

Міністерство транспорту та зв'язку України

-----  
Державний департамент з питань зв'язку та інформатизації

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О. С. ПОПОВА

=====  
Кафедра фізики оптичного зв'язку



м. Одеса,  
вул. Старопортофранківська, 61

**ФІЗИКА**

**МОДУЛЬ 6**

**ЧАСТИНА 2**

# **ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА КОМПЛЕКСНЕ ЗАВДАННЯ**

для студентів всіх спеціальностей

за напрямом "Телекомунікації"

Одеса 2006

Методичні вказівки розробили автори:  
доц. **Б. В. Коробіцин**, доц. **В. Е. Горбачов**

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

Протокол № 5 від 01.12.2005 р.

Зав кафедрою



І. М. Вікулін

Методичні вказівки розглянуто й ухвалено вченою радою науково  
навчального інститута поштового зв'язку

Протокол № 1 від 15 вересня 2006 р.

Директор ННІ

С. С. Кріль

## СТРУКТУРА МОДУЛЯ 6 “ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ’ЯЗКУ”

Змістовий модуль	Лекції (год.)	Заняття		Самостій- на робота	Індиві- дуальна робота
		прак- тичні	лабо- ратор- ні		
<b>Модуль 6 : ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ’ЯЗКУ (66 годин)</b>					
Елементи оптичного зв’язку	18	8	10	22	6
<b>Разом : Модуль 6, год.</b>	18	8	10	22	6

### ЗМІСТ ЗМІСЛОВИХ МОДУЛІВ (ЛЕКЦІЙНИХ ГОДИН)

#### Фізика оптичного зв’язку

- 6.1 Фізичні основи оптичного зв’язку (2 год.).
- 6.2 Випромінюючі напівпровідникові прилади. Світлодіоди. Лазерні діоди (2 год.).
- 6.3 Напівпровідникові фотоприймачі: фоторезистори, фотодіоди, фотоелементи (2 год.).
- 6.4 Фототранзистори (2 год.).
- 6.5 Модулятори оптичного випромінювання (2 год.).
- 6.6 Світловоди, оптичні волокна (2 год.).
- 6.7 Технічна реалізація ВОЛЗ (2 год.).

### ТЕМИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ МОДУЛЯ 6

#### “ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ’ЯЗКУ”

№ п/п	Тема	Години
1	Світлодіоди	2
2	Внутрішній фотоэффект	0
3	Нерівноважні носії струму в напівпровідниках	0
4	Фотодіоди	2
5	Модулятори	2
6	Світловоди	2

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

### ЩОДО ВИКОНАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗАВДАННЯ

1 Для виконання комплексного завдання 6 студенти повинні вивчити розділи “**Оптика**” та “**Фізика оптичного зв’язку**” курсу фізики.

2 Індивідуальні завдання містять шість тем: 6.1; 6.2; 6.3; 6.4; 6.5, 6.6. Студент повинен розв’язати по однієї задачі з кожної теми. Конкретні номери умов задач в кожній темі зазначено в табл. 1. Номер варіанта визначається порядковим номером прізвища студента в журналі групи. Всі задачі подано в тридцяти варіантах в табл. 2.

3 *Звіт з індивідуального завдання* виконується в окремому зошиті. Записи проводяться на правому боці розвороту зошита. На лівому боці записуються зауваження викладача та зроблені студентом виправлення.

4 На обкладинці зошита слід зазначити назву роботи, номер варіанта, прізвище та ініціали студента, шифр групи.

5 Задачі слід розташовувати по порядку. Умову переписувати повністю. Зробити *короткий запис умови*. Привести значення заданих величин до *системи одиниць СІ*. Навести пояснювальну *схему* чи *рисунок*.

6 Передусім подати формули, котрі відбивають фізичні явища теми задачі. Всі позначення в формулах слід *пояснити*.

7 З наведених формул слід скласти систему рівнянь та подати розв’язок задачі або її частини в *літерному вигляді*, де шукана величина має бути подана через задані величини в літерних (символьних) позначеннях.

8 Слід *перевірити одиниці виміру* здобутих величин на відповідність їх до сподіваних. Для цього підставити до формули літерного розв’язку замість символу кожної величини її одиницю виміру і здійснити необхідні перетворення. Лише після збігу одиниць виміру зі сподіваними слід підставити до формули літерного розв’язку *числові значення* величин і зробити обчислення (див. приклади розв’язування задач). Обчислення провадити з трьома значущими цифрами.

9 Наприкінці роботи слід зазначити використану літературу.

**Примітка.** В процесі обчислення до експонентної функції слід підставляти ширину забороненої зони в електронвольтах, а сталу Больцмана – як  $8,62 \cdot 10^{-5}$  еВ/К. В інших випадках сталу Больцмана брати дорівнюваною  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

У всіх випадках, якщо не зазначено інше, вважати  $T = 300$  К.

## КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЗНАНЬ

*При оцінці практичної частини по 6 задачам комплексного завдання студент одержує:*

- за правильне рішення й оформлення задачі і вірне пояснення ходу рішення – **16** балів;
- за правильне рішення й оформлення задачі і неточностями в поясненнях – **14** балів;
- за правильне рішення й оформлення задачі і помилками в поясненнях ходу рішення – **10** балів;
- за правильне рішення з недоліками оформлення (немає пояснень величин, схеми, одиниць виміру, і т.д.) задачі і вірне пояснення ходу рішення – **9** балів;
- за правильне рішення з недоліками оформлення (немає пояснень величин, схеми, одиниць виміру, і т.д.) задачі і неточностями в поясненнях ходу рішення – **7** балів;
- за правильний хід рішення й оформлення задачі, але з невірним чисельним рішенням і вірне пояснення ходу рішення – **5** балів;

Оцінка виставляється виходячи з наступних критеріїв:

- «Відмінно» - понад **95** балів,
- «Добрі» - від **80** до **95** балів,
- «Задовільно» – від **60** до **80** балів,
- «Незадовільно» – менше **60** балів.

## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$t$  – час,  $x$  – координата (товщина),  $S$  – площа перетину  
 $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла  
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль заряду електрона, заряд дірки  
 $g$  – швидкість генерації носіїв струму  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка,  $\nu$  – частота світлових квантів  
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  еВ/К – стала Больцмана,  $T$  – температура  
 $E$  – напруженість електричного поля  
 $U$  – напруга, різниця потенціалів;  $U_k$  – контактна різниця потенціалів  
 $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – електрична стала  
 $j$  – густина струму,  $j_s$  – густина струму насичення  
 $C$  – ємність р-п-переходу  
 $\delta$  – ширина області об'ємного заряду  
 $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг – маса спокою вільного електрона  
 $m_n$  – ефективна маса електрона,  $m_p$  – ефективна маса дірки  
 $L_n$  – дифузійна довжина електронів,  $L_p$  – дифузійна довжина дірок  
 $E_g$  – ширина забороненої зони,  $E$  – енергія електрона (дірки)  
 $N_v$  – ефективна густина станів у валентній зоні,  $N_c$  – в зоні провідності  
 $N_a$  – концентрація акцепторів,  $N_d$  – концентрація донорів  
 $n$  – концентрація електронів,  $p$  – концентрація дірок  
 $n_i$  – концентрація власних електронів,  $p_i$  – концентрація власних дірок  
 $n_n$  – концентрація основних електронів,  $p_p$  – концентрація основних дірок  
 $n_p$  – концентрація неосновних електронів,  $p_n$  – концентрація неосновних дірок  
 $\mu_n$  – рухливість електронів,  $\mu_p$  – рухливість дірок  
 $\tau_n$  – час життя електронів,  $\tau_p$  – час життя дірок  
 $\rho$  – питомий опір,  $\rho_i$  – власний питомий опір  
 $\rho_T$  – темновий питомий опір  
 $\gamma$  – питома електропровідність  
 $\gamma_T$  – питома темнова електропровідність,  $\Delta\gamma$  – питома фотопровідність  
 $D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів,  $D_p$  – коефіцієнт дифузії дірок  
 $\Delta n$  – концентрація нерівноважних електронів  
 $\Delta p$  – концентрація нерівноважних дірок  
 $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла,  $R$  – коефіцієнт відбиття світла  
 $\phi$  – інтенсивність випромінювання (густина потоку фотонів)  
 $L_{\text{опт}}$  – ефективна довжина поглинання світла  
 $\eta$  – квантовий вихід фотоэффекту

## ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ Й ФОРМУЛИ

**Світлодіоди.** При вивченні оптичних властивостей напівпровідників найбільш вдалою формою подавання напівпровідника є зонна діаграма (зонна модель), показана рис. 1. Позначення енергетичних рівнів такі:  $E_C$  – дно зони провідності,  $E_V$  – стеля валентної зони,  $E_D$  – рівень донорів,  $E_A$  – рівень акцепторів. Різниця енергій  $E_C - E_V$  є ширина забороненої зони  $E_g$ . Ефективна густина станів:  $N_C$  – у зоні провідності,  $N_V$  – у валентній зоні,  $N_D$  – концентрація донорів,  $N_A$  – концентрація акцепторів,  $n$  – концентрація електронів у напівпровіднику,  $p$  – концентрація дірок. Переходи електронів: 1 – з випромінюванням фотона, 2 – з поглинанням фотона.

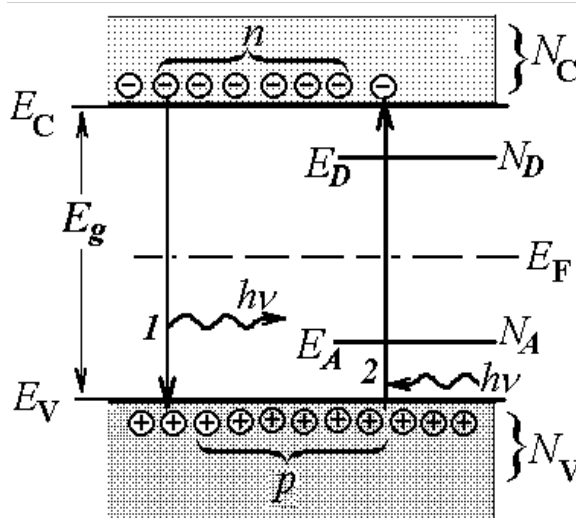


Рисунок 1 – Зонна діаграма напівпровідника

Довжина хвилі при переходах електронів із зони провідності до валентної зони світлодіода визначається за формулою

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}, \quad (1)$$

де  $h$  – стала Планка,  $c$  – швидкість світла у вакуумі.

Цій довжині хвилі відповідає максимальна квантова інтенсивність (кількість фотонів, випромінюваних за одиницю часу з одиниці поверхні випромінювача).

Довжина хвилі пов'язана з енергією фотона  $h\nu$  співвідношенням

$$\lambda = \frac{hc}{h\nu}, \quad (2)$$

де  $\nu$  – частота світла.

Смуга випромінювання в енергетичних одиницях ( $E_g - \Delta(h\nu)/2$ ;  $E_g + \Delta(h\nu)/2$ ) визначає інтервал енергій випромінюваних фотонів, квантова інтенсивність яких більше за половину максимальної квантової інтенсивності;  $\Delta(h\nu)$  – півширина смуги випромінювання в енергетичних одиницях.

Враховуючи, що енергія випромінюваних фотонів  $h\nu$  набагато більша за різницю енергій у смузі випромінювання  $d(h\nu)$ , можна продіференціювати співвідношення (2):

$$\frac{d\lambda}{d(h\nu)} = hc \frac{1}{(h\nu)^2} = hc \frac{\lambda^2}{(hc)^2} = \frac{\lambda^2}{hc}, \quad (3)$$

звідки, замінюючи знак диференціала  $d$  на знак інтервалу  $\Delta$ , дістаємо співвідношення для півширини смуги випромінювання в одиницях довжини хвилі (півширина спектра)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot \Delta(h\nu)}{hc}. \quad (4)$$

Тоді смуга випромінювання в одиницях довжини хвилі враховується як інтервал  $(\lambda - \Delta\lambda/2; \lambda + \Delta\lambda/2)$ .

