

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

ФІЗИКА

МОДУЛЬ 4

ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

**методичні вказівки та завдання до курсової роботи
для студентів усіх спеціальностей за напрямом “Телекомунікації”**

ЧАСТИНА 2

ЗАТВЕРДЖЕНО

**вченою радою науково-
навчального інституту**

“Поштовий зв'язок”

Протокол № 4

від 28.12.2007 р.

Одеса 2008

Укладачі: доц. **Б. В. Коробіцин**, доц. **В. Е. Горбачов**, ст. викл. **С. К. Криськів**

Курсова робота спрямована на поглиблення розуміння і засвоєння фізичних процесів, що відбуваються в напівпровідникових приладах і середовищах з яких складаються оптичні лінії зв'язку. Запропоновано тридцять варіантів курсової роботи з фізики оптичного зв'язку.

Посібник містить необхідний теоретичний і довідковий матеріал. Розраховано на студентів першого курсу навчання всіх спеціальностей за напрямом “Телекомунікації”.

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри
фізики оптичного зв'язку
й рекомендовано до друку.
Протокол № 5
від 01.12.2006 р.

СТРУКТУРА МОДУЛЯ 4 “ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ’ЯЗКУ”

Змістовий модуль	Лекції (год.)	Заняття		Самостій- на робота	Індиві- дуальна робота
		практичні	лабораторні		
Модуль 4 : ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ’ЯЗКУ (74 годин)					
Елементи оптичного зв’язку	18	16	10	22	6
Разом : Модуль 4, год.	18	16	10	22	6

ЗМІСТ ЗМІСТОВИХ МОДУЛІВ (ЛЕКЦІЙНИХ ГОДИН)

Фізика оптичного зв’язку

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

ТЕМИ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

№ п.п.	Тема	Години
1	Світлодіоди	2
2	Внутрішній фотоефект	2
3	Нерівноважні носії струму в напівпровідниках	2
4	Фотодіоди	2
5	Модулятори	2
6	Світловоди	2
7	Потужність та її утрати в елементах систем оптичного зв’язку	2
8	Фізичні основи технічної реалізації систем оптичного зв’язку	2

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДЛЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

- Для виконання курсової роботи студенти повинні вивчити розділи “Оптика”

та “**Фізика оптичного зв’язку**” курсу фізики.

- Курсова робота складається з п’яти взаємно пов’язаних завдань по етапам: 4.1; 4.2; 4.3; 4.4; 4.5. Студент повинен виконати по одному завданню з кожного етапу. Конкретні номери умов завдань по кожному етапу та початкові дані зазначено в табл. 1. Номер варіанта визначається порядковим номером прізвища студента в журналі групи.
- **Курсова робота** виконується на аркушах А4. Записи проводяться на одній стороні аркуша. Аркуші зшиваються в папку.
- На обкладинці слід зазначити назву роботи, **номер варіанта**, прізвище та ініціали студента, шифр групи.
- Розрахункову частину слід розташовувати по порядку нумерації етапів.
- Розрахункова частина по кожному етапу повинна містити одинадцять пунктів:

1 **Назву етапу.**

2 **Теоретичні положення** (відповідь на контрольні запитання по етапу).

3 Повну **умову завдання.**

4 **Короткий запис умови.**

5 Приведення значення заданих величин до **системи одиниць СІ.**

6 Пояснювальну **схему** або рисунок.

7 **Перелік законів чи формул**, котрі відбивають фізичні явища теми завдання. **Всі позначення** в формулах необхідно **пояснити**.

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

9 **Перевірку одиниць 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.

10 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 проводити з трьома значущими

цифрами.

11 **Результат** виконання розрахункової частини етапу.

- Наприкінці роботи слід вказати використану літературу.

В усіх випадках, якщо не зазначено інакше, вважати $T = 300 \text{ K}$.

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЗНАНЬ

При оцінці практичної частини з п'яти завдань курсової роботи студент одержує:

- за правильне виконання розрахунків й оформлення завдання та вірне пояснення ходу розрахунків і теоретичної частини – **20** балів;
- за правильне виконання розрахунків й оформлення завдання і неточностями в поясненнях – **16** балів;
- за правильне виконання розрахунків й оформлення завдання та помилками в поясненнях ходу розрахунків і теоретичної частини – **14** балів;
- за правильне виконання розрахунків з недоліками оформлення (немає пояснень величин, схеми, одиниць виміру і т.д.) завдання і вірне пояснення ходу розрахунків та теоретичної частини – **10** балів;
- за правильне виконання розрахунків з недоліками оформлення (немає пояснень величин, схеми, одиниць виміру, і т.д.) завдання і неточностями в поясненнях ходу розрахунків та теоретичної частини – **8** балів;
- за правильний хід розрахунків й оформлення завдання, але з невірним чисельним результатом і вірне пояснення ходу розрахунків та теоретичної частини – **6** балів.

Оцінка виставляється виходячи з наступних критеріїв:

- «Відмінно» - понад **95** балів,
- «Добре» - 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, ν – 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;
 ϵ – відносна діелектрична проникність, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала;
 j – густина струму, j_s – густина струму насичення;
 $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – маса спокою вільного електрона;
 E_g – ширина забороненої зони, E – енергія електрона (дірки);
 n – концентрація електронів, p – концентрація дірок;
 τ_n – час життя електронів, τ_p – час життя дірок;
 ρ – питомий опір, ρ_T – темновий питомий опір;
 η_z – зовнішній квантовий вихід світловипромінюючого діода;
 γ – питома електропровідність;
 γ_T – питома темнова електропровідність, $\Delta\gamma$ – питома фотопровідність;
 D_n – коефіцієнт дифузії електронів, D_p – коефіцієнт дифузії дірок;
 Δn – концентрація нерівноважних електронів;
 Δp – концентрація нерівноважних дірок;
 α – коефіцієнт поглинання світла, R – коефіцієнт відбиття світла;
 ϕ – квантова інтенсивність випромінювання (густина потоку фотонів);
 $L_{\text{опт}}$ – ефективна довжина поглинання світла;
 η – квантовий вихід фотоефекту фотодіода.

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ФОРМУЛИ

У даній курсовій роботі студент повинен побудувати і розрахувати

волоконно-оптичну лінію зв'язку (ВОЛЗ). Для цього необхідно підібрати і розрахувати основні параметри чотирьох визначальних елементів ВОЛС: світловипромінюючого діода (СВД), модулятора, оптичного волокна та фотодетектора. Параметри кожного з елементів ВОЛС повинні бути такими, щоб виконувалося два види умов:

- 1 Потрібно, щоб довжина хвилі випромінювання світлодіода відповідала вікну прозорості оптоволокна, а фотодетектор повинен ефективно поглинати таке випромінювання. По довжині хвилі підбирається і робоча напруга модулятора.
- 2 Електричний струм, що живить світлодіод повинен забезпечити генерування випромінювання такої інтенсивності, якого з урахуванням втрат у модуляторі й оптоволокну вистачить для створення фотоструму фотодетектора необхідної величини, яка задається.
- 3 Частота модулюючого сигналу не повинна бути більш ніж гранична частота роботи кожного з чотирьох визначальних елементів ВОЛЗ.

Тема 4.1 Світловипромінюючі діоди (СВД)

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. Різниця енергій $E_C - E_V$ – ширина забороненої зони E_g . n_n – концентрація електронів у n -області, p_p – концентрація дірок у p -області. U – величина прямої напруги, I – сила струму через СВД, Φ_B – кількість випромінених фотонів які вийшли із СВД, N_p і N_n – число дірок і електронів, інжекттованих через p - n -перехід.

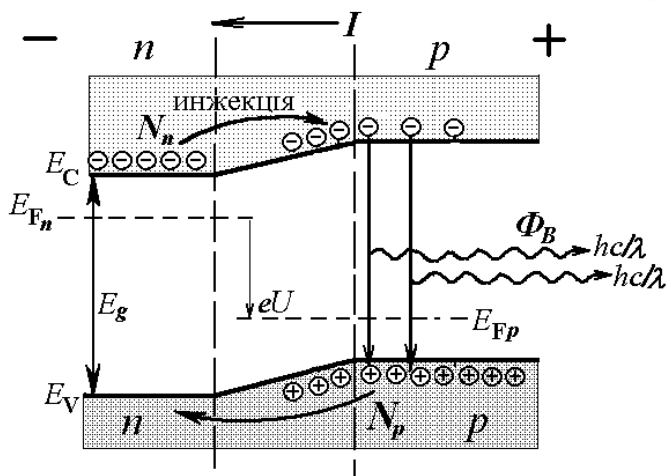


Рисунок 1 – Зонна діаграма світлодіода

Основною фізичною величиною, що характеризує якість СВД, є зовнішній квантовий вихід η_3 – відношення кількості випромінених фотонів, які вийшли з СВД Φ_B , до повної кількості дірок та електронів, які проходять через р-n-перехід $N_p + N_n$:

$$\eta_3 = \frac{\Phi_B}{N_p + N_n} . \quad (1)$$

Якщо прийняти, що величини Φ_B і $N_p + N_n$ вимірюються в одиницю часу, то сила струму через СВД дорівнює

$$I = e(N_p + N_n) . \quad (2)$$

Тоді потужність випромінюваного СВД світла визначається як

$$P_{\text{випр}} = \Phi_B h\nu = \eta_3 \cdot (N_p + N_n) \cdot h\nu = \eta_3 \cdot (I/e) \cdot h\nu = I \cdot \eta_3 \cdot h\nu / e . \quad (3)$$

У співвідношенні (3) та далі h і e – константи (див. умовні позначки).

Максимальна гранична частота роботи світлодіода (частота модулюючого сигналу при внутрішньому засобі модуляції випромінювання) визначається найчастіше часом життя інжектованих в р-базу електронів τ_n :

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2\pi \tau_n} . \quad (4)$$

У даній роботі для виготовлення СВД пропонуються три склади потрійного напівпровідникового з'єднання $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (склад 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (склад 2) та $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ (склад 3).

Ширина забороненої зони E_g таких напівпровідників залежить від параметрів складу:

$$\begin{aligned} E_g &= (0,36 + 1,08x) - \text{для складу 1 (Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As)}, \\ E_g &= (0,36 + 0,97y) - \text{для складу 2 (InP}_y\text{As}_{1-y}), \\ E_g &= (0,77 + 1,37z) - \text{для складу 3 (Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Студент повинен визначити хімічну формулу напівпровідника рекомендованого складу у залежності від варіанте. Параметр складу x , y чи z підбирається з умови того, що довжина хвилі випромінювання

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} , \quad (6)$$

повинна бути узгоджена з довжиною хвилі, одного з вікон прозорості кварцового оптоволокна (рис. 4), номер якого також задається. Вікна прозорості в ближній інфрачервоній області спектра: 0,85, 1,15, 1,33 і 1,55 мкм. Цій довжині хвилі повинен відповідати максимум потужності випромінювання.

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

$$\lambda = \frac{hc}{h\nu}, \quad (7)$$

де ν – частота світла.

Смуга випромінювання в енергетичних одиницях $(E_g - \Delta(h\nu)/2 \div E_g + \Delta(h\nu)/2)$ 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 продиференціювати співвідношення (7):

$$\frac{d\lambda}{d(h\nu)} = hc \frac{1}{(h\nu)^2} = hc \frac{\lambda^2}{(hc)^2} = \frac{\lambda^2}{hc}, \quad (8)$$

звідки, замінюючи знак диференціалу d на знак інтервалу Δ , дістаємо співвідношення для півщини смуги випромінювання в одиницях довжини хвилі (півширина спектру)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot \Delta(h\nu)}{hc}. \quad (9)$$

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

Смугу випромінювання в одиницях частоти можна дістати, обчисливши частоту випромінювання із співвідношення (7), а півширину спектру в одиницях частоти – із (9):

$$\Delta\nu = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2}. \quad (10)$$

Тема 4.2 Модулятори

Будову електрооптичного модулятора подано на рис. 2.

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

На рис. 2 вхідне світло, яке поширюється уздовж осі z , поляризоване під кутом 45° стосовно зовнішнього електричного поля E_{0x} . За наявності зовнішнього поля E_{0x} різниця показників заломлення для повздовжньої до зовнішнього електричного поля $E_x(\omega)$ і поперечної $E_y(\omega)$ компонент

$$\Delta n = \frac{n^3 r \cdot E_{0x}}{2}, \quad (11)$$

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

$$\Delta_{\text{опт}} = \Delta n \cdot L = \frac{n^3 r \cdot E_{0x} l}{2}. \quad (12)$$

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

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \times \Delta_{\text{опт}} = \frac{\pi \cdot n^3 r \cdot E_{0x} l}{\lambda}. \quad (13)$$

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

$$U_{(\lambda/2)} = E_{0x} b = \frac{\lambda b}{n^3 r l}. \quad (14)$$

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

Для рівності тривалостей світлового імпульсу та імпульсу модулюючої напруги необхідно, щоб час проходження світлової хвилі через кристал був набагато меншим тривалості імпульсу модулюючої напруги. Якщо тривалість імпульсів невелика, можна обмежитися умовою, коли час проходження

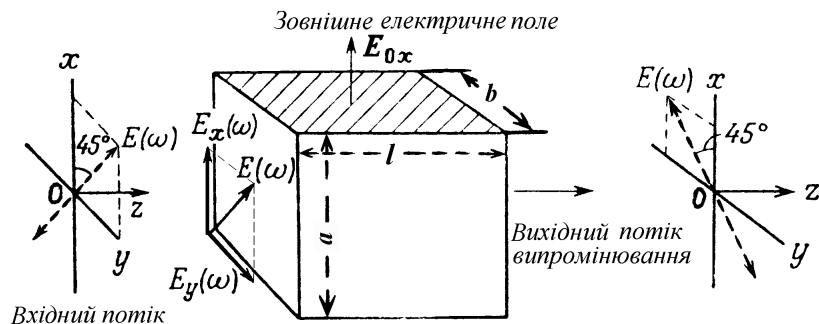


Рисунок 2 – Електрооптичний модулятор на базі комірки Поккельса.

світлової хвилі через модулятор у 20 разів менше періоду проходження модулюючих імпульсів:

$$\frac{l}{c/n} = \frac{T}{20} \quad (15)$$

Тоді максимально можлива частота модулюючого сигналу обмежена довжиною комірки відповідно до співвідношення:

$$f_{\max} = \frac{c}{20n \cdot l} \quad (16)$$

Оскільки для роботи комірки Поккельса потрібно поляризоване світло, то при її використанні в оптичних лініях зв'язку разом із джерелами некогерентного випромінювання, якими є СВД, при поляризації на входному поляризаторі губиться $\delta_{\text{пол}}=0,5$ потужності випромінювання. Таким чином, коефіцієнт корисної дії ККД комірки Поккельса визначається добутком

$$\delta_{\text{мод}} = \delta_{\text{пол}} \times \delta_{\text{матер}}, \quad (17)$$

де $\delta_{\text{матер}}$ – коефіцієнт пропускання матеріалу комірки.

Тема 4.3 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 більшою довжиною хвилі надійде до виходу швидше, ніж сигнал з меншою довжиною хвилі (у разі нормальної дисперсії). Такий ефект накладає фундаментальне обмеження на верхню границю частоти проходження імпульсів. Частота проходження імпульсів не може бути більше граничної частоти $f_{\max}$ при якій в процесі поширення імпульсів світловодом довгохвильовий край λ_2 одного імпульсу наздожене короткохвильовий край λ_1 попереднього імпульсу. Інакше кажучи, найменший період надходження імпульсів $T_{\min}$ повинен дорівнювати різниці часів поширення короткохвильового t_1 і довгохвильового t_2 імпульсів:

$$T_{\min} = t_1 - t_2 = \frac{n(\lambda_1) \cdot L}{c} - \frac{n(\lambda_2) \cdot L}{c} = \frac{[n(\lambda_1) - n(\lambda_2)] \cdot L}{c} = \frac{dn/d\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot L}{c},$$

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, λ_1 і λ_2 – розраховується по спектральній півширині імпульсу $\Delta\lambda$.

При цьому враховується, що величину дисперсії $dn/d\lambda$ для даного діапазону довжин хвиль і спектральну півширину імпульсу $\Delta\lambda$ задано, тоді різницю показників заломлення для короткохвильового і довгохвильового країв спектрального діапазону імпульсу можна знайти так:

$$n(\lambda_1) - n(\lambda_2) = \frac{dn}{d\lambda} \Delta\lambda. \quad (18)$$

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

$$\beta_0 = \frac{10}{L} \cdot \lg(P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} / P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}}), \text{ дБ/км}, \quad (19)$$

де $P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}}$ – потужність на вході, $P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}}$ – потужність на виході світловоду довжиною L км.

