

Кафедра фізики оптичного зв'язку

ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Модуль 2.3. Фізика оптичного зв'язку

**Частина 3. МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК ДО ЛАБОРАТОРНОГО
ПРАКТИКУМУ З ФІЗИКИ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

З РОБІТ №№ 6-9, 8-5, 6-10

для студентів заочної та денної форм навчання
всіх спеціальностей за напрямом 6.050903 – Телекомунікації

Укладачі: Горбачов В.Е., Коробіцин Б.В.

Методичний посібник є стосовним до навчальної дисципліни Фізика оптичного зв'язку для студентів технічного ВНЗ. На прикладі трьох лабораторних робіт вивчаються способи вимірювання основних характеристик випромінювальних та приймаючих елементів оптичного зв'язку за допомогою спеціальних технічних пристроїв, опрацювання прямих і непрямих вимірювань, обчислення довірчих інтервалів. Наведено достатній теоретичний матеріал, який включає опис конструкції та методів застосування таких пристроїв, як лабораторна модель оптичного генератора та фотодетектора.

Використано матеріали методичних керівництв попередніх років видання.

Вказівки призначено для студентів всіх спеціальностей за напрямом Телекомунікації.

ЗАТВЕРДЖЕНО

вченою радою науково-навчального
інституту “КТ А та Л”

Протокол № 3/14
від 9.04.2013 р.

СХВАЛЕНО

на засіданні кафедри
фізики оптичного зв'язку
й рекомендовано до друку.

Протокол № 5
від 19.12.2012 р.

СТРУКТУРА МОДУЛЯ № 2.3. „ Фізика оптичного зв'язку ”
(Кількість кредитів ECTS – 2)

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	заг.	у тому числі					заг.	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	с.р.		л	п	лаб	інд	с.р.
Тема. Фізика оптичного зв'язку	72	14	6	8	-	44					-	
Разом за модулем	72	14	6	8	-	44					-	
Усього за семестр	72	14	6	8	-	44	72	6	2	6	-	58
Усього по курсу	72	14	6	8	-	44	72	6	2	6	-	58

Теми лекцій

Лекція 1. Фізичні основи оптичного зв'язку.

Лекція 2. Випромінювальні напівпровідникові прилади та їх фізичні характеристики. Випромінювальна рекомбінація. Світло Випромінювальні діоди. Фактори підвищення зовнішньої квантової ефективності світловипромінювального діода.

Лекція 3. Лазерні діоди. Умови генерації світла. Фактори підвищення зовнішньої квантової ефективності лазера.

Лекція 4. Засоби модуляції оптичного випромінювання. Фазова, амплітудна та частотна модуляція світла. Глибина модуляції. Оптичні затвори.

Лекція 5. Фізичні властивості поширення світла у світловодах. Частотна та просторова дисперсія. Конструкції оптичних волокон. Фундаментальні втрати в оптичних волокнах. Питоме загасання оптичного сигналу. Вікна прозорості.

Лекція 6. Фізичні принципи роботи напівпровідникових фотоприймачів. Внутрішній фотоефект. Фоторезистори. Фізичні характеристики фотоприймачів.

Лекція 7. Фотодіоди. Фотоприймачі з внутрішнім посиленням фотоструму. Лавинні діоди, фототранзистори.

Теми лабораторних занять

№	Назва теми	Години
1	6-9. Вивчення світловипромінювального діода	2
2	8-5. Вивчення внутрішнього фотоефекту в напівпровідниках	2
3	6-9, а. Вивчення внутрішнього фотоефекту в <i>p-n</i> -переході	2
4	6-9, б. Побудова характеристик світловипромінювального діода	2
	Усього	8

ВСТУП

Метою лабораторного практикуму з фізики оптичного зв'язку є практичне освоєння основ оптоелектроніки, які надалі необхідні для розуміння реальних процесів у системах оптичного зв'язку.

Три лабораторні роботи виконуються на основі оптоелектронних приладів загального застосування.

Лабораторні роботи проводяться фронтальним методом, коли вся студентська група виконує одну й ту саму роботу.

Виконанню роботи в лабораторії обов'язково передуює домашня підготовка з теорії та методики виконання роботи, а також підготовка протоколу, що включає креслення схеми пристрою, таблиць приладів та прямих вимірювань, написання і розшифровку робочих формул. За попередньою вказівкою викладача студент відповідає на певні контрольні питання письмово.

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які виконали домашню роботу і подали позитивний результат експрес-опитування в лабораторії.

Зміст протоколів усіх робіт повинен бути таким:

Домашнє завдання (відповідь на контрольні питання)

1. Номер і тема лабораторної роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема пристрою, перелік її елементів.
4. Таблиця вимірювальних приладів.
5. Робочі формули з поясненнями величин.
6. Таблиця прямих вимірювань у стандартному вигляді для кожної вимірювальної величини. (Безпосередньо після її заповнення подається на підпис викладачеві).
7. Оброблення результатів вимірювань (за багаторазових однотипних обчислень наводиться одна підстановка).
8. Зведення результатів у стандартній формі (у вигляді довірчого інтервалу і відносної похибки або у графічному вигляді).
9. Висновок.
10. Прізвище студента.
11. Дата виконання роботи.

При підготовці до виконання лабораторних робіт, крім даного посібника, рекомендуємо користуватися літературою, що надана вкінці посібника.

ВИВЧЕННЯ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНОГО ДІОДА

1 Мета роботи

Вивчення перетворення електричної енергії у світлову світловипромінювальним діодом й вимірювання його електричних та світлових характеристик.

2 Ключові положення

У пристроях оптичного зв'язку як джерела світла використовуються найчастіше світловипромінювальні діоди (СВД), що працюють у режимі спонтанного (світлодіод) чи стимульованого (лазер) випромінювання. Розглянемо роботу такого діода.

Явище випромінювання світла при протіканні струму називається *електролюмінесценцією*, а випромінювання світла при протіканні прямого струму через *p-n-перехід* – *інжекційною електролюмінесценцією*.

На рис. 1,а показана зонна діаграма *p-n-переходу* за відсутності зовнішнього зміщення, а на рис. 1,б – при прямому зміщенні. При прикладенні напруги прямого зміщення U висота потенційного бар'єра зменшується на величину $e \cdot U$, внаслідок чого починають текти дифузійні струми електронів – з *n-області* в *p-область* і дірок – з *p-області* в *n-область* (інжекція). Інжектовані з *n-області* до *p-області* електрони, будучи в *p-області* неосновними і нерівноважними, рекомбінують з дірками або безвипромінювально з

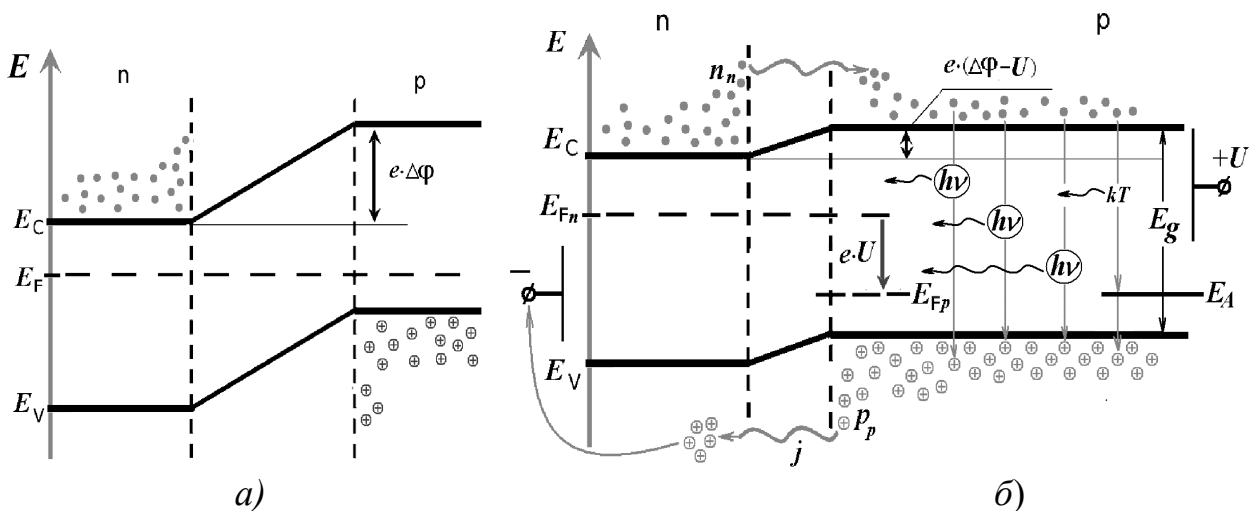


Рисунок 1 – *p-n-перехід* та електролюмінесценція в *p-n-переході*

виділенням тільки теплової енергії kT , або з випромінюванням фотона з енергією $h\nu = E_g$.

Частка випромінювальної рекомбінації в СВД повинна бути досить великою.

Вольтамперна характеристика (ВАХ) СВД $I_{\text{СВД}} = f(U_{\text{СВД}})$ має вигляд, типовий для діода (рис. 2), і може бути схарактеризована струмовою напругою

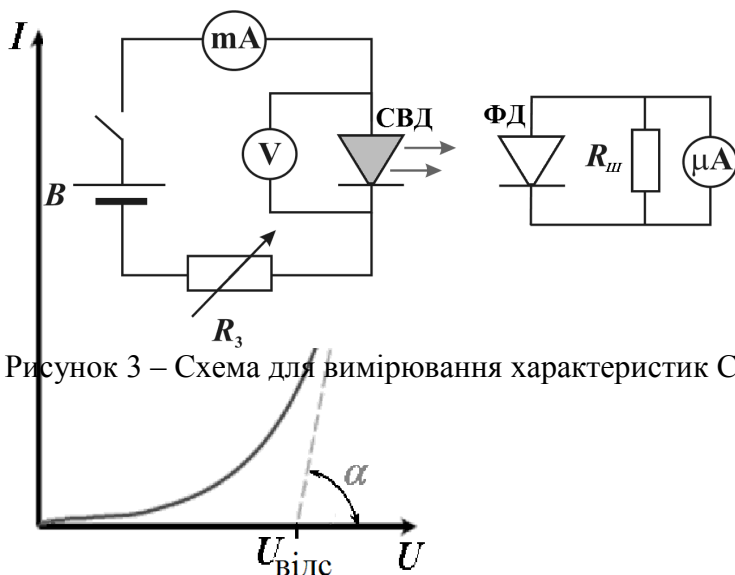


Рисунок 3 – Схема для вимірювання характеристик СВД

Рисунок 2 – Вольтамперна характеристика СВД

відсікання $U_{\text{відс}}$ і залишковим опором $R_{\text{зал}}$. Струмову напругу відсікання дістають екстраполяцією лінійної ділянки ВАХ до нуля струму. Вона близька за значенням до контактної різниці потенціалів. Залишковий опір $R_{\text{зал}}$ визначають як котангенс кута нахилу лінійної ділянки ВАХ.

Світловою характеристикою СВД $\Phi = f(I)$ є залежність потужності випромінювання від струму. Звичайно ця характеристика є сублінійна на малих струмах і лінійна – на великих. На малих струмах велику роль відіграють канали безвипромінювальної рекомбінації, а на великих струмах деякі з цих каналів насичуються, що і приводить до збільшення ефективності СВД.

3 Опис установки й методики вимірювань

Схема установки для вимірювання характеристик СВД показана на рис. 3.

Прилади та приладдя: СВД – світловипромінювальний діод, який досліджується, B – джерело живлення схеми, mA – міліамперметр для вимірювання струму через СВД, V – вольтметр для вимірювання напруги на СВД, ФД – фотодіод для вимірювання потужності випромінювання СВД, μA – мікроамперметр для вимірювання струму ФД.

Світловипромінювальний діод і фотодіод розташовуються у світлонепроникній трубочці один напроти одного впритул. За допомогою магазину опорів R поступово задається струм прямого зміщення СВД і вимірюється струм фотодіода з відомою чутливістю. Граничне значення струму СВД близько до 50 mA , бо обмежене внутрішнім опором батареї.

За виміряними даними будується ВАХ і світлова характеристика. Для вимірювання $U_{\text{відс}}$ подовжується лінійна ділянка ВАХ до перетинання з віссю напруг: точка перетинання і дасть струмову напругу відсікання. Для визначення $R_{\text{зал}}$ беруть довільний інтервал напруг у межах лінійної ділянки ВАХ і ділять його на відповідний інтервал струмів.

Для СВД ефективність перетворення електричної енергії на світлову характеризують дві величини:

- *енергетична ефективність*

$$\eta_{\text{ЕН}} = \frac{P_{\text{СВ}}}{P_{\text{ЕЛ}}} = \frac{I_{\text{ФД}}}{S_{\text{ФД}} \cdot I_{\text{СВД}} \cdot U_{\text{СВД}}}, \quad (1)$$

де в чисельнику $P_{\text{СВ}} = I_{\text{ФД}} / S_{\text{ФД}}$ – випромінена СВД світлова потужність, яка в цієї лабораторної роботі визначається за відомим $I_{\text{ФД}}$ – струмом крізь фотодіод, і $S_{\text{ФД}}$ – чутливістю фотодіода в мкА/мВт , та в знаменнику $P_{\text{ЕЛ}} = I_{\text{СВД}} U_{\text{СВД}}$ – спожита СВД електрична потужність, яка визначається за допомогою вимірювань $I_{\text{СВД}}$ – струму крізь СВД, та $U_{\text{СВД}}$ – напрузі на ньому;

- *квантова ефективність*

$$\eta_{\text{КВ}} = \frac{N_{\text{ф}}}{N_{\text{е}}} = \frac{P_{\text{СВ}} \cdot e}{h\nu \cdot I_{\text{СВД}}} = \frac{P_{\text{СВ}} \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot I_{\text{СВД}}}, \quad (2)$$

де в чисельнику $N_{\text{ф}} = P_{\text{СВ}} / h\nu$ – число випромінених фотонів, яке визначається за допомогою відомої $P_{\text{СВ}}$ – випроміненої СВД світлової потужності, h – постійної Планка, $\nu = c / \lambda$ – частоти світла, λ – довжини світлової хвилі, c – швидкості світла, та в знаменнику $N_{\text{е}} = I_{\text{СВД}} / e$ – число носіїв заряду, що пройшли крізь p - n -перехід світлодіода, яке визначається за допомогою $I_{\text{СВД}}$ – струму крізь СВД і e – заряд електрона.

Енергетична і квантова ефективності є близькими за значенням величинами, тому що енергія фотона близька до значення ширини забороненої зони, а прикладена напруга близька до ширини забороненої зони, поділеної на заряд електрона.

4 Обробка результатів вимірювань

4.1 Для отримання результату *прямих вимірювань* величини x необхідно:

1) Експериментально визначити значення вимірюваної величини n разів ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) і записати результат цих вимірювань в другому стовпчику таблиці вимірювань. У першому стовпчику таблиці вимірювань записується порядкове число вимірювання.

2) Обчислити *середнє значення* вимірюваної величини:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3)$$

3) Знайти *відхилення* Δx_i кожного значення вимірюваної величини від середнього значення і записати результати в третьому стовпчику таблиці вимірювань:

$$\Delta x_1 = \langle x \rangle - x_1; \quad \Delta x_2 = \langle x \rangle - x_2; \quad \dots; \quad \Delta x_n = \langle x \rangle - x_n. \quad (4)$$

4) Піднести кожне відхилення до квадрата, і записати в четвертому стовпчику таблиці вимірювань. Потім підсумувати їх:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2. \quad (5)$$

5) Знайти абсолютну **статистичну похибку** результатів вимірювання $\Delta x_{\text{СТ}}$ за допомогою формули Стюдента:

$$\Delta x_{\text{СТ}} = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (6)$$

де α – довірна вірогідність; n – число вимірювань; $t_{\alpha, n}$ – коефіцієнт Стюдента.

6) Записати **абсолютну похибку приладу вимірювання** $\Delta x_{\text{ПР}}$, яка вказується на шкалі приладу.

На шкалі будь-якого електровимірювального приладу замість абсолютної похибки вказують у вигляді десятинного дробу його клас точності – відносна похибка приладу у відсотках на всій межі шкали вимірів:

$$\beta \% = \frac{\Delta x_{\text{ПР}}}{x_{\text{max}}} \cdot 100.$$

Тому **абсолютна похибка електровимірювального приладу** визначається за зазначеним на шкалі приладу класом точності β :

$$\Delta x_{\text{ПР}} = \frac{\beta \% \cdot x_{\text{max}}}{100}, \quad (7)$$

де x_{max} – межа шкали приладу.

7) Знайти **повну абсолютну похибку** вимірювань

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{СТ}})^2 + (\Delta x_{\text{ПР}})^2}. \quad (8)$$

Якщо у вимірюваннях було використано декілька приладів, то при розрахунку повної похибки в (8) під коренем треба додати квадрати абсолютних похибок усіх приладів вимірювання.