Смугу випромінювання в одиницях частоти можна дістати, обчисливши частоту випромінювання із співвідношення (2), а півширину спектра в одиницях частоти – із (4):

$$\Delta\nu = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2}. \quad (5)$$

Гранична частота роботи (частота сигналу, що модулює випромінювання, при внутрішньому способі модуляції) визначається найчастіше часом життя інжектованих до  $p$ -бази електронів  $\tau_n$ :

$$f_{\text{макс}} = \frac{1}{2\pi\tau_n}. \quad (6)$$

**Внутрішній фотоефект.** Фотоактивним для даного напівпровідника є світло, енергія фотонів якого більше чи дорівнює ширині забороненої зони, але не може більш ніж удвічі перевищувати її (при цьому світло поглинається біля поверхні, де генеровані носії одразу рекомбінують через поверхневі стани):

$$E_g \leq h\nu \leq 2E_g, \quad (7)$$

тобто мінімальна й максимальна довжини хвилі фотоактивного світла

$$\lambda_{\text{мін}} = \frac{hc}{2E_g}, \quad \lambda_{\text{макс}} = \frac{hc}{E_g}. \quad (8)$$



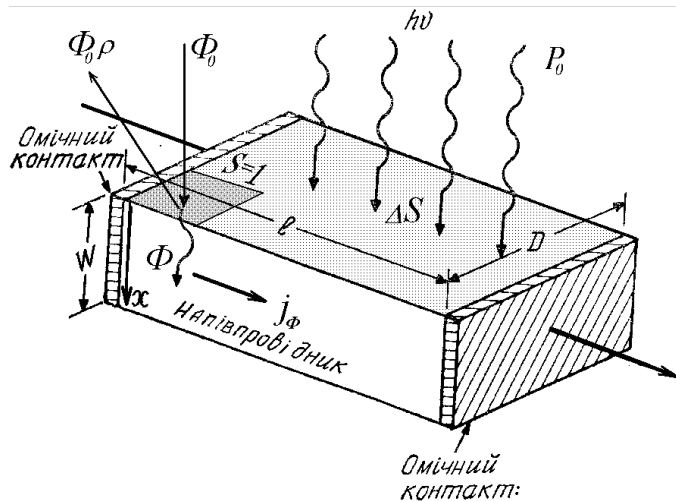


Рисунок 2 – Пояснення внутрішнього фотоефекту

Коли поверхня напівпровідника освітлюється (рис. 2) світлом з квантовою інтенсивністю (густиною потоку фотонів)  $\Phi_0$ , то в міру проникнення світла всередину напівпровідника квантова інтенсивність світла визначається за законом Бугера:

$$\phi(x) = \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (9)$$

де  $R$  – коефіцієнт відбиття світла,  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання світла,  $x$  – відстань від поверхні.

Швидкість оптичної генерації носіїв в шарі напівпровідника на відстані  $x$  від поверхні є пропорційна швидкості зменшення інтенсивності світла:

$$g(x) = -\eta \frac{d\phi}{dx} = \eta \cdot \alpha \cdot \phi(x), \quad (10)$$

де  $\eta$  – квантовий вихід фотоефекту.

Концентрація генерованих світлом нерівноважних носіїв струму на відстані  $x$  від поверхні в умовах слабого поглинання (коли ефективна довжина оптичного поглинання  $L_{\text{опт}} = 1/\alpha \gg x$ ):

$$\Delta n(x) = \tau_n g = \tau_n \cdot \eta \cdot \alpha \cdot \phi(x); \quad (11)$$

$$\Delta p(x) = \tau_p g = \tau_p \cdot \eta \cdot \alpha \cdot \phi(x), \quad (12)$$

де  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – час життя електронів та дірок відповідно.

Додаткова питома електропровідність (фотопровідність) на глибині  $x$ :

$$\Delta \gamma(x) = e \cdot (\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p \cdot \mu_p), \quad (13)$$

де  $\mu_n$  та  $\mu_p$  – рухливості електронів та дірок відповідно. Повна електропровідність напівпровідника  $\gamma = \gamma_T + \Delta \gamma$ , де  $\gamma_T$  – темнова електропровідність.

Якщо до напівпровідника прикладено зовнішнє електричне поле з напруженістю  $E$ , то збільшення електропровідності на величину  $\Delta\gamma$  призведе до виникнення додаткового струму (фотоструму) відповідно до закону Ома:

$$j_{\phi}(x) = \Delta\gamma(x) \cdot E. \quad (14)$$

Фотострум, який протікає в шарі  $dx$  на відстані  $x$  від поверхні

$$dI = j_{\phi} b dx = \Delta\gamma (U/l) b dx, \quad (15)$$

де  $U$  – зовнішня напруга,  $l$  – довжина,  $b$  – ширина зразка.

Підсумовуючи провідність всіх шарів напівпровідника товщиною  $d$ , дістаємо повний фотострум

$$I_{\phi} = U/l \cdot b \int_0^d \Delta\gamma dx = \frac{U}{l} \cdot b \cdot e \cdot \eta \cdot (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \cdot \Phi_0 \cdot (1-R) \cdot [1 - e^{-\alpha d}]. \quad (16)$$

**Нерівноважні носії струму в напівпровіднику.** Якщо на поверхні напівпровідника в умовах потужного поглинання ( $L_{\text{опт}} \ll x$ ) концентрації генерованих світлом нерівноважних електронів та дірок дорівнюють  $\Delta n_0$ ,  $\Delta p_0$ , то в міру віддалення від освітленої поверхні вони спадають відповідно до закону:

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-x / L_n); \quad (17)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(-x / L_p), \quad (18)$$

де  $L_n$ ,  $L_p$  – дифузійні довжини електронів та дірок:

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}; \quad (19)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}, \quad (20)$$

де коефіцієнти дифузії електронів та дірок:

$$D_n = \frac{kT}{e} \cdot \mu_n; \quad (21)$$

$$D_p = \frac{kT}{e} \cdot \mu_p, \quad (22)$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура,  $e$  – модуль заряду електрона (дірки).

Густина дифузійного струму електронів та дірок, який протікає від освітлюваної поверхні всередину зразка за рахунок градієнта концентрацій носіїв заряду, відповідно

$$j_n = e \cdot D_n \frac{d\Delta n}{dx}; \quad (23)$$

$$j_p = -e \cdot D_p \frac{d\Delta p}{dx}. \quad (24)$$

За розподілу носіїв вигляду (17) та (18) за  $x = 0$  виконуються співвідношення

$$\frac{d\Delta n}{dx} = -\frac{\Delta n_0}{L_n}; \quad (25)$$

$$\frac{d\Delta p}{dx} = -\frac{\Delta p_0}{L_p}. \quad (26)$$

Підставивши (25) і (26) у (23) і (24), дістанемо густина дифузійного струму поблизу освітлюваної поверхні (при  $x = 0$ ):

$$j_n = e \cdot D_n \frac{\Delta n_0}{L_n}; \quad (27)$$

$$j_p = -e \cdot D_p \frac{\Delta p_0}{L_p}. \quad (28)$$

Якщо припинити освітлювати поверхню напівпровідника, концентрація нерівноважних носіїв заряду спадатиме відповідно до закону:

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-t / \tau_n); \quad (29)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(-t / \tau_p), \quad (30)$$

де  $\Delta n_0$  та  $\Delta p_0$  – концентрації нерівноважних електронів та дірок відповідно за  $t = 0$ .

**Фотодіоди.** Найближчий контакт напівпровідників р- та n-типів утворює так званий р-n-перехід – структуру з цілим набором нових властивостей, головною з яких є однобічна провідність електричного струму при прикладенні прямого зміщення, коли “+” напруги підімкнено до р-області, а “-” – до n-області.

Вольт-амперна характеристика р-п-переходу:

$$j = j_s \left( \exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (31)$$

де  $U$  – прикладена напруга, а густина струму насичення дорівнює

$$j_s = e \cdot \left( D_n \frac{n_p}{L_n} + D_p \frac{p_n}{L_p} \right), \quad (32)$$

де  $D_n$  і  $D_p$  – коефіцієнти дифузії електронів та дірок відповідно;  $n_p$  і  $p_n$  – концентрації рівноважних неосновних електронів у р-області та дірок в п-області відповідно;  $L_n$  та  $L_p$  – дифузійні довжини електронів та дірок відповідно.

Зв'язок концентрацій носіїв струму в напівпровідниках п-типу й р-типу має вигляд :

$$n_i^2 = p_i^2 = n_n \cdot p_n = p_p \cdot n_p, \quad (33)$$

де  $n_i$  – власна концентрація електронів,  $p_i$  – власна концентрація дірок,  $n_n$  – концентрація основних електронів,  $p_n$  – концентрація неосновних дірок,  $p_p$  – концентрація основних дірок,  $n_p$  – концентрація неосновних електронів. Основними носіями є ті, які визначають тип провідності напівпровідника, тобто ті, яких більше.

З урахуванням співвідношення (33), дістанемо:

$$j_s = e \cdot \left( \frac{D_n}{L_n \cdot p_p} + \frac{D_p}{L_p \cdot n_n} \right) \cdot n_i^2. \quad (34)$$

В (34) власна концентрація носіїв визначається за формулою

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot \exp(-E_g/2kT), \quad (35)$$

де ефективна густина станів у зоні провідності

$$N_c = 2 \cdot \left( \frac{2\pi \cdot m_n \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (36)$$

і ефективна густина станів у валентній зоні

$$N_v = 2 \cdot \left( \frac{2\pi \cdot m_p \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2}. \quad (37)$$

У переважній більшості випадків в (34) можна припустити, що

$$n_n = N_D; \quad p_p = N_A, \quad (38)$$

де  $N_D$  – концентрація донорів у n-області,  $N_A$  – концентрація акцепторів у p-області.

Розглянемо фотоелемент з p-n-переходом, у якого тонка p-область завтовшки  $x$  (база) висвітлюється світлом квантовою інтенсивністю  $\phi_0$ . Для фотодіода є характерним, що світло цілком поглинається у приповерхневому шарі, тобто ефективна довжина оптичного поглинання (12)  $L_{\text{опт}} \ll x$  і швидкість оптичної генерації в p-області дорівнює

$$g = \frac{\eta \cdot \phi_0 (1 - R)}{x}, \quad (39)$$

де  $\eta$  – квантовий вихід фотоефекту,  $R$  – коефіцієнт відбиття світла.

Оскільки товщина області поглинання світла  $x$  робиться набагато менша за дифузійні довжини носіїв, то генеровані світлом електрони практично миттєво і без утрат досягають p-n-переходу й ідуть до n-області. Дірки, досягаючи p-n-переходу, не можуть подолати потенційний бар'єр і залишаються в p-області. Тоді густину електронного фотоструму через p-n-перехід площиною  $S$ , за відсутності помітних утрат на рекомбінацію фотоносіїв до їхнього розподілу p-n-переходом, можна визначити як

$$j_\phi = \frac{J}{S} = \frac{e\Delta N}{\tau_n S} = \frac{e\Delta n \cdot x \cdot S}{\tau_n S} = \frac{e \cdot g \cdot \tau_n x \cdot S}{\tau_n S} = e \cdot g \cdot x = e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R). \quad (40)$$

Внаслідок цього n-область заряджається негативно, а p-область – позитивно. Виникає фотоЕРС  $U$ , прикладена у пропускному напрямку, висота потенційного бар'єра зменшується, і в пропускному напрямку починає текти прямий струм (31), створюваний потоком електронів з n-області та дірок з p-області. Як наслідок, повний потік електронів з p-області зменшується, а дірок – збільшується. Якщо фотоелемент розімкнuto, то зміна потоків електронів та дірок продовжується доти, поки обидва потоки не зрівняються, тобто поки повний струм через p-n-перехід не дорівнюватиме нулю:

$$j_{\text{повн}} = j - j_\phi = 0. \quad (41)$$

Створена при цьому різниця потенціалів називається напругою холостого ходу. Підставивши (31) та (40) у (41), дістанемо співвідношення, яке встановлює зв'язок між падаючою на фотоелемент густиною потоку фотонів  $\phi_0$  і напругою холостого ходу  $U_{xx}$ :

$$e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) = j_s \left( \exp \frac{eU_{xx}}{kT} - 1 \right). \quad (42)$$

Якщо фотоелемент є короткозамкнутий, тобто між n- та p-областями немає різниці потенціалів, то дірки в n-область не проходять і всі електрони, що пройшли через p-n-перехід, доходять до вихідного контакту з металом (до виходу), а в колі тече струм, що рівний фотоструму (40), називаний струмом короткого замикання.

Якщо фотоелемент замкнуто на зовнішній опір, то між p- і n-областями створюється різниця потенціалів у пропускну напрямку – і струм зменшується.

У фотодіодному режимі на p-n-перехід подається зворотне зміщення і струм через перехід являє собою суму зворотного струму, визначеного згідно з (31) з від'ємним значенням  $U$ , і фотоструму (40):

$$j_{\text{повн}} = j - j_{\phi}. \quad (43)$$

**Модулятори.** Побудову електрооптичного модулятора подано на рис. 3.

Практичне застосування електрооптичного ефекту ґрунтується на тім, що показник заломлення є різний для світла, поляризованого перпендикулярно і паралельно до прикладеного зовнішнього електричного поля.

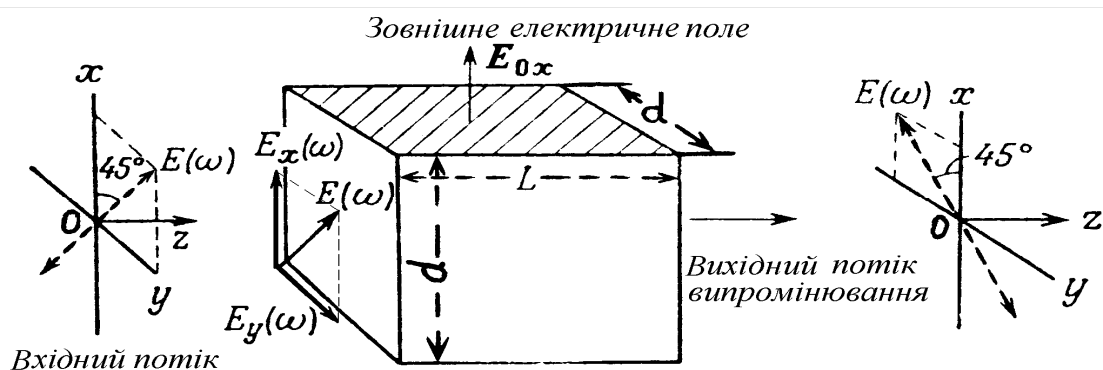


Рисунок 3 – Електрооптичний модулятор на базі комірки Поккельса.