Повне загасання сигналу після проходження світловоду довільної

довжини L

$$\beta = \lg(P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} / P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}}) = \beta_0 \cdot L \quad (20)$$

Тоді потужність сигналу на виході можна визначити:

$$P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} \cdot 10^{-\frac{\beta_0 \cdot L}{10}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} \cdot e^{-0,23\beta_0 \cdot L}. \quad (21)$$

Вікна прозорості

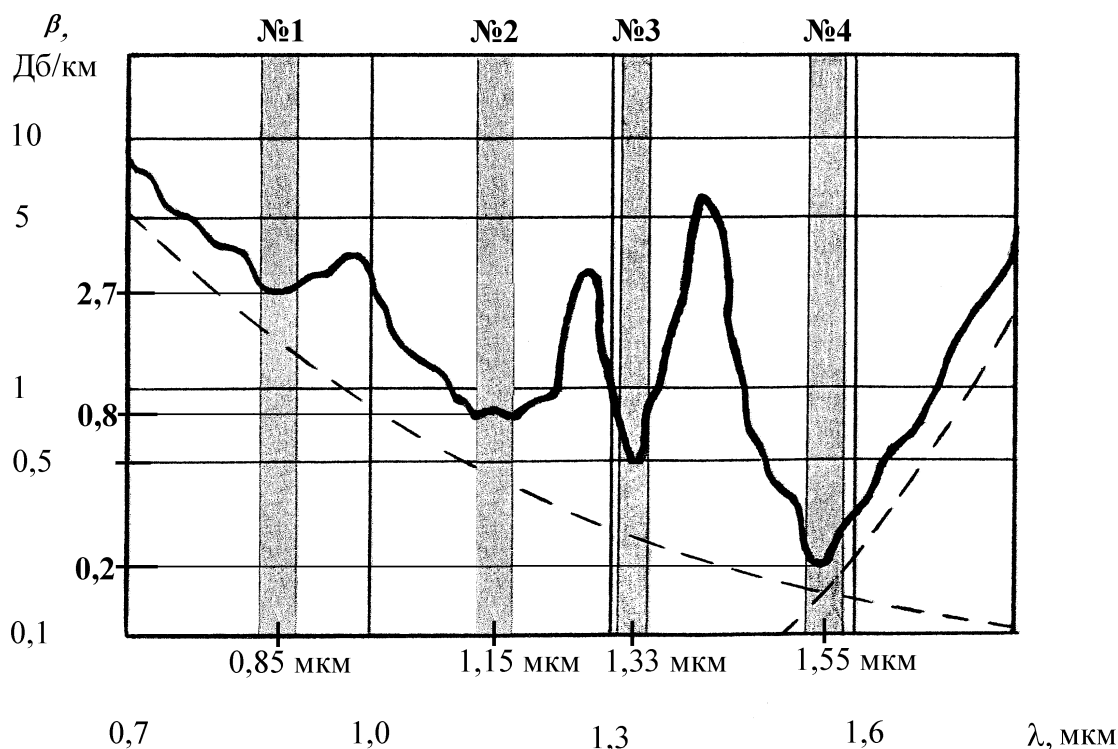


Рисунок 3 – Питоме загасання кварцового оптоволоконна

Для волоконнооптичних ліній зв'язку найчастіше використовується кварцове волокно, спектр поглинання якого показаний на рис. 3. Як видно, існують чотири мінімуми поглинання: 2,7, 0,8, 0,5 і 0,2 дБ/км – вікна прозорості. У залежності від комплексу умов вибирається визначене вікно прозорості. Щоб випромінювання СВД точно відповідало обраному вікну, необхідно застосувати напівпровідник з відповідною шириною забороненої зони, обумовленої із співвідношення (6).

Тема 4.4 Фотодіоди

Фотоактивним для даного напівпровідника є світло, енергія фотонів якого більше чи дорівнює його ширині забороненої зони. Але енергія фотонів світла,

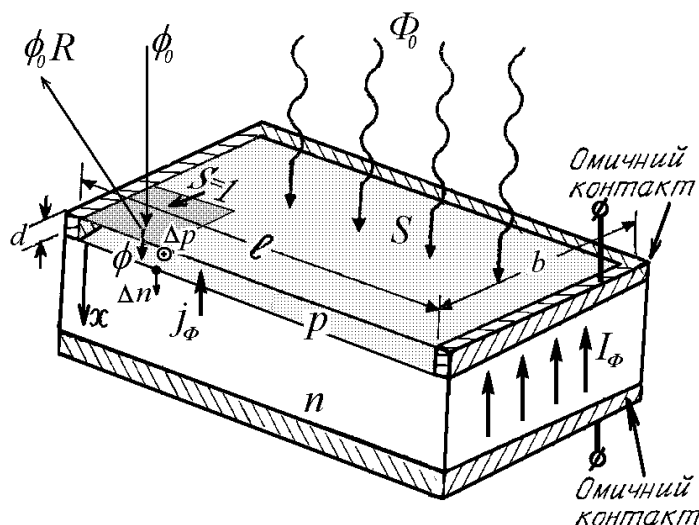


Рисунок 4 – Внутрішній фотоефект

генеровані носії зразу ж рекомбінують через поверхневі стани.

Тому напівпровідник із шириною забороненої зони E_g буде поглинати світло з енергією максимуму випромінювання $h\nu$, що знаходиться із нерівності

$$E_g \leq h\nu \leq 2E_g \quad . \quad (22)$$

Та, навпаки, світло з енергією максимуму випромінювання $h\nu$ поглинається напівпровідниками із шириною забороненої зони E_g , що знаходиться із нерівності

$$\frac{h\nu}{2} \leq E_g \leq h\nu. \quad (23)$$

Випромінювання, що поглинається, зручно характеризувати квантовою інтенсивністю ϕ_0 – кількістю фотонів, що падають на 1 м^2 поверхні напівпровідника за 1 с . Тоді потужність падаючого на поверхню напівпровідника площею S випромінювання

$$P_{\text{BX}}^{\Phi_{\text{OTO}}=\phi_{\theta}} = \phi_{\theta} \cdot S \cdot h\nu \quad (24)$$

Коли поверхня напівпровідника освітлюється (рис. 4) світлом з квантовою інтенсивністю ϕ_0 , то в міру проникнення світла всередину напівпровідника квантова інтенсивність світла визначатиметься за законом

Бугера:

$$\phi(x) = \phi_0 (1-R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (25)$$

де R – коефіцієнт відбиття світла, α – коефіцієнт поглинання світла, x – відстань від поверхні.

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

$$g(x) = -\eta \frac{d\phi}{dx} = \eta \cdot \alpha \cdot \phi(x), \quad (26)$$

де η – квантовий вихід фотоефекту.

Розглянемо фотодіод з р-п-переходом, у якого тонка р-область товщиною d (база) та перерізом S освітлюється світлом квантовою інтенсивністю ϕ_0 . Для фотодіода є характерним те, що світло цілком поглинається у приповерхневому шарі, тобто ефективна довжина оптичного поглинання $L_{\text{опт}} \ll d$ і швидкість оптичної генерації в р-області дорівнює

$$g = \frac{\eta \cdot \phi_0 (1-R)}{d}. \quad (27)$$

Концентрація генерованих світлом нерівноважних носіїв струму в базі фотодіода d :

$$\Delta n = \tau_n g = \tau_n \cdot \eta \cdot \phi_0 (1-R) / d; \quad (28)$$

$$\Delta p = \tau_p g = \tau_p \cdot \eta \cdot \phi_0 (1-R) / d, \quad (29)$$

де τ_n , τ_p – час життя електронів та дірок відповідно.

Оскільки товщина бази є набагато менша за дифузійні довжини носіїв, то генеровані світлом електрони практично миттєво і без втрат досягають р-п-переходу та йдуть до п-області. Дірки, досягаючи р-п-переходу, не можуть подолати потенційний бар'єр і залишаються в р-області. Тоді густину електронного фотоструму скрізь р-п-перехід перерізом S (рис. 4) за відсутності помітних втрат на рекомбінацію фотоносіїв до їхнього розділу р-п-переходом можна визначити як

$$j_{\Phi} = \frac{J_{\Phi}}{S} = \frac{e\Delta N}{\tau_n S} = \frac{e\Delta n \cdot d \cdot S}{\tau_n \cdot S} = e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R). \quad (30)$$

Внаслідок цього n-область заряджається негативно, а р-область – позитивно. Виникає фото-ЕРС U_{Φ} , прикладена у пропускнуому напрямку, висота потенційного бар'єра зменшується, і в пропускнуому напрямку починає протікати прямий струм, створюваний потоком електронів з n-області та дірок з р-області:

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

де j_s – густина струму насичення.

Як наслідок, повний потік електронів з р-області зменшується, а дірок – збільшується. Якщо фотоелемент розімкнуто, то зміна потоків електронів та дірок продовжується доти, доки обидва потоки не зрівняються, тобто доки повний струм через р-n-перехід не дорівнюватиме нулю:

$$j_{\text{повн}} = |j| - j_{\Phi} = 0. \quad (32)$$

Створена при цьому різниця потенціалів називається напругою холостого ходу. Підставивши (30) та (31) у (32), дістанемо співвідношення, яке встановлює зв'язок між падаючою на фотоелемент густиною потоку фотонів ϕ_0 і напругою холостого ходу U_{xx} :

$$e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) = j_s \left(\exp \frac{eU_{xx}}{kT} - 1 \right). \quad (33)$$

У фотодіодному режимі на р-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 (30):

$$j_{\text{повн}} = |j| + j_{\Phi}. \quad (34)$$

У фотодіодному режимі темновий струм (при відсутності освітлення) повинен бути якнайменше, тому на р-n-перехід подається таке зворотне зміщення, при якому темновий струм практично дорівнює току насичення, тоді:

$$j_{\text{повн}} = j_s + j_{\Phi}. \quad (35)$$

В показаній на рис. 4 можливій конструкції фотодіода сила струму через діод

$$I=j \cdot S, \quad (36)$$

де S – співпадає з площиною, що освітлюється світлом.

Максимальна гранична частота роботи фотодіода $f_{\max}$ (частота модулюючого сигналу, при якій фотострум ще встигає спадати від свого максимального значення до нуля) визначається часом виходу носіїв заряду з бази τ_b :

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi \tau_b}, \quad (37)$$

а час виходу носіїв заряду з бази стає меншим, якщо зменшується товщина бази d :

$$\tau_b = \frac{d^2}{2D_n} = \frac{d^2 e}{2kT\mu_n}. \quad (38)$$

Тут враховано, що коефіцієнт дифузії носіїв заряду $D_n = kT\mu_n/e$, где μ_n – рухливість носіїв заряду.

ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ РОБОТИ

Етап 4.1. Розрахунок світловипромінюючого діода (СВД)

СВД виготовляється з потрібного з'єднання складу: $Al_vGa_{1-v}As$, у якого ширина забороненої зони визначається атомною часткою алюмінію v відповідно до співвідношення $E_g = (1,43 + 1,37v)$. СВД використовується для роботи у ВОЛЗ із кварцовим оптоволоконном у вікні прозорості №1. Зовнішня квантова ефективність СВД дорівнює 0,6. Час життя електронів в р-області СВД дорівнює $3 \cdot 10^{-9}$ с.

Визначимо атомну частку v алюмінію у потрібному з'єднанні і запишемо його формулу. Обчислимо для спектральної смуги випромінювання напівширину в одиницях довжини хвилі, якщо вона в енергетичних одиницях дорівнює $1,5kT$ і енергію максимуму випромінювання в електронвольтах. Розрахуємо потужність випромінювання на виході СВД при силі струму 10мА,

та максимальну граничну частоту модулюючого сигналу.

Дано:

Склад: $\text{Al}_v\text{Ga}_{1-v}\text{As}$;

Вікно прозорості №1;

$\Delta h\nu = 1,5kT$;

$\eta_B = 0,6$;

$\tau_n = 3 \times 10^{-9} \text{с}$;

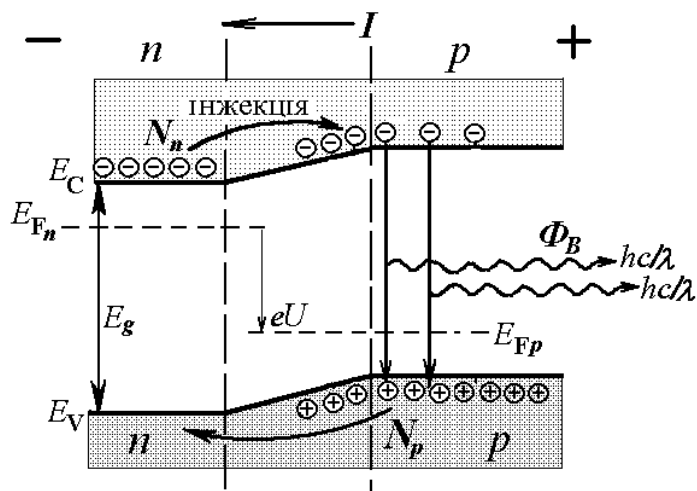
$T = 300^\circ\text{C}$;

$I = 10 \text{ мА}$.

v , формула - ? $\Delta\lambda$ - ?

$h\nu$ - ? $P_{\text{випр}}$ - ? f_{max} - ?

$10 \times 10^{-3} \text{ А}$



Розрахунки: За графіком питомого загасання кварцового оптоволоконна (рис. 3) визначимо довжину хвилі, що відповідає мінімальному поглинанню світла у вікні прозорості №1:

$$\lambda = 0,85 \text{ мкм.} = 8,5 \times 10^{-6} \text{ м.}$$

На цій довжині хвилі інтенсивність випромінювання СВД повинна бути максимальною. Визначимо енергію максимуму випромінювання СВД, використовуючи формулу (7) даного посібника:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

де h – постійна Планка; c – швидкість світла; λ – довжина хвилі максимуму випромінювання.

Енергія максимуму випромінювання СИД дорівнює ширині забороненої зони E_g напівпровідника, з якого він виготовлений:

$$E_g(\text{Дж}) = h\nu.$$

За умовою, для виготовлення СВД використовується потрібний напівпровідник складу: $\text{Al}_v\text{Ga}_{1-v}\text{As}$. Визначимо атомну частку v алюмінію зі співвідношення, характерного для складу 4:

$$E_g(\text{еВ}) = (1,43 + 1,37v).$$

З огляду на те, що $E_g(\text{еВ}) = E_g(\text{Дж}) / 1,6 \times 10^{-19}$, одержимо:

$$v = \frac{E_g - 1,43}{1,37} = \frac{h\nu / 1,6 \cdot 10^{-19} - 1,43}{1,37} = \frac{hc / \lambda 1,6 \cdot 10^{-19} - 1,43}{1,37}.$$

Напівширину смуги випромінювання СВД $\Delta\lambda$ визначимо з формули (9) даного посібника

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta v \cdot \lambda^2}{c} = \frac{\Delta h\nu \cdot \lambda^2}{h \cdot c} = \frac{1,5kT \cdot \lambda^2}{hc}.$$

Потужність випромінюваного СВД світла визначається як

$$P_{\text{випр}} = I\eta_B \frac{h\nu}{e} = I\eta_B \frac{hc}{\lambda \cdot e}.$$

Максимальна гранична частота модулюючого сигналу при внутрішньому засобі модуляції випромінювання визначається з формули (4) даного керівництва

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2\pi\tau_n},$$

де τ_n – час життя інжектованих в р-базу електронів.

Перевіримо одиниці виміру величин:

$$[h\nu_0] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \text{м};$$

$$[P_{\text{випр}}] = A \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{м} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт};$$

$$[f_{\text{max}}] = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}.$$

Підставимо в отримані формули числові значення величин і зробимо обчислення

$$h\nu = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7}} = 2,34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,46 \text{ эВ};$$

$$v = \left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7}} - 1,43 \right) / 1,37 = \frac{1,46 - 1,43}{1,37} = 0,0237;$$

$$\Delta\lambda = \frac{1,5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot (8,5 \cdot 10^{-7})^2}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,26 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 22,6 \text{ нм};$$

$$P_{\text{випр}} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 8,78 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 8,78 \text{ мВт};$$

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-9}} = 5,3 \cdot 10^7 \text{ Гц} = 53 \text{ МГц}.$$

Результати: $\lambda=0,85 \text{ мкм}$; $v=0,0237$; $\text{Al}_{0,0237}\text{Ga}_{0,9763}\text{As}$; $\Delta\lambda=22,6 \text{ нм}$; $h\nu=1,46 \text{ эВ}$;

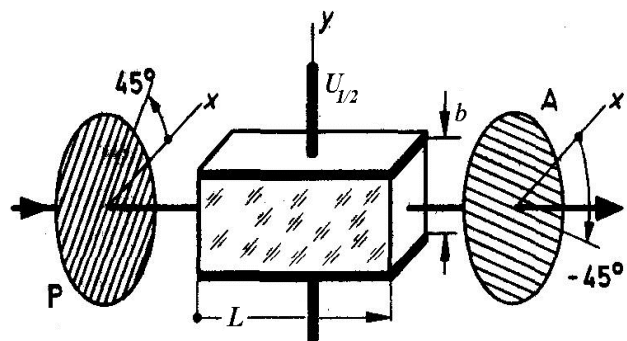
$$P_{\text{випр}}=8,78 \text{ мВт}; f_{\text{max}}=53 \text{ МГц}.$$

Етап 4.2. Розрахунок модулятора

Світло, що випромінюється обраним на етапі 4.1 СВД, модулюється подачею напівхвильової напруги на комірку Поккельса, фактор якості матеріалу якої дорівнює $0,2 \text{ нм/В}$, а електрооптичний коефіцієнт Поккельса 10^{-11} м/В . Коефіцієнт пропускання матеріалу комірки дорівнює $0,84$. Визначимо напівхвильову напругу комірки Поккельса з поперечними розмірами $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$ і довжиною 15 мм . Розрахуємо максимально можливу частоту модулюючого сигналу та обчислимо потужність випромінювання на виході з модулятора.