8) Обчислити **відносну похибку** вимірювань величини x :

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{< x >}. \quad (9)$$

9) Записати **кінцевий результат** у вигляді **довірчого інтервалу** і **відносної похибки** у відсотках:

$$x = (< x > \pm \Delta x)_{\alpha} = (\dots \pm \dots)_{0,95}; \quad \delta_x \% = \frac{\Delta x}{< x >} \cdot 100\% = \dots \%. \quad (10)$$

4.2 Для отримання результату непрямого вимірювання величини y необхідно:

1) Обчислити **середнє значення** вимірюваної величини $<y>$ за формулою, підставляючи в неї середні значення виміряних величин $<a>$, $$, $<c>$, наприклад:

$$< y > = \frac{8 < a >^4 \cdot \sqrt[3]{< b >^2}}{7 < c >^5}. \quad (11)$$

2) Обчислити **відносну похибку** вимірюваної величини δ_y як суму квадратів відносних похибок вимірюваних величин δ_a , δ_b , δ_c з коефіцієнтами, рівними показникам ступеню з яким ці величини входять в робочу формулу. Для нашого прикладу (11) – це 4, 2/3 та 5 відповідно для δ_a , δ_b , δ_c :

$$\delta_y = \sqrt{(4\delta_a)^2 + \left(\frac{2}{3}\delta_b\right)^2 + (5\delta_c)^2} = \sqrt{\left(4\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\frac{\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(5\frac{\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2}, \quad (12)$$

де Δa , Δb , Δc – абсолютні похибки вимірюваних величин; $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$ – їх середні значення.

3) Знайти **абсолютну похибку** вимірюваної величини

$$\Delta y = \langle y \rangle \times \delta_y. \quad (13)$$

4) Записати **кінцевий результат** у вигляді **довірчого інтервалу** і **відносної похибки** у відсотках:

$$y = (\langle y \rangle \pm \Delta y)_{\alpha} = (\dots \pm \dots)_{0.95}; \quad \delta_y \% = \delta_y \cdot 100\% = \dots \%. \quad (14)$$

5 Порядок виконання роботи

1. Перевірити правильність збирання схеми і полярність приєднання СВД та ФД.

2. За допомогою магазину опорів R установити струм через СВД по міліамперметру 5 мА і записати в таблицю покази всіх приладів. Вимірювання проводити при струмах через 5 мА до 50 мА . За необхідності використовувати шунт мікроамперметра.

3. Побудувати графік ВАХ $I_{\text{СВД}} = f(U_{\text{СВД}})$ і визначити $R_{\text{Зал}}$ і $U_{\text{ВіДС}}$, як було зазначено на рис. 8.

4. За формулами (1) і (2) обчислити енергетичну ефективність $\eta_{\text{ЕН}}$ і квантову ефективність $\eta_{\text{КВ}}$ для всіх вимірюваних струмів і побудувати відповідні графіки разом з графіком $P_{\text{СВ}}$.

5. Записати результати обчислення електричних параметрів СВД ($U_{\text{СВД}}$, $P_{\text{ЕЛ}}$ та $P_{\text{СВ}}$), енергетичної $\eta_{\text{ЕН}}$ й квантової $\eta_{\text{КВ}}$ ефективності для максимального струму.

6. Зробити висновки про оптимальний режим СВД (режим максимальної світлової потужності, максимальної ефективності).

6 Контрольні питання

1. Як утворюється p - n -перехід і коли він проводить електричний струм, а коли не проводить?
2. Як перетворюється в СВД електрична енергія на світлову?
3. Що таке енергетична і квантова ефективність СВД?
4. Які параметри можна визначити з ВАХ?
5. Як залежать світлові характеристики СВД від струму?

7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 6-9

I. Домашнє завдання.

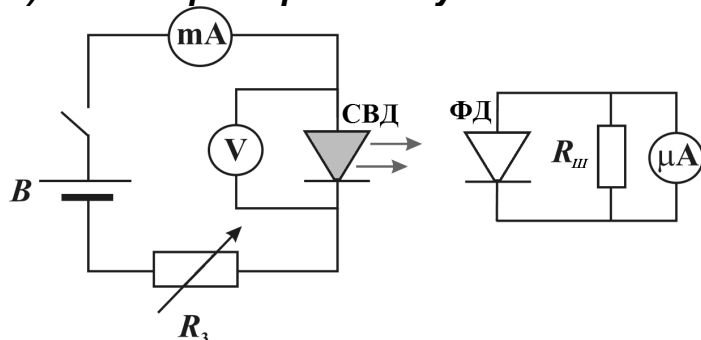
...

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 6-9

1) **Тема:** Вивчення світловипромінювального діода

2) **Мета роботи:** Вивчення процесу перетворення електричної енергії в світлову світловипромінювальним діодом та вимірювання його електричних та світлових характеристик.

3) **Схема пристрою або установки**



СВД – світловипромінювальний діод,
ФД – фотодіод,
В – джерело живлення,
R_з – магазин опорів,
mA – міліамперметр,
V – вольтметр,
μA – мікроамперметр.

4) **Таблиця приладів:**

№	Найменування	Тип	Заводськи й №	Межа шкали	Ціна поділки	Клас точності
1.	Міліамперметр	M90 6		25 мА	1 мА	1,0
2.	Мікроампермет р	M90 6		1000 мкА	40 мкА	1,0
3.	Вольтметр	M90 6		5 В	0,2 В	1,5
4.	Магазин R _з	P333	-	9999 Ом	1 Ом	0,2

5) **Формули розрахунків величин:**

1. Електрична потужність світловипромінювального діода:

$$P_{\text{ЕЛ}} = I_{\text{СВД}} U_{\text{СВД}},$$

де $I_{\text{СВД}}$ – струм світловипромінювального діода, $U_{\text{СВД}}$ – напруга на ньому.

2. Випромінена світлова потужність

$$P_{\text{СВ}} = \frac{I_{\text{ФД}}}{S_{\text{ФД}}},$$

де $I_{\text{ФД}}$ – струм фотодіода, $S_{\text{ФД}}$ – його чутливість..

3. Енергетична ефективність світловипромінювального діода:

$$\eta_{\text{ЕН}} = \frac{P_{\text{СВ}}}{P_{\text{ЕЛ}}} \cdot 100\%.$$

4. Квантова ефективність світловипромінювального діода:

$$\eta_{\text{КВ}} = \frac{N_{\text{Ф}}}{N_{\text{е}}} \cdot 100\% = 76,4 \cdot \frac{P_{\text{СВ}}}{I_{\text{СВД}}} \%$$

6) Вимірювання:

$S = \dots \text{мкА} / \text{мВт}$ - чутливість фотодіода (написано на коробці).

Для $R_{\text{ш}} = 1 \text{ кОм}$ (межа шкали 500 мкА); $R_{\text{ш}} = 500 \text{ Ом}$ (межа шкали 1000 мкА).

$\lambda = \dots \text{нм}$ – довжина хвилі.

Таблиця вимірювань

№	$I_{\text{СВД}}, \text{мА}$	$I_{\text{ФТ}}, \text{мкА}$	$U_{\text{СВД}}, \text{В}$	$P_{\text{СВ}}, \text{мВт}$	$P_{\text{ЕЛ}}, \text{мВт}$	$\eta_{\text{ЕН}}, \%$	$\eta_{\text{КВ}}, \%$
1	5						
2	10						
3	15						
4	20						
5	25						
6	30						
7	35						
8	40						
9	45						
10	50						

7) Розрахунки величин і їх похибок

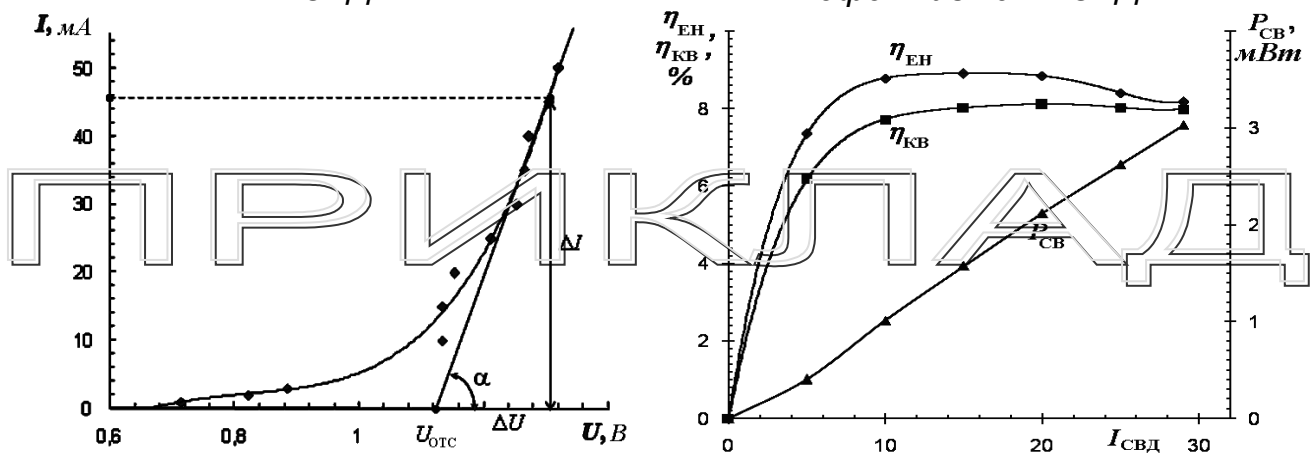
$U_{\text{ВІДС}} = \dots \text{В}$; $R_{\text{ЗАЛ}} = \dots \text{Ом}$; $U_{\text{СВД}}(50\text{мА}) = \dots \text{В}$; $P_{\text{ЕЛ}}(50\text{мА}) = \dots \text{мВт}$; $P_{\text{СВ}}(50\text{мА}) = \dots \text{мВт}$; $\eta_{\text{ЕН}}(50\text{мА}) = \dots \%$; $\eta_{\text{КВ}}(50\text{мА}) = \dots \%$.

8) Результати

Графіки:

Вольт-амперна характеристика СВД

Потужність випромінювання та ефективність СВД



Результати розрахунків

$U_{\text{ВІДС}} = \dots \text{В}$; $R_{\text{ЗАЛ}} = \dots \text{Ом}$; $U_{\text{СВД}}(50\text{мА}) = \dots \text{В}$; $P_{\text{ЕЛ}}(50\text{мА}) = \dots \text{мВт}$; $P_{\text{СВ}}(50\text{мА}) = \dots \text{мВт}$; $\eta_{\text{ЕН}}(50\text{мА}) = \dots \%$; $\eta_{\text{КВ}}(50\text{мА}) = \dots \%$.

9) **Висновок:** Ефективність СВД максимальна при $I_{\text{СВД}} = \dots \text{мА}$, коли $U_{\text{СВД}} = \dots \text{В}$. Коли світлова потужність максимальна, тоді ефективність СВД $\eta_{\text{ЕН}} = \dots \%$, тому що ...

10) Роботу виконав(а): _____ (прізвище чітко).

Роботу перевірити:
11) Дата.

Лабораторна робота № 8-5 ВИВЧЕННЯ ФОТОПРОВІДНОСТІ ОДНОРІДНИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

1 Мета роботи

- 1.1. Вивчення основних положень теорії внутрішнього фотоефекту.
- 1.2. Ознайомлення з методикою дослідження фотоелектричних властивостей напівпровідника.
- 1.3. Побудова графіка фотопровідності з метою з'ясування механізму рекомбінації нерівноважних носіїв заряду.

2 Ключові положення

Фотопровідність – це явище зміни електропровідності кристалів під дією

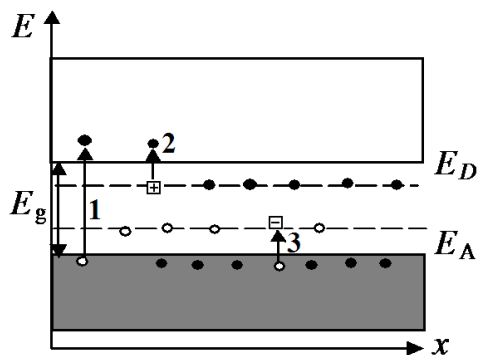


Рисунок 4 – Зонна діаграма напівпровідника з переходами зона-зона (1) і рівень-зона (2, 3) світла за рахунок внутрішнього фотоефекту. Внутрішній фотоефект – це процес генерації носіїв струму під дією світла, що приводить до збільшення електропровідності.

Можливі типи переходів, що приводять до зміни електропровідності, наведені на рис. 4. При внутрішньому фотоефекті первинним процесом є поглинання фотона з енергією, достатньою для переходу електрона з валентної зони в зону провідності (перехід 1), або з донорного рівня в зону провідності (перехід 2), а також з валентної зони на акцепторний рівень в зону провідності (перехід 3). Перехід 1 приводить до утворення пари електрон-дірка, а в результаті інших переходів утворюються вільні носії заряду тільки одного знака (для переходу 2 – тільки електрони, для переходу 3 – тільки дірки). Якщо оптичний перехід електронів відбувається з валентної зони в зону провідності (крізь заборонену зону E_g), то це називається *власною фотопровідністю*. При цьому, очевидно, енергія фотона $h\nu$ повинна задовольняти умові $h\nu \geq E_g$. Отже, існує деяка гранична частота ν_{Γ} , за якої фотопровідність ще спостерігається. Вона визначається співвідношенням $h\nu = E_g$ і називається *червоною межею фотопровідності*.

Наприклад, для напівпровідника, у якого ширина забороненої зони дорівнює $E_g = 2 \text{ eV}$, гранична частота $\nu_{\Gamma} = E_g/h = 5 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$, що відповідає довжині хвилі $\lambda_{\Gamma} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Переходи 2 і 3 викликають появу домішкової фотопровідності. Ретельне

вивчення внутрішнього фотоефекту показало, що ефективна концентрація виникаючих фотоносіїв за заданої інтенсивності світлового потоку залежить від його спектрального складу. Тому у кожного напівпровідника існує своя спектральна характеристика (спектр fotocутливості). Генерація вільних носіїв заряду під дією світла приводить до збільшення електропровідності напівпровідника, яка за наявності нерівноважних електронів Δn і дірок Δp може бути записана у вигляді:

$$\gamma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p], \quad (15)$$

де n_0, p_0 – концентрація рівноважних електронів і дірок.

Надмірна (нерівноважна) провідність дорівнює різниці провідності напівпровідника на світлі $\gamma_{\text{св}}$ та в темряві $\gamma_{\text{т}}$:

$$\gamma_{\text{ф}} = \gamma_{\text{св}} - \gamma_{\text{т}} = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p). \quad (16)$$

Концентрація нерівноважних носіїв заряду Δn і Δp залежить від інтенсивності освітлення.

При безперервному освітленні напівпровідника світлом постійної інтенсивності встановлюється стаціонарний стан, що характеризується концентрацією нерівноважних носіїв заряду Δn_0 і Δp_0 , визначуваних виразами:

$$\Delta n_0 = \eta \tau_n \alpha \Phi, \quad \Delta p_0 = \eta \tau_p \alpha \Phi, \quad (17)$$

де τ_n і τ_p – час життя нерівноважних електронів і дірок, відповідно (час, за який концентрація носіїв при включеному освітленні зменшується в e разів); η – коефіцієнт квантового виходу, який визначає кількість пар нерівноважних носіїв, що утворюються одним поглиненим квантом світла; Φ – квантова інтенсивність світла (щільність потоку фотонів); α – коефіцієнт поглинання. Залежність $\gamma_{\text{ф}}$ від інтенсивності світла при стаціонарному освітленні має вигляд:

$$\gamma_{\text{ф}} = e\alpha\eta\Phi(\tau_n\mu_n + \tau_p\mu_p). \quad (18)$$

Якщо один з членів в дужках співвідношення (18) значно більше іншого (за рахунок різниці в величинах рухливості або часу життя електронів і дірок), то фотопровідність визначається носіями одного знака і називається монополярною (наприклад електронною). В цьому випадку

$$\gamma_{\text{ф}} = e\alpha\eta\Phi\tau_n\mu_n. \quad (19)$$

Величина τ визначається умовами рекомбінації носіїв заряду в

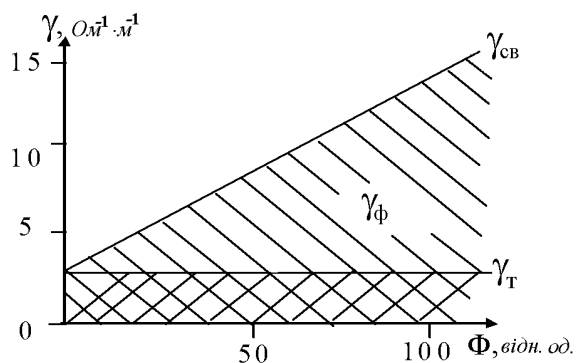


Рисунок 5 – Теоретичний графік фотопровідності напівпровідника з лінійною рекомбінацією

напівпровіднику і залежить від багатьох факторів.

Досліджуючи залежність $\gamma_{\text{ф}}$ від інтенсивності світла Φ можна отримати

деякі відомості про умови рекомбінації носіїв у напівпровіднику. При освітленні напівпровідника монохроматичним світлом можна припустити, що $\alpha = \text{const}$ та $\eta = \text{const}$.

Тоді лінійна залежність γ_ϕ від Φ (див. рис. 5) означає, що час життя $\tau = \text{const}$, тобто не залежить від концентрації нерівноважних носіїв заряду. Це так звана **лінійна рекомбінація**.