На рис. 3 вхідне світло, яке поширюється уздовж осі  $z$ , поляризовано під кутом  $45^\circ$  стосовно зовнішнього електричного поля  $E_{0x}$ . За наявності зовнішнього поля  $E_{0x}$  різниця показників заломлення для подовжньої до зовнішнього електричного поля  $E_x(\omega)$  і поперечної  $E_y(\omega)$  компонент

$$\Delta n = \frac{n^3 r \cdot E_{0x}}{2}, \quad (44)$$

де  $n$  – показник заломлення під час відсутності зовнішнього поля;  $r$  – електрооптичний коефіцієнт (Поккельса),  $E_{0x}$  – напруженість зовнішнього електричного поля, спрямованого уздовж  $0x$ . У результаті при виході світлової електромагнітної хвилі з кристала довжиною  $L$  компоненти  $E_x(\omega)$  і  $E_y(\omega)$  здобувають оптичну різницю ходу

$$\Delta_{\text{опт}} = \Delta n \cdot L = \frac{n^3 r \cdot E_{0x} L}{2}. \quad (45)$$

Відповідна різниця фаз між компонентами  $E_x(\omega)$  і  $E_y(\omega)$  буде

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta_{\text{опт}} = \frac{\pi \cdot n^3 r \cdot E_{0x} L}{\lambda}. \quad (46)$$

Якщо  $\Delta_{\text{опт}} = \lambda/2$ , то площина поляризації вихідного пучка буде повернена на  $90^\circ$  стосовно площини поляризації вхідного пучка. Таким чином, якщо кристал з поперечними розмірами  $d \times d$  поміщено між схрещеними поляризаторами, то вихідний сигнал буде відсутнім за відсутності напруги і досягає максимуму, коли прикладена зовнішня “напівхвильова напруга”:

$$U_{(\lambda/2)} = E_{0x} \cdot d = \frac{\lambda \cdot d}{n^3 r \cdot L}. \quad (47)$$

Величина  $n^3 r$  являє собою чинник якості електрооптичного матеріалу.

Час проходження світлової хвилі кристалом не повинен становити понад половини періоду модулюючого сигналу  $T$ , тому що протягом другої половини періоду модулюючого сигналу модулююча напруга змінює знак на протилежний і світло, промодульоване у протязі першої половини періоду повинне залишити кристал. Таким чином, максимальна довжина комірки

Поккельса пов'язана з максимально можливою частотою модулюючого сигналу  $\nu_{\text{макс}}$  співвідношенням:

$$L_{\text{макс}} = \frac{c}{n} \cdot \frac{T}{2} = \frac{c}{2n\nu_{\text{макс}}}. \quad (48)$$

**Світловоди.** Дуже короткий світловий імпульс певної спектральної ширини  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , введений до світловоду в одномодовому режимі, коли фронт хвилі є перпендикулярний до осі світловоду, виходить з нього трохи розмитим у часі. Це відбувається внаслідок оптичної дисперсії, коли світлові хвилі з різною довжиною поширюються з різною швидкістю: сигнал з найбільшою довжиною хвилі надійде до виходу швидше, ніж сигнал з найменшою довжиною хвилі (у разі нормальної дисперсії). Такий ефект накладає фундаментальне обмеження на верхню границю частоти проходження імпульсів. Максимальною частотою проходження імпульсів  $\nu_{\text{макс}}$  слід вважати таку, коли в процесі поширення світловодом довгохвильовий край  $\lambda_2$  одного імпульсу наздожене короткохвильовий край  $\lambda_1$  попереднього імпульсу, інакше кажучи, найменший період проходження імпульсів  $T_{\text{мін}} = 1/\nu_{\text{макс}}$  повинен дорівнювати різниці часів поширення короткохвильового  $t_1$  і довгохвильового  $t_2$  імпульсів:

$$T_{\text{мін}} = t_1 - t_2 = \frac{n(\lambda_1) \cdot l}{c} - \frac{n(\lambda_2) \cdot l}{c} = \frac{[n(\lambda_1) - n(\lambda_2)] \cdot l}{c} = \frac{dn/d\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot l}{c}, \quad (49)$$

де  $n(\lambda_1)$  і  $n(\lambda_2)$  – показники заломлення для короткохвильового і довгохвильового країв спектрального діапазону імпульсу,  $l$  – довжина світловоду,  $c$  – швидкість світла у вакуумі.

В (49) враховано, що, знаючи величину дисперсії  $dn/d\lambda$  для даного діапазону довжин хвиль і спектральну півширину імпульсу  $\Delta\lambda$ , можна знайти різницю показників заломлення для короткохвильового і довгохвильового країв спектрального діапазону імпульсу:

$$n(\lambda_1) - n(\lambda_2) = \frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda. \quad (50)$$



Поширення світлового сигналу світловодом супроводжується втратами, які характеризуються питомим коефіцієнтом утрат

$$\beta_0 = 10 \cdot \lg(P_0 / P_1), \text{ дБ/км}, \quad (51)$$

де  $P_0$  – потужність на вході,  $P_1$  – потужність на виході світловоду довжиною 1 км.

Оскільки витрати потужності у світловоді характеризуються нелінійною залежністю від відстані, то після проходження світловоду довільної довжини  $l$  потужність сигналу на виході можна визначити:

$$P = P_0 \cdot 10^{-\frac{\beta_0 l}{10}} = P_0 \cdot e^{-0,23\beta_0 l}. \quad (52)$$

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

**Приклад 1** Зразок напівпровідника n-типу має питомий опір 0,03 Ом·м. Визначити концентрацію власних, неосновних і основних носіїв струму. Ширина забороненої зони дорівнює 3,5 еВ, відносна ефективна маса електронів дорівнює 0,25, а дірок – 0,6. Рухливість основних носіїв заряду дорівнює 0,1 м<sup>2</sup>/В·с. Температура дорівнює 300 К.

$$\rho = 0,03 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$E_g = 3,5 \text{ еВ}$$

$$\frac{m_n}{m_0} = 0,25$$

$$\frac{m_p}{m_0} = 0,6$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$\mu_n = 0,1 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$$

*Розв'язання:*

Вважатимемо, що у напівпровідника явно виражена домішкова провідність: про це говорить низький питомий опір. Тоді для питомого опору можна записати:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{e \cdot n_n \cdot \mu_n}, \quad (1.1)$$

де  $e$  – заряд електрона,  $n_n$  – концентрація основних електронів,  $\mu_n$  – рухливість електронів.

$$n_i, p_n, n_n - ?$$

Звідси

$$n_n = \frac{1}{\rho \cdot e \cdot \mu_n}. \quad (1.2)$$

Концентрація власних носіїв струму

$$n_i = \sqrt{4(m_n \cdot m_p)^{3/2} \cdot \left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^3 \exp(-E_g / kT)}, \quad (1.3)$$

де  $m_n$ ,  $m_p$  – ефективна маса електронів та дірок, відповідно,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура,  $h$  – стала Планка.

Відомо, що

$$n_i^2 = n_n \cdot p_n, \quad (1.4)$$

де  $p_n$  – концентрація неосновних дірок.

Звідси:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}. \quad (1.5)$$

Підставивши (1.3) в (1.5), дістанемо

$$p_n = \frac{32}{h^6} (m_n \cdot m_p)^{3/2} (\pi k T)^3 \cdot \rho \cdot e \cdot \mu_n \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right). \quad (1.6)$$

Перевіримо одиниці виміру величин:

$$[p_n] = \frac{(\text{кк} \cdot \text{кг})^{3/2} \text{Дж}^3 \cdot \text{К}^3 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2}{\text{Дж}^6 \cdot \text{с}^6 \cdot \text{К}^3 \cdot \text{В} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}^3 \cdot \text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2}{\text{Дж}^3 \cdot \text{с}^6 \cdot \text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}^3 \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^6}{\text{кг}^3 \cdot \text{м}^6 \cdot \text{с}^6} = \text{м}^{-3};$$

$$[n_i] = \sqrt{\frac{(\text{кк} \cdot \text{кг})^{3/2} \text{Дж}^3 \cdot \text{К}^3}{\text{Дж}^6 \cdot \text{с}^6 \cdot \text{К}^3}} = \sqrt{\frac{\text{кг}^3}{\text{Дж}^3 \cdot \text{с}^6}} = \sqrt{\frac{\text{с}^6 \cdot \text{кг}^3}{\text{кг}^3 \cdot \text{м}^6 \cdot \text{с}^6}} = \text{м}^{-3};$$

$$[n_n] = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2} = \frac{1}{\text{м}^3} = \text{м}^{-3}.$$

Одиниця виміру  $E_g$  дорівнює одиниці виміру  $kT$ , тобто  $E_g/kT$  є безрозмірною величиною.

Підставивши в дістані формули числові значення величин, зробимо обчислення.

$$n_n = \frac{1}{0,03 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1} = 2,08 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3};$$

$$n_i = \sqrt{4(0,259,1110^{-31} \cdot 0,69,1110^{-31})^{3/2} \cdot \left(\frac{2 \cdot 3,141,3810^{-23} \cdot 300}{(6,6310^{-34})^2}\right)^3 \exp\left(-\frac{3,5}{8,6210^{-5} \cdot 300}\right)} = 4,4810^9 \text{ м}^{-3};$$

$$p_n = \frac{32}{(6,63 \cdot 10^{-34})^6} (0,259,11 \cdot 10^{-31} \cdot 0,69,11 \cdot 10^{-31})^{3/2} (3,14 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^3 \cdot 0,03 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \times 0,1 \cdot \exp\left(-\frac{3,5}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 300}\right) = 2,15 \cdot 10^{-30} \text{ м}^{-3}.$$

Можна скористатися формулою (1.5), підставивши до неї обчислені значення  $n_i$  та  $n_n$ .

Відповідь:  $n_i = 4,48 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-3}$ ;  $p_n = 2,15 \cdot 10^{-30} \text{ м}^{-3}$ ;  $n_n = 2,08 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ .

**Приклад 2** На поверхні однорідної пластини р-типу за допомогою світлового зонда відбувається генерація електронно-діркових пар. Визначити, на якій відстані від поверхні концентрація нерівноважних електронів поменшає у 20 разів. Рухливість електронів дорівнює  $0,1 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , час життя –  $10^{-6} \text{ с}$ .

<p>Дано:</p> $\frac{\Delta n_0}{\Delta n} = 20$ $\mu_n = 0,1 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ $\tau_n = 10^{-6} \text{ с}$ <hr style="border: 0.5px solid black;"/> <p><math>x = ?</math></p>	<p style="text-align: center;"><u>Розв'язання</u></p> <p>Розподіл нерівноважних електронів за глибиною описується виразом:</p> $\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-x/L_n), \quad (2.1)$ <p>де <math>\Delta n_0</math> – концентрація нерівноважних електронів у поверхні,  <math>L_n</math> – дифузійна довжина електронів, <math>x</math> – відстань від поверхні.</p>
---	--

Звідси

$$\frac{\Delta n_0}{\Delta n} = \exp\left(\frac{x}{L_n}\right). \quad (2.2)$$

Після логарифмування (2.2) дістанемо

$$\ln \frac{\Delta n_0}{\Delta n} = \frac{x}{L_n}. \quad (2.3)$$

Звідси

$$x = L_n \cdot \ln \frac{\Delta n_0}{\Delta n}. \quad (2.4)$$

Дифузійна довжина електронів

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}, \quad (2.5)$$

де  $\tau_n$  – час життя електронів. У свою чергу, коефіцієнт дифузії електронів

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n, \quad (2.6)$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура,  $\mu_n$  – рухливість електронів.

Підставимо (2.6) в (2.5) й дістанемо

$$L_n = \sqrt{\frac{kT}{e} \mu_n \cdot \tau_n}. \quad (2.7)$$

Тепер підставимо (2.7) в (2.4) й остаточно дістанемо

$$x = \sqrt{\frac{kT}{e} \mu_n \tau_n} \cdot \ln \frac{\Delta n_0}{\Delta n}. \quad (2.8)$$

Перевіримо одиницю виміру  $x$ :

$$[x] = \sqrt{\frac{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{К} \cdot \text{Кл} \cdot \text{В} \cdot \text{с}}} = \sqrt{\frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}}} = \text{м}.$$

Підставивши в отриману формулу числові значення величин, зробимо обчислення:

$$x = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}}} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 20 = 1,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Відповідь:  $x = 1,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$

**Приклад 3** Визначити швидкість оптичної генерації нерівноважних носіїв струму в пластині напівпровідника на відстані  $10^{-4}$  м від поверхні, освітленої фотоактивним світлом з інтенсивністю  $10^{19} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , якщо показник поглинання на довжині хвилі випромінювання дорівнює  $1,5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ , а коефіцієнт відбиття дорівнює 0,28.