Дано:

$n^3r=0,2 \text{ нм/В};$	$0,2 \times 10^{-9}$
$l=15 \text{ мм};$	$\text{м/В};$
$r=10^{-11} \text{ м/В};$	$15 \times 10^{-3} \text{ м};$
$a=b=0,5 \text{ мм};$	
$\delta_{\text{матер.}}=0,84$	$0,5 \times 10^{-3} \text{ м}$
$U_{1/2} - ? \quad f_{\text{max}} - ? \quad P_{\text{вих}}^{\text{мод}} - ?$	



Розрахунки: Напівхвильова напруга

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda \cdot b}{n^3 r \cdot l},$$

де b – поперечний розмір комірки, n^3r – фактор якості, l – довжина комірки. Довжина світлової хвилі випромінювання, що модулюється, дорівнює довжині хвилі максимуму випромінювання СВД, отриманої на етапі 4.1

$$\lambda = 0,85 \text{ мкм.}$$

Максимально можлива частота модулюючого сигналу обмежена довжиною комірки відповідно до співвідношення:

$$f_{\max} = \frac{c}{20n \cdot l}.$$

Показник заломлення можна визначити по фактору якості $F=n^3r$ матеріалу комірки

$$n = \sqrt[3]{\frac{F}{r}},$$

r – електрооптичний коефіцієнт Поккельса.

$$\text{Тоді} \quad f_{\max} = \frac{c}{20 \cdot \sqrt[3]{\frac{F}{r}} \cdot l_{\max}}.$$

ККД комірки Поккельса показує, яка доля вхідного випромінювання виходить з неї, і визначається добутком

$$\delta_{\text{мод}} = \delta_{\text{пол}} \times \delta_{\text{матер}},$$

де $\delta_{\text{матер}}$ – коефіцієнт пропускання матеріалу комірки, $\delta_{\text{пол}}=0,5$ – втрати при поляризації.

На етапі 4.1 ми отримали потужність випромінювання на виході СВД $P_{\text{випр}}=8,78$ мВт. За умовою $P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}}=P_{\text{випр}}$, тоді потужність випромінювання на виході модулятора

$$P_{\text{ВИХ}}^{\text{мод}}=P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}} \cdot \delta_{\text{мод}}=P_{\text{випр}} \cdot \delta_{\text{мод}}.$$

Перевіримо одиниці виміру отриманих величин:

$$[U_{\lambda/2}] = \frac{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{В}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \text{В};$$

$$[f_{\max}] = \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \sqrt[3]{\frac{\text{м} \cdot \text{В}}{\text{В} \cdot \text{м}}} \cdot \text{м}} = \text{с}^{-1}.$$

Підставимо чисельні значення величин і зробимо обчислення:

$$U_{\lambda/2} = \frac{8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-10} \cdot 0,015} = 142 \text{ В};$$

$$f_{\max} = \frac{3 \cdot 10^8}{20 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^{-10}}{10^{-11}}} \cdot 0,015} = 3,68 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} = 368 \text{ МГц};$$

$$\delta_{\text{мод}} = 0,5 \times 0,84 = 0,42;$$

$$P_{\text{вих}}^{\text{мод}} = 8,78 \times 10^{-3} \times 0,42 = 3,69 \times 10^{-3} \text{ Вт} = 3,69 \text{ мВт}.$$

Результати: $U_{1/2} = 142 \text{ В}$, $f_{\max} = 368 \text{ МГц}$, $\delta_{\text{мод}} = 0,42$, $P_{\text{вих}}^{\text{мод}} = 3,69 \text{ мВт}$.

Етап 4.3. Розрахунок світловода

Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами, визначеними на етапі 4.2, поширюється по кварцовому світловоду з дисперсією 18 мм^{-1} по вікну прозорості №1 (див. рис.3). Визначимо максимальну довжину світловода, якщо частота проходження імпульсів в ньому повинна бути не менш частоти сигналу, що модулює, із етапу 4.2. Розрахуємо повне загасання випромінювання у світловоді при отриманій довжині, а також в скільки разів при цьому зменшиться потужність випромінювання. Обчислимо потужність випромінювання на виході світловода.

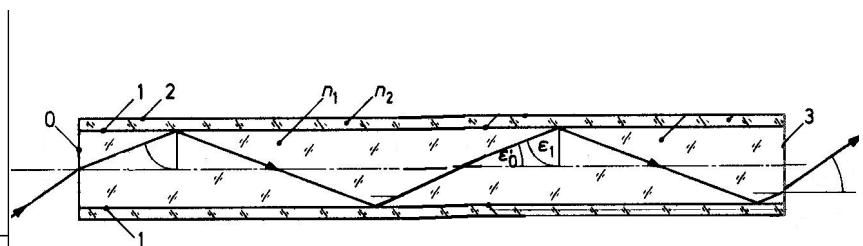
Дано:

$$\frac{dn}{d\lambda} = 18 \text{ мм}^{-1} = 18 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1};$$

Вікно прозорості №1;

L -? β -?

$P_{\text{вх}}^{\text{вол}}/P_{\text{вих}}^{\text{вол}}$ -? $P_{\text{вих}}^{\text{вол}}$ -?



Розрахунки: Ширина спектра випромінювання відповідає отриманій на етапі 4.1:

$$\Delta\lambda = 22,5 \text{ нм}.$$

Максимальна частота проходження імпульсів у світловоді обмежена довжиною оптоволока відповідно до виразу:

$$f_{\max} = \frac{c}{(dn/d\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L},$$

де c - швидкість світла, $\frac{dn}{d\lambda}$ - дисперсія світловода, $\Delta\lambda$ - ширина спектру, L - довжина світловода.

Звідси:

$$L = \frac{c}{(dn/d\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot f_{\max}},$$

де максимальну частоту проходження імпульсів у світловоді вибираємо рівній максимально можливій частоті сигналу, що модулює, у модуляторі відповідно до етапу 4.2:

$$f_{\max} = 368 \text{ МГц.}$$

Потужність випромінювання на виході оптоволока довжиною L

$$P_{\text{вих}}^{\text{вол}} = P_{\text{вх}}^{\text{вол}} \times e^{-0,23\beta_0 \times L},$$

де значення питомого загасання знаходимо по рис. 3 для вікна прозорості №1 кварцового оптоволока:

$$\beta_0 = 2,7.$$

Потужність на вході оптоволока дорівнює потужності на виході модулятора визначеній на етапі 4.2:

$$P_{\text{вх}}^{\text{вол}} = P_{\text{вих}}^{\text{мол}} = 3,69 \text{ мВт} = 3,69 \times 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Повне загасання випромінювання на виході оптоволока довжиною L

$$\beta = \beta_0 \times L.$$

Зменшення оптичної потужності у світловоді:

$$\frac{P_{\text{вх}}^{\text{вол}}}{P_{\text{вих}}^{\text{вол}}} = e^{0,23\beta_0 \cdot L}.$$

Перевіримо одиницю виміру

$$[L] = \frac{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{м}} = \text{м},$$

Підставимо числові значення величин і зробимо обчислення:

$$L = \frac{3 \cdot 10^8}{18 \cdot 10^3 \cdot 22,5 \cdot 10^{-9} \cdot 3,68 \cdot 10^8} = 2,006 \cdot 10^3 \text{ м} = 2,01 \text{ км};$$

$$\beta = 2,7 \times 2,01 = 5,41 \text{ Дб};$$

$$\frac{P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}}}{P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}}} = e^{0,23 \cdot 2,7 \cdot 2,006} = 3,47;$$

$$P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}} = 3,69 \cdot 10^{-3} e^{-0,23 \cdot 2,7 \cdot 2,006} = 3,69 \cdot 10^{-3} / 3,47 = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 1,06 \text{ мВт}.$$

Результати: $L = 2,01 \text{ км}; \beta = 5,41 \text{ Дб}; P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}}/P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}} = 3,47; P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}} = 1,06 \text{ мВт}.$

Етап 4.4. Розрахунок фотодіода

Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами, визначеними на етапі 4.2, проходить кварцовий світловод відповідно до етапу 4.3, а потім засвітлює тонку р-область фотодіода площею 8 мм^2 та товщиною 1 мкм . Густина струму насичення р-п-переходу 10^{-2} А/м^2 при рухливості носіїв заряду в ньому $0,01 \text{ м}^2/(\text{В} \times \text{с})$. Коефіцієнт відбиття світла від поверхні бази – $0,18$, квантовий вихід внутрішнього фотоефекту – $0,92$.

Обчислимо максимальну ширину забороненої зони напівпровідника придатного для виготовлення фотоприймача для даного випромінювання. Визначимо напругу холостого ходу даного фотоприймача в режимі фотоеlementу при такій освітленості. Обчислимо силу струму електричного сигналу на виході фотоприймача в режимі фото діода при такій же освітленості. Розрахуємо в скільки разів фотострум більше темнового струму. Визначимо максимальну граничну частота роботи фотодіода. Технологічні втрати не враховуємо.

Дано:

$$S=8 \text{ мм}^2;$$

$$d=1 \text{ мкм};$$

$$j_s=10^{-2} \text{ А/м}^2;$$

$$\mu_n=0,01 \text{ м}^2/(\text{В}\times\text{с});$$

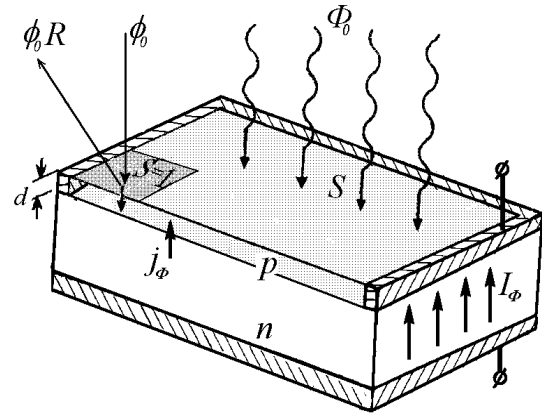
$$R=0,18;$$

$$\eta=0,92.$$

$$E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} - ? \quad U_{\text{хх}} - ? \quad j_{\Phi} - ? \quad f_{\text{max}} - ?$$

$$8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$10^{-6} \text{ м}.$$



Розрахунки: Ширина забороненої зони фотоприймача не може бути більше енергії фотона в максимумі смуги випромінювання СВД, тому

$$E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} = h\nu = hc/\lambda.$$

В електронвольтах:

$$E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} = \frac{hc}{\lambda} / 1,6 \cdot 10^{-19}.$$

де λ – довжина хвилі максимуму випромінювання, ν – його частота.

Відповідно до етапу 4.1 довжина хвилі світла, яким освітлюється поверхня фотодіода

$$\lambda=0,85 \text{ мкм.}=8,5 \times 10^{-7} \text{ м},$$

а відповідно до етапу 4.3 потужність цього випромінювання дорівнює

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}}=P_{\text{ВІХ}}^{\text{вол}}=1,06 \text{ мВт}=1,06 \times 10^{-3} \text{ Вт},$$

а потужність випромінювання пов'язана з квантовою інтенсивністю ϕ_0

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}}=P_0=\phi_0 \times S \times h\nu=\phi_0 \times S \times hc/\lambda,$$

де S – площа освітленої поверхні.

Густина генерованого в р-області фотоструму через р-п-перехід

$$j_{\Phi} = e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R),$$

де η – квантовий вихід внутрішнього фотоефекту; R – коефіцієнт відбиття світла від поверхні фотодіода.

В режимі фотоелемента фотострум j_{Φ} дорівнює дифузійному струму j

(31), викликаному фото-ЕРС холостого ходу U_{xx} :

$$e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) = j_S \left(\exp \frac{e \cdot U_{xx}}{kT} - 1 \right),$$

де j – густина струму насичення; T – абсолютна температура переходу.

Звідки напруга холостого ходу

$$U_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{e \eta \phi_0 (1 - R)}{j_S} \right) = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{e \eta \lambda P_0 (1 - R)}{Shc \cdot j_S} \right).$$

В режимі фотоелемента фотострум визначається потужністю випромінювання, яке освітлює поверхню фотодетектора

$$I_\Phi = j_\Phi S = e \cdot \eta \frac{\lambda P_0}{hc} (1 - R).$$

Розрахуємо в скільки разів фотострум буде більше темнового струму

$$\frac{I_\Phi}{I_{\text{темн}}} = \frac{j_\Phi}{j_S} = e \cdot \eta \frac{\lambda P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}}}{hc} \frac{(1 - R)}{S \cdot j_S}.$$

Максимальна гранична частота роботи фотодіода $f_{\text{фото}}$ визначається згідно (37), (38):

$$f_{\text{фото}} = \frac{kT\mu_n}{\pi d^2 e},$$

де μ_n – рухливість носіїв заряду; d – товщина бази фотодіода.

Перевіримо одиниці вимірювання

$$E_g^{\text{фото}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{м}} / 1,6 \cdot 10^{-19} = \text{Дж} / 1,6 \cdot 10^{-19} = \text{эВ};$$

$$U_{xx} = \frac{\text{Дж/град} \cdot \text{град}}{\text{Кл}} = \text{В};$$

$$I_\Phi = \text{Кл} \cdot \frac{\text{м} \cdot \text{Вт}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}} = \text{А};$$

$$f_{\text{max}} = \frac{\text{Дж/град} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{Кл} \cdot \text{В} \cdot \text{с}} = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}.$$

Підставимо числові значення величин і зробимо обчислення:

$$E_{g \text{ фото}}^{\text{фото}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7}} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,46 \text{ эВ};$$

$$U_{xx} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \left(1 + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,92 \cdot 8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,18)}{8 \cdot 10^{-6} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-2}} \right) = 0,228 \text{ В};$$

$$I_{\Phi} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,92 \cdot \frac{8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,18)}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 5,47 \cdot 10^{-4} \text{ А} = 0,547 \text{ мА};$$

$$f_{\text{max}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0,01}{3,14 \cdot 10^{-12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 8,24 \cdot 10^7 \text{ Гц} = 82,4 \text{ МГц}.$$

Результати: $E_{g \text{ фото}}^{\text{фото}} = 1,46 \text{ эВ}; U_{xx} = 0,228 \text{ В}; I_{\Phi} = 0,547 \text{ мА}; f_{\text{max}} = 82,4 \text{ МГц}.$

Етап 4.5. Узгодження елементів ВОЛЗ

Перевіримо відповідність довжини хвилі випромінювання світлодіода напівхвильовій напрузі модулятора, вікну прозорості оптоволокна та ширині забороненої зони фотодетектора.

Знайдемо, чи достатньо сили струму $I = 10 \text{ мА}$, який протікає по СВД, щоб генерувати випромінювання такої інтенсивності, якої з урахуванням втрат в модуляторі й оптоволокну вистачило б для створення фотоструму $I_{\Phi} = 0,547 \text{ мА}$.