Якщо залежність γ_ϕ від Φ **сублінійна**, тобто $\gamma_\phi \sim \Phi^a$, де $a < 1$, то це означає, що τ зменшується із зростанням інтенсивності світла, або, що одне і теж, зі зростанням концентрації нерівноважних носіїв заряду. Вона спостерігається при великих інтенсивностях освітлення, коли стає значною *поверхнева рекомбінація* носіїв заряду.

За деяких умов можлива **надлінійна** ($a > 1$) залежність γ_ϕ від Φ . Це означає, що τ зростає із зростанням інтенсивності світла, що обумовлено

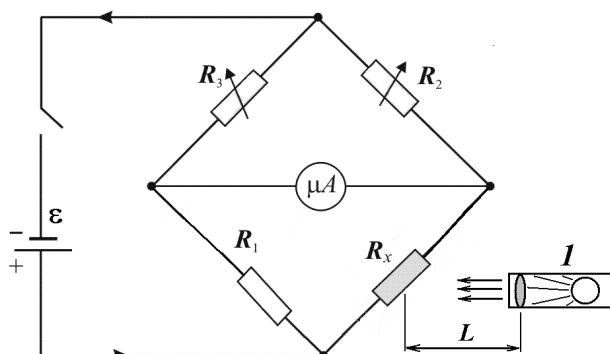


Рисунок 6, а – Схема моста Уїтстона для вивчення фотопровідності

рекомбінацією через домішкові центри захвату.

Явище фотопровідності в напівпровідниках широко використовується для вимірювання параметрів напівпровідникових матеріалів, а також в техніці для створення світлочутливих приладів – фоторезисторів.

3 Опис установки і методики вимірювань

Метод 1. Мостова схема установки для вимірювання фотопровідності показана на рис. 6, а.

Прилади та приладдя: Зразок напівпровідника з невідомим опором R_x ; освітлювач I ; джерело напруги ϵ ; мікроамперметр μA (нуль індикатор із нулем в середині шкали); резистор з відомим опором R_1 ; однодекадний магазин опорів R_2 ; трьохдекадний магазин опорів R_3 .

Мостова схема вимірів опорів є самим точним методом виміру опорів.

Мостом Уїтстона називається коло, зображене на рис. 6, складене із чотирьох гілок з опорами R_x , R_1 , R_2 , R_3 . Ці однорідні ділянки кола називаються *плечима моста*. В плече AB увімкнено невідомий опір R_x , який вимірюється у цій роботі. В плечі BC і CD увімкнено магазини опорів, отже R_3 і R_2 можна змінювати. Опір R_1 плеча AD постійний. Таким чином, опори R_1 , R_2 , R_3 відомі. У діагональ AC увімкнено джерело струму, у діагональ BD увімкнено мікроамперметр, який грає роль нуль-індикатора.

Зібрати міст Уїтстона, в одне з плечей якого включити зразок напівпровідника.. На магазині R_2 виставляємо такий опір, щоб $R_1/R_2 = 1/9$. При

рівновазі моста (струм через мікроамперметр не проходить) опір зразка розраховуємо за формулою

$$R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}. \quad (20)$$

Зразок поміщаємо перед освітлювачем I . Інтенсивність освітлення зразка змінюємо за рахунок зміни відстані L між зразком напівпровідника і лампочкою освітлювача.

Метод 2. Як метод вимірювання фотопровідності можна використовувати найбільш просту схему, що складається з ланцюга напівпровідникового зразка R_x сполученого з цифровим універсальним вимірювальним мультиметром 2 (використовується як Омметр) і освітлювача I (див. рис. 6,б). Зразок розташований перед освітлювачем. Інтенсивність освітлення зразка змінюється зі зміною відстані L між зразком і лампочкою освітлювача.

4 Обробка результатів вимірювань

Дивись пункт 4 лабораторної роботи № 6-9.

5 Порядок виконання роботи

1. Встановити максимальну відстань від спіралі лампочки до зразка. Виміряти темновий опір зразка R_T і розрахувати провідність в темряві γ_T :

$$\gamma_T = \frac{l}{R_T \cdot x \cdot b}, \quad (21)$$

де l , x , b – лінійні розміри зразка.

2. Включити освітлювач і, наближаючи лампочку освітлювача до зразка, через кожні 10 мм вимірювати опір освітленого зразка R_{CB} і розрахувати провідність напівпровідника на світлі γ_{CB} за формулою

$$\gamma_{CB} = \frac{l}{R_{CB} \cdot x \cdot b}. \quad (22)$$

3. Виміряти темновий опір зразка R_T' після всіх вимірів R_{CB} і розрахувати γ_T' (21). Результат може відрізнятись від отриманого в п.1 через нагрів зразка.

4. Побудувати графік залежності γ_{CB} від освітленості (дивись теоретичний графік на рис. 5). Освітленість вимірювати у відносних одиницях, вважаючи джерело світла ізотропним:

$$\Phi = \frac{400}{(r_{cm})^2}, \quad (23)$$

де r_{cm} – відстань від спіралі лампочки до зразка в сантиметрах.

5. Обчислити відносну зміну провідності (ефективність фотодетектора)

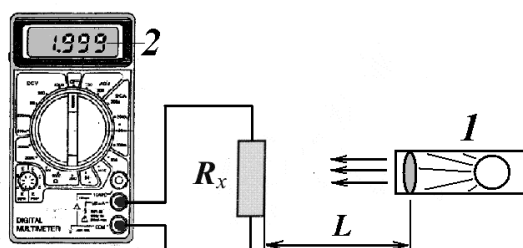


Рисунок 6, б – Простіша схема для вимірювання фотопровідності при мінімальній та максимальній освітленості:

$$K_{\min} = \frac{\gamma_{\text{CB}}^{\min}}{\gamma_{\text{T}}}; \quad K_{\max} = \frac{\gamma_{\text{CB}}^{\max}}{\gamma_{\text{T}}'}. \quad (24)$$

6. Порівняти отриманий експериментальний і теоретичний графіки (рис. 5) та зробити висновок про рекомбінацію фотоносіїв у зразку.

6 Контрольні питання

1. Що називається внутрішнім фотоефектом?
2. Що називається фотопровідністю речовини?
3. Як виникає власна фотопровідність?
4. Що називається червоною межею власної фотопровідності?
5. Який механізм домішкової фотопровідності?
6. Запишіть формулу для фотопровідності напівпровідника.
7. Запишіть формулу для стаціонарної концентрації нерівноважних носіїв і стаціонарної фотопровідності.
8. Яка фотопровідність називається монополярною? Запишіть формулу для монополярної провідності.
9. Яка може бути залежність фотопровідності напівпровідника від інтенсивності світла? Які висновки можна зробити з цієї залежності?

7 Зміст протоколу

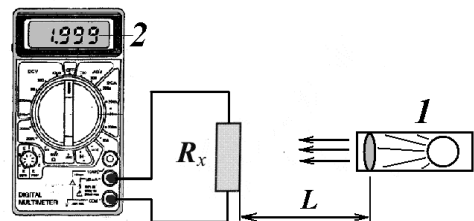
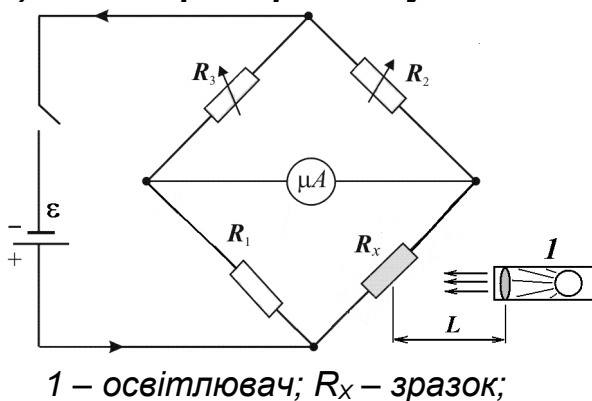
Лабораторная работа № 8-5

I. Домашнє завдання

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 6-9.

- 1) **Тема:** Вивчення фотопровідності однорідних напівпровідників
- 2) **Мета роботи:**
 1. Вивчення основних положень теорії внутрішнього фотоефекту.
 2. Ознайомлення з методикою дослідження фотоелектричних властивостей напівпровідника.
 3. Побудова графіка фотопровідності з метою виявлення механізму рекомбінації нерівноважних носіїв заряду.

3) Схема пристрою чи установки:



L – відстань між зразком та освітлювачем,
2 – цифровий мультиметр.

4) Таблиця приладів

№	Найменування	Тип	Заводський №	Межа шкали	Ціна поділки	Клас точності (абс. пох.)
1.	Цифровий мультиметр	DT-830B	-	200 Ω	0,1 Ω	0,8
				2000 Ω	1 Ω	0,8
2	Лінійка	У	-		1 мм	0.5 мм

5) Формули розрахунків величин та їх похибок:

1. Питома електропровідність зразка:

$$\gamma = \frac{l}{R \cdot x \cdot b},$$

де l , x , b – довжина, ширина та товщина зразка; R – опір зразка.

2. Відносна освітленість:

$$\Phi = \frac{400}{(r_{cm})^2},$$

де r_{cm} – відстань від спіралі лампочки до зразка в сантиметрах.

3. Відносна фотопровідність зразка за мінімальної освітленості:

$$K_{min} = \frac{\gamma_{CB}^{min}}{\gamma_T},$$

де γ_{CB}^{min} – електропровідність зразка на світлі; γ_T – електропровідність зразка без освітлення на максимальній відстані r_{cm} .

4. Відносна фотопровідність зразка за максимальної освітленості:

$$K_{max} = \frac{\gamma_{CB}^{max}}{\gamma_{T'}},$$

де γ_{CB}^{max} – питома електропровідність зразка на світлі; $\gamma_{T'}$ – питома електропровідність зразка без освітлення на мінімальній відстані r_{cm} .

6) Вимірювання: Номер зразка; $l = \dots$ мм; $x = \dots$ мм; $b = \dots$ мм

Таблиця вимірювань

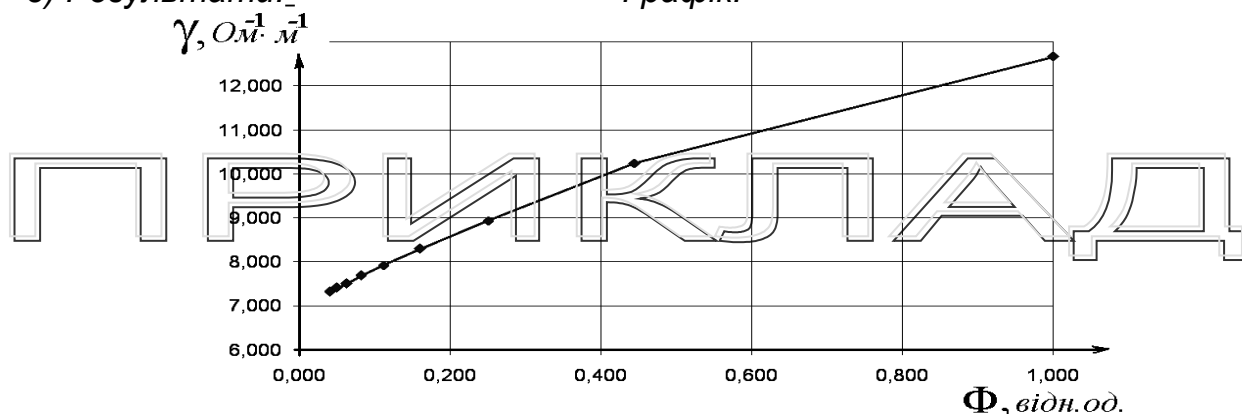
	r , мм	R , Ом	Φ , відн.од.	γ , (Ом·м) ⁻¹	
Темн.	100				γ_T
	100				γ_{CB}^{min}
	90				
	80				
	70				
	60				
	50				
	40				
	30				
	20				
	10				γ_{CB}^{max}
Темн.	10				$\gamma_{T'}$

7) **Розрахунки величин:**

$$K_{\max} = \dots ; \quad K_{\min} = \dots ;$$

8) **Результати:**

Графік:



Результати розрахунків:

$$K_{\min} = \dots ; \quad K_{\max} = \dots .$$

9) **Висновок:** залежність $\gamma_{\Phi} \sim \Phi^{\alpha}$ сублінійна ($\alpha < 1$), рекомбінація поверхнева. Ефективність фотодетектора більша при ...

10) **Роботу виконав(а):** _____ (прізвище чітко).

Роботу перевірів:

11) **Дата.**

Лабораторна робота № 6-10

ВИВЧЕННЯ ФОТОЕФЕКТУ В *p-n*-ПЕРЕХОДІ

1 Мета роботи

Ознайомлення з фотоефектом у *p-n*-переході і вимірювання темнових і світлових вольтамперних характеристик.

2 Ключові положення

Вентильний фотоефект полягає у виникненні фото- е.р.с. у вентильному (тобто випрямлювальному) контакті при його освітленні. Найбільше практичне застосування має вентильний фотоефект, що спостерігається в *p-n*-переході. Такий перехід виникає звичайно у внутрішній області кристалічного напівпровідника, де змінюються тип легованої домішки (з донорної на акцепторну) і пов'язаний з цим тип провідності (з електронної на діркову).

Якщо контакт між напівпровідниками *p*- і *n*-типу є відсутній, то рівні Фермі на їхніх енергетичних схемах розташовані на різній висоті, причому в напівпровіднику *p*-типу – ближче до валентної зони, у напівпровіднику *n*-типу – ближче до зони провідності.

При виникненні контакту (рис. 7,а) відбувається обмін носіями заряду, внаслідок якого рівні Фермі вирівнюються. У приконтатній області утворюється так званий запірний шар, збіднений основними носіями заряду: електронами – з боку електронного напівпровідника, дірками – з боку діркового напівпровідника. Іони домішок цього шару створюють позитивний об'ємний заряд у n -області і від'ємний – у p -області. Між p - і n -областями виникає контактна різниця потенціалів $\Delta\Phi$, що перешкоджає руху основних носіїв, оскільки, щоб пройти через p - n -перехід, основні носії повинні подолати

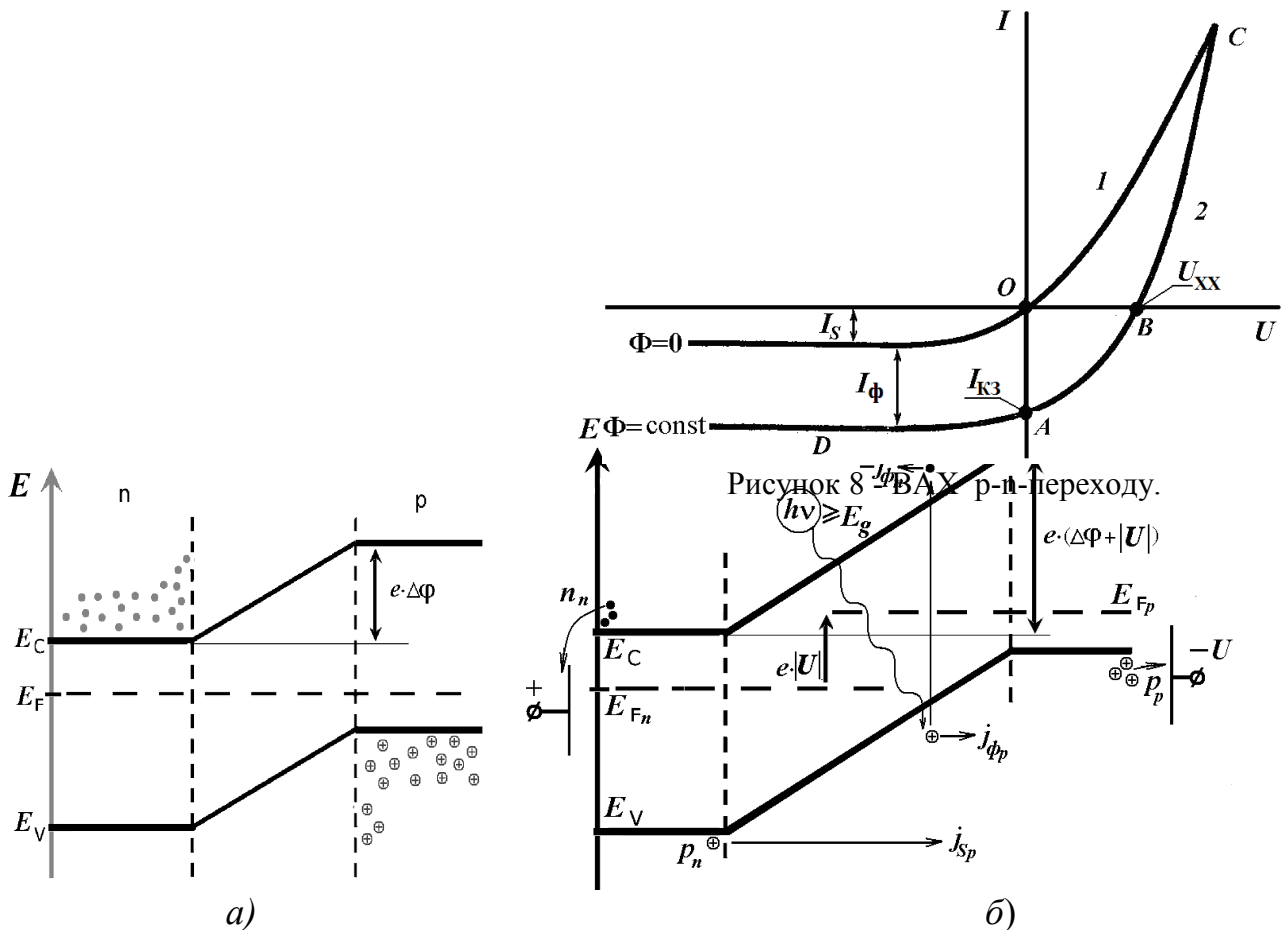


Рисунок 7 – p - n -перехід та фотогенерація носіїв заряду в p - n -переході

потенційний бар'єр $e \cdot \Delta\Phi$.