Дано:	Розв'язання
$x = 10^{-1} \text{ м}$	Розподіл інтенсивності світла за товщиною описується
$\phi_0 = 10^{19} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	формулою
$\alpha = 1,5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$	$\phi(x) = \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (3.1)$
$R = 0,28$	де $\phi_0$ – інтенсивність падаючого світла, $R$ – коефіцієнт
$g$ – ?	відбиття, $\alpha$ – коефіцієнт поглинання, $x$ – відстань від поверхні.

Швидкість оптичної генерації носіїв струму дорівнює кількості носіїв струму, що генеруються в одиниці об'єму в одиницю часу, й дорівнює швидкості зменшення інтенсивності світла:

$$g(x) = -\eta \frac{d\phi}{dx} = \eta \cdot \alpha \cdot \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (3.2)$$

$\eta = 1$  – квантовий вихід фотоэффекту.

Перевіримо одиницю виміру:

$$[g] = m^{-1} m^{-2} c^{-1} = m^{-3} c^{-1} = \frac{1}{m^3 c}$$

Підставимо у здобуту формулу числові значення величин і зробимо обчислення:

$$g = 1,5 \cdot 10^4 \cdot 10^{19} (1 - 0,28) \cdot \exp(-1,5 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}) = 3,35 \cdot 10^{22} m^{-3} c^{-1}$$

Відповідь:  $g = 3,35 \cdot 10^{22} m^{-3} c^{-1}$ .

## ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

### 6.1 Світлодіоди

**1** Світловипромінювальний діод, виготовлений із заданого напівпровідника, випромінює світло при міжзонних переходах нерівноважних носіїв.

- Яка є довжина хвилі електролюмінесценції? Визначити півширину спектральної смуги випромінювання в нанометрах, якщо півширину смуги випромінювання в енергетичних одиницях прийняти  $4kT / \sqrt{N}$ , де  $N$  – номер варіанта. Для варіантів 1...15  $T = 390$  К, для варіантів 16...30  $T = 290$  К.

- Визначити граничну частоту роботи світлодіода при внутрішньому способі модуляції.

- Обчислити максимальну ширину забороненої зони напівпровідника, придатного для виготовлення фотодіодів для приймання даного випромінювання.

**2** Світловипромінювальний діод, виготовлений із заданого напівпровідника, випромінює світло при міжзонних переходах нерівноважних носіїв.

- Яка є частота максимуму випромінювання? Визначити півширину спектра випромінювання в терагерцах, якщо півширину смуги випромінювання в енергетичних одиницях прийняти  $4kT / \sqrt{N}$ , де  $N$  – номер варіанта. Для варіантів 1...15  $T = 380$  К, для варіантів 16...30  $T = 280$  К.

- Визначити граничну частоту роботи світлодіода при внутрішньому способі модуляції.

- Обчислити мінімальну ширину забороненої зони напівпровідника, придатного для виготовлення фотодіодів для приймання даного випромінювання.

**3** Світловипромінювальний діод, виготовлений із заданого напівпровідника, випромінює світло при міжзонних переходах нерівноважних носіїв.

- Запишіть енергію максимуму смуги випромінювання в енергетичних одиницях. Півширину смуги випромінювання в енергетичних одиницях прийняти  $4kT / \sqrt{N}$ , де  $N$  – номер варіанта. Для варіантів 1...15  $T = 370$  К, для варіантів 16...30  $T = 270$  К.

- Визначити граничну частоту роботи світлодіода при внутрішньому способі модуляції.

- Які напівпровідники із таблиці 1 придатні для виготовлення фотодіодів для приймання даного випромінювання? Зазначити номери й хімічні формули.

## **6.2 Внутрішній фотоефект**

**1** Напівпровідник освітлено фотоактивним світлом з квантовою інтенсивністю (густиною потоку фотонів)  $10^{24} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Показник поглинання дорівнює  $1000 \text{ м}^{-1}$ , коефіцієнт відбиття світла від поверхні зразка – 0,1, квантовий вихід внутрішнього фотоефекту – 0,95, питомий опір матеріалу в темряві – 0,2 Ом·м. У скільки разів зміниться питома електропровідність в шарі напівпровідника на відстані  $x$  від поверхні під дією випромінювання ( $\gamma / \gamma_T$ )? Визначити густину фотоструму в цьому шарі напівпровідника за напруженості електричного поля 10 В/м.

**2** Визначити концентрацію нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику на відстані  $x$  від поверхні при оптичному збуджуванні світлом з квантовою інтенсивністю  $10^{23} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , якщо показник поглинання на довжині хвилі випромінювання дорівнює  $2000 \text{ м}^{-1}$ . Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту прийняти дорівнюваним одиниці, коефіцієнт відбиття світла від поверхні зразка дорівнює 0,2. Визначити повний фотострум у зразку за

зовнішньої напруги 20 В, якщо довжина зразка дорівнює 5 мм, ширина – 3 мм, товщина – 1 мм.

**3** Напівпровідник освітлено фотоактивним світлом з квантовою інтенсивністю  $10^{22} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ , коефіцієнт відбиття світла від поверхні зразка дорівнює 0,3. Показник поглинання дорівнює  $3000 \text{ м}^{-1}$ . Наскільки зміниться питома електропровідність в шарі напівпровідника на відстані  $x$  від поверхні під дією випромінювання, якщо квантовий вихід фото ефекту дорівнює 0,9? Визначити повний фотострум в зразку при зовнішній напрузі 30 В, якщо довжина зразка дорівнює 2,5 мм, ширина – 1,5 мм, товщина – 1 мм.

### **6.3 Нерівноважні носії струму у напівпровіднику**

**1** Поверхня зразка освітлюється фотоактивним світлом, причому світло поглинається у приповерхневому шарі. Концентрація нерівноважних дірок біля поверхні дорівнює  $N \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , де  $N$  – номер варіанта. Визначити густину дифузійного діркового струму в безпосередній близькості від освітленої поверхні й глибину, на якій концентрація нерівноважних дірок становитиме  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Світло з якими довжинами хвилі буде фотоактивним для даного напівпровідника?

**2** Напівпровідник р-типу освітлено фотоактивним світлом, світло поглинається у приповерхневому шарі. Концентрація неосновних нерівноважних носіїв струму біля поверхні становить  $N \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , де  $N$  – номер варіанта. Визначити густину дифузійного електронного струму в безпосередній близькості від освітленої поверхні через 2 мкс після вимикання джерела світла. Світло з якими довжинами хвилі буде фотоактивним для даного напівпровідника?

**3** Напівпровідник р-типу освітлено фотоактивним світлом, світло поглинається у приповерхневому шарі. Концентрація основних нерівноважних носіїв біля поверхні дорівнює  $N \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , де  $N$  – номер варіанта. Визначити густину дифузійного діркового струму на відстані 5 мм від освітленої поверхні. За який час після вимикання світла концентрація основних нерівноважних

носіїв біля поверхні буде  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  ? Світло з якими довжинами хвилі буде фотоактивним для даного напівпровідника?

#### 6.4 Фотодіоди

1 Є р-n-перехід при температурі  $T = (400 - 3,5N) \text{ К}$  з концентрацією донорів  $10^{4,1\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$  та концентрацією акцепторів  $10^{4,6\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$ . Визначити фотоЕРС холостого ходу, генерованого р-n-переходом при освітленні фотоактивним світлом з квантовою інтенсивністю  $10^{4,6\sqrt{N}} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .  $N$  – номер варіанта. Коефіцієнт відбиття світла від поверхні зразка дорівнює 0,3. Вважати, що усе проникле до бази світло поглинається зі 100-відсотковим квантовим виходом.

2 Є р-n-перехід при температурі  $T = (400 - 3,5N) \text{ К}$  з концентрацією донорів  $10^{4,2\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$  та концентрацією акцепторів  $10^{4,5\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$ , де  $N$  – номер варіанта. Визначити густину потоку фотонів, за якої фотоЕРС холостого ходу дорівнюватиме 50 мВ. Вважати, що проникле до бази світло поглинається з 95-відсотковим квантовим виходом. Утрати при відбитті – відсутні.

3 Є р-n-перехід при температурі  $T = (400 - 3,5N) \text{ К}$  з концентрацією донорів  $10^{4,3\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$  та концентрацією акцепторів  $10^{4,4\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$ , де  $N$  – номер варіанта. Визначити, у скільки разів збільшиться струм через зворотно зміщений р-n-перехід (модуль відношення  $j_{\phi}/j$ ) при його освітленні фотоактивним світлом з квантовою інтенсивністю  $10^{5\sqrt{N}} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , якщо зворотна напруга дорівнює 1 В. Коефіцієнт відбиття світла від поверхні зразка – 0,2. Вважати, що проникле до бази світло поглинається з 90-відсотковим квантовим виходом.

#### 6.5 Модулятори

1 Світло, випромінюване при міжзонних переходах носіїв у світлодіоді, виготовленому на основі даного напівпровідника (див. таблицю2), модулюється поданням напруги на комірку Поккельса, фактор якості якої зазначено у таблиці варіантів завдань.



- Яка є півхвильова напруга для даної комірки Поккельса з поперечними розмірами  $0,2 \times 0,2$  мм і довжиною 10 мм?

- Чому дорівнює різниця показників заломлення двох складових минаючого світла: поляризованої уздовж зовнішнього електричного поля і поперек його?

**2** Світло, випромінюване при міжзонних переходах носіїв у світлодіоді, виготовленому на основі даного напівпровідника (див. таблицю варіантів завдань), модулюється подачею напруги на комірку Поккельса, фактор якості якої зазначено у таблиці варіантів завдань.

- Якою повинна бути довжина комірки Поккельса, щоб при поперечних розмірах  $0,2 \times 0,2$  мм напівхвильова напруга дорівнювала у Вольтах  $30\sqrt{N}$ , де  $N$  – номер варіанта?

- Визначити максимально можливу частоту модулюючого сигналу при отриманій довжині комірки, якщо електрооптичний коефіцієнт матеріалу комірки прийняти рівним  $N \cdot 10^{-11}$  м/В, де  $N$  – номер варіанта.

**3** Світло, випромінюване при міжзонних переходах носіїв у світлодіоді, виготовленому на основі даного напівпровідника (див. таблицю варіантів завдань), модулюється подачею напруги на комірку Поккельса, фактор якості якої зазначений у таблиці варіантів завдань.

- Якими повинні бути поперечні розміри комірки Поккельса при довжині 10 мм, щоб напівхвильова напруга дорівнювала у Вольтах  $30\sqrt{N}$ , де  $N$  – номер варіанта?

- Яка може бути максимальна довжина комірки при максимально можливій частоті модулюючого сигналу 10 ГГц, якщо електрооптичний коефіцієнт матеріалу комірки прийняти  $N \cdot 10^{-11}$  м/В, де  $N$  – номер варіанта.

## **6.6 Світловоди**

**1** Світлове випромінювання з півшириною спектра, визначеною відповідно до варіанта в задачі 6.1, поширюється у світловоді довжиною 20 км для 1...15 варіантів і 10 км – для 16...30 варіантів, виконаному з матеріалу з питомим коефіцієнтом втрат і дисперсією, зазначеними в таблиці варіантів

завдань. У скільки разів зменшиться потужність світлового випромінювання внаслідок втрат у світловоді і яка максимальна частота проходження імпульсів у ньому?

**2** Світлове випромінювання з півшириною спектра, визначеною відповідно до варіанта в задачі 6.1, поширюється у світловоді, виконаному з матеріалу з питомим коефіцієнтом втрат і дисперсією, зазначеними в таблиці варіантів завдань. Яка має бути максимальна довжина світловоду, щоб потужність світлового сигналу на виході з нього зменшувалася не більш ніж у 100 разів? Яка є максимальна частота проходження імпульсів у ньому при отриманій довжині?

**3** Світлове випромінювання з півшириною спектра, визначеною відповідно до варіанта в задачі 6.1, поширюється у світловоді, виконаному з матеріалу з питомим коефіцієнтом втрат і дисперсією, зазначеними в таблиці варіантів завдань. Яка має бути максимально довжина світловоду, якщо частота проходження імпульсів у ньому повинна бути не менше за 10 ГГц ? У скільки разів зменшиться потужність випромінювання внаслідок втрат у світловоді при отриманій довжині?

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОМПЛЕКСНОГО ЗАДАНИЯ

1 Для выполнения комплексного задания № 6 студенты должны изучить разделы “Оптика” и “Элементы оптической связи” курса физики.

2 Студент должен решить пять задач: 6.1; 6.2; 6.3; 6.4; 6.5. Номер варианта определяется порядковым номером фамилии студента в журнале группы. Номера условий, которые студент должен включить в комплексное задание, указаны в таблицах исходных данных.

3 Отчет по индивидуальному заданию выполняется в отдельной тетради. Записи ведутся на правой стороне разворота тетради. На левой стороне пишутся замечание преподавателя и сделанные студентом исправления.

4 На обложке тетради следует записать название работы, номер варианта, фамилию и инициалы студента, шифр группы.

5 Задачи следует располагать по порядку. Условие переписывать полностью. Сделать *короткую запись условия*. Представить значение заданных величин к *системе единиц СИ*. Привести пояснительную *схему* или *рисунок*.