З урахуванням

$$P_{\text{випр}} = I \eta \frac{hc}{\lambda \cdot e};$$

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}} = P_{\text{випр}}; \quad P_{\text{ВИХ}}^{\text{мод}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}} \times \delta_{\text{мод}};$$

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВИХ}}^{\text{мод}}; \quad P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} \times e^{-0,23 \times \beta};$$

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}} = P_{\text{ВИХ}}^{\text{вол}}; \quad I_{\Phi} = e \cdot \eta \frac{\lambda P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}}}{hc} (1 - R).$$

Отримуємо

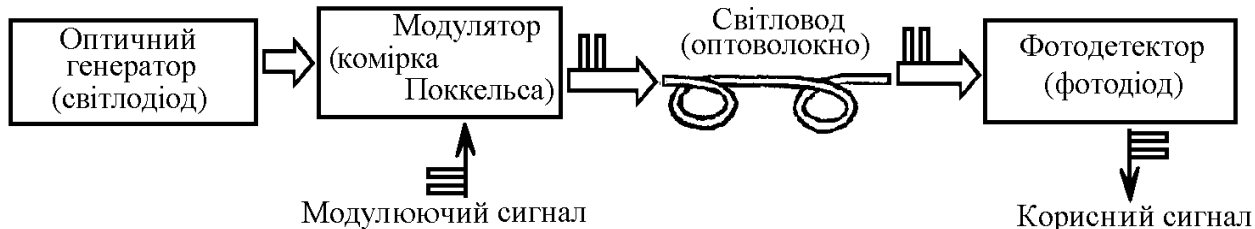
$$I_{\Phi} = I \cdot \eta_{\text{В}} \cdot \eta \cdot (1 - R) \cdot \delta_{\text{мод}} \cdot e^{-0,23 \cdot \beta};$$

$$I_{\Phi} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 0,92 \cdot (1 - 0,18) \cdot 0,42 \cdot e^{-0,23 \cdot 5,41} = 5,47 \cdot 10^{-4} = 0,547 \text{ мА}.$$

Максимальна частота модулюючого сигналу не повинна бути більшою

ніж гранична частота роботи кожного з чотирьох визначальних елементів ВОЛЗ.

Значення параметрів визначальних елементів занесемо до таблиці



Світлодіод	Модулятор	Оптоволокно	Фотодіод
Напівпровідник $\text{Al}_{0,0237}\text{Ga}_{0,9763}\text{As}$	Розміри $a \times b \times l = 0,5 \times 0,5 \times 15 \text{ мм}$	Довжина $L = 2,01 \text{ км}$	Товщина $d = 1 \text{ мкм}$
Довжина хвилі $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$	Напівхвильова напруга $U_{\lambda/2} = 142 \text{ В}$	Вікно прозорості № 1	Ширина забор. зони $E_{\text{г фото max}} = 1,46 \text{ эВ}$
Смуга випромінювання $\Delta\lambda = 22,6 \text{ нм}$			Коефіцієнт відбиття $R = 0,18$
Зовнішня квантова ефективність $\eta_{\text{в}} = 0,6$	ККД $\delta = 0,42$	Питоме загасання $\beta = 5,41 \text{ Дб}$	Квантовий вихід фотоефекту $\eta = 0,92$
Сила струму $I = 10 \text{ мА}$			
Вих.потужність $P_{\text{випр}} = 8,78 \text{ мВт}$	Вхідна потужність $P_{\text{вх}}^{\text{мод}} = 8,78 \text{ мВт}$		
	Вих.потужність $P_{\text{вих}}^{\text{мод}} = 3,69 \text{ мВт}$	Вхідна потужність $P_{\text{вх}}^{\text{вол}} = 3,69 \text{ мВт}$	
		Вих.потужність $P_{\text{вих}}^{\text{вол}} = 1,06 \text{ мВт}$	Вхідна потужність $P_{\text{вх}}^{\text{фото}} = 1,06 \text{ мВт}$
			Фотострум $I_{\text{ф}} = 0,547 \text{ мА}$
Гран. частота модул. сигналу $f_{\text{max}} = 53 \text{ МГц}$	Гран.частота роботи $f_{\text{max}} = 368 \text{ МГц}$	Гран.частота роботи $f_{\text{max}} = 368 \text{ МГц}$	Гран.частота роботи $f_{\text{max}} = 82,4 \text{ МГц}$
Гранична частота модулюючого сигналу $f_{\text{max}} = 53 \text{ МГц}$			

ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Завдання до етапу 6.1. Світлодіод

1 Для виготовлення СВД використовувалось потрійне з'єднання одного із складів: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (склад 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (склад 2) і $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb}$ (склад 3), у яких ширина забороненої зони визначається відповідно до співвідношення (5). Номер складу зазначено у таблиці вхідних даних. СВД використовується для роботи у ВОЛЗ із кварцовим оптоволоконном у вікні прозорості (див. рис. 3), номер якого зазначено у таблиці вхідних даних. Зовнішня квантова ефективність СВД дорівнює $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Визначити невідому атомну частку елемента в потрійному з'єднанні і записати його формулу.
- Розрахувати довжину хвилі електролюмінісценції. Визначити півширину спектральної смуги випромінювання в одиницях довжини хвилі, якщо півширину смуги випромінювання в енергетичних одиницях прийняти $2kT / \sqrt{N}$, де N – номер варіанта.
- Записати зовнішню квантову ефективність СВД.
- Визначити граничну частоту роботи світлодіода при внутрішньому способі модуляції, якщо час життя електронів матеріалу світлодіода $\sqrt[3]{N} \cdot 10^{-9}$ с.

2 Для виготовлення СВД використовувалось потрійне з'єднання одного із складів: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (склад 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (склад 2) і $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb}$ (склад 3), у яких ширина забороненої зони визначається відповідно до співвідношення (5). Номер складу зазначено у таблиці вхідних даних. СВД використовується для роботи у ВОЛЗ із кварцовим оптоволоконном у вікні прозорості (див. рис. 3), номер якого зазначено у таблиці вхідних даних. Зовнішня квантова ефективність СВД дорівнює $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Визначити невідому атомну частку елемента в потрійному з'єднанні і записати його формулу.

- Розрахувати частоту максимуму випромінювання. Визначити півширину спектра випромінювання в одиницях частоти, якщо півширину смуги випромінювання в енергетичних одиницях прийняти $2kT / \sqrt{N}$, де N – номер варіанта.
- Записати зовнішню квантову ефективність СВД.
- Визначити граничну частоту роботи світлодіода при внутрішньому способі модуляції, якщо час життя електронів матеріалу світлодіода $\sqrt[3]{N} \cdot 10^{-9}$ с.

3 Для виготовлення СВД використовувалось потрійне з'єднання одного із складів: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (склад 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (склад 2) і $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb}$ (склад 3), у яких ширина забороненої зони визначається відповідно до співвідношення (5). Номер складу зазначено у таблиці вхідних даних. СВД використовується для роботи у ВОЛЗ із кварцовим оптоволоконном у вікні прозорості (див. рис. 3), номер якого зазначено у таблиці вхідних даних. Зовнішня квантова ефективність СВД дорівнює $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Визначити невідому атомну частку елемента в потрійному з'єднанні і записати його формулу.
- Записати енергію максимуму смуги випромінювання. Визначити півширину спектральної смуги випромінювання в одиницях довжини хвилі, якщо півширину смуги випромінювання в енергетичних одиницях прийняти $2kT / \sqrt{N}$, де N – номер варіанта.
- Записати зовнішню квантову ефективність СВД.
- Визначити граничну частоту роботи світлодіода при внутрішньому способі модуляції, якщо час життя електронів матеріалу світлодіода $\sqrt[3]{N} \cdot 10^{-9}$ с.

Завдання до етапу 4.2. Модулятор

1 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, модулюється подачею напівхвильової напруги на комірку Поккельса, фактор якості якої

$10^{-9}/\sqrt[3]{N}$ м/В, де N – номер варіанта. Коефіцієнт пропускання матеріалу комірки дорівнює 0,95.

- Визначити напівхвильову напругу для даної комірки Поккельса з поперечними розмірами 0,15×0,15 мм і довжиною 10 мм.
- Розрахувати різницю показників заломлення двох складових світла, що проходить: поляризованої вздовж зовнішнього електричного поля і поперек його.
- Визначити максимально можливу частоту модулюючого сигналу при отриманій довжині комірки, якщо електрооптичний коефіцієнт матеріалу комірки прийняти рівним $\sqrt{N} \cdot 10^{-11}$ м/В.
- Розрахувати ККД комірки.

2 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, модулюється подачею напівхвильової напруги на комірку Поккельса, фактор якості якої $10^{-9}/\sqrt[3]{N}$ м/В, де N – номер варіанта. Коефіцієнт пропускання матеріалу комірки дорівнює 0,9.

- Розрахувати довжину комірки Поккельса, щоб при поперечних розмірах 0,2×0,2 мм напівхвильова напруга дорівнювала у вольтах $15\sqrt{N}$, де N – номер варіанту.
- Визначити максимально можливу частоту модулюючого сигналу при отриманій довжині комірки, якщо електрооптичний коефіцієнт матеріалу комірки прийняти рівним $\sqrt{N} \cdot 10^{-11}$ м/В.
- Розрахувати оптичну різницю ходу двох складових світла, що проходить: поляризованої вздовж зовнішнього електричного поля і поперек його.
- Розрахувати ККД комірки.

3 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, модулюється подачею напівхвильової напруги на комірку Поккельса, фактор

якості якої $10^{-9} / \sqrt[3]{N}$ м/В, де N – номер варіанта. Коефіцієнт пропускання матеріалу комірки дорівнює 0,85.

- Визначити поперечні розміри комірки Поккельса при довжині 15 мм, щоб напівхвильова напруга дорівнювала у вольтах $14 \sqrt{N}$, де N – номер варіанту.
- Розрахувати максимальну довжину комірки при максимально можливій частоті модулюючого сигналу 0,5 ГГц, якщо електрооптичний коефіцієнт матеріалу комірки прийняти $\sqrt{N} \cdot 10^{-11}$ м/В. Якщо максимальна довжина комірки виявиться меншою за 15 мм, тоді необхідно визначити максимально можливу частоту сигналу, що модулює, при заданій довжині 15 мм.
- Розрахувати різницю фаз двох складових світла, що проходить: поляризованої вздовж зовнішнього електричного поля і поперек його.
- Розрахувати ККД комірки.

Завдання до етапу 4.3. Світловод

1 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами, визначеними на етапі 4.2, поширюється по кварцовому одномодовому світловоду. Номер вікна прозорості (див. рис. 3) зазначено у таблиці вхідних даних. Дисперсія в оптоволокну залежить від довжини хвилі λ світла згідно з співвідношенням $10^{-14} / \lambda^3$ м⁻¹. Довжина оптоволокну $(4,5 - \sqrt[3]{N})$ км, де N – номер варіанта.

- Визначити максимальну частоту проходження імпульсів в світловоді.
- Розрахувати загасання в світловоді отриманої довжини, а також визначити у скільки разів зменшиться потужність світлового випромінювання внаслідок втрат в ньому.

Технологічні втрати не враховувати.

2 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами, визначеними на етапі 4.2, поширюється по кварцовому одномодовому світловоду. Номер вікна прозорості

(див. рис. 3) зазначено у таблиці вхідних даних. Дисперсія в оптоволокну залежить від довжини хвилі λ світла згідно з співвідношенням $10^{-14}/\lambda^3 \text{ м}^{-1}$.

- Розрахувати максимальну довжину світловоду, при якій потужність світлового сигналу на виході з нього зменшується в $2\sqrt[3]{N}$ разів, де N – номер варіанта.
- Визначити максимальну частоту проходження імпульсів в ньому при отриманій довжині.
- Розрахувати загасання в світловоді отриманої довжини.

Технологічні втрати не враховувати.

3 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами, визначеними на етапі 4.2, поширюється по кварцовому одномодовому світловоду. Номер вікна прозорості (див. рис. 3) зазначено у таблиці вхідних даних. Дисперсія в оптоволокну залежить від довжини хвилі λ світла згідно з співвідношенням $10^{-14}/\lambda^3 \text{ м}^{-1}$.

- Визначити максимальну довжину світловоду, якщо гранична найбільша частота проходження імпульсів в ньому повинна бути не меншою за $2\sqrt[3]{N^2} \cdot 10^8$ Гц, де N – номер варіанта.
- Розрахувати загасання в світловоді отриманої довжини, а також визначити у скільки разів зменшиться потужність світлового випромінювання внаслідок втрат у ньому.

Технологічні втрати не враховувати.

Завдання до етапу 4.4. Фотодіод

1 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами, визначеними на етапі 4.2, проходить кварцовий світловод відповідно до етапу 4.3, а потім освітлює тонку р-область фотодіода площиною $\sqrt[3]{N} \text{ мм}^2$ і товщиною $\sqrt[3]{N} \text{ мкм}$, де N – номер варіанта. Густина струму насичення р-п-переходу $\sqrt[3]{N} \text{ А/м}^2$ при рухливості

носіїв заряду в ньому $0,01 \cdot \sqrt{N} \text{ м}^2/(\text{В} \times \text{с})$. Коефіцієнт відбиття світла від поверхні бази – 0,11. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекта – $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Обчислити максимальну ширину забороненої зони напівпровідника придатного для виготовлення фотоприймача даного випромінювання.

- Визначити, якої сили струм повинен протікати по СВД, щоб генерувати випромінювання такої інтенсивності, якої з урахуванням втрат в модуляторі й оптоволокні вистачило б для створення фотоструму 300 разів більшого за темновий струм. Для цього розрахувати величину фотоструму у фотодіоді й одержати значення потужності випромінювання підведеного з оптоволокна до фотодіода. По загасанню у світловоді з етапу 4.3 обчислити відповідну потужність випромінювання на вході оптоволокна. По ККД комірки Поккельса з етапу 4.2 розрахувати потужність випромінювання на вході комірки. По цій потужності та зовнішній квантовій ефективності з етапу 4.1 розрахувати необхідну силу струму СВД.

- Обчислити максимальну граничну частота роботи фотодіода.

Технологічні втрати не враховувати.

2 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами визначеними на етапі 4.2 проходить кварцовий світловод відповідно до етапу 4.3, а потім освітлює тонку р-область фотодіода площею $\sqrt[3]{N} \text{ мм}^2$ і товщиною $\sqrt[3]{N} \text{ мкм}$, де N – номер варіанта. Густина струму насичення р-п-переходу $\sqrt[3]{N} \text{ А/м}^2$ при рухливості носіїв заряду в ньому $0,01 \cdot \sqrt{N} \text{ м}^2/(\text{В} \times \text{с})$. Коефіцієнт відбиття світла від поверхні бази – 0,12. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту – $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

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

- Визначити, якої сили струм повинен протікати по СВД, щоб генерувати випромінювання такої інтенсивності, якої з урахуванням втрат у модуляторі й оптоволокні вистачило б для створення фотоструму 200 разів більшого за

темновий струм. Для цього розрахувати величину фотоструму у фотодіоді й одержати значення потужності випромінювання підведеного з оптоволокна до фотодіода. По загасанню у світловоді з етапу 4.3 обчислити відповідну потужність випромінювання на вході оптоволокна. По ККД комірки Поккельса з етапу 4.2 розрахувати потужність випромінювання на вході комірки. По цій потужності та зовнішній квантовій ефективності з етапу 4.1 розрахувати необхідну силу струму СВД.

- Обчислити максимальну граничну частота роботи фотодіода.

Технологічні втрати не враховувати.

3 Світло, що випромінюється розрахованим на етапі 4.1 СВД, після модуляції корисним сигналом з параметрами, визначеними на етапі 4.2, проходить кварцовий світловод відповідно до етапу 4.3, а потім освітлює тонку р-область фотодіода площею $\sqrt[3]{N}$ мм² і товщиною $\sqrt[3]{N}$ мкм, де N – номер варіанта. Густина струму насичення р-п-переходу $\sqrt[3]{N}$ А/м² при рухливості носіїв заряду в ньому $0,01 \cdot \sqrt{N}$ м²/(В×с). Коефіцієнт відбиття світла від поверхні бази – 0,13. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекта – $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Вказати інтервал значень ширини забороненої зони напівпровідників, придатних для виготовлення фотодіодів для прийому даного випромінювання.

- Визначити, якої сили струм повинен протікати по СВД, щоб генерувати випромінювання такої інтенсивності, якої з урахуванням втрат у модуляторі й оптоволокні вистачило б для створення фотоструму 100 разів більшого за темновий струм. Для цього розрахувати величину фотоструму у фотодіоді й одержати значення потужності випромінювання підведеного з оптоволокна до фотодіода. По загасанню у світловоді з етапу 4.3 обчислити відповідну потужність випромінювання на вході оптоволокна. По ККД комірки Поккельса з етапу 4.2 розрахувати потужність випромінювання на вході комірки. По цій потужності та зовнішній квантовій ефективності з етапу 4.1 розрахувати необхідну силу струму СВД.

- Обчислити максимальну граничну частота роботи фотодіода.

Технологічні втрати не враховувати.

Завдання до етапу 4.5. Узгодження елементів ВОЛЗ

Накреслити структурну схему ВОЛЗ, що розраховується.