Якщо за час відсутності освітлення замкнути зовнішні кінці двох областей p - n -переходу, то струму в колі не буде. Це означає, що у стані рівноваги сумарний струм, створений рухом основних і неосновних носіїв через контактний перехід, дорівнює нулю.

Підімкнення до p - n -переходу зовнішньої напруги *прямої полярності* (плюс – з боку p -напівпровідника, мінус – з боку n -напівпровідника) призводить до зменшення потенційного бар'єру (рис. 1,б). Число основних носіїв, здатних проникнути через p - n -перехід, зростає, потік неосновних носіїв при цьому не змінюється. Через контакт йде струм j у прямому напрямку.

Якщо на перехід подати *від'ємне зміщення* (рис. 7,б), то зовнішнє поле зворотної полярності складається з внутрішнім полем запірного шару. При цьому для струму дифузії основних носіїв виникає більший опір. Через контакт

йде струм зворотного напрямку j_{sn} та j_{sp} , набагато разів менший за струм при прямому зміщенні. При зворотній напрузі перехід основних носіїв через контакт припиняється тому, що вони рухаються в напрямку контактів (екстракція). Зворотний струм, створюваний тепер лише неосновними носіями, досягає свого насичення j_s .

Вольтамперна характеристика неосвітленого p - n -переходу подана на рис. 8 (крива 1). Вона може бути описана таким виразом:

$$I = I_s \left(\exp \left[\frac{eU}{kT} \right] - 1 \right), \quad (25)$$

де I_s – струм насичення неосвітленого p - n -переходу, k – постійна Больцмана, e – заряд електрона, T – абсолютна температура, U – напруга зовнішнього поля.

Нехай тепер на p - n -перехід падає світло, енергія фотонів якого не менше за ширину забороненої зони напівпровідника. Внаслідок внутрішнього фотоефекту виникають електронно-діркові пари, концентрація яких зменшується в міру віддалення від освітленої поверхні. Електрони й дірки переміщуються до контактного переходу, де відбувається їхній розподіл: основні носії області затримуються контактним полем, неосновні – прискорюються і вільно проходять через p - n -перехід, утворюючи фотострум I_ϕ , що тече у зворотному напрямку (від n -області до p -області).

Якщо коло розімкнемо $U=0$, то на межах p - n -переходу накопичується об'ємний заряд, що перешкоджає руху неосновних носіїв. Виникає фото-е.р.с. $U_{\text{ХХ}}$, полярність якої є зворотна до полярності контактної різниці потенціалів рис. 8 (точка В). Потенційний бар'єр запірного шару зменшується подібно як на рис. 1,б). Це, у свою чергу, спричиняє появу так званого струму витікання I_y , що тече у прямому напрямку. Величина фото-е.р.с. зростає доти, поки зростаючий струм основних носіїв I_y не скомпенсує фотострум I_ϕ .

Замкнемо p - n -перехід на навантажувальний опір r_H (рис. 9). По колу потече струм I , який можна подати як суму двох протилежних струмів:

$$I = I_\phi - I_y. \quad (26)$$

Струм витікання I_y розраховується за формулою (25) для неосвітленого p - n -переходу, коли до нього прикладена зовнішня напруга $U = I \cdot r_H$ в прямому

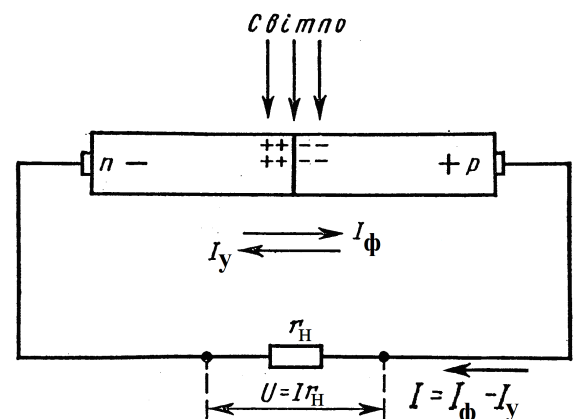


Рисунок 9 – Схема роботи фотоелемента

напрямку:

$$I_y = I_s \exp\left[\frac{eU}{kT}\right]. \quad (27)$$

У режимі короткого замикання ($r_H = 0$) буде $U=0$, $I_y=0$, струм $I_{КЗ}$ зовнішнього кола дорівнює фотострумові, який у свою чергу, є пропорційний інтенсивності світла Φ :

$$I_{КЗ} = I_\Phi; \quad I_\Phi \sim \Phi. \quad (28)$$

У режимі холостого ходу коло розімкнено ($r_H = \infty$), напруга холостого ходу $U_{ХХ} = U_\Phi$, $I = 0$, $I_\Phi = I_y$. З формули (25) отримаємо:

$$I_\Phi = I_s \left(\exp\left[\frac{eU_{ХХ}}{kT}\right] - 1 \right), \quad (29)$$

звідки випливає, що

$$U_\Phi = U_{ХХ} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_\Phi}{I_s}\right). \quad (30)$$

Таким чином, вентильні фотоелементи дозволяють здійснити безпосереднє перетворення променевої енергії на електричну, тому їх також називають *фотогальванічними елементами*.

Вольт-амперну характеристику освітленого p - n -переходу подано на рис. 8 (крива 2). Відрізок OA ($U=0$) відповідає струму короткого замикання ($r_H = 0$), відрізок OB ($I=0$) – величині напруги холостого ходу ($r_H = \infty$). При зміні зовнішнього навантаження від 0 до ∞ отримаємо ділянку AB , яка і являє собою власне вольт-амперну характеристику p - n -переходу у фотогальванічному режимі при постійній інтенсивності світла Φ . Ділянка BC характеризує роботу фотоелемента при поданні на p - n -перехід прямої зовнішньої напруги, ділянка AD – зворотної зовнішньої напруги (фотодіодний режим роботи).

При зміні світлового потоку, а, отже, й освітленості, вольтамперні характеристики зміщуються, форма їхня змінюється. Сімейство вольтамперних характеристик вентильного фотоелемента у фотогальванічному режимі за

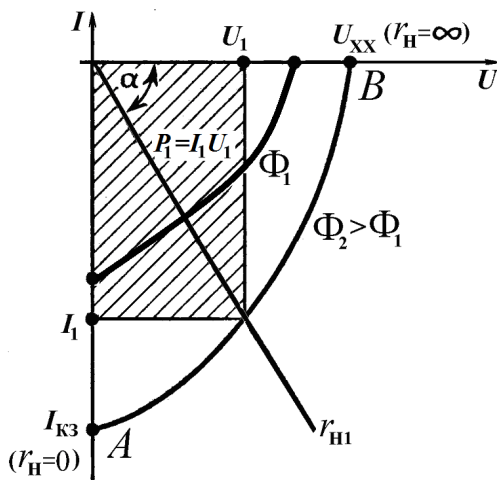


Рисунок 10 – ВАХ фотоелемента за різних освітленостей

різних освітленостей подано на рис. 10. Пряма, проведена з початку координат під кутом α (що визначається величиною опору навантаження $\operatorname{ctg}\alpha = r_{\text{Н}} = U_1 / I_1$), перетинає характеристику в точці, абсциса якої дає значення падіння напруги на навантаженні, а ордината – струм у зовнішньому колі (наприклад, $U_1 = I_1 \cdot r_{\text{Н}}$). Площа, заштрихована на рисунку, є пропорційна електричній потужності $P_{\text{ЕЛ}}$, що виділяється на навантаженні $r_{\text{Н}}$:

$$P_{\text{ЕЛ}} = U_1 \cdot I_1. \quad (31)$$

Коефіцієнт корисної дії фотогальванічного елемента η визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{P_{\text{ЕЛ}}}{P_{\text{СВ}}}, \quad (32)$$

де $P_{\text{СВ}}$ – потужність падаючого на ФД світла, $P_{\text{ЕЛ}}$ – електрична потужність ФД.

Оптимальний опір навантаження $r_{\text{Н.опт}}$ обирається так, щоб $P_{\text{ЕЛ}}$ або η був максимальним.

3 Опис установки і методики вимірювань

Схема установки подана на рис. 11.

Прилади та приладдя: ФД – кремнієвий фотодіод який досліджується, СВД – джерело світла регульованої інтенсивності (це може бути СВД, ввімкнений, як у роботі 6-9), R_3 – магазин опорів, mA – міліамперметр для вимірювання фотоструму, V – вольтметр.

Після виконання роботи № 6-9 ми маємо СВД з відомою характеристикою інтенсивність світла – сила струму. Задаючи значення струму, ми отримуємо світловий сигнал відомої інтенсивності за фіксованої довжини хвилі.

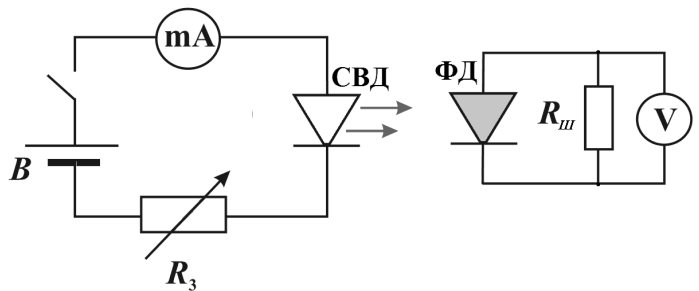


Рисунок 11 – Схема установки для вимірювання фотоструму

Змінюючи шунтуючий опір від 0 до ∞ , змінюємо режим роботи фотодіода від короткого замикання до холостого ходу. Повний навантажувачий опір фотодіода отримуємо з урахуванням опора вольтметра:

$$r_{\text{Н}} = \frac{R_{\text{ш}} \cdot R_{\text{V}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{V}}} \quad (33)$$

Потужність фотодіода обчислюється за формулою (31) і коефіцієнт корисної дії – за формулою (32).

4 Обробка результатів вимірювань

Дивись пункт 4 лабораторної роботи № 6-9.

5 Порядок виконання роботи

1. Перевірити правильність схеми вимірювань.

2. Задати значення струму СВД 10 мА і, змінюючи шунтуючий опір $R_{\text{ш}}$ від ∞ до 0 , спостерігати за зміненнями показників вольтметра. Підібрати шунтуючий опір $R_{\text{ш}}$ таким, щоб спочатку напруга на ФД мала максимальне значення U_{max} та записати в таблицю значення $R_{\text{ш}}$ і U_{max} . Потім послідовно для показників вольтметра $0,9; 0,8; 0,7; 0,5; 0,25$ від U_{m} , виміряти напругу і записати в таблицю значення $R_{\text{ш}}$ і U_{max} .

3. Виміряти напругу холостого ходу (близьку до цього величину) при вимкненому магазині опорів.

4. Повторити п.2 і 3 для значень струму СВД $10, 30$ і 40 мА .

5. Розрахувати силу фотоструму

$$I_{\text{ФД}} = \frac{U}{R_{\text{H}}} \quad (34)$$

6. Побудувати сімейство вольтамперних характеристик для двох значень інтенсивностей світла (наприклад, $I_{\text{СВД}} = 10\text{ мА}$ і $I_{\text{СВД}} = 30\text{ мА}$).

7. Із роботи 6-9 беруть величини світової потужності $P_{\text{СВ}}$, відповідні до $I_{\text{СВД}} = 10\text{ мА}$ і $I_{\text{СВД}} = 30\text{ мА}$, та розраховують ефективність η (32) фотоелемента

8. Побудувати графіки ефективність-опір навантаження і знайти для кожної інтенсивності світла оптимальний опір навантаження, відповідні до максимальної ефективності.

9. Прокоментувати здобуті результати і зробити висновки: який максимальний струм може генерувати ФД, яку максимальну напругу, який оптимальний опір навантаження при різних освітленні.

6 Контрольні питання

1. Як виникає фотоефект у p - n -переході?
2. Які граничні режими роботи фотоелемента є можливими?
3. Як залежить фотострум короткого замикання від інтенсивності світла?
4. Як залежить фотонапруга холостого ходу від інтенсивності світла?
5. Що таке оптимальне навантаження фотоелемента?
6. Що таке коефіцієнт корисної дії фотоелемента?
7. Що таке червона межа фотоефекту?
8. Який вигляд мають темнові та світлові ВАХ p - n -переходу?

7 Зміст протоколу

Лабораторна робота № 6-10

I. Домашнє завдання

...

II. Протокол виконання лабораторної роботи № 6-10

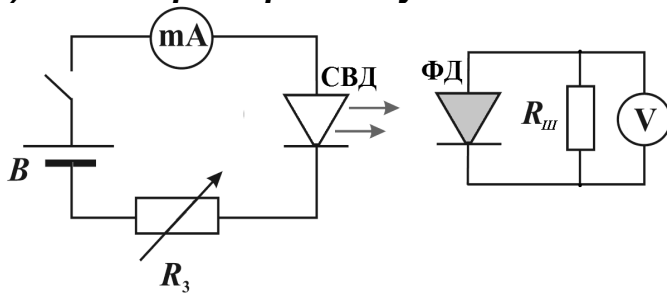
1) **Тема:** Вивчення фотоефекту в р-п-переході

2) **Мета роботи:**

1. Ознайомлення з фотоефектом в р-п-переході.

2. Вимірювання темнових та світлових вольтамперних характеристик.

3) **Схема пристрою чи установки**



СВД – світловипромінювальний діод,
ФД – фотодіод,
В – джерело живлення,
R₃ – магазин опорів,
R_ш – шунтуючий опір,
mA – міліамперметр,
V – вольтметр.

4) **Таблиця приладів:**

№	Найменування	Тип	Зав. №	Межа шкали	Ціна поділки	Клас точності i
1.	Міліамперметр	M906		25 mA	1 mA	1
2.	Вольтметр(мультиметр)	DT-830B		200 mV	0.1 mV	0.5
				2000 mV	1 mV	
3.	Магазин опорів R ₃	P33	-	9999 Ω	1 Ω	0,2
4.	Шунтуючий опір R _ш	P33	-	9990 Ω	10 Ω	0,2

Приладдя: світловипромінювальний діод, фотодіод.

5) **Формули розрахунку величин:**

1. Навантажуючий опір фотодіода:

$$R_H = \frac{R_{ш} \cdot R_V}{R_{ш} + R_V},$$

де R_ш – шунтуючий опір, R_V = 2000 kΩ – опір вольтметра.

2. Фотострум:

$$I_{ФД} = \frac{U}{R_H},$$

де U – напруга на фотодіоді, R_H – навантажуючий опір.

3. Потужність на навантажуючому опорі фотодіода:

$$P_{ФД} = I_{ФД} \cdot U,$$

де I_{ФД} – фотострум; U – напруга на фотодіоді.

4. Ефективність фотодіода:

$$\eta = \frac{P_{\text{ФД}}}{P_{\text{СВ}}},$$

де $P_{\text{ФД}}$ - потужність на навантажуючому опорі фотодіода,
 $P_{\text{СВ}}$ – потужність падаючого світла.

6) **Вимірювання:** $R_V = 2000 \text{ k}\Omega$.