6 При решении задач следует прежде всего установить основные физические явления и записать формулы, которые отражают эти явления. Все обозначения в формулах следует *пояснить*.

7 Из приведенных формул следует составить систему уравнений и найти решение задачи или ее части в *буквенном виде*, где искомая величина должна быть представлена через заданные величины в буквенных (символьных) обозначениях.

8 Следует *проверить единицы измерения* полученных величин на соответствие их с ожидаемыми. Для этого следует подставить в формулу буквенного решения вместо символа каждой величины ее единицу измерения и осуществить необходимые преобразования. Лишь после совпадения единиц измерения с ожидаемыми следует подставить в формулу буквенного решения *числовые значения* величин и сделать вычисления (см. примеры).

9 В конце работы следует указать использованную литературу.

**Примечание.** Если в процессе вычисления в экспоненту подставлять ширину запрещенной зоны в электронвольтах, тогда значение постоянной Больцмана принимать равным  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

В других случаях – постоянную Больцмана брать как  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Во всех случаях, если не указано иначе, считать  $T = 300$  К.

### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

*При оценке практической части по 6 задачам комплексного задания студент получает:*

- за правильное решение и оформление задачи и верное объяснение хода решения – **16** баллов;
- за правильное решение и оформление задачи и неточностями в объяснениях – **14** баллов;
- за правильное решение и оформление задачи и ошибками в объяснениях хода решения – **10** баллов;
- за правильное решение с недостатками оформления (нет пояснений величин, схемы, единиц измерения, и т.д.) задачи и верное объяснение хода решения – **9** баллов;
- за правильное решение с недостатками оформления (нет пояснений величин, схемы, единиц измерения, и т.д.) задачи и неточностями в объяснениях хода решения – **7** баллов;
- за правильный ход решения и оформление задачи, но с неверным численным решением и верное объяснение хода решения – **5** баллов;

Оценка выставляется исходя из следующих критериев:

- «Відмінно» - свыше **95** баллов,  
«Добре» - от **80** до **95** баллов,  
«Задовільно» – от **60** до **80** баллов,  
«Незадовільно» – меньше **60** баллов.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$t$  – время,  $x$  – координата (толщина),  $S$  – площадь сечения  
 $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света  
 $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль заряда электрона, заряд дырки  
 $g$  – скорость генерации носителей тока  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $\nu$  – частота световых квантов  
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К – постоянная Больцмана,  $T$  – температура  
 $E$  – напряженность электрического поля  
 $U$  – разность потенциалов,  $U_k$  – контактная разность потенциалов  
 $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость  
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная  
 $j$  – плотность тока,  $j_s$  – плотность тока насыщения  
 $C$  – электроёмкость р-п-перехода,  $\delta$  – ширина области объёмного заряда  
 $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя свободного электрона  
 $m_n$  – эффективная масса электрона,  $m_p$  – эффективная масса дырки  
 $L_n$  – диффузионная длина электронов,  $L_p$  – диффузионная длина дырок  
 $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $E$  – энергия электрона (дырки)  
 $N_v$  – плотность состояний в валентной зоне,  $N_c$  – в зоне проводимости  
 $N_a$  – концентрация акцепторов,  $N_d$  – концентрация доноров  
 $n$  – концентрация электронов,  $p$  – концентрация дырок  
 $n_i$  – концентрация собственных электронов,  $p_i$  – концентрация собственных дырок  
 $n_n$  – концентрация основных электронов,  $p_p$  – концентрация основных дырок  
 $n_p$  – концентрация неосновных электронов,  $p_n$  – концентрация неосновных дырок  
 $\mu_n$  – подвижность электронов,  $\mu_p$  – подвижность дырок  
 $\tau_n$  – время жизни электронов,  $\tau_p$  – время жизни дырок  
 $\rho$  – удельное сопротивление,  $\rho_i$  – собственное удельное сопротивление  
 $\rho_T$  – темновое удельное сопротивление,  $\gamma$  – удельная электропроводность  
 $\gamma_T$  – удельная темновая электропроводность,  $\Delta\gamma$  – удельная фотопроводимость  
 $D_n$  – коэффициент диффузии электронов,  $D_p$  – коэффициент диффузии дырок  
 $\Delta n$  – концентрация неравновесных электронов  
 $\Delta p$  – концентрация неравновесных дырок  
 $\alpha$  – коэффициент поглощения света,  $R$  – коэффициент отражения света  
 $\phi$  – квантовая интенсивность излучения (плотность потока фотонов)  
 $L_{\text{опт}}$  – эффективная длина поглощения света  
 $\eta$  – квантовый выход фотоэффекта

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ФОРМУЛЫ

**Светодиоды.** При изучении оптических свойств полупроводников наиболее удачной формой представления полупроводника является зонная диаграмма (зонная модель), которая показана на рис. 1. Обозначения энергетических уровней следующие:  $E_C$  – дно зоны проводимости,  $E_V$  – потолок валентной зоны,  $E_D$  – уровень доноров,  $E_A$  – уровень акцепторов. Разность энергий  $E_C - E_V$  есть ширина запрещенной зоны  $E_g$ . Эффективная плотность состояний:  $N_C$  – в зоне проводимости,  $N_V$  – в валентной зоне,  $N_D$  – концентрация доноров,  $N_A$  – концентрация акцепторов,  $n$  – концентрация электронов в полупроводнике,  $p$  – концентрация дырок. Переходы электронов: 1 – с излучением фотона, 2 – с поглощением фотона.

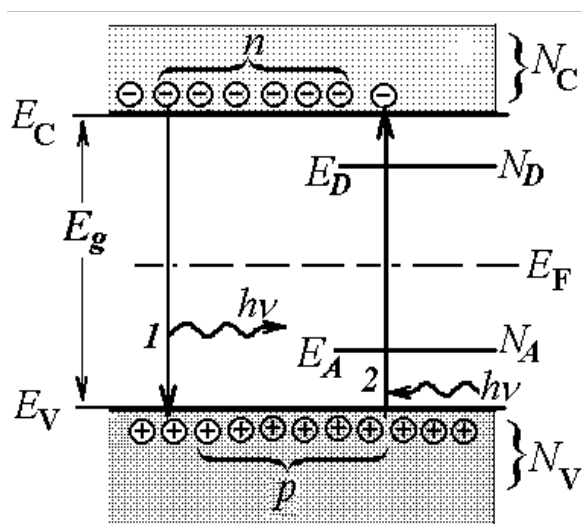


Рисунок 1 – Зонная диаграмма полупроводника

валентной зоны,  $E_D$  – уровень доноров,  $E_A$  – уровень акцепторов. Разность энергий  $E_C - E_V$  есть ширина запрещенной зоны  $E_g$ . Эффективная плотность состояний:  $N_C$  – в зоне проводимости,  $N_V$  – в валентной зоне,  $N_D$  – концентрация доноров,  $N_A$  – концентрация акцепторов,  $n$  – концентрация электронов в полупроводнике,  $p$  – концентрация дырок. Переходы электронов: 1 – с излучением фотона, 2 – с

поглощением фотона.

Длина волны электролюминесценции при переходах электронов из зоны проводимости в валентную зону светоизлучающего диода определяется по формуле

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме.

Этой длине волны соответствует максимальная квантовая интенсивность излучения (число фотонов, излучаемых за единицу времени с единичной площадки излучателя).

Длина волны связана с энергией фотона  $h\nu$  выражением

$$\lambda = \frac{hc}{h\nu}, \quad (2)$$

где  $\nu$  – частота света.

Полоса излучения в энергетических единицах ( $E_g - \Delta(h\nu)/2$ ;  $E_g + \Delta(h\nu)/2$ ) определяет интервал энергий излучаемых фотонов, квантовая интенсивность которых больше половины максимальной квантовой интенсивности;  $\Delta(h\nu)$  – полуширина полосы излучения в энергетических единицах.

Учитывая, что энергия излучаемых фотонов  $h\nu$  намного больше разности энергий  $d(h\nu)$  в полосе излучения  $\Delta(h\nu)$ , можно продифференцировать выражение (2):

$$\frac{d\lambda}{d(h\nu)} = hc \cdot \frac{1}{(h\nu)^2} = hc \cdot \frac{\lambda^2}{(hc)^2} = \frac{\lambda^2}{hc}, \quad (3)$$

откуда, заменив знак дифференциала  $d$  на знак приращения  $\Delta$ , получим выражение для полуширины полосы излучения в единицах длины волны (полуширины спектра)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot \Delta(h\nu)}{hc}. \quad (4)$$

Тогда полоса излучения в единицах длины волны считается как интервал  $(\lambda - \Delta\lambda/2; \lambda + \Delta\lambda/2)$ .

Полосу излучения в единицах частоты можно получить, рассчитав частоту излучения из выражения (2), а полуширину спектра в единицах частоты – из (4):

$$\Delta\nu = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2}. \quad (5)$$

Предельная частота работы светодиода (частота модулирующего сигнала при внутреннем способе модуляции излучения) определяется чаще всего временем жизни инжектированных в р-базу электронов  $\tau_n$ :

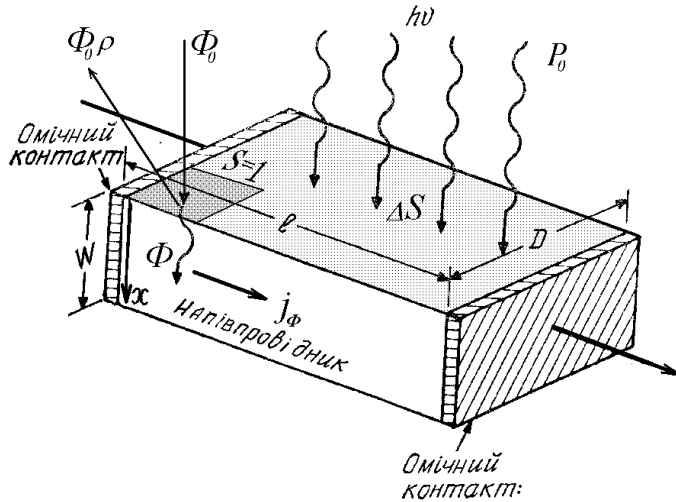
$$f_{\text{макс}} = \frac{1}{2\pi\tau_n}. \quad (6)$$

**Внутренний фотоэффект.** Фотоактивным для данного полупроводника является свет, энергия фотонов которого больше или равна ширине запрещенной зоны, но не может более чем вдвое превышать её (при этом свет поглощается вблизи поверхности, где генерированные носители сразу рекомбинируют через поверхностные состояния):

$$E_g \leq h\nu \leq 2E_g, \quad (7)$$

То есть минимальная и максимальная длина волны фотоактивного света

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{hc}{2E_g}, \quad \lambda_{\text{макс}} = \frac{hc}{E_g}. \quad (8)$$



Когда поверхность полупроводника освещается (рис. 2) фотоактивным светом интенсивностью (плотностью потока фотонов)  $\phi_0$ , то по мере проникновения света вглубь полупроводника интенсивность света будет изменяться по закону Бугера:

Рисунок 2 – Пояснения внутреннего фотоэффекта

$$\phi(x) = \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (9)$$

где  $R$  – коэффициент отражения света,  $\alpha$  – коэффициент поглощения света,  $x$  – расстояние от поверхности.

Скорость оптической генерации носителей пропорциональна скорости убывания интенсивности света:

$$g(x) = -\eta \frac{d\phi}{dx} = \eta \cdot \alpha \cdot \phi(x), \quad (10)$$

где  $\eta$  – квантовый выход внутреннего фотоэффекта.

Концентрация генерированных светом неравновесных электронов и дырок в слое полупроводника на глубине  $x$  в условиях слабого поглощения (когда эффективная длина оптического поглощения  $L_{\text{опт}} = 1/\alpha \gg x$ ):

$$\Delta n(x) = \tau_n g = \tau_n \cdot \eta \cdot \alpha \cdot \phi(x); \quad (11)$$

$$\Delta p(x) = \tau_p g = \tau_p \cdot \eta \cdot \alpha \cdot \phi(x), \quad (12)$$

где  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – время жизни электронов и дырок соответственно.

Дополнительная электропроводность (фотопроводимость) на глубине  $x$

$$\Delta \gamma(x) = e \cdot (\Delta n \cdot \mu_n + \Delta p \cdot \mu_p), \quad (13)$$



где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок. Полная электропроводность полупроводника  $\gamma = \gamma_T + \Delta\gamma$ , где  $\gamma_T$  – темновая электропроводность.

Если к полупроводнику приложено электрическое поле с напряжённостью  $E$ , то увеличение электропроводности на величину  $\Delta\gamma$  приведёт к появлению дополнительного тока (фототока) в соответствии с законом Ома:

$$j_\phi(x) = \Delta\gamma(x) \cdot E. \quad (14)$$

Фототок, протекающий в слое  $dx$  на расстоянии  $x$  от поверхности

$$dI = j_\phi \cdot b \cdot dx = \Delta\gamma \cdot (U/l) \cdot b \cdot dx, \quad (15)$$

где  $U$  – внешнее напряжение,  $l$  – длина,  $b$  – ширина образца.