- Перевірити відповідність довжини хвилі випромінювання світлодіода напівхвильовій напрузі модулятора, вікну прозорості оптоволокна та ширині забороненої зони фотодетектора.
- Перевірити, чи достатньо сили струму, який протікає по СВД, щоб генерувати випромінювання такої інтенсивності, якій з урахуванням втрат в модуляторі й оптоволокну вистачило б для створення фотоструму зазначеної в завданні до етапу 4.4 величини. Для цього необхідно перевірити розрахунки потужності випромінювання на усіх етапах проходження сигналу (див. приклади) без урахування технологічних втрат.
- Указати максимальну частоту сигналу, що модулює, яка не повинна бути більшого ніж гранична частота роботи кожного з чотирьох визначальних елементів ВОЛЗ.

Заповнити таблицю з вказівкою значень параметрів визначальних елементів.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

- Для выполнения курсовой работы студенты должны выучить разделы “Оптика” и “Физика оптической связи” курса физики.
- Курсовая работа состоит из пяти взаимно связанных заданий по этапам: 4.1; 4.2; 4.3; 4.4; 4.5. Студент должен выполнить по одному заданию из каждого этапа. Конкретные номера условий заданий по каждому этапу и начальные данные в тридцати вариантах указаны в табл.1. Номер варианта определяется порядковым номером фамилии студента в журнале группы.
- **Курсовая работа** выполняется на белых нелинованных листах А4. Записи ведутся на одной стороне листа. Листы сшиваются в папку.
- На обложке следует отметить название работы, **номер варианта**, фамилия и инициалы студента, шифр группы.
- Расчетную часть следует располагать по порядку нумерации этапов.
- Расчетная часть по любому этапу должна содержать одиннадцать пунктов:

1 **Название этапа**

2 **Теоретические положения** (ответ на контрольные вопросы по теме).

3 Полное **условие задания**.

4 **Краткая запись условия**.

5 Приведение значения заданных величин к **системе единиц СИ**.

6 Пояснительную **схему** или рисунок.

7 **Перечень законов или формул**, которые отражают физические явления темы этапа. **Все обозначения** в формулах следует **пояснить**.

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

9 **Проверку единиц измерения** полученных величин на соответствие их с ожидаемыми. Для этого подставить к формуле буквенного решения вместо символа каждой величины ее единицу измерения и осуществить необходимые преобразования.

10 Лишь после совпадения единиц измерения с ожидаемыми следует подставить в формулу буквенного решения **числовые значения** величин и произвести вычисления (см. примеры выполнения расчетной части). Вычисление проводить с тремя значащими цифрами.

11 **Результат** выполнения расчетной части.

В конце работы следует перечислить использованную литературу.

Во всех случаях, если не указано иначе, считать $T = 300 \text{ K}$.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

При оценке практической части по 5 задачам курсовой работы студент получает:

- за правильное решение и оформление расчетной части и верное объяснение хода расчетов – **20** баллов;
- за правильное решение и оформление расчетной части и неточностями в объяснениях – **16** баллов;
- за правильное решение и оформление расчетной части и ошибками в объяснениях хода расчетов – **14** баллов;
- за правильное решение с недостатками оформления (нет пояснений величин, схемы, единиц измерения, и т.д.) задачи и верное объяснение хода расчетов – **10** баллов;
- за правильное решение с недостатками оформления (нет пояснений величин, схемы, единиц измерения, и т.д.) расчетов и неточностями в объяснениях хода расчетов – **8** баллов;
- за правильный ход расчетов и оформление расчетной части, но с неверным численным решением и верное объяснение хода расчетов – **6** 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, ν – 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;
 $\eta_{\text{в}}$ – внешний квантовый выход;
 ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;
 j – плотность тока, j_s – плотность тока насыщения;
 $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя свободного электрона;
 E_g – ширина запрещенной зоны, E – энергия электрона (дырки);
 n – концентрация электронов, p – концентрация дырок;
 τ_n – время жизни электронов, τ_p – время жизни дырок;
 ρ – удельное сопротивление, $\rho_{\text{т}}$ – темновое удельное сопротивление;
 γ – удельная электропроводность;
 $\gamma_{\text{т}}$ – удельная темновая электропроводность, $\Delta\gamma$ – удельная фотопроводимость;
 D_n – коэффициент диффузии электронов, D_p – коэффициент диффузии дырок;
 Δn – концентрация неравновесных электронов,
 Δp – концентрация неравновесных дырок;
 α – коэффициент поглощения света, R – коэффициент отражения света;
 ϕ – квантовая интенсивность излучения (плотность потока фотонов);
 $L_{\text{опт}}$ – эффективная длина поглощения света;
 η – квантовый выход фотоэффекта.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ФОРМУЛЫ

В данной курсовой работе студент должен построить волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС). Для этого необходимо подобрать и рассчитать основные параметры четырех определяющих элементов конструируемой ВОЛС: светоизлучающего диода, модулятора, оптического волокна и фотодетектора. Параметры каждого из элементов ВОЛС должны быть такими, чтобы выполнялось три вида условий:

1 Необходимо, чтобы *длина волны* излучения СИД соответствовала окну прозрачности оптоволокна, а фотодетектор должен эффективно поглощать такое излучение. По длине волны подбирается и рабочее напряжение модулятора.

2 *Электрический ток*, который питает СИД, должен обеспечить генерирование излучения такой интенсивности, которой с учетом потерь в модуляторе и оптоволокне хватило бы для создания фототока фотодетектора величины, которая задается.

3 Частота модулирующего сигнала не должна быть больше предельной частоты работы каждого из четырех определяющих элементов ВОЛС.

Тема 4.1 Светоизлучающие диоды (СИД)

При изучении оптических свойств полупроводниковых приборов наиболее удачной формой представления излучающего p – n –перехода является

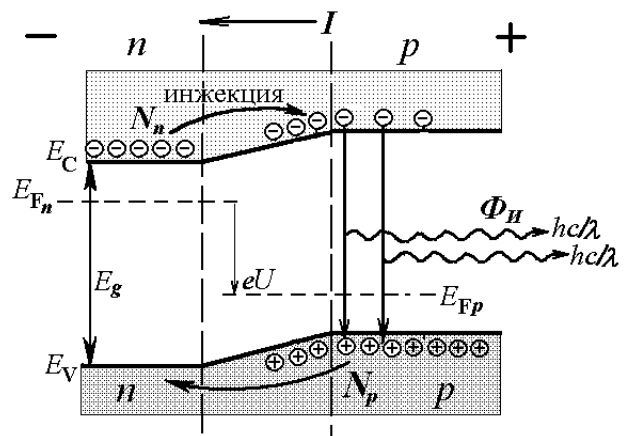


Рисунок 1 – Зонная диаграмма светодиода

его зонная диаграмма, которая показана на рис. 1. Обозначения

энергетических уровней следующие: E_C – дно зоны проводимости, E_V – потолок валентной зоны. Разность энергий $E_C - E_V$ есть ширина запрещенной зоны E_g . n_n – концентрация электронов в n -области, p_p – концентрация дырок в p -области. U – величина прямого напряжения, I – сила тока через СИД, Φ_{II} – число выходящих из СИД излучённых фотонов, N_p и N_n – число дырок и электронов, инжектированных через p - n -переход.

Основной физической величиной, характеризующей качество СИД, является *внешний квантовый выход* η_B – отношение числа выходящих из СИД излучённых фотонов Φ_{II} , к полному числу дырок и электронов, протекающих через p - n -переход $N_p + N_n$:

$$\eta_B = \frac{\Phi_{II}}{N_p + N_n}. \quad (1)$$

Если принять, что величины Φ_{II} и $N_p + N_n$ измеряются в единицу времени, то сила тока через СИД равна

$$I = e(N_p + N_n). \quad (2)$$

Тогда мощность излучаемого им света определяется как

$$P_{\text{изл}} = \Phi_{II} \cdot h\nu = \eta_B \cdot (N_p + N_n) \cdot h\nu = \eta_B \cdot (I/e) \cdot h\nu = I \cdot \eta_B \cdot h\nu / e. \quad (3)$$

В соотношении (3) и далее h и e – константы (см. условные обозначения).

Максимальная предельная частота работы светодиода (частота модулирующего сигнала при внутреннем способе модуляции излучения) определяется временем жизни инжектированных в p -базу электронов τ_n :

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2\pi \tau_n}. \quad (4)$$

В данной работе для изготовления СИД предлагаются три состава тройных полупроводниковых соединений $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (состав 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (состав 2) и $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ (состав 3).

Ширина запрещенной зоны E_g таких полупроводников зависит от параметров состава:

$$E_g = (0,36 + 1,08x) \text{ – для состава 1 } (\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}),$$

$$E_g=(0,36+0,97y) - \text{ для состава 2 (InP}_y\text{As}_{1-y}), \quad (5)$$

$$E_g=(0,77+1,37z) - \text{ для состава 3 (Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb)}.$$

Студент должен определить химическую формулу полупроводника рекомендованного состава в зависимости от варианта. Параметр состава x , y или z подбирается из условия того, что длина волны излучения

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (6)$$

должна совпадать длиной волны, одного из окон прозрачности кварцевого оптоволокна (рис. 4), номер которого задается. Окна прозрачности кварцевого оптоволокна в ближней инфракрасной области спектра: 0,85, 1,15, 1,33 и 1,55 мкм. Этой длине волны должен соответствовать максимум мощности излучения. Длина волны связана с энергией фотона $h\nu$ выражением

$$\lambda = \frac{hc}{h\nu}. \quad (7)$$

Полоса излучения в энергетических единицах $(E_g - \Delta(h\nu))/2 \div E_g + \Delta(h\nu)/2$ 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 формулу (7):

$$\frac{d\lambda}{d(h\nu)} = hc \cdot \frac{1}{(h\nu)^2} = hc \cdot \frac{\lambda^2}{(hc)^2} = \frac{\lambda^2}{hc}, \quad (8)$$

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

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot \Delta(h\nu)}{hc}. \quad (9)$$

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

Полосу излучения в единицах частоты можно получить, рассчитав частоту

излучения из выражения (7), а полуширину спектра в единицах частоты – из (9):

$$\Delta \nu = \frac{c \cdot \Delta \lambda}{\lambda^2} \quad (10)$$

Тема 4.2 Модуляторы

Устройство электрооптического модулятора показано на рис. 2.

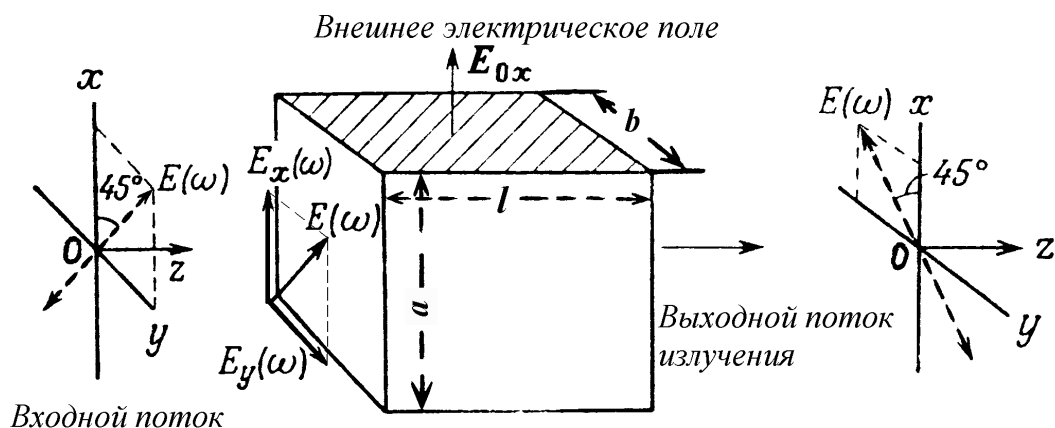


Рисунок 2 – Электрооптический модулятор на базе ячейки Поккельса

Практическое применение электрооптического эффекта основано на том, что показатель преломления различен для света, поляризованного перпендикулярно и параллельно приложенному внешнему электрическому полю, и эта разность зависит от величины поля.

На рис. 2 входящий свет, распространяющийся вдоль оси z , поляризован под углом 45° 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

$$\Delta n = \frac{n^3 r \cdot E_{0x}}{2}, \quad (11)$$

где n – показатель преломления в отсутствие внешнего поля,

r – электрооптический коэффициент Поккельса, E_{0x} – напряженность внешнего электрического поля, направленного вдоль $0x$. В результате при выходе световой электромагнитной волны из кристалла длиной l компоненты

$E_x(\omega)$ и $E_y(\omega)$ приобретают оптическую разность хода

$$\Delta_{\text{опт}} = \Delta n \cdot L = \frac{n^3 r \cdot E_{0x} \cdot l}{2}. \quad (12)$$

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

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_{\text{опт}} = \frac{\pi \cdot n^3 r \cdot E_{0x} \cdot l}{\lambda}. \quad (13)$$

Если $\Delta_{\text{опт}} = \lambda/2$, то плоскость поляризации выходящего света будет повернута на 90° по отношению к плоскости поляризации входящего пучка. Таким образом, если кристалл с поперечными размерами $a \times b$ помещен между скрещенными поляризаторами, то выходной сигнал отсутствует при отсутствии напряжения и достигает максимума, когда приложено внешнее "полуволновое напряжение":

$$U_{(\lambda/2)} = E_{0x} b = \frac{\lambda b}{n^3 r l}. \quad (14)$$

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

Для равенства длительности светового импульса и импульса управляющего напряжения необходимо, чтобы время прохождения световой волны по кристаллу было намного меньше длительности импульса управляющего напряжения. Если длительность импульсов невелика, можно ограничиться условием, когда время прохождения световой волны через модулятор в 20 раз меньше периода следования управляющих импульсов:

$$\frac{l}{c/n} = \frac{T}{20}. \quad (15)$$

Тогда максимально возможная частота модулирующего сигнала ограничена длиной ячейки в соответствии с соотношением:

$$f_{\text{max}} = \frac{c}{20n \cdot l}. \quad (16)$$

Поскольку для работы ячейки Поккельса требуется поляризованный свет, то при их использовании в оптических линиях связи совместно с источниками некогерентного излучения, которыми являются СИД, при поляризации на

входном поляризаторе теряется $\delta_{\text{пол}}=0,5$ мощности излучения. Таким образом, КПД ячейки Поккельса определяется произведением

$$\delta_{\text{мод}} = \delta_{\text{пол}} \cdot \delta_{\text{матер}}, \quad (17)$$

где $\delta_{\text{матер}}$ – коэффициент пропускания материала ячейки.

Тема 4.3 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. Частота следования импульсов не может быть больше граничной частоты f_{max} при которой в процессе распространения импульсов по световоду длинноволновый край λ_2 одного импульса догонит коротковолновый край λ_1 предыдущего импульса, иначе говоря, наименьший период следования импульсов $T_{\text{мин}}$ должен быть равен разности времен распространения коротковолнового t_1 и длинноволнового t_2 импульсов:

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

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, λ_1 и λ_2 – рассчитывают по спектральной полуширине импульса $\Delta\lambda$.

Здесь 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:

$$n(\lambda_1) - n(\lambda_2) = \frac{dn}{d\lambda} \cdot \Delta\lambda. \quad (18)$$

Распространение светового сигнала по световоду сопровождается

потерями, характеризуемыми удельным коэффициентом потерь

$$\beta_0 = \frac{10}{L} \cdot \lg(P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} / P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}}), \text{ дБ/км}, \quad (19)$$

где $P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}}$ – мощность на входе, $P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}}$ – мощность на выходе световода длиной L км.