Таблиця вимірювань

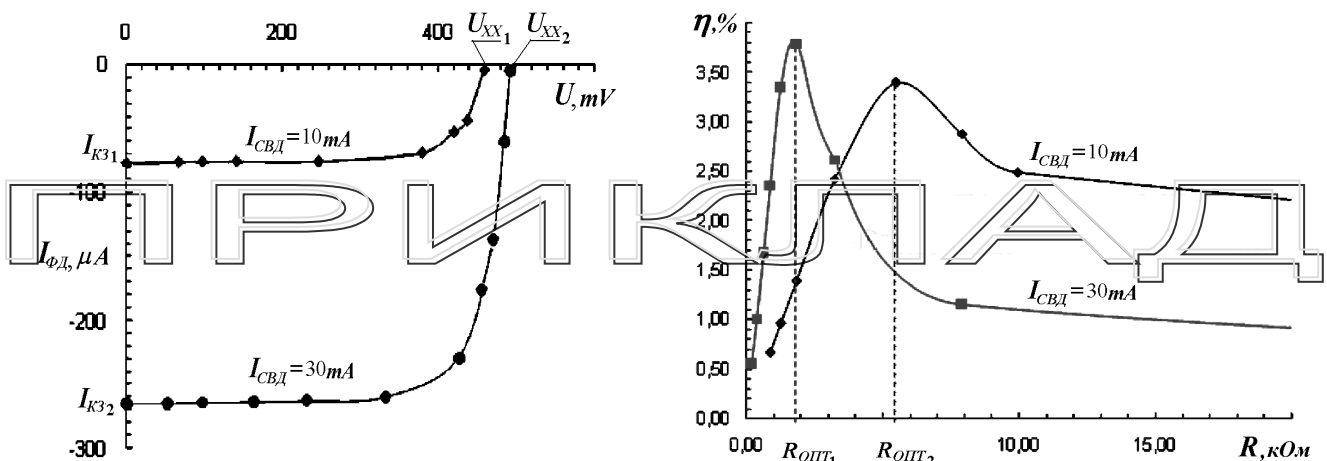
№	$I_{\text{СВ}}, \text{мА}$	$P_{\text{СВ}}, \text{мВт}$	$R_{\text{ш}}, \text{кОм}$	$R_{\text{Н}}, \text{кОм}$	$U, \text{мВ}$	$I_{\text{ФД}}, \text{мкА}$	$P_{\text{ЕЛ}}, \text{мВт}$	η
1.	10		99,99					
2.			10					
3.			7,97					
4.			5,5					
5.			3,26					
6.			1,86					
7.			1,28					
8.			0,88					
9.	30		99,99					
10.			7,97					
11.			3,26					
12.			1,86					
13.			1,28					
14.			0,88					
15.			0,62					
16.			0,37					
17.			0,2					

7) **Розрахунок величин:**

$R_{\text{Н}} = \dots \text{кОм}; U = \dots \text{мВ}; I_{\text{ФД}} = \dots \text{мкА}; P = \dots \text{мВт}.$

8) **Результати:**

Графіки:



Вольтамперна характеристика фотодіода при окремих освітленнях

Ефективність фотодіода в залежності від навантажуючого опору

Результати розрахунків: $U_{\text{ХХ1}} = \dots \text{В}; I_{\text{КЗ1}} = \dots \text{мкА}; R_{\text{ОПТИМ1}} = \dots \text{кОм};$
 $U_{\text{ХХ2}} = \dots \text{В}; I_{\text{КЗ2}} = \dots \text{мкА}; R_{\text{ОПТИМ2}} = \dots \text{кОм};$

9) **Висновок:** По характеристикам фотодіода ми встановили, що при більшій освітленості навантажуючий опір має бути ...

10) **Роботу виконав(а):** _____ (прізвище чітко).

Роботу перевірів:

11) **Дата.**

Лабораторная работа № 6-9 ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИОДА

1 Цель работы:

Изучение преобразования электрической энергии в световую светоизлучающим диодом и измерение его электрических и световых характеристик.

2 Ключевые положения

В устройствах оптической связи в качестве источников света используются чаще всего светоизлучающие диоды (СИД), работающие в режиме спонтанного (светодиод) или стимулированного (лазер) излучения. Рассмотрим работу такого диода.

Явление излучения света при протекании тока называется *электролюминесценцией*, а излучение света при протекании прямого тока через *p-n-переход* – *инжекционной электролюминесценцией*.

На рис. 1,а показана зонная диаграмма *p-n-перехода* в отсутствие внешнего смещения, а на рис. 1,б – при прямом смещении. При приложении напряжения прямого смещения U высота потенциального барьера уменьшается на величину $e \cdot U$, вследствие чего начинают течь диффузионные токи электронов – из *n-области* в *p-область* и дырок – из *p-области* в *n-область* (инжекция). Инжектированные из *n-области* электроны, являясь в *p-области*

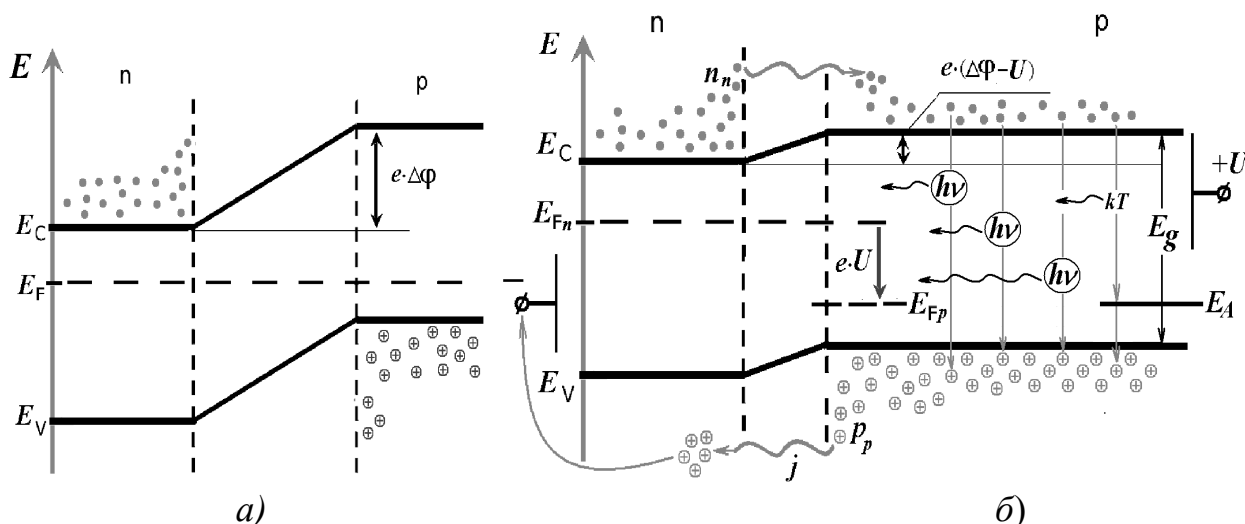


Рисунок 1 – *p-n-переход* и электролюминесценция в *p-n-переходе*

неосновными и неравновесными, рекомбинируют с дырками либо безызлучательно с выделением лишь тепловой энергии kT , либо с излучением фотона с энергией $h\nu = E_g$.

Доля излучательной рекомбинации в СИД должна быть достаточно

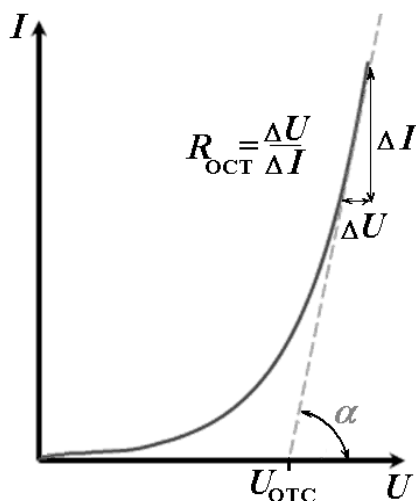


Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика СИД

большой.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) СИД $I_{\text{сид}} = f(U_{\text{сид}})$ имеет вид, типичный для диода (рис. 2), и может быть охарактеризована токовым напряжением отсечки $U_{\text{отс}}$ и остаточным сопротивлением $R_{\text{ост}}$. Токовое напряжение отсечки получают экстраполяцией линейного участка ВАХ к нулю тока. Оно близко по значению к контактной разности потенциалов. Остаточное сопротивление $R_{\text{ост}}$ определяют как котангенс угла наклона линейного участка ВАХ.

Световой характеристикой СИД является зависимость мощности излучения от тока $\Phi_{\text{сд}} = f(I)$. Обычно эта характеристика сублинейна на малых токах и линейная – на больших. На малых токах большую роль играют каналы безызлучательной рекомбинации, а на больших токах некоторые из этих каналов насыщаются, что и приводит к увеличению эффективности СИД.

3 Описание установки и методики измерений

Схема установки для измерения характеристик СИД показана на рис. 3.

Приборы и принадлежности: СИД – исследуемый светоизлучающий диод, ФД – фотодиод для измерения мощности излучения СИД, B – батарея питания схемы, mA – миллиамперметр для измерения тока через СИД, V – вольтметр для измерения напряжения на СИД, μA – микроамперметр для измерения тока ФД.

Светоизлучающий диод и фотодиод располагаются в светонепроницаемой трубочке друг напротив друга вплотную. С помощью магазина сопротивлений R ступенчато задается ток прямого смещения СИД и измеряется ток фотодиода с известной чувствительностью. Предельное значение тока СИД около 50 mA , так как ограничено внутренним сопротивлением батареи.

По измеренным данным строится ВАХ и световая характеристика. Для измерения $U_{\text{отс}}$ продлевается линейный участок ВАХ до пересечения с осью напряжений: точка пересечения и даст токовое напряжение отсечки. Для определения $R_{\text{ост}}$ берут произвольный интервал напряжений в пределах линейного участка ВАХ и делят его на соответствующий интервал токов.

Для СИД эффективность преобразования электрической энергии в световую характеризует две величины:

- *Энергетическая эффективность*

$$\eta_{\text{ЭН}} = \frac{P_{\text{СВ}}}{P_{\text{ЭЛ}}} = \frac{I_{\text{ФД}}}{S_{\text{ФД}} \cdot I_{\text{СИД}} \cdot U_{\text{СИД}}}, \quad (1)$$

где в числителе дроби $P_{\text{СВ}} = I_{\text{ФД}} / S_{\text{ФД}}$ – излученная СИД световая мощность, которую в данной лабораторной работе определяем по $I_{\text{ФД}}$ – току через фотодиод и $S_{\text{ФД}}$ – чувствительности фотодиода в мкА/мВт , а в знаменателе $P_{\text{ЭЛ}} = I_{\text{СИД}} U_{\text{СИД}}$ – потребленная светодиодом электрическая мощность, которая определяется по $I_{\text{СИД}}$ – току через СИД и $U_{\text{СИД}}$ – напряжению на нем.

- *Квантовая эффективность*

$$\eta_{\text{КВ}} = \frac{N_{\text{ф}}}{N_e} = \frac{P_{\text{СВ}} \cdot e}{h\nu \cdot I_{\text{СИД}}} = \frac{P_{\text{СВ}} \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot I_{\text{СИД}}}, \quad (2)$$

где в числителе $N_{\text{ф}} = P_{\text{СВ}} / h\nu$ – число излучённых СИД фотонов, которое определяется по $P_{\text{СВ}}$ – излученной СИД световой мощности, h – постоянной Планка, $\nu = c/\lambda$ – частоте света, λ – длине световой волны и c – скорости света, а в знаменателе $N_e = I_{\text{СИД}} / e$ – число носителей заряда, прошедших через p - n -

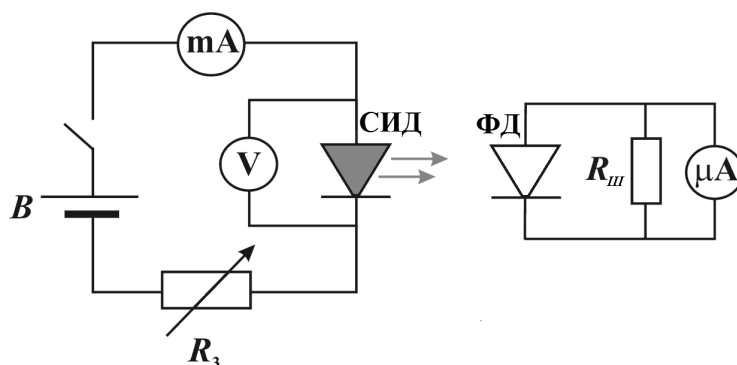


Рисунок 3 – Схема для измерения характеристик СИД

переход светодиода, которое определяется по $I_{\text{СИД}}$ – току через СИД и e – заряд электрона.

Энергетическая и квантовая эффективности являются близкими по значению величинами, так как энергия фотона близка к значению ширины запрещенной зоны, а приложенное напряжение близко к ширине запрещенной зоны, деленной на заряд электрона.

4 Обработка результатов измерений

4.1 Для получения результата **прямых измерений** величины x необходимо:

1) Экспериментально определить n раз значения измеряемой величины ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) и записать результат этих измерений во втором столбце таблицы измерений (см. пример оформления протокола в конце каждой работы). В первом столбце таблицы измерений записывается порядковое число измерения.

2) Вычислить **среднее значение** измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3)$$

3) Найти **отклонение** Δx_i каждого значения измеряемой величины от среднего значения и записать результаты в третьем столбце таблицы измерений:

$$\Delta x_1 = \langle x \rangle - x_1; \quad \Delta x_2 = \langle x \rangle - x_2; \quad \dots; \quad \Delta x_n = \langle x \rangle - x_n. \quad (4)$$

4) Возвести каждое отклонение в квадрат, и записать в четвертом столбце таблицы измерений. Затем просуммировать эти квадраты:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 = (\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2. \quad (5)$$

5) Найти абсолютную **статистическую погрешность** результатов измерения $\Delta x_{\text{СТ}}$ с помощью формулы Стьюдента:

$$\Delta x_{\text{СТ}} = t_{\alpha, n} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (6)$$

где α – доверительная вероятность; n – число измерений; $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента.

6) Записать указанную на приборе абсолютную **приборную погрешность** $\Delta x_{\text{ПР}}$.

На шкале электроизмерительных приборов вместо абсолютной погрешности указан в виде десятичной дроби **класс точности** – относительная погрешность прибора в процентах на всем пределе шкалы измерений:

$$\beta \% = \frac{\Delta x_{\text{ПР}}}{x_{\text{max}}} \cdot 100.$$

Поэтому **абсолютная погрешность** электроизмерительного прибора определяется по указанному на шкале прибора классу точности β :

$$\Delta x_{\text{ПР}} = \frac{\beta \% \cdot x_{\text{max}}}{100}, \quad (7)$$

где x_{max} – предел шкалы измерительного прибора.

7) Найти **полную абсолютную погрешность** измерений

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{СТ}})^2 + (\Delta x_{\text{ПР}})^2} \quad (8)$$

Если при измерениях было использовано несколько приборов, то при расчете полной погрешности в (8) под корнем надо прибавить квадраты абсолютных погрешностей всех приборов измерения.

8) Вычислить **относительную погрешность** измерений величины x :

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} . \quad (9)$$

9) Записать **конечный результат** в виде **доверительного интервала** и **относительной погрешности** в процентах:

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta x)_\alpha = (\dots \pm \dots)_{0.95}; \quad \delta_x \% = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\% = \dots \% . \quad (10)$$

4.2 Для получения результата **косвенного измерения** величины y необходимо:

1) Вычислить **среднее значение** измеряемой величины $\langle y \rangle$ по формуле, подставляя в нее средние значения измеренных величин $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$, например:

$$\langle y \rangle = \frac{8 \langle a \rangle^4 \cdot \langle b \rangle^{2/3}}{7 \langle c \rangle^5} . \quad (11)$$

2) Вычислить **относительную погрешность** измеряемой величины δ_y как сумму квадратов относительных погрешностей измеренных величин δ_a , δ_b , δ_c с коэффициентами, равными показателям степени с которыми эти величины входят в рабочую формулу. Для нашего примера (11) – это 4, 2/3 и 5 соответственно для δ_a , δ_b и δ_c :

$$\delta_y = \sqrt{(4\delta_a)^2 + \left(\frac{2}{3}\delta_b\right)^2 + (5\delta_c)^2} = \sqrt{\left(4\frac{\Delta a}{\langle a \rangle}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\frac{\Delta b}{\langle b \rangle}\right)^2 + \left(5\frac{\Delta c}{\langle c \rangle}\right)^2} , \quad (12)$$

где Δa , Δb , Δc – абсолютные погрешности измеренных величин; $\langle a \rangle$, $\langle b \rangle$, $\langle c \rangle$ – их средние значения.

3) Найти **абсолютную погрешность** измеряемой величины

$$\Delta y = \langle y \rangle \times \delta_y . \quad (13)$$

4) Записать **конечный результат** в виде **доверительного интервала** и **относительной погрешности** в процентах:

$$y = (\langle y \rangle \pm \Delta y)_\alpha = (\dots \pm \dots)_{0.95}; \quad \delta_y \% = \delta_y \cdot 100\% = \dots \% . \quad (14)$$

5 Порядок выполнения работы

1. Проверить правильность сборки схемы и полярность присоединения СИД и ФД.

2. С помощью магазина сопротивлений R установить ток через СИД по миллиамперметру 5 мА и записать в таблицу показания всех приборов. Измерения проделать при токах через 5 мА до 50 мА . При необходимости использовать шунт микроамперметра.

3. Построить график ВАХ $I_{\text{сид}} = f(U_{\text{сид}})$ и определить $R_{\text{ост}}$ и $U_{\text{отс}}$, как было указано на рис. 8.

4. По формулам (1) и (2) вычислить энергетическую эффективность $\eta_{\text{ЭН}}$ и квантовую эффективность $\eta_{\text{КВ}}$ для всех измеренных токов и построить

соответствующие графики вместе с графиком $P_{\text{св}}$.

5. Записать результаты вычисления электрических параметров СИД ($U_{\text{сид}}$, $P_{\text{эл}}$ и $P_{\text{св}}$), энергетической $\eta_{\text{ЭН}}$ и квантовой $\eta_{\text{КВ}}$ эффективности для максимального тока.

6. Сделать выводы об оптимальном режиме СИД (режим максимальной световой мощности, максимальной эффективности).

6 Контрольные вопросы

1. Как образуется р-п-переход и когда он проводит электрический ток, а когда не проводит?
2. Как преобразуется в СИД электрическая энергия в световую?
3. Что такое энергетическая и квантовая эффективность СИД?
4. Какие параметры можно определить из ВАХ?
5. Как зависят световые характеристики СИД от тока?

