. Який фізичний зміст явища радіоактивності?
2. Які процеси відносяться до основних типів радіоактивних перетворень?
3. Як математично виражається закон радіоактивного розпаду?
4. Який фізичний зміст має постійна розпаду λ ?
5. Що називається періодом напіврозпаду?
6. В яких одиницях вимірюється активність препарату?
7. Як визначити активність препарату використовуючи закон радіоактивного розпаду?
8. Який зв'язок активності препарату з кількістю радіоактивного ізотопу в ньому?
9. У чому складається сутність виміру активності препарату абсолютним методом?
10. Чому не всі частки, випущені препаратом попадають у лічильник?
11. Яким чином розраховується швидкість рахунку з урахуванням: а) «мертвого часу», б) фона лічильника?
12. Який зміст коефіцієнта « K », що входить у формулу (11.7) для розрахунку активності препарату?
13. Як визначити масу радіоізотопу в препараті по його активності?

Література

1. Савельєв І.В.. Курс загальної фізики. – М.: Наука, 1971 р.
2. Кортнев А.В. та ін. Практикум по фізиці. – М.: Вища школа, 1963 р.

ІНСТРУКЦІЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ

при виконанні робіт в лабораторії

1 Загальні положення

1.1 До роботи в лабораторії допускаються:

- співробітники кафедри, які знають свої функціональні обов'язки та мають допуск до самостійної роботи;

- студенти, що вивчили та засвоїли правила поведіння в лабораторії, знають методику проведення лабораторних робіт, пройшли відповідний інструктаж.

1.2 Інструктаж для студентів проводить співробітник кафедри. Кожен студент у журналі «Інструктаж студентів з питань охорони праці» зобов'язаний особистим підписом підтвердити знання інструктажу.

1.3 Допуск студентів до роботи здійснює керівник заняття після того, як він з'ясував рівень знань студентів методики проведення лабораторних робіт.

2 Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1 Для виконання робіт використовують тільки придатні для роботи прилади та інструменти.

2.2 Перед виконанням роботи керівник повинен особисто перевірити справність приладів і дати дозвіл на виконання роботи.

2.3 Особи, що не беруть участі у виконанні лабораторної роботи, в лабораторію не допускаються.

3 Вимоги безпеки під час виконання робіт

3.1 Забороняється вмикати або вимикати джерела електричної та світлової енергії без дозволу керівника робіт.

3.2 Забороняється крутити будь-які гвинти, рукоятки, натискувати кнопки, вимикачі, призначення яких для студента невідоме.

3.3 Про усі нещодавні в роботі приладів та обладнання студент повинен негайно повідомити викладача.

4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1 Перед закінчення роботи послідовно вимкнути всі споживачі електроенергії.

4.2 Візуально перевірити справність стану, установки. Слід пам'ятати, що за зламаним приладом студент несе відповідальність.

5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1 Виконавець робіт зобов'язаний:

- зупинити роботу;

- вимкнути прилади та обладнання з електричної мережі;

- сповістити керівника робіт про те, що сталося в лабораторії.

5.2 На випадок пожежі приступити до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння. Діяти згідно розпорядженням свого керівника або особи, що керує гасінням пожежі.

5.3 Керівник робіт сповіщає по тел. 101.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7	
Фотопровідність	4
1.1. Загальні відомості.....	4
1.2. Порядок виконання роботи.....	6
1.3. Контрольні запитання	7
2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8	
Визначення ширини забороненої зони напівпровідника оптичним методом	8
2.1. Загальні відомості	8
2.2. Порядок виконання роботи	10
2.3. Контрольні запитання.....	11
3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9	
Властивості явища фотопровідності.....	13
3.1. Загальні відомості	13
3.1.1. Вступ	13
3.1.2. Час життя нерівноважних носіїв заряду.....	16
3.1.3. Залежність фотопровідності від інтенсивності світла, що поглинається	19
3.2. Порядок виконання роботи	20
3.2.1. Завдання 1	20
3.2.2. Завдання 2	22
3.3. Контрольні запитання.....	24
4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10	
Контактні явища в напівпровідниках	25
4.1. Загальні відомості	25
4.1.1. Контакт двох металів. Товщина контактного шару	25
4.1.2. Контакт метал-напівпровідник і його випрямляючі властивості. Омічний контакт	26
4.1.3. Контакт двох напівпровідників з різним типом провідності. р-п-перехід і його випрямляючі властивості	30
4.2. Порядок виконання роботи	35
4.3. Контрольні запитання.....	37
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 11	
Реєстрація радіоактивного випромінювання	38
5.1. Загальні відомості	38
5.1.1. Вступ	38
5.1.2. Активність препарату і одиниці виміру	39
5.1.3. Зв'язок активності препарату з масою активного ізотопу в ньому.....	39
5.1.4. Вимір активності препарату абсолютним методом	40
5.1.5. Сцинтиляційний лічильник	41
5.2. Порядок виконання роботи	42
5.3. Контрольні запитання.....	43
ІНСТРУКЦІЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	44

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисципліни
«Фізика твердого тіла»
для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
Частина 2

Укладачі: ЗАЙЦЕВ Роман Валентинович
КІРІЧЕНКО Михайло Валерійович
МІНАКОВА Ксенія Олександрівна
ДРОЗДОВ Антон Миколайович

Відповідальний за випуск Р.В. Зайцев

План 2019 р.

Підписано до друку . Формат 60×84 1/16. Папір друк. №2.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,0.
Обл.-вид. 3,6. Тираж 50 прим.

Видавничий центр НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Кирипичева, 2.
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Надруковано у типографії ТОВ «Цифра Принт»
на цифровому комплексі Xerox DocuTech 6135.
Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 3.08.2009 г.