Тогда полное затухание после прохождения световода произвольной длины L

$$\beta = \lg(P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} / P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}}) = \beta_0 \cdot L \quad (20)$$

Тогда мощность сигнала на выходе можно определить как

$$P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} \cdot 10^{-\frac{\beta_0 \cdot L}{10}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} \cdot e^{-0,23\beta_0 \cdot L}. \quad (21)$$

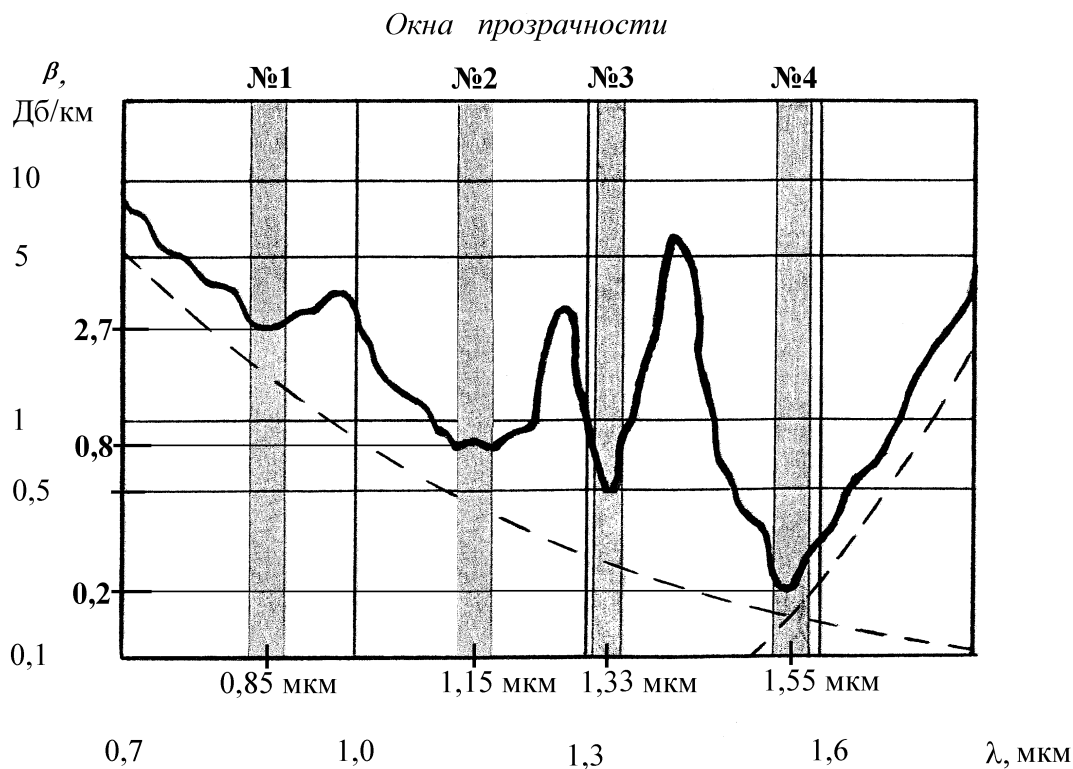


Рисунок 3 – Удельное затухание кварцевого оптоволокна

Для волоконнооптических линий связи чаще всего используется кварцевое волокно, спектр поглощения которого показан на рис.4. Как видно, существуют четыре минимума поглощения: 2,7, 0,8, 0,5 и 0,2 дБ/км – окна прозрачности. В зависимости от комплекса условий выбирается определенное окно прозрачности. Чтобы излучение СИД точно соответствовало выбранному

окну, необходимо применить полупроводник с соответствующей шириной запрещенной зоны, определяемой из соотношения (6).

Тема 4.4 Фотодиоды

Фотоактивным для данного полупроводника является свет, энергия фотонов которого больше или равна ширине запрещенной зоны. Однако, энергия фотонов поглощаемого света не может более чем вдвое превышать

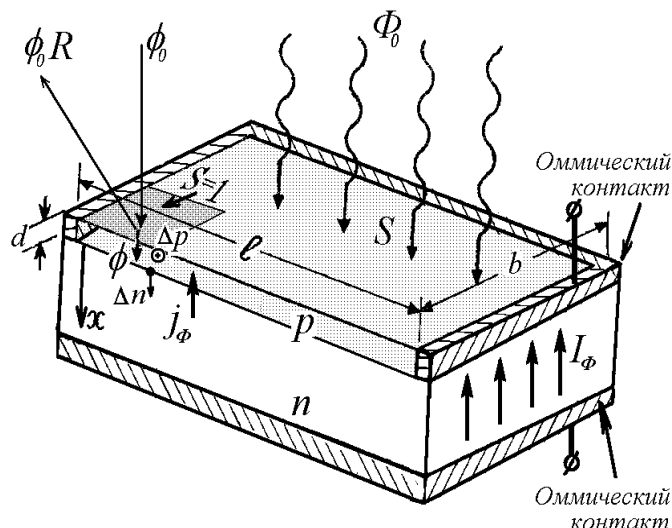


Рисунок 4 – Внутренний фотоэффект

ширину запрещенной зоны, так как при этом свет поглощается вблизи поверхности, где генерированные носители сразу рекомбинируют через поверхностные состояния. Поэтому полупроводник с шириной запрещенной зоны E_g будет поглощать свет с энергией максимума излучения $h\nu$ из неравенства

$$E_g \leq h\nu \leq 2E_g. \quad (22)$$

И, наоборот, свет с энергией максимума излучения $h\nu$ поглощается полупроводниками с шириной запрещенной зоны E_g из неравенства

$$\frac{h\nu}{2} \leq E_g \leq h\nu. \quad (23)$$

Поглощаемое излучение удобно характеризовать квантовой интенсивностью ϕ_0 – количеством фотонов, падающих на 1 м^2 поверхности полупроводника за 1 с. Тогда мощность падающего на поверхность полупроводника площадью S излучения

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}} = \phi_0 \cdot S \cdot h\nu \quad (24)$$

Когда поверхность полупроводника освещается (рис. 4) фотоактивным светом с квантовой интенсивностью ϕ_0 , то по мере проникновения света вглубь полупроводника квантовая интенсивность света изменяется по закону Бугера:

$$\phi(x) = \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (25)$$

где R – коэффициент отражения света, α – коэффициент поглощения света, x – расстояние от поверхности.

Скорость оптической генерации носителей в тонком слое пропорциональна скорости убывания интенсивности света:

$$g(x) = -\eta \frac{d\phi}{dx} = \eta \cdot \alpha \cdot \phi_0 (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x), \quad (26)$$

где η – квантовый выход внутреннего фотоэффекта.

Рассмотрим фотодиод с р-п-переходом, у которого тонкая р-область толщиной d (база) и площадью S освещается светом квантовой интенсивностью ϕ_0 . Для фотодиода характерно, что свет полностью поглощается в приповерхностном слое, т. е. эффективная длина оптического поглощения $L_{\text{opt}} \ll d$ и скорость оптической генерации в р-области

$$g = \frac{\eta \cdot \phi_0 (1 - R)}{d}, \quad (27)$$

Концентрация генерированных светом неравновесных электронов и дырок в базе фотодиода :

$$\Delta n = \tau_n g = \tau_n \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) / d; \quad (28)$$

$$\Delta p = \tau_p g = \tau_p \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) / d, \quad (29)$$

где τ_n , τ_p – время жизни электронов и дырок соответственно.

Так как толщина области поглощения света d делается намного меньше диффузионных длин носителей, то генерируемые светом электроны практически мгновенно и без потерь достигают р-п-перехода и уходят в п-область. Дырки, достигая р-п-перехода, не могут преодолеть потенциальный барьер и остаются в р-области. Тогда плотность электронного фототока через р-п-переход площадью S (рис. 4), в отсутствие заметных потерь на

рекомбинацию фотоносителей до их разделения р-n-переходом, можно определить как

$$j_{\Phi} = \frac{J_{\Phi}}{S} = \frac{e\Delta N}{\tau_n S} = \frac{e\Delta n \cdot d \cdot S}{\tau_n \cdot S} = e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R). \quad (30)$$

В результате этого n-область заряжается отрицательно, а р-область – положительно. Возникает фото-ЭДС U_{Φ} , приложенная в пропускном направлении, высота потенциального барьера уменьшается, и в пропускном направлении начинает течь прямой ток создаваемый потоком электронов из n-области и дырок из р-области:

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

где j_S – плотность тока насыщения.

Поэтому полный поток электронов из р-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-n-переход не станет равным нулю:

$$j_{\text{полн}} = |j| - j_{\Phi} = 0. \quad (32)$$

Созданная при этом разность потенциалов называется напряжением холостого хода. Подставив (30) и (31) в (32), получим соотношение, устанавливающее связь между падающей на фотоэлемент плотностью потока фотонов ϕ_0 и напряжением холостого хода U_{xx} :

$$e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) = j_S \left(\exp \frac{e \cdot U_{xx}}{kT} - 1 \right). \quad (33)$$

В фотодиодном режиме на р-n-переход подаётся обратное смещение, и ток через р-n-переход представляет собой сумму обратного тока, определяемого по (31) с отрицательным значением U , и фототока (30):

$$j_{\text{полн}} = |j| + j_{\Phi}. \quad (34)$$

В фотодиодном режиме темновой ток (в отсутствии освещения) должен быть как можно меньше, поэтому на р-n-переход подаётся такое обратное

смещение при котором темновой ток практически равен току насыщения, тогда:

$$j_{\text{полн}} = j_S + j_{\text{ф}}. \quad (35)$$

В показанной на рис. 4 возможной конструкции фотодиода сила тока через диод

$$I = j \cdot S, \quad (36)$$

где S – совпадает с площадью освещаемой поверхности.

Максимальная предельная частота работы фотодиода f_{max} (частота модулирующего сигнала, при которой фототок еще успевает спадать от своего максимального значения до нуля) определяется временем выхода носителей заряда из базы τ_b :

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2\pi \tau_b}, \quad (37)$$

а время выхода носителей из базы тем меньше, чем меньше толщина базы d :

$$\tau_b = \frac{d^2}{2D_n} = \frac{d^2 e}{2kT\mu_n}. \quad (38)$$

Здесь учтено, что коэффициент диффузии носителей заряда $D_n = kT\mu_n/e$, где μ_n – подвижность носителей заряда.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Этап 4.1. Расчет светоизлучающего диода (СИД)

СИД изготовлен из тройного соединения состава: $\text{Al}_v\text{Ga}_{1-v}\text{As}$, у которого ширина запрещенной зоны определяется атомной долей алюминия v в соответствии с соотношением $E_g = (1,43 + 1,37v)$. СИД используется для работы в ВОЛС с кварцевым оптоволокном в окне прозрачности №1. Внешняя квантовая эффективность СИД равна 0,6. Время жизни электронов в n-области СИД равно 3×10^{-9} с.

Определим атомную долю v алюминия в тройном соединении и запишем его формулу. Определим для спектральной полосы излучения полуширину в единицах длины волны, если она в энергетических единицах равна $1,5kT$ и

энергию максимума излучения в электронвольтах. Рассчитаем мощность излучения на выходе СИД при силе тока 10 мА, и максимальную предельную частоту модулирующего сигнала.

Дано:

Состав: $\text{Al}_v\text{Ga}_{1-v}\text{As}$;

Окно прозрачности №1;

$\eta_v=0,6$;

$\tau_n=3 \times 10^{-9}\text{с}$;

$\Delta h\nu=1,5kT$;

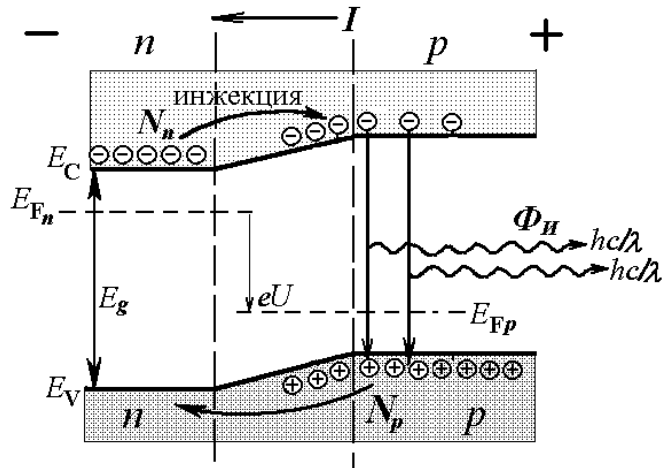
$T=300^\circ\text{C}$;

$I=10\text{ мА}$.

v , формула - ?

$\Delta\lambda$, $h\nu_0$ - ? $P_{\text{изл}}$ - ? f_{max} - ?

$10 \cdot 10^{-3}\text{А}$



Расчеты: По графику удельного затухания кварцевого оптоволокна

(рис. 3) определим длину волны, соответствующую поглощению света в окне прозрачности №1:

$$\lambda=0,85\text{ мкм.}=8,5 \times 10^{-7}\text{м.}$$

На этой длине волны интенсивность излучения СИД должна быть максимальной. Определим энергию максимума излучения СИД используя формулу (7) данного руководства:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; λ – длина волны максимума излучения.

Энергия максимума излучения СИД равна ширине запрещенной зоны E_g полупроводника, из которого он изготовлен:

$$E_g(\text{Дж})=h\nu$$

По условию, для изготовления СИД используется тройной полупроводник состава: $\text{Al}_v\text{Ga}_{1-v}\text{As}$. Определим атомную долю v алюминия из соотношения, характерного для состава 4:

$$E_g(\text{эВ}) = (1,43 + 1,37\nu).$$

Учитывая, что $E_g(\text{эВ}) = E_g(\text{Дж}) / 1,6 \cdot 10^{-19}$, получим:

$$\nu = \frac{E_g - 1,43}{1,37} = \frac{h\nu / 1,6 \cdot 10^{-19} - 1,43}{1,37} = \frac{hc / \lambda 1,6 \cdot 10^{-19} - 1,43}{1,37}.$$

Полуширину полосы излучения СИД $\Delta\lambda$ определим по формуле (9) данного руководства

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\nu \cdot \lambda^2}{c} = \frac{\Delta h\nu \cdot \lambda^2}{h \cdot c} = \frac{1,5kT \cdot \lambda^2}{hc}.$$

Мощность излучаемого СИД света определяется как

$$P_{\text{изл}} = I\eta_B \frac{h\nu}{e} = I\eta_B \frac{hc}{\lambda \cdot e}.$$

Максимальная предельная частота модулирующего сигнала при внутреннем способе модуляции излучения определяется по формуле (4) данного руководства

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2\pi\tau_n},$$

где τ_n – время жизни инжектированных в р-базу электронов.

Проверим единицы измерения величин:

$$[h\nu] = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}} = \text{м};$$

$$[P_{\text{изл}}] = A \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{м} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт};$$

$$[f_{\text{max}}] = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}.$$

Подставим в полученные формулы числовые значения величин и произведем вычисления

$$h\nu = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7}} = 2,34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,46 \text{ эВ};$$

$$\nu = \left(\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7}} - 1,43 \right) / 1,37 = \frac{1,46 - 1,43}{1,37} = 0,0237;$$

$$\Delta \lambda = \frac{1,5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot (8,5 \cdot 10^{-7})^2}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 2,26 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 22,6 \text{ нм};$$

$$P_{\text{изл}} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 8,78 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 8,78 \text{ мВт};$$

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^{-9}} = 5,3 \cdot 10^7 \text{ Гц} = 53 \text{ МГц}.$$

Результаты: $\lambda=0,85 \text{ мкм}$; $\nu=0,0237$; $\text{Al}_{0,0237}\text{Ga}_{0,9763}\text{As}$; $\Delta\lambda=22,6 \text{ нм}$; $h\nu=1,46 \text{ эВ}$;

$P_{\text{изл}}=8,78 \text{ мВт}$; $f_{\text{max}}=53 \text{ МГц}$.

Этап 4.2. Расчет модулятора

Свет излучаемый выбранным на этапе 4.1 СИД модулируется подачей полуволнового напряжения на ячейку Поккельса фактор качества материала которой равен 0,2 нм/В, а электрооптический коэффициент Поккельса 10^{-11} м/В . Коэффициент пропускания материала ячейки равен 0,84. Рассчитаем полуволновое напряжение ячейки Поккельса с поперечными размерами $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$ и длиной 15 мм. Определим максимально возможную частоту модуляции сигнала. Вычислим мощность излучения на выходе из модулятора.

Дано:

$$n^3 r = 0,2 \text{ нм/В};$$

$$0,2 \cdot 10^{-9} \text{ м/В};$$

$$l = 15 \text{ мм};$$

$$15 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$r = 10^{-11} \text{ м/В};$$

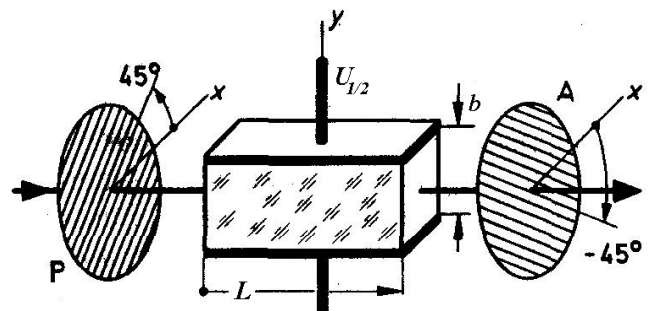
$$a = b = 0,5 \text{ мм};$$

$$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\delta_{\text{матер.}} = 0,84$$

$$U_{1/2} - ? \quad f_{\text{max}} - ? \quad P_{\text{ВЫХ}}^{\text{мод}} - ?$$

Расчеты: Полуволновое напряжение



$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda \cdot b}{n^3 r \cdot l}$$

где b – поперечный размер ячейки, $n^3 r$ – фактор качества, l – длина ячейки. Длина световой волны модулируемого излучения равна длине волны максимума излучения СИД, полученной на этапе 4.1

$$\lambda = 0,85 \text{ мкм}.$$

Максимально возможная частота модулирующего сигнала ограничена длиной ячейки в соответствии с соотношением:

$$f_{\max} = \frac{c}{20n \cdot l}.$$

Показатель преломления можно определить по фактору качества $F=n^3r$ материала ячейки

$$n = \sqrt[3]{\frac{F}{r}},$$

r – электрооптический коэффициент Поккельса.