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 6-9

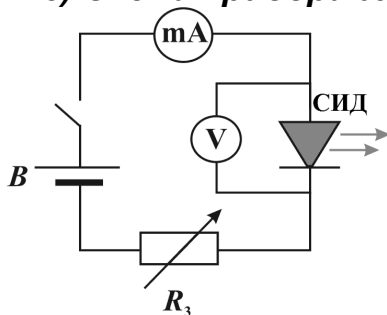
I. Домашнее задание

II. Протокол выполнения лабораторной работы № 6-9

1) Тема: Изучение светоизлучающего диода

2) **Цель работы:** Изучение преобразования электрической энергии в световую светоизлучающим диодом и измерение его электрических и световых характеристик.

3) Схема прибора или установки



СИД – светодиод,
ФД – фотодиод,
В – источник питания,
мА – миллиамперметр;
 R_3 – магазин сопротивлений,
 $R_{\text{ш}}$ – шунтирующее сопротивление,
V – вольтметр.

4) Таблица приборов:

№	Наименование	Тип	Заводской №	Предел шкалы	Цена деления	Класс точности
1.	Миллиамперметр	M906		25 мА	1 мА	1,0
2.	Микроамперметр	M906		1000 мкА	40 мкА	1,0
3.	Вольтметр	M906		5 В	0,2 В	1,5
4.	Магазин R_3	P333	-	9999 Ом	1 Ом	0,2

5) Формулы расчета величин:

1. Электрическая мощность светодиода:

$$P_{\text{эл}} = I_{\text{сид}} U_{\text{сид}},$$

где $I_{\text{сид}}$ – ток через светодиод, $U_{\text{сид}}$ – напряжение на нем.

2. Излученная световая мощность

$$P_{\text{св}} = \frac{I_{\text{фд}}}{S_{\text{фд}}},$$

где $I_{\text{фд}}$ – ток через фотодиод, $S_{\text{фд}}$ – его чувствительность.

3. Электрическая эффективность светодиода:

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{P_{\text{св}}}{P_{\text{эл}}} \cdot 100\%;$$

4. Квантовая эффективность светодиода:

$$\eta_{\text{кв}} = \frac{N_{\text{ф}}}{N_{\text{е}}} \cdot 100\% = 76,4 \cdot \frac{P_{\text{св}}}{I_{\text{сид}}} \%$$

6) Измерения:

$S = \dots \text{мкА} / \text{мВт}$ - чувствительность фотодиода (написано на коробочке)

$R_{\text{ш}} = 1 \text{ кОм}$ (предел шкалы 500 мкА); $R_{\text{ш}} = 500 \text{ Ом}$ (предел шкалы 1000 мкА).

$\lambda = \dots \text{нм}$ – длина волны,

Таблица измерений

№	$I_{\text{сид}},$ мА	$I_{\text{фд}},$ мкА	$U_{\text{сид}},$ В	$P_{\text{св}},$ мВт	$P_{\text{эл}},$ мВт	$\eta_{\text{эн}},$ %	$\eta_{\text{кв}},$ %
1	5						
2	10						
3	15						
4	20						
5	25						
6	30						
7	35						
8	40						
9	45						
10	50						

7) Расчеты величин

$U_{\text{отс}} = \dots \text{В}; \quad R_{\text{ост}} = \dots \text{Ом}; \quad U_{\text{сид}}(50\text{мА}) = \dots \text{В}; \quad P_{\text{эл}}(50\text{мА}) = \dots \text{мВт};$

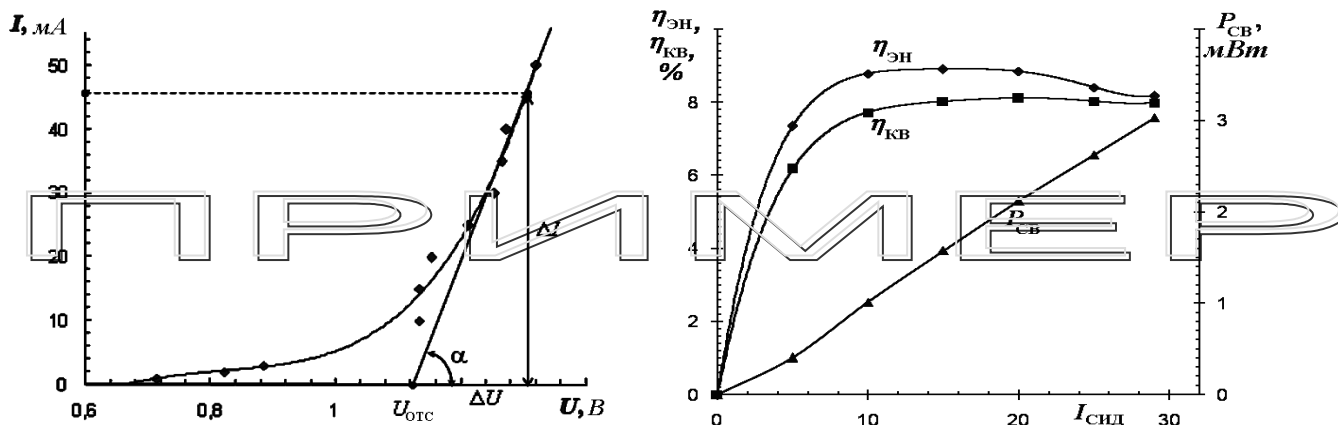
$P_{\text{св}}(50\text{мА}) = \dots \text{мВт}; \quad \eta_{\text{эн}}(50\text{мА}) = \dots \%; \quad \eta_{\text{кв}}(50\text{мА}) = \dots \%.$

8) Результаты:

Графики:

Вольтамперная характеристика
СИД

Мощность излучения и
эффективность СИД



Численные результаты:

$U_{отс} = \dots \text{В}; R_{ост} = \dots \text{Ом}; U_{сид}(50\text{mA}) = \dots \text{В}; P_{эл}(50\text{mA}) = \dots \text{мВт};$
 $P_{св}(50\text{mA}) = \dots \text{мВт}; \eta_{ЭН}(50\text{mA}) = \dots \%; \eta_{КВ}(50\text{mA}) = \dots \%.$

9) **Вывод:** Эффективность СИД максимальна при $I_{сид} = \dots \text{mA}$, когда $U_{сид} = \dots \text{В}$. Когда световая мощность максимальна, тогда эффективность СИД $\eta_{ЭН} = \dots \%$, потому что ...

10) **Работу выполнил(а):** _____ (фамилия). **Работу проверил:** _____

11) **Дата.**

Лабораторная работа № 8-5 ИЗУЧЕНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ОДНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1 Цель работы:

1. Изучение основных положений теории внутреннего фотоэффекта.
2. Ознакомление с методикой исследования фотоэлектрических свойств полупроводника.
3. Построение графика фотопроводимости с целью выяснения механизма рекомбинации неравновесных носителей заряда.

2 Ключевые положения

Фотопроводимость – это явление изменения электропроводности кристаллов под действием света за счет внутреннего фотоэффекта. Внутренний фотоэффект – это процесс фотогенерации носителей тока под действием света, приводящий к увеличению электропроводности.

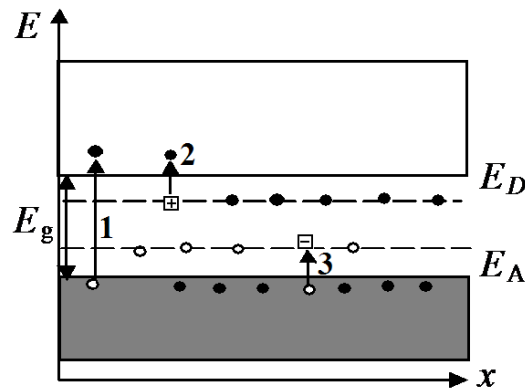


Рисунок 4 – Зонная диаграмма полупроводника с переходами зона-зона (1) и уровень-зона (2, 3)..

Возможные типы переходов, приводящие к изменению электропроводности, приведены на рис. 4. При внутреннем фотоэффекте первичным процессом является поглощение фотона с энергией, достаточной для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости (переход 1), или с донорного уровня в зону проводимости (переход 2), а также из валентной зоны на акцепторный уровень (переход 3).

Переход 1 приводит к образованию пары электрон-дырка, а в результате других переходов образуются свободные носители заряда только одного знака (для перехода 2 – только электроны, для перехода 3 – только дырки). Если оптический переход электронов происходит из валентной зоны в зону проводимости (через запрещенную зону E_g), то это называется *собственной фотопроводимостью*. При этом, очевидно, энергия фотона $h\nu$ должна удовлетворять условию $h\nu \geq E_g$. Следовательно, существует некоторая граничная частота ν_T , при которой фотопроводность еще наблюдается. Она определяется соотношением $h\nu = E_g$ и называется *красной границей фотопроводимости*. Например, граничная частота для полупроводника с шириной запрещенной зоны $E_g = 2 \text{ эВ}$ равна $\nu_T = E_g/h = 5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$, что соответствует длине волны $\lambda_T = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Переходы 2 и 3 вызывают появление примесной фотопроводимости. Тщательное изучение внутреннего фотоэффекта показало, что эффективная концентрация возникающих фотоносителей при заданной интенсивности светового потока зависит от его спектрального состава. Поэтому у каждого полупроводника существует своя спектральная характеристика (спектр fotocувствительности). Генерация свободных носителей заряда под действием света приводит к увеличению электропроводности полупроводника, которая при наличии неравновесных электронов Δn и дырок Δp может быть записана в виде:

$$\gamma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p], \quad (15)$$

где n_0, p_0 – концентрация равновесных электронов и дырок.

Избыточная (неравновесная) проводимость, равная разности проводимостей полупроводника при наличии освещения ($\gamma_{\text{св}}$) и при его отсутствии (γ_T), представляет фотопроводимость $\gamma_{\text{ф}}$:

$$\gamma_{\text{ф}} = \gamma_{\text{св}} - \gamma_T = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p). \quad (16)$$

Здесь концентрация неравновесных носителей заряда Δn и Δp зависит от интенсивности освещения.

При непрерывном освещении полупроводника светом постоянной интенсивности устанавливается стационарное состояние, характеризующееся концентрацией неравновесных носителей заряда Δn_0 и Δp_0 , определяемых выражениями:

$$\Delta n_0 = \eta \tau_n \alpha \Phi, \quad \Delta p_0 = \eta \tau_p \alpha \Phi, \quad (17)$$

где τ_n и τ_p – время жизни неравновесных электронов и дырок, соответственно (время, за которое концентрация носителей при включенном освещении уменьшается в e раз); η – коэффициент квантового выхода, определяющий число пар неравновесных носителей, образуемых одним поглощенным квантом света; Φ – квантовая интенсивность света (плотность потока фотонов), α – коэффициент поглощения. Зависимость γ_Φ от интенсивности света при стационарном освещении имеет вид:

$$\gamma_\Phi = e \alpha \eta \Phi (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p). \quad (18)$$

Если один из членов в скобках соотношения (18) значительно больше другого (за счет разницы в величинах подвижности или времени жизни электронов и дырок), то фотопроводность определяется носителями одного знака и называется монополярной (например, электронной). В этом случае

$$\gamma_\Phi = e \alpha \eta \Phi \tau_n \mu_n. \quad (19)$$

Величина τ определяется условиями рекомбинации носителей заряда в полупроводнике и зависит от многих факторов.

Исследуя зависимость γ_Φ от интенсивности света можно получить некоторые сведения об условиях рекомбинации носителей в полупроводнике. При освещении полупроводника монохроматическим светом можно считать, что $\alpha = \text{const}$ и $\eta = \text{const}$.

Тогда линейная зависимость γ_Φ от Φ (см. рис. 5) означает, что время жизни $\tau = \text{const}$, т.е. не зависит от концентрации неравновесных носителей заряда. Это так называемая **линейная рекомбинация**.

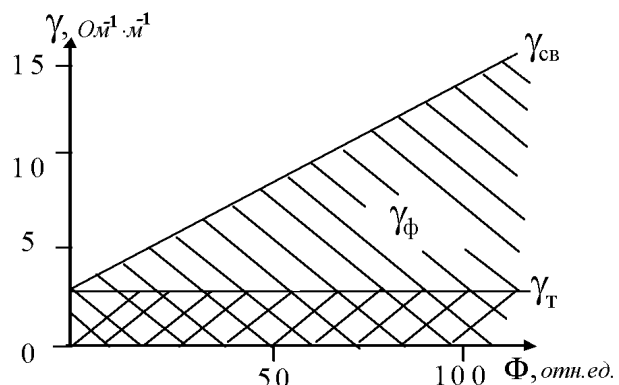


Рисунок 5 – Теоретический график фотопроводимости полупроводника с линейной рекомбинацией

Если зависимость γ_Φ от Φ **сублинейная**, т.е. $\gamma_\Phi \sim \Phi^a$, где $a < 1$, то это значит, что τ уменьшается с ростом интенсивности света, или, что одно и то же, с ростом концентрации неравновесных носителей заряда. Она наблюдается при

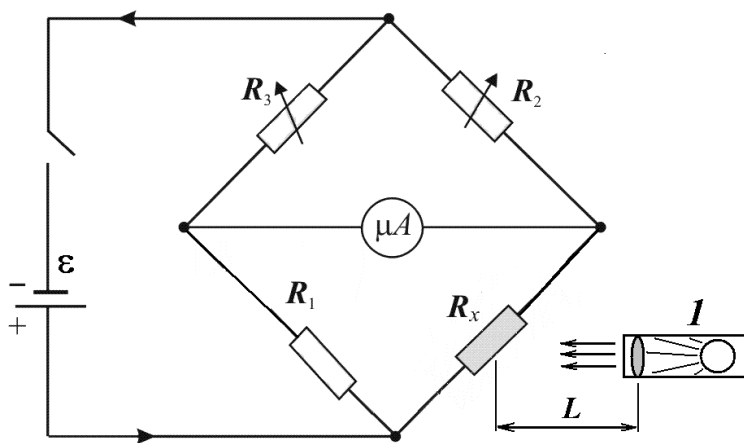


Рисунок 6, а – Схема моста Уитстона для измерения фотопроводимости больших интенсивностях освещения, когда существенна *поверхностная рекомбинация* носителей заряда.

При некоторых условиях возможна *сверхлинейная* ($a > 1$) зависимость γ_{Φ} от Φ . Это значит, что τ возрастает с ростом интенсивности света, что обусловлено *рекомбинацией носителей заряда через примесные центры захвата*.

Явление фотопроводимости в полупроводниках широко используется для измерения параметров полупроводниковых материалов, а также в технике для создания светочувствительных приборов – *фоторезисторов*.

3 Описание установки и методики измерений

Метод 1. Мостовая схема установки для измерения фотопроводимости показана на рис. 6,а.

Приборы и принадлежности: Исследуемый полупроводниковый образец R_x , освятитель I , источник напряжения ϵ , микроамперметр μA (ноль-индикатор с нулем в середине шкалы), резистор с известным сопротивлением R_1 , однодекадный магазин сопротивлений R_2 , трехдекадный магазин сопротивлений R_3 .

Мостовая схема измерений сопротивления является самым точным методом измерения сопротивлений.

Мостом Уитстона называется электрическая цепь, изображенная на рис.6, составленная из четырех ветвей с сопротивлениями R_x , R_1 , R_2 , R_3 . Эти однородные участки цепи называются *плечами моста*. В плечо AB включен полупроводниковый образец R_x , сопротивление которого измеряется в данной работе. В плечи DC и BC включены магазины сопротивлений, таким образом величину R_2 и R_3 можно менять. В качестве сопротивления R_1 плеча AD выбирают постоянный резистор. Таким образом, сопротивления R_1 , R_2 , R_3 известны. В диагональ AC включен источник тока, в диагональ BD включен микроамперметр, который играет роль ноль-индикатора.

Собрать мост Уитстона, в одно из плеч которого включить образец

полупроводника. На магазине R_2 выставляем такое сопротивление, чтобы $R_1/R_2=1/9$. При равновесии моста (ток через микроамперметр не проходит) искомое сопротивление рассчитываем по формуле

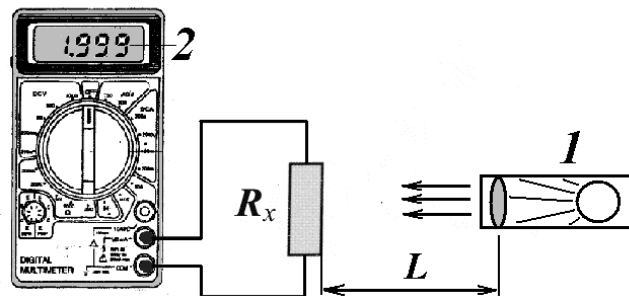


Рисунок 6, б – Простейшая схема для измерения фотопроводимости

$$R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}. \quad (20)$$

Образец помещаем перед осветителем. Интенсивность освещения образца изменяем за счет изменения расстояния между образцом полупроводника и лампочкой осветителя.

Метод 2. В качестве альтернативного метода измерения фотопроводимости можно использовать наиболее простую схему состоящую из цепи полупроводникового образца R_x , соединенного с цифровым универсальным измерительным мультиметром 2 (используется как Омметр) и осветителя 1 (см. рис. 6, б). Образец расположен перед осветителем. Интенсивность освещения образца изменяется с изменением расстояния L между образцом и лампой осветителя.