Суммируя проводимость всех слоёв полупроводника толщиной  $d$ , получаем полный фототок

$$I_\phi = U/l \cdot b \int_0^d \Delta\gamma dx = \frac{U}{l} \cdot b \cdot e \cdot \eta \cdot (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \cdot \Phi_0 \cdot (1 - R) \cdot [1 - e^{-\alpha d}]. \quad (16)$$

**Неравновесные носители тока в полупроводнике.** Если на поверхности образца при условии сильного поглощения ( $L_{\text{опт}} \ll x$ ) концентрации генерированных светом неравновесных электронов и дырок равны  $\Delta n_0$  и  $\Delta p_0$ , то по мере удаления от поверхности они убывают в соответствии с законом:

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-x/L_n); \quad (17)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(-x/L_p), \quad (18)$$

где  $L_n, L_p$  – диффузионные длины для электронов и дырок:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}; \quad (19)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \quad (20)$$

где коэффициенты диффузии электронов и дырок

$$D_n = \frac{kT}{e} \cdot \mu_n; \quad (21)$$

$$D_p = \frac{kT}{e} \cdot \mu_p, \quad (22)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $e$  – модуль заряда электрона (дырки).

Плотность диффузионного тока электронов и дырок, протекающего от освещаемой поверхности вглубь образца за счёт градиента концентраций носителей заряда, соответственно

$$j_n = eD_n \frac{d\Delta n}{dx}; \quad (23)$$

$$j_p = -eD_p \frac{d\Delta p}{dx}. \quad (24)$$

При распределении носителей вида (17) и (18) при  $x = 0$  выполняются соотношения

$$\frac{d\Delta n}{dx} = -\frac{\Delta n_0}{L_n}; \quad (25)$$

$$\frac{d\Delta p}{dx} = -\frac{\Delta p_0}{L_p}. \quad (26)$$

Подставив (25) и (26) в (23) и (24), получим плотность диффузионного тока вблизи освещаемой поверхности (при  $x = 0$ ):

$$j_n = eD_n \frac{\Delta n_0}{L_n}; \quad (27)$$

$$j_p = -eD_p \frac{\Delta p_0}{L_p}. \quad (28)$$

Если прекратить освещать поверхность полупроводника, концентрация неравновесных носителей заряда будет уменьшаться в соответствии с законом

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-t / \tau_n); \quad (29)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(-t / \tau_p). \quad (30)$$

где  $\Delta n_0$  и  $\Delta p_0$  – неравновесные концентрации электронов и дырок соответственно при  $t = 0$ .

**Фотодиоды.** Ближайший контакт полупроводников р- и n-типов образует так называемый р-n-переход – структуру с целым набором новых свойств,

главным из которых является односторонняя проводимость электрического тока при приложении прямого смещения, когда “+” напряжения подключён к р-области, а “-” — к п-области.

Вольт-амперная характеристика р-п-перехода:

$$j = j_s \left( \exp \frac{e \cdot U}{kT} - 1 \right), \quad (31)$$

где  $U$  – приложенное напряжение, а плотность тока насыщения

$$j_s = e \left( D_n \frac{n_p}{L_n} + D_p \frac{p_n}{L_p} \right), \quad (32)$$

где  $D_n$  и  $D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно;  $n_p$  и  $p_n$  – концентрации равновесных неосновных электронов в р-области и дырок в п-области соответственно;  $L_n$  и  $L_p$  – диффузионные длины электронов и дырок соответственно.

Связь концентраций носителей тока в полупроводниках п-типа и р-типа:

$$n_i^2 = p_i^2 = n_n \cdot p_n = p_p \cdot n_p, \quad (33)$$

где  $n_i$  – собственная концентрация электронов,  $p_i$  – собственная концентрация дырок,  $n_n$  – концентрация основных электронов,  $p_n$  – концентрация неосновных дырок,  $p_p$  – концентрация основных дырок,  $n_p$  – концентрация неосновных электронов. Основными носителями являются те, которые определяют тип проводимости полупроводника, т. е. те, которых больше.

С учётом соотношения (33), получим

$$j_s = e \left( \frac{D_n}{L_n p_p} + \frac{D_p}{L_p n_n} \right) n_i^2. \quad (34)$$

Здесь собственная концентрация носителей определяется формулой:

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot \exp(-E_g / 2kT), \quad (35)$$

где эффективная плотность состояний в зоне проводимости

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi \cdot m_n \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (36)$$

и эффективная плотность состояний в валентной зоне

$$N_v = 2 \left( \frac{2\pi \cdot m_p \cdot kT}{h^2} \right)^{3/2}. \quad (37)$$

В подавляющем большинстве случаев в (34) можно принять, что

$$n_n = N_D; \quad p_p = N_A, \quad (38)$$

где  $N_D$  – концентрация доноров в n-области,  $N_A$  – концентрация акцепторов в p-области.

Рассмотрим фотоэлемент с p-n-переходом, у которого тонкая p-область толщиной  $x$  (база) освещается светом квантовой интенсивностью  $\phi_0$ . Для фотодиода характерно, что свет полностью поглощается в приповерхностном слое, т. е. эффективная длина оптического поглощения (12)  $L_{opt} \ll x$  и скорость оптической генерации в p-области

$$g = \frac{\eta \cdot \phi_0 (1 - R)}{x}, \quad (39)$$

где  $\eta$  – квантовый выход внутреннего фотоэффекта,  $R$  – коэффициент отражения света от поверхности.

Так как толщина области поглощения света  $x$  делается намного меньше диффузионных длин носителей, то генерируемые светом электроны практически мгновенно и без потерь достигают p-n-перехода и уходят в n-область. Дырки, достигая p-n-перехода, не могут преодолеть потенциальный барьер и остаются в p-области. Тогда плотность электронного фототока через p-n-переход площадью  $S$ , в отсутствие заметных потерь на рекомбинацию фотоносителей до их разделения p-n-переходом, можно определить как

$$j_\phi = \frac{J}{S} = \frac{e\Delta N}{\tau_n S} = \frac{e\Delta n \cdot x \cdot S}{\tau_n S} = \frac{e \cdot g \cdot \tau_n x \cdot S}{\tau_n \cdot S} = e \cdot g \cdot x = e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R). \quad (40)$$

В результате этого n-область заряжается отрицательно, а p-область – положительно. Возникает фотоЭДС, приложенная в пропускном направлении, высота потенциального барьера уменьшается, и в пропускном направлении начинает течь прямой ток (31), создаваемый потоком электронов из n-области и дырок из p-области. Поэтому полный поток электронов из p-области уменьшается, а дырок – увеличивается. Если фотоэлемент разомкнут, то

изменение потоков электронов и дырок продолжается до тех пор, пока оба потока не сравняются, т. е. пока полный ток через р-п-переход не станет равным нулю:

$$j_{\text{полн}} = j - j_{\phi} = 0. \quad (41)$$

Созданная при этом разность потенциалов называется напряжением холостого хода. Подставив (31) и (40) в (41), получим соотношение, устанавливающее связь между падающей на фотоэлемент плотностью потока фотонов  $\phi_0$  и напряжением холостого хода  $U_{\text{хх}}$ :

$$e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) = j_s \left( \exp \frac{e \cdot U_{\text{хх}}}{kT} - 1 \right). \quad (42)$$

Если фотоэлемент короткозамкнут, т. е. между п- и р-областями нет разности потенциалов, то дырки в п-область не проходят и все электроны, прошедшие через р-п-переход, доходят до выходного контакта с металлом (до вывода), а в цепи течет ток, равный фототоку (40), называемый током короткого замыкания.

Если фотоэлемент замкнут на внешнее сопротивление, то между р- и п-областями создается разность потенциалов в пропускном направлении – и ток уменьшается.

В фотодиодном режиме на р-п-переход подаётся обратное смещение, и ток через р-п-переход представляет собой сумму обратного тока, определяемого по (31) с отрицательным значением  $U$ , и фототока (40):

$$j_{\text{полн}} = j - j_{\phi}. \quad (43)$$

**Модуляторы.** Устройство электрооптического модулятора показано на рис. 3. Практическое применение электрооптического эффекта основано на том, что показатель преломления различен для света, поляризованного перпендикулярно и параллельно приложенному внешнему электрическому полю.

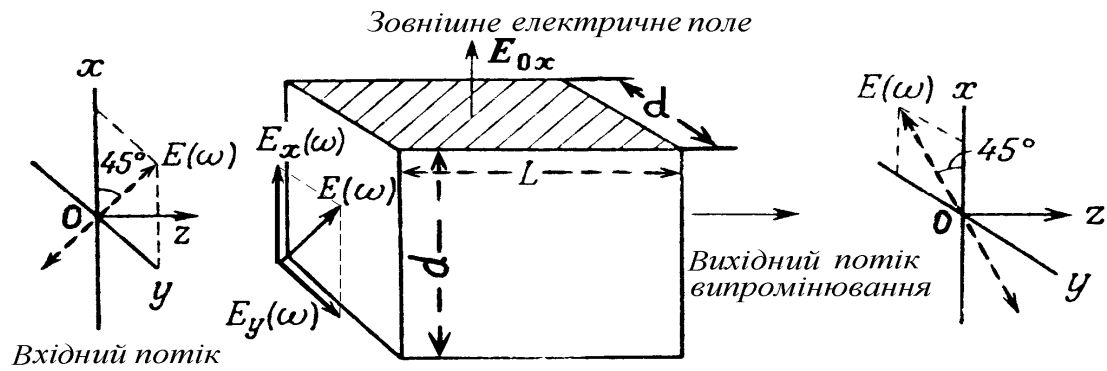


Рисунок 3 – Электрооптический модулятор на базе ячейки Погкельса

На рис. 3 входящий свет, распространяющийся вдоль оси  $z$ , поляризован под углом  $45^\circ$  по отношению к внешнему электрическому полю  $E_{0x}$ . При наличии внешнего поля  $E_{0x}$  возникает разность показателей преломления для продольной к внешнему электрическому полю  $E_x(\omega)$  и поперечной  $E_y(\omega)$  компонент электромагнитного поля светового излучения

$$\Delta n = \frac{n^3 r \cdot E_{0x}}{2}, \quad (44)$$

где  $n$  – показатель преломления в отсутствие внешнего поля,  $r$  – электрооптический коэффициент (Поккельса),  $E_{0x}$  – напряженность внешнего электрического поля, направленного вдоль  $Ox$ . В результате при выходе световой электромагнитной волны из кристалла длиной  $L$  компоненты  $E_x(\omega)$  и  $E_y(\omega)$  приобретают оптическую разность хода

$$\Delta_{\text{опт}} = \Delta n \cdot L = \frac{n^3 r \cdot E_{0x} L}{2}. \quad (45)$$

Соответствующая разность фаз между компонентами  $E_x(\omega)$  и  $E_y(\omega)$  будет

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta_{\text{опт}} = \frac{\pi \cdot n^3 r \cdot E_{0x} L}{\lambda}. \quad (46)$$

Если  $\Delta_{\text{опт}} = \lambda/2$ , то плоскость поляризации выходящего пучка будет повернута на  $90^\circ$  по отношению к плоскости поляризации входящего пучка. Таким образом, если кристалл с поперечными размерами  $d \times d$  помещен между скрещенными поляризаторами, то выходной сигнал отсутствует при отсутствии

напряжения и достигает максимума, когда приложено внешнее "полуволновое напряжение":

$$U_{(\lambda/2)} = E_{0x} d = \frac{\lambda d}{n^3 r L}. \quad (47)$$

Величина  $n^3 r$  представляет собой фактор качества электрооптического материала.

Время прохождения световой волны по кристаллу не может быть больше половины периода модулирующего сигнала  $T$ , так как в течение второй половины периода модулирующего сигнала модулирующее напряжение меняет знак на противоположный и свет, промодулированный в течение первой половины периода должен покинуть кристалл. Таким образом, максимальная длина ячейки Поккельса связана с максимально возможной частотой модулирующего сигнала  $\nu_{\text{макс}}$  соотношением:

$$L_{\text{макс}} = \frac{c}{n} \cdot \frac{T}{2} = \frac{c}{2n\nu_{\text{макс}}}. \quad (48)$$

**Световоды.** Очень короткий световой импульс некоторой спектральной ширины  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , введённый в световод в одномодовом режиме, когда фронт волны перпендикулярен оси световода, выходит из него несколько размытым во времени. Это происходит в результате оптической дисперсии, когда световые волны с разной длиной волны распространяются с различной скоростью: сигнал с наибольшей длиной волны придет к выходу быстрее, чем сигнал с наименьшей длиной волны (в случае нормальной дисперсии). Такой эффект накладывает фундаментальное ограничение на верхнюю границу частоты следования импульсов. Максимальной частотой следования импульсов  $\nu_{\text{макс}}$  следует считать такую частоту, когда в процессе распространения по световоду длинноволновый край  $\lambda_2$  одного импульса догонит коротковолновый край  $\lambda_1$  предыдущего импульса, иначе говоря, наименьший период следования импульсов  $T_{\text{мин}} = 1/\nu_{\text{макс}}$  должен быть равен разности времен распространения коротковолнового  $t_1$  и длинноволнового  $t_2$  импульсов:

$$T_{\text{мин}} = t_1 - t_2 = \frac{n(\lambda_1) \cdot l}{c} - \frac{n(\lambda_2) \cdot l}{c} = \frac{[n(\lambda_1) - n(\lambda_2)] \cdot l}{c} = \frac{dn/d\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot l}{c}, \quad (49)$$

где  $n(\lambda_1)$  и  $n(\lambda_2)$  – показатели преломления для коротковолнового и длинноволнового краёв спектрального диапазона импульса,  $l$  – длина световода,  $c$  – скорость света в вакууме.