Тогда

$$f_{\max} = \frac{c}{20 \cdot \sqrt[3]{\frac{F}{r}} \cdot l_{\max}}.$$

КПД ячейки Поккельса показывает, какая доля входного излучения выходит из неё, и определяется произведением

$$\delta_{\text{мод}} = \delta_{\text{пол}} \times \delta_{\text{матер}},$$

где $\delta_{\text{матер}}$ – коэффициент пропускания материала ячейки, $\delta_{\text{пол}}=0,5$ – потери при поляризации.

Вся мощность излученная СИД, которая в соответствии с этапом 4.1 равна $P_{\text{изл}}=8,78$ мВт, подается на модулятор $P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}}=P_{\text{изл}}$. Тогда мощность излучения на выходе модулятора

$$P_{\text{ВЫХ}}^{\text{мод}}=P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}} \cdot \delta_{\text{мод}}$$

Проверим единицы измерения полученных величин:

$$[U_{\lambda/2}] = \frac{\text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{В}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \text{В};$$

$$[f_{\max}] = \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \sqrt[3]{\frac{\text{м} \cdot \text{В}}{\text{В} \cdot \text{м}}} \cdot \text{м}} = \text{с}^{-1}.$$

Подставим численные значения величин и произведем вычисления

$$U_{\lambda/2} = \frac{8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-10} \cdot 0,015} = 142 \text{ В};$$

$$f_{\max} = \frac{3 \cdot 10^8}{20 \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^{-10}}{10^{-11}} \cdot 0,015}} = 3,68 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} = 368 \text{ МГц};$$

$$\delta_{\text{мод}} = 0,5 \cdot 0,84 = 0,42;$$

$$P_{\text{ВЫХ}}^{\text{мод}} = 8,78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,42 = 3,69 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 3,69 \text{ мВт}.$$

Результаты: $U_{\lambda/2} = 142 \text{ В}$, $f_{\max} = 368 \text{ МГц}$, $\delta_{\text{мод}} = 0,42$, $P_{\text{ВЫХ}}^{\text{мод}} = 3,69 \text{ мВт}$.

Этап 4.3. Расчет световода

Свет, излучаемый СИД в соответствии с этапом 4.1, после модуляции полезным сигналом с параметрами, рассчитанными на этапе 4.2, распространяется в кварцевом световоде с дисперсией 18 мм^{-1} по окну прозрачности №1 (см. рис. 3).

Рассчитаем максимальную длину световода, если частота следования импульсов в нем должна быть не меньше частоты модулирующего сигнала из этапа 4.2. Определим полное затухание излучения в световоде при полученной длине, а также во сколько раз при этом уменьшится мощность излучения. Вычислим мощность излучения на выходе световода.

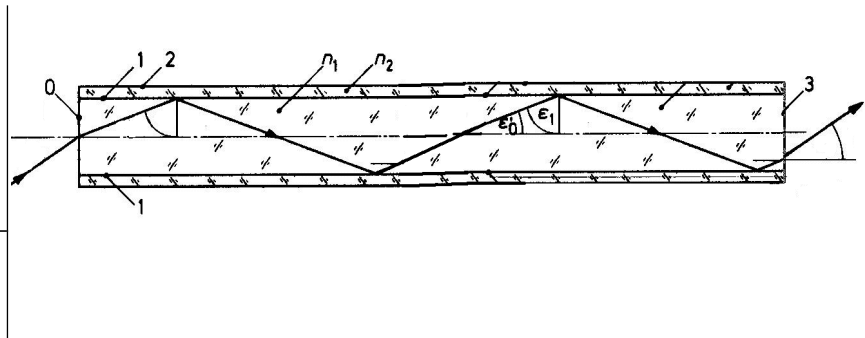
Дано:

$$\frac{dn}{d\lambda} = 18 \text{ мм}^{-1} = 18 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1};$$

Окно прозрачности №1;

$$L - ? \quad \beta - ? \quad P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}} / P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} - ?$$

$$P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}} - ?$$



Расчеты: Ширина спектра излучения соответствует полученной на этапе 4.1:

$$\Delta\lambda = 22,6 \text{ нм}.$$

Максимальная частота следования импульсов в световоде ограничена длиной оптоволоконна в соответствии с выражением:

$$f_{\max} = \frac{c}{(dn/d\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L},$$

где c - скорость света, $\frac{dn}{d\lambda}$ - дисперсия световода, $\Delta\lambda$ - ширина спектра, L -

длина световода.

Отсюда:
$$L = \frac{c}{(dn/d\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot f_{\max}},$$

где максимальную частоту следования импульсов в световоде $f_{\max}$ выбираем равной максимально возможной частоте модулирующего сигнала в модуляторе из этапа 4.2:

$$f_{\max} = 368 \text{ МГц.}$$

Мощность излучения на выходе оптоволокну согласно (21)

$$P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} \cdot e^{-0,23\beta_0 \cdot L},$$

где значение удельного затухания β_0 находим по рис. 3 для окна прозрачности №1 кварцевого оптоволокну:

$$\beta_0 = 2,7,$$

а мощность на входе оптоволокну равна мощности на выходе модулятора из этапа 4.2:

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВЫХ}}^{\text{мод}} = 3,69 \text{ мВт} = 3,69 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Полное затухание в оптоволокну длиной L

$$\beta = \beta_0 \cdot L.$$

Уменьшение оптической мощности в световоде:

$$\frac{P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}}}{P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}}} = e^{0,23 \cdot \beta_0 \cdot L},$$

Проверим единицу измерения

$$[L] = \frac{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{м}} = \text{м}.$$

Подставим числовые значения величин и произведем вычисления:

$$L = \frac{3 \cdot 10^8}{18 \cdot 10^3 \cdot 22,5 \cdot 10^{-9} \cdot 3,68 \cdot 10^8} = 2,006 \cdot 10^3 \text{ м} = 2,01 \text{ км};$$

$$\beta = 2,7 \cdot 2,01 = 5,41 \text{ Дб};$$

$$\frac{P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}}}{P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}}} = e^{0,23 \cdot 2,7 \cdot 2,006} = 3,47;$$

$$P_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОЛ}} = 3,69 \cdot 10^{-3} e^{-0,23 \cdot 2,7 \cdot 2,006} = 3,69 \cdot 10^{-3} / 3,47 = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} = 1,06 \text{ мВт}.$$

Результаты: $L = 2,01 \text{ км}$; $\beta = 5,41 \text{ Дб}$; $P_{\text{ВХ}}^{\text{ВОЛ}} / P_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОЛ}} = 3,47$; $P_{\text{ВЫХ}}^{\text{ВОЛ}} = 1,06 \text{ мВт}$.

Этап 4.4. Расчет фотодиода

Свет, излучается рассчитанным на этапе 4.1 СИД, после модуляции полезным сигналом с параметрами, найденными на этапе 4.2, проходит кварцевый световод в соответствии с этапом 4.3, а затем освещает тонкую область фотодиода площадью 8 мм^2 и толщиной 1 мкм . Плотность тока насыщения р-п-перехода 10^{-2} А/м^2 при подвижности носителей заряда в нем $0,01 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Коэффициент отражения света от поверхности базы – $0,18$; квантовый выход внутреннего фотоэффекта – $0,92$.

Вычислим максимальную ширину запрещенной зоны полупроводника пригодного для изготовления фотоприемника данного излучения. Рассчитаем напряжение холостого хода данного фотоприемника в режиме фотоэлемента при освещенности, полученной на этапе 4.3. Определим фототок на выходе фотоприемника в режиме фотодиода при такой освещенности. Рассчитаем во сколько раз фототок фотодиода больше темнового тока. Определим максимальную предельную частоту работы фотодиода. Технологическими потерями пренебрегаем.

Дано:

$$S = 8 \text{ мм}^2;$$

$$d = 1 \text{ мкм};$$

$$j_s = 10^{-2} \text{ А/м}^2;$$

$$\mu_n = 0,01 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с});$$

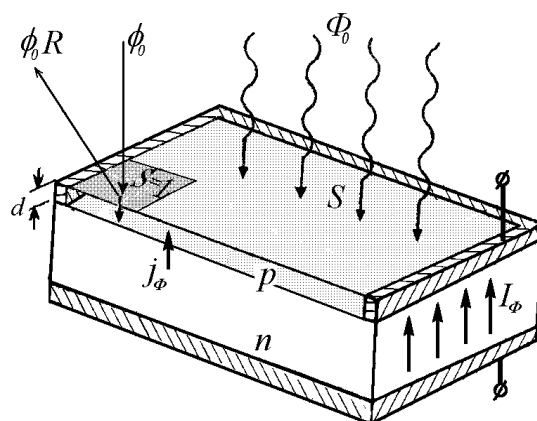
$$R = 0,18;$$

$$\eta = 0,92.$$

$$E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} - ? \quad U_{\text{хх}} - ? \quad j_{\Phi} - ? \quad f_{\text{max}} - ?$$

$$8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$10^{-6} \text{ м};$$



Расчеты: Ширина запрещенной зоны фотоприемника не должна быть больше энергии фотона в максимуме полосы излучения СИД, поэтому

$$E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} = h\nu = hc/\lambda.$$

В электронвольтах:

$$E_{g \max}^{\text{фото}} = \frac{hc}{\lambda} / 1,6 \cdot 10^{-19},$$

где λ – длина волны максимума излучения, ν – его частота.

В соответствии с этапом 4.1 длина волны падающего на фотоприемник излучения равна

$$\lambda = 0,85 \text{ мкм.} = 8,5 \cdot 10^{-7} \text{ м,}$$

а в соответствии с этапом 4.3 мощность этого излучения равна мощности на выходе оптоволоконна

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}} = P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}} = 1,06 \text{ мВт} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Мощность излучения связана с квантовой интенсивностью ϕ_0 соотношением:

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}} = P_0 = \phi_0 \times S \times h\nu = \phi_0 \times S \times hc/\lambda,$$

где S – площадь освещаемой поверхности.

Тогда плотность генерированного в р-области фототока через р-п-переход

$$j_{\Phi} = e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R),$$

где η – квантовый выход внутреннего фотоэффекта;

R – коэффициент отражения света от поверхности базы фотодиода.

В режиме фотоэлемента фототок j_{Φ} равен диффузионному току j (31), вызванному фото-ЭДС холостого хода $U_{\text{хх}}$:

$$e \cdot \eta \cdot \phi_0 (1 - R) = j_S \left(\exp \frac{e \cdot U_{\text{хх}}}{kT} - 1 \right),$$

где j_S – плотность тока насыщения; T – абсолютная температура перехода.

Откуда напряжение холостого хода

$$U_{\text{хх}} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{e\eta\phi_0(1-R)}{j_S} \right) = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{e\eta\lambda P_0(1-R)}{Shc \cdot j_S} \right).$$

В режиме фотодиода фототок можно записать через мощность падающего на поверхность фотодетектора излучения

$$I_{\Phi} = j_{\Phi} S = e \cdot \eta \frac{\lambda P_0}{hc} (1 - R).$$

Рассчитать во сколько раз увеличивается ток фотодиода при освещении

его поверхности излучением такой мощности можно из соотношения:

$$\frac{I_{\Phi}}{I_{\text{темн}}} = \frac{j_{\Phi}}{j_S} = e \cdot \eta \frac{\lambda P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}}}{hc} \frac{(1 - R)}{S \cdot j_S}.$$

Максимальная предельная частота работы фотодиода f_{max} определяется соотношениями (37), (38):

$$f_{\text{max}} = \frac{kT\mu_n}{\pi d^2 e},$$

где μ_n – подвижность носителей заряда; d – толщина базы фотодиода.

Проверим единицы измерения

$$E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{\text{м}} / 1,6 \cdot 10^{-19} = \text{Дж} / 1,6 \cdot 10^{-19} = \text{эВ};$$

$$U_{\text{xx}} = \frac{\text{Дж/град} \cdot \text{град}}{\text{Кл}} = \text{В};$$

$$I_{\Phi} = \text{Кл} \cdot \frac{\text{м} \cdot \text{Вт}}{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}} = \text{А};$$

$$f_{\text{max}} = \frac{\text{Дж/град} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{Кл} \cdot \text{В} \cdot \text{с}} = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}.$$

Подставим числовые значения величин и произведем вычисления:

$$E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,5 \cdot 10^{-7}} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,46 \text{ эВ}.$$

$$U_{\text{xx}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \left(1 + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,92 \cdot 8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,18)}{8 \cdot 10^{-6} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-2}} \right) = 0,228 \text{ В};$$

$$I_{\Phi} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,92 \cdot \frac{8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,18)}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} = 5,47 \cdot 10^{-4} \text{ А} = 0,547 \text{ мА};$$

$$f_{\text{max}} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 0,01}{3,14 \cdot 10^{-12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 8,24 \cdot 10^7 \text{ Гц} = 82,4 \text{ МГц}.$$

Результаты: $E_g^{\text{фото}}_{\text{max}} = 1,46 \text{ эВ}$; $U_{\text{xx}} = 0,228 \text{ В}$; $I_{\Phi} = 0,547 \text{ мА}$; $f_{\text{max}} = 82,4 \text{ МГц}$.

Этап 4.5. Согласование элементов ВОЛС

Проверим соответствие длины волны излучения светодиода

полуволновому напряжению модулятора, окну прозрачности оптоволокну и ширине запрещенной зоны фотодетектора.

Проверим, достаточно ли силы тока $I=10$ мА, протекающего по СИД, чтобы генерировать излучение такой интенсивности, которой с учетом потерь в модуляторе и оптоволокну хватило бы для создания фототока $I_{\Phi} = 0,547$ мА.

С учетом

$$P_{\text{изл}} = I \eta_B \frac{hc}{\lambda_0 \cdot e};$$

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}} = P_{\text{изл}}; \quad P_{\text{ВЫХ}}^{\text{мод}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{мод}} \times \delta_{\text{мод}};$$

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВЫХ}}^{\text{мод}}; \quad P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}} = P_{\text{ВХ}}^{\text{вол}} \times e^{-0,23 \times \beta};$$

$$P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}} = P_{\text{ВЫХ}}^{\text{вол}}; \quad I_{\Phi} = e \cdot \eta \frac{\lambda P_{\text{ВХ}}^{\text{фото}}}{hc} (1 - R).$$

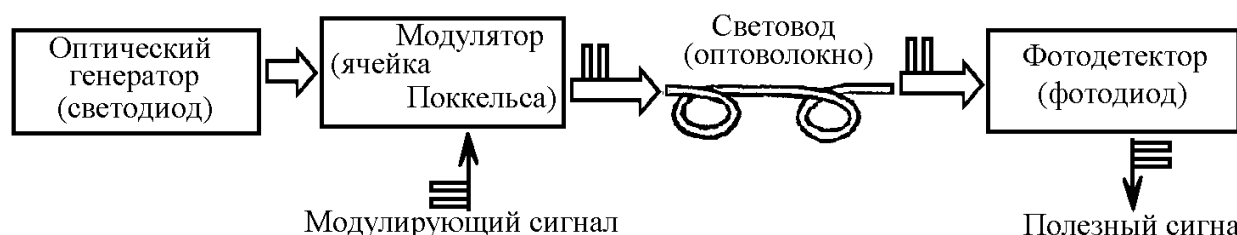
Получаем:

$$I_{\Phi} = I \cdot \eta_B \cdot \eta \cdot (1 - R) \cdot \delta_{\text{мод}} \cdot e^{-0,23 \cdot \beta};$$

$$I_{\Phi} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 0,92 \cdot (1 - 0,18) \cdot 0,42 \cdot e^{-0,23 \cdot 5,41} = 5,47 \cdot 10^{-4} = 0,547 \text{ мА}.$$

Максимальная частота модулирующего сигнала не должна быть больше предельной частоты работы каждого из четырех определяющих элементов ВОЛС.

Значения параметров определяющих элементов занесем в сводную таблицу.