4 Обработка результатов измерений

Смотри пункт 4 лабораторной работы № 6-9.

5 Порядок выполнения работы

1. Установить максимальное расстояние от спирали лампочки до образца. Измерить темновое сопротивление образца R_T и рассчитать γ_T :

$$\gamma_T = \frac{l}{R_T \cdot x \cdot b}, \quad (21)$$

где l , x , b – линейные размеры образца.

2. Включить осветитель и, приближая лампочку осветителя к образцу, через каждые 10 мм измерять сопротивление освещенного образца R_{CB} и рассчитать γ_{CB} по формуле

$$\gamma_{\text{CB}} = \frac{l}{R_{\text{CB}} \cdot x \cdot b}. \quad (22)$$

3. Измерить темновое сопротивление образца R_{T}' после всех измерений R_{CB} и рассчитать γ_{T}' . Результат может отличаться от полученного в п.1 из-за нагрева образца.

4. Построить график зависимости γ_{CB} от освещенности (смотри примерный теоретический график на рис.5). Для построения графика освещенность измерять в относительных единицах, считая источник света изотропным:

$$\Phi = \frac{400}{(r_{\text{см}})^2}, \quad (23)$$

где r – расстояние от спирали лампочки до образца в сантиметрах.

5. Вычислить относительное изменение проводимости (эффективность фотодетектора) при минимальной и максимальной освещенности:

$$K_{\min} = \frac{\gamma_{\text{CB}}^{\min}}{\gamma_{\text{T}}}; \quad K_{\max} = \frac{\gamma_{\text{CB}}^{\max}}{\gamma_{\text{T}}}. \quad (24)$$

6. Сравнить полученный экспериментальный и теоретический график (рис. 5) и сделать вывод о типе рекомбинации фотоносителей в образце.

6 Контрольные вопросы

1. Что называется внутренним фотоэффектом?
2. Что называется фотопроводимостью вещества?
3. Как возникает собственная фотопроводимость?
4. Что называется красной границей собственной фотопроводимости?
5. Каков механизм примесной фотопроводимости?
6. Запишите формулу для фотопроводимости полупроводника.
7. Запишите формулу для стационарной концентрации неравновесных носителей и стационарной фотопроводимости.
8. Какая фотопроводимость называется монополярной? Запишите формулу для монополярной проводимости.
9. Какова может быть зависимость фотопроводимости полупроводника от интенсивности света? Какие выводы можно сделать из этой зависимости?

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 8-5

I. Домашнее задание

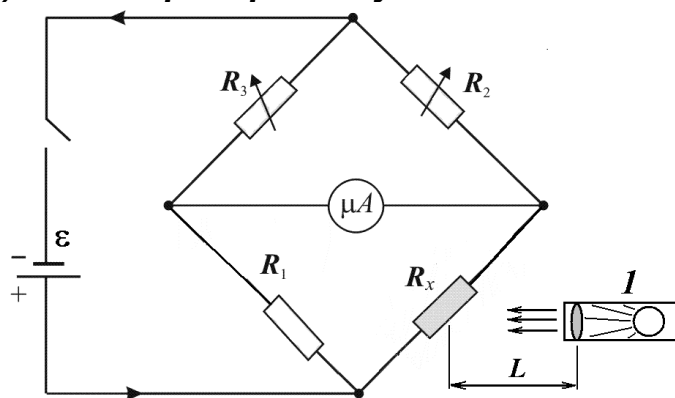
II. Протокол выполнения лабораторной работы № 8-5

- 1) **Тема:** Изучение фотопроводимости однородных полупроводников

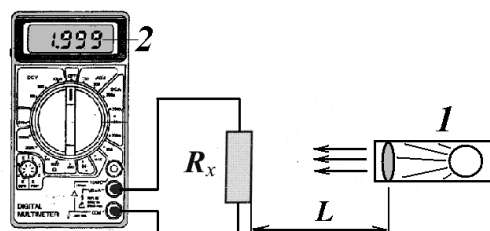
2) Цель работы:

1. Изучение основных положений теории внутреннего фотоэффекта.
2. Ознакомление с методикой исследования фотоэлектрических свойств полупроводника.
3. Построение графика фотопроводимости с целью выяснения механизма рекомбинации неравновесных носителей заряда.

3) Схема прибора или установки



1 – осветитель; R_x – образец;



L – расстояние между образцом и осветителем,
2 – цифровой мультиметр.

4) Таблица приборов

№	Наименование	Тип	Заводской №	Предел шкалы	Цена деления	Класс точности (абс. погр.)
1.	Цифровой мультиметр	DT-830B	-	200 Ω	0,1 Ω	0,8
				2000 Ω	1 Ω	0,8
2	Линейка	У	-		1 мм	0.5 мм

5) Уравнения для расчетов:

1. Удельная электропроводность образца:

$$\gamma = \frac{l}{R \cdot x \cdot b},$$

где l , x , b – длина, ширина и толщина образца; R – сопротивление образца.

2. Относительная освещенность:

$$\Phi = \frac{400}{(r_{cm})^2},$$

где r_{cm} – расстояние от осветителя до образца в сантиметрах.

3. Относительная фотопроводимость образца при минимальной освещенности:

$$K_{\min} = \frac{\gamma_{\text{CB}}^{\min}}{\gamma_{\text{T}}},$$

где $\gamma_{\text{CB}}^{\min}$ – удельная электропроводность образца на свету и γ_{T} – удельная электропроводность образца в темноте при максимальном расстоянии $r_{\text{см}}$.

4. Относительная фотопроводимость образца при максимальной освещенности:

$$K_{\max} = \frac{\gamma_{\text{CB}}^{\max}}{\gamma_{\text{T}}'},$$

где $\gamma_{\text{CB}}^{\max}$ – удельная электропроводность образца на свету и γ_{T}' – удельная электропроводность образца в темноте при минимальном расстоянии $r_{\text{см}}$.

6) Измерения:

Номер образца; $\ell = \dots$ мм; $x = \dots$ мм; $b = \dots$ мм

Таблица измерений

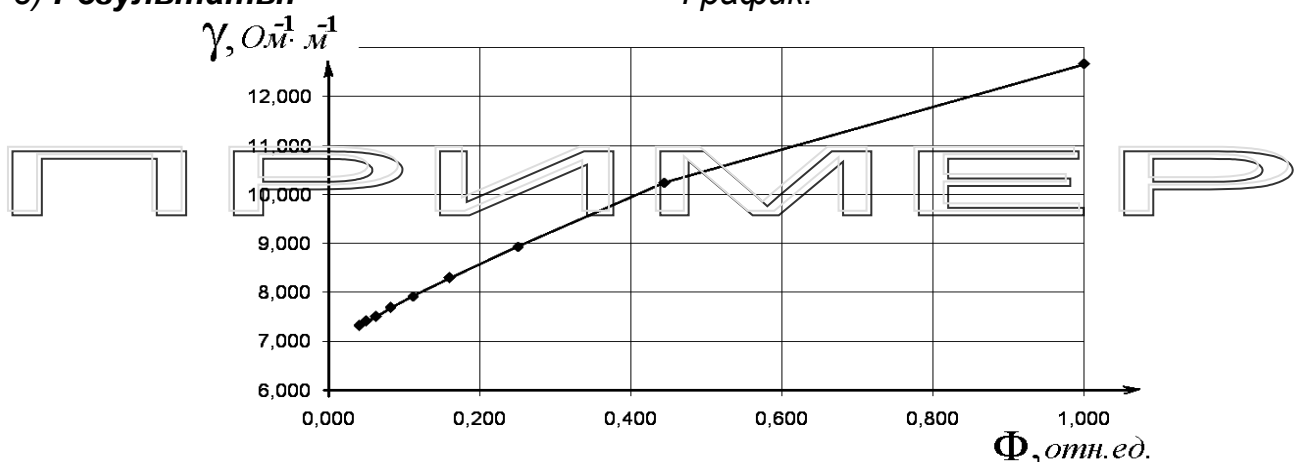
	r , мм	R , Ом	Φ , отн.ед.	γ , (Ом·м) ⁻¹	
Темн.	100				γ_{T}
	100				$\gamma_{\text{CB}}^{\min}$
	90				
	80				
	70				
	60				
	50				
	40				
	30				
	20				
	10				$\gamma_{\text{CB}}^{\max}$
Темн.	10				γ_{T}'

7) Расчет величин:

$K_{\max} = \dots$; $K_{\min} = \dots$;

8) Результаты:

График:



Численные результаты:

$K_{\min} = \dots$. $K_{\max} = \dots$.

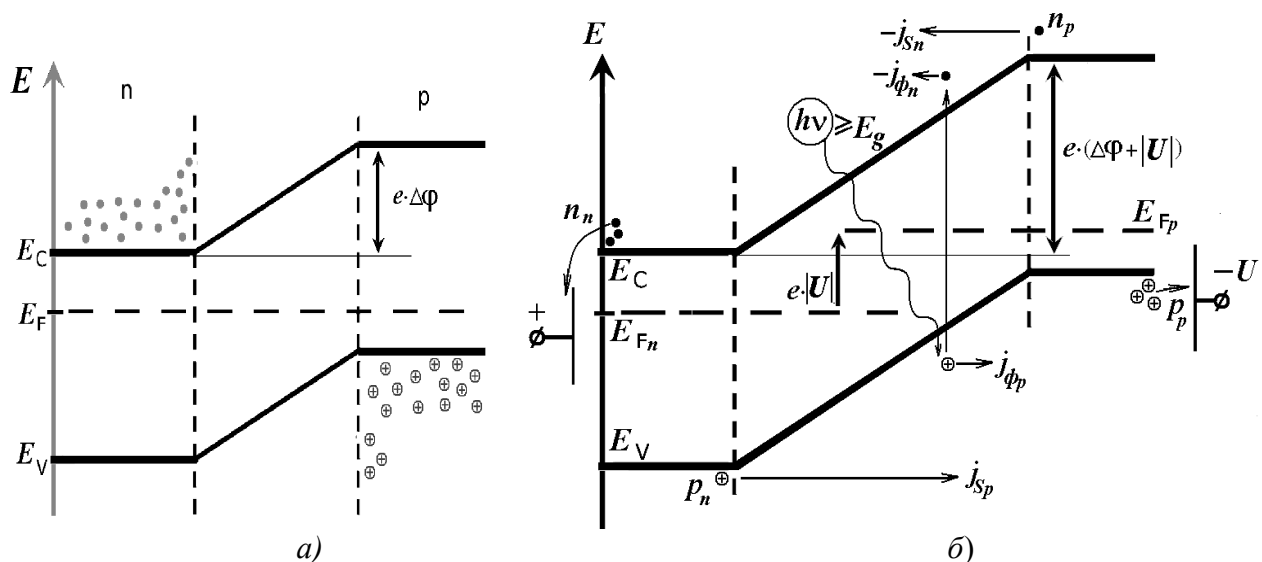


Рисунок 7 – p - n -переход и фотогенерация носителей заряда в p - n -переходе

9) **Вывод:** зависимость $\gamma_{\phi} \sim \Phi^{\alpha}$ сублинейная ($\alpha < 1$), рекомбинация поверхностная. Эффективность фотодетектора больше при ...

10) **Работу выполнил(а):** _____ (фамилия разборчиво).
Работу проверил:

11) **Дата.**

Лабораторная работа № 6-10 ИЗУЧЕНИЕ ФОТОЭФФЕКТА В P - N -ПЕРЕХОДЕ

1 Цель работы:

Ознакомление с фотоэффектом в p - n -переходе и измерение темновых и световых вольтамперных характеристик.

2 Ключевые положения

Вентильный фотоэффект заключается в возникновении фото-э.д.с. в вентильном (т. е. Выпрямляющем) контакте при его освещении. Наибольшее практическое применение имеет вентильный фотоэффект, наблюдаемый в p - n -переходе. Такой переход возникает обычно во внутренней области кристаллического полупроводника, где меняются тип легирующей примеси (с донорной на акцепторную) и связанный с этим тип проводимости (с электронной на дырочную).

Если контакт между полупроводниками n - и p – типа отсутствует, то уровни Ферми на их энергетических схемах расположены на разной высоте, причем в полупроводнике n -типа – ближе к зоне проводимости, в полупроводнике p -типа – ближе к валентной зоне.

При возникновении контакта (рис. 7,а) происходит обмен носителями заряда, в результате которого уровни Ферми выравниваются. В приконтактной области образуется так называемый запирающий слой, обедненный основными

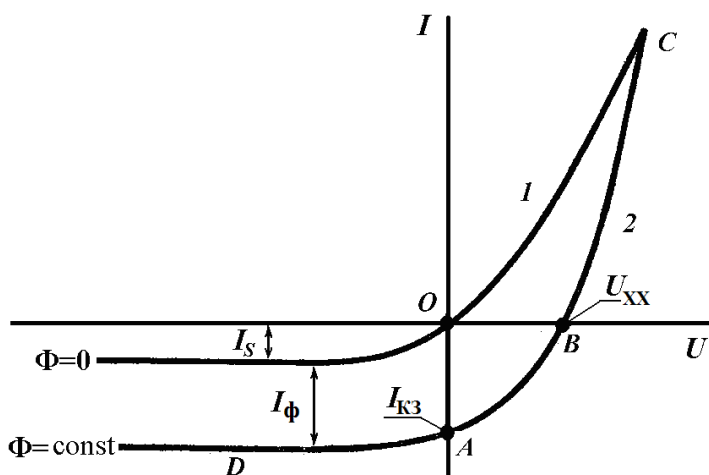


Рисунок 8 – ВАХ p-n-перехода

носителями заряда: электронами – со стороны электронного полупроводника, дырками – со стороны дырочного полупроводника. Ионы примесей этого слоя создают положительный объемный заряд в n -области и отрицательный – в p -области. Между p - и n -областями возникает контактная разность потенциалов $\Delta\phi$, препятствующая движению основных носителей, так как, чтобы пройти через p - n -переход, основные носители должны преодолеть потенциальный барьер $e \cdot \Delta\phi$.

Если в отсутствие освещения замкнуть наружные концы двух областей p - n -перехода, то тока в цепи не будет. Это означает, что в состоянии равновесия суммарный ток, созданный движением основных и неосновных носителей через контактный переход, равен нулю.

Подключение к контакту внешнего напряжения *прямой полярности* (плюс – со стороны p -полупроводника, минус – со стороны n -полупроводника) приводит к уменьшению потенциального барьера (см. рис. 1,б). Число основных носителей, способных проникнуть через p - n -переход, растет. Через контакт идет ток j в прямом направлении.

Если на переход подать *отрицательное смещение* (см. рис. 7,б), то внешнее поле обратной полярности складывается с внутренним полем запирающего слоя. При этом для тока диффузии основных носителей возникает большее сопротивление. Через контакт идет ток обратного направления j_{sn} и j_{sp} , во много раз меньший тока при прямом смещении. При обратном напряжении переход основных носителей через контакт прекращается, так как они уходят в контакты (экстракция). Обратный ток, создаваемый теперь только неосновными носителями, достигает своего насыщения j_s .

Вольт-амперная характеристика неосвещенного p - n -перехода представлена на рис. 8 (кривая 1). Она может быть описана следующим выражением:

$$I = I_s \left(\exp \left[\frac{eU}{kT} \right] - 1 \right), \quad (25)$$

где I_s – ток насыщения неосвещенного p - n -перехода, k – постоянная Больцмана, e – заряд электрона, T – абсолютная температура, U – внешнее напряжение.

Пусть теперь на p - n -переход падает свет, энергия фотонов которого не меньше ширины запрещенной зоны полупроводника. В результате внутреннего фотоэффекта возникают электронно-дырочные пары, концентрация которых уменьшается по мере удаления от освещенной поверхности. Электроны и дырки перемещаются к контактному переходу, где происходит их разделение: основные носители области задерживаются контактным полем, неосновные – ускоряются и свободно проходят через p - n -переход, образуя фототок I_{ϕ} , текущий в обратном направлении (от n -области к p -области).

Если цепь разомкнута $U=0$, то при освещении на границах p - n -перехода накапливается объемный заряд, препятствующий движению неосновных носителей. Возникает фото-э.д.с. $U_{\text{хх}}$, полярность которой обратна полярности контактной разности потенциалов (рис. 8 точка B). Потенциальный барьер запирающего слоя уменьшается (как на рис. 1,б). Это, в свою очередь, вызывает появление так называемого тока утечки I_y , текущего в прямом направлении. Величина фото-э.д.с. растет до тех пор, пока возрастающий ток основных носителей I_y не скомпенсирует фототока I_{ϕ} .