В (49) учтено, что, зная величину дисперсии  $dn/d\lambda$  для заданного диапазона длин волн и спектральную полуширину импульса  $\Delta\lambda$ , можно найти разность показателей преломления для коротковолнового и длинноволнового краёв спектрального диапазона импульса:

$$n(\lambda_1) - n(\lambda_2) = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda. \quad (50)$$

Распространение светового сигнала по световоду сопровождается потерями, характеризуемыми удельным коэффициентом потерь

$$\beta_0 = 10 \lg(P_0 / P_l), \text{ дБ/км}, \quad (51)$$

где  $P_0$  – мощность на входе,  $P_l$  – мощность на выходе световода длиной 1 км.

Так как потери мощности в световоде характеризуются нелинейной зависимостью от расстояния, то после прохождения световода произвольной длины  $l$  мощность сигнала на выходе можно определить как

$$P = P_0 \cdot 10^{-\frac{\beta_0 l}{10}} = P_0 \cdot e^{-0,23\beta_0 l}. \quad (52)$$



## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Пример 1** Образец полупроводника n-типа имеет удельное сопротивление 0,03 Ом·м. Найти концентрацию собственных, неосновных и основных носителей тока. Ширина запрещенной зоны – 3,5 эВ, относительная эффективная масса электронов – 0,25, а дырок – 0,6. Подвижность основных носителей заряда равна 0,1 м<sup>2</sup>/В·с. Температура образца 300 К.

*Дано:*

$$\rho = 0,03 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

$$E_g = 3,5 \text{ эВ}$$

$$\frac{m_n}{m_0} = 0,25$$

$$\frac{m_p}{m_0} = 0,6$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$$\mu_n = 0,1 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$$

$$n_i, p_n, n_n - ?$$

*Решение:*

Будем считать, что у полупроводника ярко выраженная примесная проводимость (об этом говорит низкое удельное сопротивление). Тогда для удельного сопротивления можно записать:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{e \cdot n_n \cdot \mu_n}, \quad (1.1)$$

где  $e$  – заряд электрона,  $n_n$  – концентрация основных электронов,  $\mu_n$  – подвижность электронов.

Отсюда

$$n_n = \frac{1}{\rho \cdot e \cdot \mu_n}. \quad (1.2)$$

Концентрация собственных носителей тока

$$n_i = \sqrt{4(m_n \cdot m_p)^{3/2} \cdot \left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^3 \exp(-E_g/kT)}, \quad (1.3)$$

где  $m_n, m_p$  – эффективные массы электронов и дырок соответственно,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $h$  – постоянная Планка.

Известно, что

$$n_i^2 = n_n \cdot p_n, \quad (1.4)$$

где  $p_n$  – концентрация неосновных дырок. Отсюда

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}. \quad (1.5)$$

Подставив (1.3) в (1.5), получим

$$p_n = \frac{32}{h^6} (m_n \cdot m_p)^{3/2} (\pi kT)^3 \cdot \rho \cdot e \cdot \mu_n \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right). \quad (1.6)$$

Проверим единицы измерения величин:

$$[p_n] = \frac{(\text{кк} \cdot \text{кг})^{3/2} \text{Дж}^3 \cdot \text{К}^3 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2}{\text{Дж}^6 \cdot \text{с}^6 \cdot \text{К}^3 \cdot \text{В} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}^3 \cdot \text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2}{\text{Дж}^3 \cdot \text{с}^6 \cdot \text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}^3 \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^6}{\text{кг}^3 \cdot \text{м}^6 \cdot \text{с}^6} = \text{м}^{-3};$$

$$[n_i] = \sqrt{\frac{(\text{кк} \cdot \text{кг})^{3/2} \text{Дж}^3 \cdot \text{К}^3}{\text{Дж}^6 \cdot \text{с}^6 \cdot \text{К}^3}} = \sqrt{\frac{\text{кг}^3}{\text{Дж}^3 \cdot \text{с}^6}} = \sqrt{\frac{\text{с}^6 \cdot \text{кг}^3}{\text{кг}^3 \cdot \text{м}^6 \cdot \text{с}^6}} = \text{м}^{-3};$$

$$[n_n] = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{В} \cdot \text{м} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2} = \frac{1}{\text{м}^3} = \text{м}^{-3}.$$

Единица измерения  $E_g$ , очевидно, равна единице измерения  $kT$ , т.е.  $E_g/kT$  является безразмерной величиной.

Подставив в полученные формулы числовые значения величин, произведем вычисления:

$$n_n = \frac{1}{0,03 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1} = 2,08 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3};$$

$$n_i = \sqrt{4(0,259,1110^{-31} \cdot 0,69,1110^{-31})^{3/2} \cdot \left( \frac{2 \cdot 3,141,3810^{-23} \cdot 300}{(6,6310^{-34})^2} \right)^3 \exp\left( -\frac{3,5}{8,6210^{-5} \cdot 300} \right)} = 4,4810^9 \text{ м}^{-3};$$

$$p_n = \frac{32}{(6,63 \cdot 10^{-34})^6} (0,25 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 0,6 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31})^{3/2} (3,14 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300)^3 \cdot 0,03 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \times 0,1 \cdot \exp\left( -\frac{3,5}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 3} \right) = 2,15 \cdot 10^{-30} \text{ м}^{-3}.$$

Допустимо воспользоваться формулой (1.5), подставив в нее вычисленные значения  $n_i$  и  $n_n$ .

$$\text{Ответ: } n_i = 4,48 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}, p_n = 2,15 \cdot 10^{-30} \text{ м}^{-3}, n_n = 2,08 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

**Пример 2** На поверхности однородной пластины р-типа с помощью светового зонда происходит генерация электронно-дырочных пар. Определить, на каком расстоянии от поверхности концентрация неравновесных электронов уменьшится в 20 раз. Подвижность электронов равна  $0,1 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , время жизни –  $10^{-6} \text{ с}$ .

Дано:

$$\frac{\Delta n_0}{\Delta n} = 20$$

$$\mu_n = 0,1 \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$$

$$\tau_n = 10^{-6} \text{ с}$$

$x = ?$

Решение:

Распределение неравновесных электронов по глубине описывается выражением

$$\Delta n = \Delta n_0 \cdot \exp(-x/L_n), \quad (2.1)$$

где  $\Delta n_0$  – концентрация неравновесных электронов вблизи поверхности,  $L_n$  – диффузионная длина электронов,  $x$  – расстояние от поверхности.

Отсюда

$$\frac{\Delta n_0}{\Delta n} = \exp\left(\frac{x}{L_n}\right). \quad (2.2)$$

После логарифмирования (2.2) получим:

$$\ln \frac{\Delta n_0}{\Delta n} = \frac{x}{L_n}. \quad (2.3)$$

Отсюда

$$x = L_n \cdot \ln \frac{\Delta n_0}{\Delta n}. \quad (2.4)$$

Диффузионная длина электронов

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}, \quad (2.5)$$

где  $\tau_n$  – время жизни электронов. В свою очередь, коэффициент диффузии электронов

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n, \quad (2.6)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $\mu_n$  – подвижность электронов.

Подставим (2.6) в (2.5) и получим

$$L_n = \sqrt{\frac{kT}{e} \mu_n \cdot \tau_n}. \quad (2.7)$$

Теперь подставим (2.7) в (2.4) и окончательно получим

$$x = \sqrt{\frac{kT}{e} \mu_n \tau_n} \cdot \ln \frac{\Delta n_0}{\Delta n}. \quad (2.8)$$

Проверим единицу измерения  $x$ :

$$[x] = \sqrt{\frac{Дж \cdot К \cdot м^2 \cdot с}{К \cdot Кл \cdot В \cdot с}} = \sqrt{\frac{В \cdot А \cdot с \cdot м^2}{А \cdot с \cdot В}} = м.$$

Подставив в полученную формулу числовые значения величин, произведем вычисления:

$$x = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 20} = 1,53 \cdot 10^{-4} м.$$

Ответ:  $x = 1,53 \cdot 10^{-4} м.$

**Пример 3** Определить скорость оптической генерации неравновесных носителей тока в пластине полупроводника на расстоянии  $10^{-4}$  м от поверхности, освещенной фотоактивным светом с интенсивностью  $10^{19} м^{-2} с^{-1}$ , если показатель поглощения на длине волны излучения равен  $1,5 \cdot 10^4 м^{-1}$ , а коэффициент отражения равен 0,28.

Дано:

$$x = 10^{-4} м$$

$$\varphi_0 = 10^{19} м^{-2} с^{-1}$$

$$\alpha = 1,5 \cdot 10^4 м^{-1}$$

$$R = 0,28$$

---


$$g - ?$$

Решение:

Распределение интенсивности поглощённого света по толщине описывается формулой

$$\phi(x) = \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (3.1)$$

где  $\phi_0$  – интенсивность падающего света,  $R$  – коэффициент отражения,  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $x$  – расстояние от поверхности.

Скорость оптической генерации носителей тока равна количеству носителей тока, генерируемых в единице объема в единицу времени, и равна скорости уменьшения интенсивности света:

$$g(x) = -\eta \frac{d\phi}{dx} = \eta \cdot \alpha \cdot \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (3.2)$$

где  $\eta = 1$  – квантовый выход внутреннего фотоэффекта.

Проверим единицу измерения:

$$[g] = м^{-1} м^{-2} с^{-1} = м^{-3} с^{-1} = \frac{1}{м^3 с}.$$

Подставим в полученную формулу числовые значения величин и произведем вычисления:

$$g = 1,5 \cdot 10^4 \cdot 10^{19} (1 - 0,28) \cdot \exp(-1,5 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}) = 3,35 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

*Ответ:*  $g = 3,35 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$

## ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

### 6.1 Светодиоды

**1** Светоизлучающий диод изготовлен из заданного полупроводника и излучает свет при межзонных переходах неравновесных носителей.

- Какова длина волны электролюминесценции? Определить полуширину спектральной полосы излучения в нанометрах, если полуширину полосы излучения в энергетических единицах принять  $4kT / \sqrt{N}$ , где  $N$  – номер варианта. Для вариантов 1...15  $T = 390 \text{ К}$ , для вариантов 16...30  $T = 290 \text{ К}$ .

- Определить предельную частоту работы светодиода при внутреннем способе модуляции излучения.

- Вычислить максимальную ширину запрещенной зоны полупроводника, пригодного для изготовления фотодиодов для приема данного излучения.

**2** Светоизлучающий диод изготовлен из заданного полупроводника и излучает свет при межзонных переходах неравновесных носителей.

- Какова частота максимума излучения? Определить полуширину спектра излучения в терагерцах, если полуширину полосы излучения в энергетических единицах принять  $4kT / \sqrt{N}$ , где  $N$  – номер варианта. Для вариантов 1...15  $T = 380 \text{ К}$ , для вариантов 16...30  $T = 280 \text{ К}$ .

- Определить предельную частоту работы светодиода при внутреннем способе модуляции излучения.

- Вычислить минимальную ширину запрещенной зоны полупроводника, пригодного для изготовления фотодиодов для приема данного излучения.

**3** Светоизлучающий диод изготовлен из данного полупроводника и излучает свет при межзонных переходах неравновесных носителей.

- Укажите энергию максимума и полуширину полосы излучения в энергетических единицах. Полуширину полосы излучения в энергетических единицах принять  $4kT / \sqrt{N}$ , где  $N$  – номер варианта. Для вариантов 1...15  $T = 370$  К, для вариантов 16...30  $T = 270$  К.

- Определить предельную частоту работы светодиода при внутреннем способе модуляции излучения.

- Какие полупроводники из таблицы 1 пригодны для изготовления фотодиодов для приема данного излучения? Указать номера и химические формулы.

## 6.2 Внутренний фотоэффект

**1** Полупроводник освещен фотоактивным светом с интенсивностью плотностью потока фотонов  $10^{24} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Показатель поглощения равен  $1000 \text{ м}^{-1}$ , коэффициент отражения света от поверхности образца – 0,1, квантовый выход внутреннего фотоэффекта – 0,95, удельное сопротивление материала в темноте – 0,2 Ом·м. Во сколько раз изменится удельная электропроводность в слое полупроводника на глубине  $x$  от поверхности ( $\gamma / \gamma_T$ ) под действием излучения? Определить плотность фототока в этом слое при напряжённости электрического поля 10 В/м.

**2** Определить концентрацию неравновесных носителей заряда в полупроводнике на глубине  $x$  от поверхности при оптическом возбуждении светом с интенсивностью  $10^{23} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Квантовый выход внутреннего фотоэффекта принять равным единице, коэффициент отражения света от поверхности образца – 0,2, показатель поглощения на длине волны излучения –  $2000 \text{ м}^{-1}$ . Определить полный фототок в образце при напряжении 20 В, если длина образца – 5 мм, ширина – 3 мм, толщина – 1 мм.