Светодиод	Модулятор	Оптоволокно	Фотодиод
Полупроводник $\text{Al}_{0,0237}\text{Ga}_{0,9763}\text{As}$	Размеры $a \times b \times l = 0,5 \times 0,5 \times 15 \text{ мм}$	Длина $L = 2,01 \text{ км}$	Толщина $d = 1 \text{ мкм}$
Длина волны $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$	Полуволновое напряжение $U_{\lambda/2} = 142 \text{ В}$	Окно прозрачности № 1	Ширина запрещ. зоны $E_g^{\text{фото}} = 1,46 \text{ эВ}$
Полоса излучения $\Delta\lambda = 22,6 \text{ нм}$			Коэффициент отражения $R = 0,18$

Внешняя квантовая эффективность $\eta_{\text{в}}=0,6$	КПД $\delta_{\text{мод}}=0,42$	Затухание $\beta=5,41$ Дб	Квантовый выход фотоэффекта $\eta=0,92$
Сила тока $I=10$ мА			
Вых.мощность $P_{\text{изл}}=8,78$ мВт	Входная мощность $P_{\text{вх}}^{\text{мод}}=8,78$ мВт		
	Вых.мощность $P_{\text{вых}}^{\text{мод}}=3,69$ мВт	Входная мощность $P_{\text{вх}}^{\text{вол}}=3,69$ мВт	
		Вых.мощность $P_{\text{вых}}^{\text{вол}}=1,06$ мВт	Входная мощность $P_{\text{вх}}^{\text{фото}}=1,06$ мВт
			Фототок $I_{\text{ф}} = 0,547$ мА
Пред частота модулир. сигнала $f_{\text{max}} = 53$ МГц	Пред частота работы $f_{\text{max}} = 368$ МГц	Пред частота работы $f_{\text{max}} = 368$ МГц	Пред частота работы $f_{\text{max}} = 82,4$ МГц
Предельная частота модулирующего сигнала линии $f_{\text{max}} = 53$ МГц			

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание к этапу 4.1. Светоизлучающий диод (СИД)

1 Для изготовления СИД использовалось тройное соединение одного из составов: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (состав 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (состав 2) и $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb}$ (состав 3), у которых ширина запрещенной зоны определяется в соответствии с соотношением (5). Номер состава указан в таблице исходных данных. СИД используется для работы в ВОЛС с кварцевым оптоволоконном в окне прозрачности (см. рис. 3) номер которого указан в таблице исходных данных. Внешняя квантовая эффективность СИД равна $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Определить неизвестную атомную долю элемента в тройном соединении и записать его формулу.
- Рассчитать длину волны электролюминесценции. Определить полуширину спектральной полосы излучения в единицах длины волны, если полуширину полосы излучения в энергетических единицах принять $2kT / \sqrt{N}$, где N – номер варианта.
- Укажите внешнюю квантовую эффективность СИД.
- Определить предельную частоту работы светодиода при внутреннем способе модуляции излучения, если время жизни электронов материала светодиода $\sqrt[3]{N} \cdot 10^{-9}$ с.

2 Для изготовления СИД использовалось тройное соединение одного из составов: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (состав 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (состав 2) и $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb}$ (состав 3), у которых ширина запрещенной зоны определяется в соответствии с соотношением (5). Номер состава указан в таблице исходных данных. СИД используется для работы в ВОЛС с кварцевым оптоволоконном в окне прозрачности (см. рис. 3) номер которого указан в таблице исходных данных. Внешняя квантовая эффективность СИД равна $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Определить неизвестную атомную долю элемента в тройном соединении и записать его формулу.
- Рассчитать частоту максимума излучения? Определить полуширину спектра излучения в единицах частоты, если полуширину полосы излучения в энергетических единицах принять $2kT / \sqrt{N}$, где N – номер варианта.

- Укажите внешнюю квантовую эффективность СИД.
- Определить предельную частоту работы светодиода при внутреннем способе модуляции излучения, если время жизни электронов материала светодиода $\sqrt[3]{N} \cdot 10^{-9}$ с.

3 Для изготовления СИД использовалось тройное соединение одного из составов: $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ (состав 1), $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ (состав 2) и $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{Sb}$ (состав 3), у которых ширина запрещенной зоны определяется в соответствии с соотношением (5). Номер состава указан в таблице исходных данных. СИД используется для работы в ВОЛС с кварцевым оптоволокном в окне прозрачности (см. рис. 3) номер которого указан в таблице исходных данных. Внешняя квантовая эффективность СИД равна $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Определить неизвестную атомную долю элемента в тройном соединении и записать его формулу.
- Указать энергию максимума излучения. Определить полуширину спектральной полосы излучения в единицах длины волны, если полуширину полосы излучения в энергетических единицах принять $2kT / \sqrt{N}$, где N – номер варианта.
- Укажите внешнюю квантовую эффективность СИД.
- Определить предельную частоту работы светодиода при внутреннем способе модуляции излучения, если время жизни электронов материала светодиода $\sqrt[3]{N} \cdot 10^{-9}$ с.

Задание к этапу 4.2. Модулятор

1 Свет, излучаемый рассчитанным на этапе 4.1 СИД, модулируется подачей полуволнового напряжения на ячейку Погкельса, фактор качества которой равен $10^{-9} / \sqrt[3]{N}$ м/В. Коэффициент пропускания материала ячейки равен 0,95.

- Определить полуволновое напряжение для данной ячейки Погкельса с поперечными размерами 0,15×0,15 мм и длиной 10 мм.
- Рассчитать разность показателей преломления двух составляющих проходящего света: поляризованной вдоль внешнего электрического поля и

поперек него.

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

- Рассчитать КПД ячейки.

2 Свет, излучаемый рассчитанным на этапе 4.1 СИД, модулируется подачей полуволнового напряжения на ячейку Поккельса, фактор качества которой равен $10^{-9} / \sqrt[3]{N}$ м/В. Коэффициент пропускания материала ячейки равен 0,9.

- Рассчитать быть длина ячейки Поккельса, чтобы при поперечных размерах $0,2 \times 0,2$ мм полуволновое напряжение равнялось в вольтах $15 \sqrt{N}$, где N – номер варианта.

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

- Рассчитать оптическую разность хода двух составляющих проходящего света: поляризованной вдоль внешнего электрического поля и поперек него.

- Рассчитать КПД ячейки.

3 Свет, излучаемый рассчитанным на этапе 4.1 СИД, модулируется подачей полуволнового напряжения на ячейку Поккельса, фактор качества которой равен $10^{-9} / \sqrt[3]{N}$ м/В. Коэффициент пропускания материала ячейки равен 0,85.

- Рассчитать поперечные размеры ячейки Поккельса при длине 15 мм, чтобы полуволновое напряжение равнялось вольтах $14 \sqrt{N}$, где N – номер варианта.

- Определить максимальную длину ячейки при максимально возможной частоте модулирующего сигнала 0,5 ГГц, если электрооптический коэффициент Поккельса материала ячейки принять равным $\sqrt{N} \cdot 10^{-11}$ м/В, где N – номер варианта. Если максимальная длина ячейки окажется меньше 15 мм, тогда необходимо определить максимально возможную частоту модулирующего сигнала при заданной длине 15 мм.

- Рассчитать разность фаз двух составляющих проходящего света: поляризованной вдоль внешнего электрического поля и поперек него.
- Рассчитать КПД ячейки.

Задание к этапу 4.3. Световод

1 Свет, излучаемый рассчитанным на этапе 4.1 СИД, после модуляции полезным сигналом с параметрами, найденными на этапе 4.2, распространяется по кварцевому одномодовому световоду. Номер окна прозрачности (см. рис. 3) указан в таблице вариантов заданий. Дисперсия в оптоволокне зависит от длины волны λ света в соответствии с соотношением $10^{-14} / \lambda^3 \text{ м}^{-1}$. Длина оптоволокну $(4,5 - \sqrt[3]{N}) \text{ км}$, где N – номер варианта.

- Определить предельную наибольшую частоту следования импульсов в оптоволокне.
- Рассчитать затухание в оптоволокне полученной длины, а также во сколько раз уменьшится мощность светового излучения в результате потерь в нем.

Технологическими потерями пренебречь.

2 Свет, излучаемый рассчитанным на этапе 4.1 СИД, после модуляции полезным сигналом с параметрами, найденными на этапе 4.2, распространяется по кварцевому одномодовому световоду. Номер окна прозрачности (см. рис. 3) указан в таблице вариантов заданий. Дисперсия в оптоволокне зависит от длины волны λ света в соответствии с соотношением $10^{-14} / \lambda^3 \text{ м}^{-1}$.

- Рассчитать максимальную длину световода, при которой мощность светового сигнала на выходе из него уменьшится в $2\sqrt[3]{N}$ раз, где N – номер варианта.
- Определить какова может быть предельная наибольшая частота следования импульсов в нём при такой длине.
- Рассчитать затухание в оптоволокне полученной длины.

Технологическими потерями пренебречь.

3 Свет, излучаемый рассчитанным на этапе 4.1 СИД, после модуляции полезным сигналом с параметрами, найденными на этапе 4.2, распространяется по кварцевому одномодовому световоду. Номер окна прозрачности (см. рис. 3) указан в таблице вариантов заданий. Дисперсия в оптоволокне зависит от

длины волны λ света в соответствии с соотношением $10^{-14}/\lambda^3 \text{ м}^{-1}$.

- Рассчитать максимальную длину световода, если предельная наибольшая частота следования импульсов в нем должна быть не меньше $2\sqrt[3]{N^2} \cdot 10^8$ Гц, где N – номер варианта.

- Определить затухание в оптоволокне полученной длины, а также во сколько раз уменьшится мощность светового излучения в результате потерь в нем.

Технологическими потерями пренебречь.

Задание к этапу 4.4. Фотодиод

1 Свет, излучается рассчитанным на этапе 4.1 СИД, после модуляции полезным сигналом с параметрами, найденными на этапе 4.2, проходит кварцевый световод в соответствии с этапом 4.3, а затем освещает тонкую область фотодиода площадью $\sqrt[3]{N}$ мм² и толщиной $\sqrt[3]{N}$ мкм, где N – номер варианта. Плотность тока насыщения р-п-перехода $\sqrt[3]{N}$ А/м² при подвижности носителей заряда в нем $0,01 \cdot \sqrt{N}$ м²/(В·с). Коэффициент отражения света от поверхности базы – 0,11. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта – $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Вычислить максимальную ширину запрещенной зоны полупроводника пригодного для изготовления фотоприемника данного излучения.

- Определить какой силы ток должен протекать по СИД, чтобы генерировать излучение такой интенсивности, которой с учетом потерь в модуляторе и оптоволокне хватило бы для создания фототока в 300 раз больше темнового тока. Для этого рассчитать величину фототока в фотодиоде и получить значение мощности излучения подводимого из оптоволокна к фотодиоду. По затуханию в световоде из этапа 4.3 вычислить соответствующую мощность излучения на входе оптоволокна. По КПД ячейки Поккельса из этапа 4.2 рассчитать мощность излучения на входе ячейки. По этой мощности и значению внешней квантовой эффективности СИД из этапа 4.1 рассчитать необходимую силу тока СИД.

- Определить максимальную предельную частоту работы фотодиода.

Технологическими потерями пренебречь.

2 Свет, излучается рассчитанным на этапе 4.1 СИД, после модуляции полезным сигналом с параметрами, найденными на этапе 4.2, проходит кварцевый световод в соответствии с этапом 4.3, а затем освещает тонкую область фотодиода площадью $\sqrt[3]{N}$ мм² и толщиной $\sqrt[3]{N}$ мкм, где N – номер варианта. Плотность тока насыщения р-п-перехода $\sqrt[3]{N}$ А/м² при подвижности носителей заряда в нем $0,01 \cdot \sqrt{N}$ м²/(В×с). Коэффициент отражения света от поверхности базы – 0,12. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта – $(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Вычислить минимальную ширину запрещённой зоны полупроводника, пригодного для изготовления фотодиодов для приема данного излучения.
- Определить какой силы ток должен протекать по СИД, чтобы генерировать излучение такой интенсивности, которой с учетом потерь в модуляторе и оптоволокну хватило бы для создания фототока в 200 раз больше темнового тока. Для этого рассчитать величину фототока в фотодиоде и получить значение мощности излучения подводимого из оптоволокну к фотодиоду. По затуханию в световоде из этапа 4.3 вычислить соответствующую мощность излучения на входе оптоволокну. По КПД ячейки Поккельса из этапа 4.2 рассчитать мощность излучения на входе ячейки. По этой мощности и значению внешней квантовой эффективности СИД из этапа 4.1 рассчитать необходимую силу тока СИД.

- Определим максимальную предельную частоту работы фотодиода.

Технологическими потерями пренебречь.

3 Свет, излучается рассчитанным на этапе 4.1 СИД, после модуляции полезным сигналом с параметрами, найденными на этапе 4.2, проходит кварцевый световод в соответствии с этапом 4.3, а затем освещает тонкую область фотодиода площадью $\sqrt[3]{N}$ мм² и толщиной $\sqrt[3]{N}$ мкм, где N – номер варианта. Плотность тока насыщения р-п-перехода $\sqrt[3]{N}$ А/м² при подвижности носителей заряда в нем $0,01 \cdot \sqrt{N}$ м²/(В×с). Коэффициент отражения света от поверхности базы – 0,13. Квантовый выход внутреннего фотоэффекта –

$(1 - 0,1\sqrt[3]{N})$.

- Указать интервал значений ширины запрещённой зоны полупроводников, пригодных для изготовления фотодиодов для приема данного излучения.
- Определить какой силы ток должен протекать по СИД, чтобы генерировать излучение такой интенсивности, которой с учетом потерь в модуляторе и оптоволокне хватило бы для создания фототока в 100 раз больше темнового тока. Для этого рассчитать величину фототока в фотодиоде и получить значение мощности излучения подводимого из оптоволокна к фотодиоду. По затуханию в световоде из этапа 4.3 вычислить соответствующую мощность излучения на входе оптоволокна. По КПД ячейки Поккельса из этапа 4.2 рассчитать мощность излучения на входе ячейки. По этой мощности и значению внешней квантовой эффективности СИД из этапа 4.1 рассчитать необходимую силу тока СИД.
- Определим максимальную предельную частоту работы фотодиода. Технологическими потерями пренебречь.

Задание к этапу 4.5. Согласование элементов ВОЛС

Начертить структурную схему рассчитываемой ВОЛС.

- Проверить соответствие длины волны излучения светодиода полуволновому напряжению модулятора, окну прозрачности оптоволокна и ширине запрещенной зоны фотодетектора.
 - Проверить, достаточно ли силы тока, протекающего по СИД, чтобы генерировать излучение такой интенсивности, которой с учетом потерь в модуляторе и оптоволокне хватило бы для создания фототока указанной в задании к этапу 4.4 величины. Для этого необходимо проверить расчеты мощности излучения на всех этапах прохождения сигнала (см. примеры) без учета технологических потерь.
- Указать максимальную частоту модулирующего сигнала, которая не должна быть больше предельной частоты работы каждого из четырех определяющих элементов ВОЛС.

Заполнить сводную таблицу результатов с указанием значений параметров определяющих элементов ВОЛС.

Таблиця 1 Початкові дані за варіантами

№ варіанта	Склад	№ вікна прозорості	Номери завдань за етапами			
			4.1	4.2	4.3	4.4
1	1	1	1	2	3	1
2	2	2	2	3	1	2
3	3	3	3	1	2	3
4	1	4	1	2	3	1
5	2	1	2	3	1	2
6	3	2	3	1	2	3
7	1	3	1	2	3	1
8	2	4	2	3	1	2
9	3	1	3	1	2	3
10	1	2	1	2	3	1
11	2	3	2	3	1	2
12	3	4	3	1	2	3
13	1	1	1	2	3	1
14	2	2	2	3	1	2
15	3	3	3	1	2	3
16	1	4	1	2	3	1
17	2	1	2	3	1	2
18	3	2	3	1	2	3
19	1	3	1	2	3	1
20	2	4	2	3	1	2
21	3	1	3	1	2	3
22	1	2	1	2	3	1
23	2	3	2	3	1	2
24	3	4	3	1	2	3
25	1	1	1	2	3	1
26	2	2	2	3	1	2
27	3	3	3	1	2	3
28	1	4	1	2	3	1
29	2	1	2	3	1	2
30	3	2	3	1	2	3

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 4 “Фізика оптичного зв’язку”	3
Методичні вказівки	4
Умовні позначення	6
Основні поняття й формули	7
Приклади розрахункової частини	17
Індивідуальні завдання по етапах	29
Методические указания	37
Условные обозначения	39
Основные понятия и формулы	40
Примеры расчетной части	50
Индивидуальные задания по этапам	62
Таблиця 1 Початкові дані за варіантами	69
Список рекомендованої літератури.....	70

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ВИДАННЯ

ФІЗИКА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Методичні вказівки та завдання для курсової роботи до модуля № 4 з фізики

Укладачі: доц. *Горбачов В.Е.*, доц. *Коробіцин Б.В.*, *Криськів С.К.*

Редактор

Кодрул Л. А.

Комп'ютерне верстання

Корнійчук Є. С.