Замкнем p - n -переход на нагрузочное сопротивление $r_{\text{н}}$ (рис. 9). По цепи потечет ток I , который можно представить как сумму двух противоположно направленных токов:

$$I = I_{\phi} - I_y. \quad (26)$$

Ток утечки I_y рассчитывается по формуле (25) для неосвещенного p - n -перехода, когда к нему приложено внешнее напряжение $U = I \cdot r_{\text{н}}$ в прямом направлении:

$$I_y = I_s \exp \left[\frac{eU}{kT} \right]. \quad (27)$$

В режиме короткого замыкания ($r_{\text{н}} = 0$) $U=0$, $I_y=0$, ток $I_{\text{КЗ}}$ внешней цепи равен фототоку, который в свою очередь пропорционален интенсивности света Φ :

$$I_{\text{КЗ}} = I_{\phi}; \quad I_{\phi} \sim \Phi. \quad (28)$$

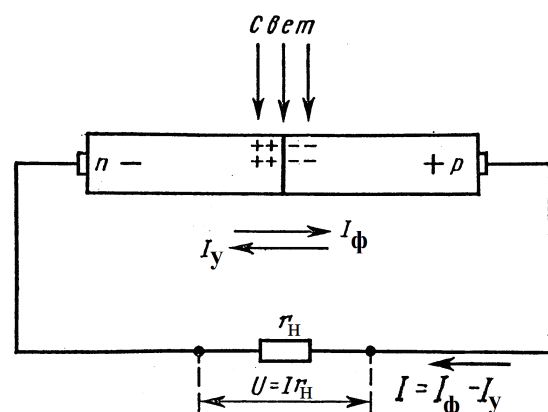


Рисунок 9 – Схема работы фотоэлемента

В режиме холостого хода цепь разомкнута ($r_H = \infty$), напряжение холостого хода $U_{XX} = U_\phi$, $I = 0$, $I_\phi = I_y$. Из формулы (25) получаем:

$$I_\phi = I_s \left(\exp \left[\frac{eU_{XX}}{kT} \right] - 1 \right), \quad (29)$$

откуда следует, что

$$U_\phi = U_{XX} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_\phi}{I_s} \right). \quad (30)$$

Таким образом, вентильные фотоэлементы позволяют осуществить непосредственное превращение лучистой энергии в электрическую, поэтому их также называют *фотогальваническими элементами*.

Вольтамперная характеристика освещенного p - n -перехода представлена на рис. 8 (кривая 2). Отрезок OA ($U=0$) соответствует току короткого замыкания ($r_H=0$), отрезок OB ($I=0$) – величине напряжения холостого хода ($r_H=\infty$).

При изменении внешней нагрузки от 0 до ∞ получаем участок AB , который и представляет собой собственно вольтамперную характеристику p - n -перехода в фотогальваническом режиме при постоянной интенсивности света Φ . Участок BC характеризует работу фотоэлемента при подаче на p - n -переход прямого внешнего напряжения, участок AD – обратного внешнего напряжения (фотодиодный режим работы).

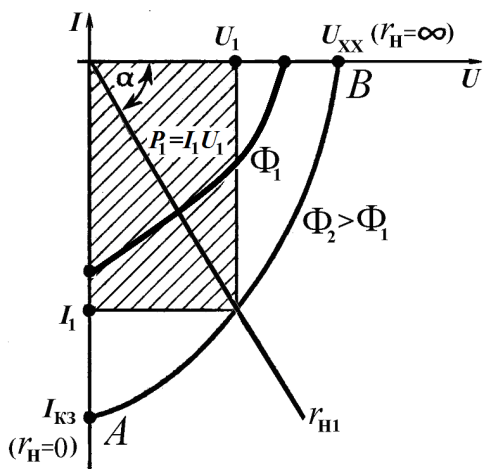


Рисунок 10 – ВАХ фотоэлемента при разных освещенностях.

При изменении светового потока, а следовательно, и освещенности, вольтамперные характеристики смещаются, форма их изменяется. Семейство вольтамперных характеристик вентильного фотоэлемента в фотогальваническом режиме при различных освещенностях представлено на рис.10. Прямая, проведенная из начала координат под углом α (определяемым величиной сопротивления нагрузки $\text{ctg} \alpha = r_H = U_1 / I_1$), пересекает характеристику в точке, абсцисса которой даёт значение падения напряжения на нагрузке, а ордината – ток во внешней цепи (например $U_1 = I_1 \cdot r_{H1}$). Площадь, заштрихованная на рисунке, пропорциональна мощности $P_{эл1}$,

выделяемой на нагрузке r_H :

$$P_{ЭЛ} = U_1 \cdot I_1. \quad (31)$$

Оптимальное сопротивление нагрузки $r_{H,опт}$ выбирается так, чтобы эта мощность была максимальной.

Коэффициент полезного действия фотогальванического элемента η определяется соотношением

$$\eta = \frac{P_{ЭЛ}}{P_{СВ}}, \quad (32)$$

где $P_{СВ}$ – мощность падающего на ФД света, $P_{ЭЛ}$ – электрическая мощность ФД. При оптимальном сопротивлении нагрузки η будет максимальным.

3 Описание установки и методики измерений

Схема установки показана на рис. 11.

Приборы и принадлеж-ности: СИД – источник света регулируемой интенсивности (это может быть СИД, включенный, как в работе 6-9), ФД – измеряемый фотодиод (кремниевый), R_3 – магазин сопротивлений, mA – миллиамперметр для измерения фототока, V – вольтметр.

После выполнения работы № 6-9 мы располагаем СИД с известной характеристикой интенсивность света – сила тока. Задавая значение тока, мы получаем световой сигнал известной интенсивности при фиксированной длине волны.

Изменяя сопротивление нагрузки от 0 до ∞ , изменяем режим работы фотодиода от короткого замыкания до холостого хода. Полное сопротивление нагрузки фотодиода получаем с учетом сопротивления вольтметра :

$$r_H = \frac{R_{ш} \cdot R_V}{R_{ш} + R_V}. \quad (33)$$

Мощность фотодиода вычисляется по формуле (31) и коэффициент полезного действия – по формуле (32).

4 Обработка результатов измерений

Смотри пункт 4 лабораторной работы № 6-9.

5 Порядок выполнения работы

1. Проверить правильность схемы измерений.

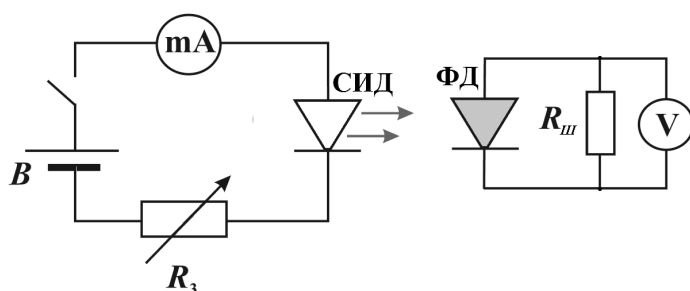


Рисунок 11 – Схема установки. Для измерения фототока ФД

2. Задать значение тока СИД 10 мА и, изменяя шунтирующее сопротивление $R_{\text{ш}}$ от ∞ до 0 , понаблюдать за изменениями показаний вольтметра. Подобрать шунтирующее сопротивление $R_{\text{ш}}$ такое, чтобы вначале напряжение на ФД составило максимальное значение U_{max} . Записать в таблицу значения $R_{\text{ш}}$ и U_{max} . Затем добиться показаний вольтметра последовательно $0,9$; $0,8$; $0,7$; $0,5$; $0,25$ от U_{max} , и записать в таблицу значения $R_{\text{ш}}$ и U_{max} .

3. Измерить напряжение холостого хода (близкую к этому величину) при отключенном магазине сопротивлений.

4. Повторить п.2 и 3 для значения тока СИД 10 мА , 30 мА и 40 мА .

5. Рассчитать силу фототока

$$I_{\text{ФД}} = \frac{U}{R_{\text{н}}} . \quad (34)$$

6. Построить семейство вольтамперных характеристик для двух значений интенсивностей света (например, $I_{\text{сид}} = 10\text{ мА}$ и $I_{\text{сид}} = 30\text{ мА}$).

7. Из работы 6-9 берут величины световой мощности $P_{\text{св}}$, соответствующие $I_{\text{сид}} = 10\text{ мА}$ и $I_{\text{сид}} = 30\text{ мА}$, и вычисляют эффективность η фотоэлемента (32).

8. Построить графики эффективность-сопротивление нагрузки и определить для каждой интенсивности света оптимальное сопротивление нагрузки, соответствующее максимальной эффективности.

9. Прокомментировать полученные результаты и сделать выводы о том, какой максимальный ток и какое максимальное напряжение может генерировать ФД, каково значение оптимального сопротивления нагрузки при различных освещенностях.

6 Контрольные вопросы

1. Как возникает фотоэффект в p - n -переходе?
2. Какие предельные режимы работы фотоэлемента возможны?
3. Как зависит фототок короткого замыкания от интенсивности света?
4. Как зависит фотонапряжение холостого хода от интенсивности света?
5. Что такое оптимальная нагрузка фотоэлемента?
6. Что такое коэффициент полезного действия фотоэлемента?
7. Что такое красная граница фотоэффекта?
8. Каков вид темновых и световых ВАХ p - n -перехода?

7 Содержание протокола

Лабораторная работа № 6-10
I Домашнее задание

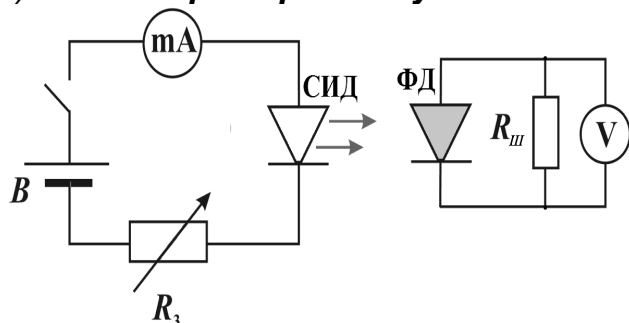
...

II Протокол выполнения лабораторной работы №6-10

1) **Тема:** Изучение фотоэффекта в р-п-переходе

2) **Цель работы:** Ознакомление с фотоэффектом в р-п-переходе и измерение темновых и световых вольтамперных характеристик.

3) **Схема прибора или установки**



СИД – светодиод,
ФД – фотодиод,
В – источник питания светодиода,
mA – миллиамперметр;
R₃ – магазин сопротивлений,
R_ш – шунтирующее сопротивление,
V – вольтметр.

4) **Таблица приборов:**

№	Наименование	Тип	Зав. №	Предел шкалы	Цена деления	Класс точности
1	Миллиамперметр	M906		25 mA	1 mA	1
2	Вольтметр (мультиметр)	DT-830B		200 mV	0.1 mV	0.5
				2000 mV	1 mV	
3	Магазин сопротивлений R ₃	P33	-	9999 Ω	1 Ω	0,2
4	Шунтирующее сопротивление R _ш	P33	-	9990 Ω	10 Ω	0,2

Принадлежности: светоизлучающий диод, фотодиод.

5) **Формулы расчета величин и их погрешностей:**

1. Нагрузочное сопротивление фотодиода:

$$R_H = \frac{R_{ш} \cdot R_V}{R_{ш} + R_V};$$

где R_ш – шунтирующее сопротивление, R_V = 2000 kΩ – сопротивление вольтметра.

2. Фототок:

$$I_{ФД} = \frac{U}{R_H};$$

где U – напряжение на фотодиоде, R_H – нагрузочное сопротивление.

3. Мощность выделяемая на нагрузке фотодиода:

$$P_{ФД} = I_{ФД} \cdot U;$$

где I_{ФД} - фототок; U – напряжение на фотодиоде.

4. Эффективность фотодиода:

$$\eta = \frac{P_{\text{ФД}}}{P_{\text{СВ}}}.$$

где $P_{\text{ФД}}$ - мощность выделяемая на нагрузке фотодиода, $P_{\text{СВ}}$ – мощность падающего света.

6) Измерения:

$R_V = 2000 \text{ к}\Omega$.

Таблица измерений

№	$I_{\text{СВ}}, \text{ мА}$	$P_{\text{СВ}}, \text{ мВт}$	$R_{\text{ш}}, \text{ к}\Omega$	$R_{\text{н}}, \text{ к}\Omega$	$U, \text{ мВ}$	$I_{\text{ФД}}, \text{ мкА}$	$P, \text{ мВт}$	$\eta, \text{ отн.ед}$
1	10		99,99					
2			10					
3			7,97					
4			5,5					
5			3,26					
6			1,86					
7			1,28					
8			0,88					
9	30		99,99					
10			7,97					
11			3,26					
12			1,86					
13			1,28					
14			0,88					
15			0,62					
16			0,37					
17			0,2					

7) Расчет величин:

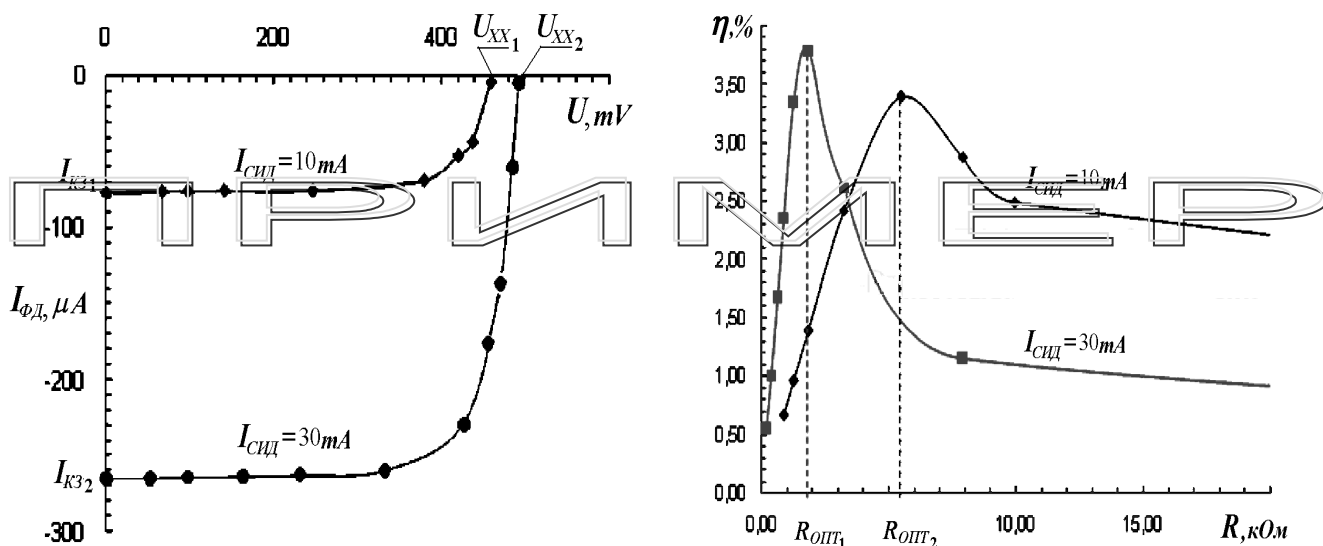
$R_{\text{н}} = \dots \text{ к}\Omega$; $U = \dots \text{ мВ}$; $I_{\text{ФД}} = \dots \text{ мкА}$; $P = \dots \text{ мВт}$.

8) Результаты:

Графики:

Вольтамперная характеристика
фотодиода при различных
освещенностях

Эффективность фотодиода в
зависимости от сопротивления
нагрузки



Численные результаты:

$U_{XX1} = \dots \text{В}; \quad I_{K31} = \dots \text{мкА}; \quad R_{ОПТИМ1} = \dots \text{кОм};$
 $U_{XX2} = \dots \text{В}; \quad I_{K32} = \dots \text{мкА}; \quad R_{ОПТИМ2} = \dots \text{кОм};$

9) **Вывод:** По характеристикам фотодиода мы установили, что при большей освещенности оптимальное сопротивление нагрузки должно быть ...

10) **Работу выполнил(а):** _____ (фамилия разборчиво).
Работу проверил:

11) **Дата.**

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Викулин И.М. Физика оптической связи: метод. указания для самостоятельной работы студентов/ И.М. Викулин, В.Э. Горбачёв. –Одесса: Од. міська друк., 2000. –94с.
2. Викулин И.М. Полупроводниковые фотоприёмники/ И.М. Викулин и др. –М: Радио и связь, 1984. –294с.
3. Коробіцин Б.В. Фізика оптичного зв'язку: метод. вказівки та завдання до курсової роботи/ Б.В. Коробіцин, В.Є. Горбачов, С.К. Криськів –Одеса: вид ОНАЗ, 2008. –72с.

ЗМІСТ

Вступ	4
Українською мовою:	
1. Робота 6-9. Вивчення світловипромінювального діода	5
2. Робота 8-5. Вивчення фотопровідності однорідних напівпровідників	12
3. Робота 6-10. Вивчення фотоефекту в p - n -переході	18
Російською мовою:	
1. Работа 6-9. Изучение светоизлучающего диода	25
2. Работа 8-5. Изучение фотопроводимости однородных полупроводников	32
3. Работа 6-10. Изучение фотоэффекта в p - n -переходе	39
4. Список рекомендованої літератури	46

Навчально-методичне видання

**ГОРБАЧОВ Віктор Едуардович,
КОРОБІЩИН Борис Васильович**

ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Методичний посібник до лабораторного
практикуму з фізики оптичного зв'язку

Редактор

Кодрул Л. А.

Комп'ютерне верстання
та макетування

Корнійчук Є. С.

Здано в набір 21.05.2013 Підписано до друку 11.07.2013
Формат 60/88/16 Зам. № 5684
Тираж 500 прим. Обсяг: 3,0 ум. друк. арк.
Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO
у друкарні редакційно-видавничого центру ОНАЗ ім. О.С. Попова
ОНАЗ, 2013