**3** Полупроводник освещен фотоактивным светом с интенсивностью  $10^{22} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Коэффициент отражения света от поверхности образца равен 0,3, показатель поглощения –  $3000 \text{ м}^{-1}$ , квантовый выход фотоэффекта – 0,6. На сколько изменится удельная электропроводность полупроводника на глубине  $x$  от поверхности под действием излучения. Определить полный фототок в

образце при напряжении 30 В, если длина образца – 2,5 мм, ширина – 1,5 мм, толщина – 1 мм.

### 6.3 Неравновесные носители тока в полупроводнике

1 Поверхность образца освещается фотоактивным светом, причем всё падающее излучение поглощается в приповерхностном слое. Концентрация неравновесных дырок у поверхности равна  $N \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , где  $N$  – номер варианта. Определить плотность диффузионного дырочного тока в непосредственной близости от освещенной поверхности и глубину, на которой концентрация неравновесных дырок составит  $10^{18} \text{ м}^{-3}$ . Свет с какими длинами волн будет фотоактивным для данного полупроводника?

2 Полупроводник р-типа освещен фотоактивным светом, причем всё падающее излучение поглощается в приповерхностном слое. Концентрация неосновных неравновесных носителей тока у поверхности составляет  $N \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , где  $N$  – номер варианта. Определить плотность диффузионного электронного тока в непосредственной близости от освещенной поверхности через 2 мкс после выключения источника света. Свет с какими длинами волн будет фотоактивным для данного полупроводника?

3 Полупроводник р-типа освещен фотоактивным светом, причем всё падающее излучение поглощается в приповерхностном слое. Концентрация неравновесных основных носителей у поверхности равна  $N \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , где  $N$  – номер варианта. Определить плотность диффузионного дырочного тока на расстоянии 5 мм от освещенной поверхности. За какое время после выключения света концентрация неравновесных основных носителей у поверхности станет  $10^{10} \text{ м}^{-3}$ ? Свет с какими длинами волн будет фотоактивным для данного полупроводника?

### 6.4 Фотодиоды

1 Имеется р-п-переход при температуре  $T = (400 - 3,5N) \text{ К}$  с концентрацией доноров  $10^{4,1\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$  и концентрацией акцепторов  $10^{4,6\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$ . Определить фото-ЭДС холостого хода, генерируемую р-п-переходом при

освещении фотоактивным светом с квантовой интенсивностью  $10^{4,6\sqrt{N}} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .  $N$  – номер варианта. Коэффициент отражения света от поверхности образца равен 0,3. Считать, что весь прошедший в базу свет поглощается со 100-процентным квантовым выходом.

**2** Имеется р-п-переход при температуре  $T = (400-3,5N)$  К с концентрацией доноров  $10^{4,2\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$  и концентрацией акцепторов  $10^{4,5\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$ .  $N$  – номер варианта. Определить плотность потока фотонов, при которой фото-ЭДС холостого хода будет равна 50 мВ. Считать, что прошедший в базу свет поглощается с 95% квантовым выходом. Потери при отражении – отсутствуют.

**3** К р-п-переходу приложено обратное напряжение 1 В при температуре  $T = (400-3,5N)$  К с концентрацией доноров  $10^{4,3\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$  и концентрацией акцепторов  $10^{4,4\sqrt{N}} \text{ м}^{-3}$  ( $N$  – номер варианта). Определить во сколько раз увеличится ток через обратно смещенный р-п-переход (модуль отношения  $j_{\phi} / j$ ) при его освещении фотоактивным светом с квантовой интенсивностью  $10^{5\sqrt{N}} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Коэффициент отражения света от поверхности образца равен 0,2. Считать, что прошедший в базу свет поглощается с 90% квантовым выходом.

## 6.5 Модуляторы

**1** Свет, излучаемый при межзонных переходах носителей в светодиоде, изготовленном на основе данного полупроводника (см. таблицу вариантов заданий), модулируется подачей напряжения на ячейку Поккельса, фактор качества которой указан в таблице вариантов заданий.

- Каково полуволновое напряжение для данной ячейки Поккельса с поперечными размерами 0,2×0,2мм и длиной 10мм?

- Чему равна разность показателей преломления двух составляющих проходящего света: поляризованной вдоль внешнего электрического поля и поперек него?

**2** Свет, излучаемый при межзонных переходах носителей в светодиоде, изготовленном на основе данного полупроводника (см. таблицу вариантов



заданий), модулируется подачей напряжения на ячейку Поккельса, фактор качества которой указан в таблице вариантов заданий.

- Какой должна быть длина ячейки Поккельса, чтобы при поперечных размерах  $0,2 \times 0,2$  мм полуволновое напряжение равнялось в вольтах  $30\sqrt{N}$ , где  $N$  – номер варианта?

- Определить максимально возможную частоту модулирующего сигнала при полученной длине ячейки, если электрооптический коэффициент Поккельса материала ячейки принять равным  $N \cdot 10^{-11}$  м/В, где  $N$  – номер варианта.

**3** Свет, излучаемый при межзонных переходах носителей в светодиоде, изготовленном на основе данного полупроводника (см. таблицу вариантов заданий), модулируется подачей напряжения на ячейку Поккельса, фактор качества которой указан в таблице вариантов заданий.

- Какими должны быть поперечные размеры ячейки Поккельса при длине 10 мм, чтобы полуволновое напряжение равнялось вольтах  $30\sqrt{N}$ , где  $N$  – номер варианта?

- Какова может быть максимальная длина ячейки при максимально возможной частоте модулирующего сигнала 10 ГГц, если электрооптический коэффициент Поккельса материала ячейки принять равным  $N \cdot 10^{-11}$  м/В, где  $N$  – номер варианта.

## **6.6 Световоды**

**1** Световое излучение с полушириной спектра, определённой в соответствии с вариантом в задаче 6.1, распространяется в световоде длиной 20 км для вариантов 1...15 и 10 км – для вариантов 16...30, выполненном из материала с удельным коэффициентом потерь и дисперсией, указанными в таблице вариантов заданий. Во сколько раз уменьшится мощность светового излучения в результате потерь в световоде, и какова максимальная частота следования импульсов в нём?

**2** Световое излучение с полушириной спектра, определённой в соответствии с вариантом в задаче 6.1, распространяется в световоде, выполненном из материала с удельным коэффициентом потерь и дисперсией,

указанными в таблице вариантов заданий. Какова максимальная длина световода, чтобы мощность светового сигнала на выходе из него уменьшалась не более чем в 100 раз? Какова максимальная частота следования импульсов в нём при такой длине?

**3** Световое излучение с полушириной спектра, определённой в соответствии с вариантом в задаче 6.1, распространяется в световоде, выполненном из материала с удельным коэффициентом потерь и дисперсией, указанными в таблице вариантов заданий. Какова максимальная длина световода, если частота следования импульсов в нём должна быть не меньше 10 ГГц? Во сколько раз уменьшится мощность излучения в результате потерь в световоде при полученной длине?

Таблиця 1 **Номери умов задач за варіантами**

Варіант										Номери задач по темах					
										6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6
<b>1</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>19</b>	<b>22</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	1	2	3	1	2	3
<b>2</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>23</b>	<b>26</b>	<b>29</b>	2	3	1	2	3	1
<b>3</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>21</b>	<b>24</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	3	1	2	3	1	2

**Таблиця 2 Початкові дані за варіантами**

№ варіанта	Напівпровідник	$E_g$ , эВ	$\frac{m_n}{m_0}$	$\frac{m_p}{m_0}$	$\frac{\mu_n, \frac{M^2}{B \cdot c}}{B \cdot c}$	$\frac{\mu_p, \frac{M^2}{B \cdot c}}{B \cdot c}$	$\tau_n, c$	$\tau_p, c$	$x, \text{MKM}$	$n^3 r, \frac{\text{HM}}{B}$	$\beta_0, \frac{\text{ДБ}}{\text{KM}}$	$\frac{dn}{d\lambda}, \text{MM}^{-1}$
1	ZnS	<b>3,60</b>	0,3	0,5	0,017	0,0005	$10^{-4}$	$10^{-3}$	175	0,34	0,72	96
2	GaN	<b>3,40</b>	0,2	0,6	0,038	0,02	$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	65	0,26	0,74	94
3	ZnO	<b>3,30</b>	0,32	0,27	0,018	0,001	$3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	100	0,5	0,76	90
4	SiC	<b>3,00</b>	0,6	1,0	0,03	0,005	$10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	16	0,27	0,78	86
5	ZnSe	<b>2,60</b>	0,17	0,6	0,03	0,0015	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	120	1,0	0,80	84
6	CdS	<b>2,53</b>	0,2	0,7	0,03	0,005	$2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3}$	210	0,58	0,82	80
7	AlP	<b>2,43</b>	0,35	0,45	0,008	0,003	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	134	0,48	0,84	76
8	ZnTe	<b>2,28</b>	0,15	0,65	0,034	0,02	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	104	0,66	0,86	74
9	GaP	<b>2,26</b>	0,36	0,4	0,02	0,01	$10^{-6}$	$10^{-7}$	84	0,9	0,88	70
10	AlAs	<b>2,16</b>	1,06	0,49	0,1	0,01	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	70	1,2	0,90	66
11	CdSe	<b>1,74</b>	0,13	0,45	0,06	0,006	$10^{-5}$	$10^{-4}$	257	0,95	0,92	64
12	AlSb	<b>1,58</b>	0,3	0,4	0,04	0,02	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	130	2,1	0,94	60
13	GdTe	<b>1,51</b>	0,11	0,4	0,1	0,01	$10^{-6}$	$10^{-7}$	36	2,3	0,96	56
14	GaAs	<b>1,43</b>	0,067	0,5	0,85	0,04	$10^{-7}$	$10^{-8}$	18	3,2	0,98	54
15	InP	<b>1,35</b>	0,06	0,2	0,5	0,06	$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	73	1,2	1,0	50
16	Si	<b>1,12</b>	1,05	0,56	0,15	0,05	$3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	150	2,4	1,02	38
17	As <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	<b>1,0</b>	0,2	0,82	0,017	0,008	$6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	60	2,1	1,04	36
18	GaSb	<b>0,72</b>	0,05	0,4	0,5	0,14	$10^{-6}$	$10^{-6}$	107	1,2	1,06	34
19	Mg <sub>2</sub> Si	<b>0,70</b>	0,46	0,87	0,04	0,007	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	50	1,6	1,08	32
20	Ge	<b>0,67</b>	0,57	0,37	0,39	0,19	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$	200	4,6	1,10	30
21	Mg <sub>2</sub> Ge	<b>0,60</b>	0,18	0,31	0,05	0,01	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	47	3,62	1,12	28
22	ZnSb	<b>0,50</b>	0,15	0,42	0,1	0,05	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	67	4,1	1,14	26
23	CdSb	<b>0,46</b>	0,3	0,25	0,03	0,001	$2 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	180	2,8	1,16	24
24	PbS	<b>0,39</b>	0,25	0,25	0,06	0,07	$10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	60	5,2	1,18	22
25	InAs	<b>0,36</b>	0,027	0,41	3,0	0,04	$5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	20	5,19	1,20	20
26	Te	<b>0,34</b>	0,13	0,4	0,09	0,06	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	145	4,31	1,22	18
27	PbTe	<b>0,32</b>	0,034	0,032	0,2	0,10	$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	24	3,36	1,24	16
28	Mg <sub>2</sub> Sn	<b>0,30</b>	1,17	1,28	0,025	0,02	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	42	5,30	1,26	14
29	PbSe	<b>0,27</b>	0,054	0,05	0,1	0,06	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	40	4,29	1,28	12

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Викулин И.М., Горбачёв В.Э. **Физика оптической связи**: Метод. указания для самост. работы студентов по курсу физики. – Одесса: Од. міська друкарня, 2000.
- 2 **Оптическая связь**. / Пер. с японского. – М.: Радио и связь, 1984.
- 3 Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. **Полупроводниковая оптоэлектроника**. – М.: Мир, 1976.
- 4 Викулин И.М., Стафеев В.И. **Физика полупроводниковых приборов**. – М.: Радио и связь, 1990.
- 5 Зи С. **Физика полупроводниковых приборов**. – М.: Мир, 1998.
- 6 Анисимова И.Д., Викулин И.М., Зайтов Ф.А., Курмашов Ш.Д. **Полупроводниковые фотоприемники**. – М.: Радио и связь, 1984.

## ЗМІСТ

Структура модуля 6 “Фізика оптичного зв’язку” .....	3
Методичні вказівки щодо розв’язання задач .....	4
Умовні позначення .....	6
Основні поняття й формули .....	7
Приклади розв’язування задач .....	17
Індивідуальні завдання .....	21
Таблиця 1 Номери умов задач за варіантами .....	51
Таблиця 2 Початкові дані за варіантами .....	52
Список рекомендованої літератури.....	53



Навчально-методичне видання

## **ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Методичні вказівки та комплексне завдання до модуля № 6 з фізики

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

Редактор І.В. Ращупкіна

Комп'ютерне макетування Ж.А. Гардиман