

Б.Л. 1.383 (075)

С-30

М.М. Семеренко, Є.О. Смольков

## **ПРАКТИКУМ З ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ**

3489 77  
Міністерство освіти і науки України  
Вінницький державний технічний університет

М.М. Семеренко, Є.О.Смольков

## ПРАКТИКУМ З ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

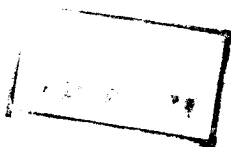
НТБ ВНТУ



3489-41

621.383(075) С 30 2003

Семеренко М.М. Практикум з оптоелектронік



Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як практикум для студентів електронних спеціальностей всіх форм навчання. Протокол №7 від 6.03.2003р.

Вінниця ВДТУ 2003

**Рецензенти:**

*В.П. Кожем'яко*, доктор технічних наук, професор

*П.М. Зузяк*, доктор фізико-математичних наук, професор

*Г.І. Гаврилюк*, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Семеренко М.М., Смольков Є.О.**

С 30 **Практикум з оптоелектроніки.**

Практикум. - Вінниця: ВДТУ, 2003.-118с.

В практикумі розглянуті основи аналізу і дослідження сучасних оптоелектронних приладів в лабораторних роботах та характерних практичних задачах. Посібник розроблений у відповідності з планом кафедри та програми до дисципліни "Оптоелектроніка".

Розрахований на студентів електронних спеціальностей всіх форм навчання.



## ЗМІСТ

Передмова.....	4
Перелік основних позначень.....	5
ВСТУП.....	9
1. ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ.....	10
1.1. Загальні поняття.....	10
1.2. Взаємодія світла з речовиною.....	12
1.3. Завдання, контрольні питання та задачі.....	17
2. ОПТИЧНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ.....	28
2.1. Загальні поняття.....	28
2.2. Світлодіоди.....	30
2.3. Лазери.....	38
2.4. Завдання, контрольні питання та задачі.....	44
3. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ФОТОПРИЙМАЧІ.....	54
3.1. Загальні поняття.....	54
3.2. Фоторезистори.....	59
3.3. Фотодіоди.....	66
3.4. Фототранзистори.....	76
3.5. Фототиристори.....	80
3.6. Завдання, контрольні питання та задачі.....	82
4. ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ.....	96
4.1. Оптичари.....	96
4.2. Використання ОЕП.....	105
4.3. Завдання, контрольні питання та задачі.....	106
ПІСЛЯМОВА.....	110
ЛІТЕРАТУРА.....	111
ДОДАТКИ.....	113

## ПЕРЕДМОВА

Сучасна оптоелектроніка займає одне з чільних місць серед інших технічних напрямків, які забезпечують технологічний прогрес. Тому набуття та поглиблення практичних навичок в дослідженні основних параметрів і характеристик різних оптоелектронних приладів, які є основними задачами, що стоять перед студентами при вивченні дисципліни, значно підвищує якість підготовки фахівців з виробництва та застосування виробів електронної техніки.

Навчальний посібник написаний у відповідності до програми курсу "Оптоелектроніка" для спеціальностей "Мікроелектроніка та напівпровідникові прилади" та "Електронні прилади і пристрої" і може бути корисним для студентів всіх електронних спеціальностей.

Курс "Оптоелектроніка" призначений для поглиблення знань, отриманих студентами при вивченні дисциплін "Фізика", "Фізика твердого тіла", "Метрологія" і "Твердотіла електроніка", які є основою для успішного вивчення даної дисципліни.

Поданий матеріал викладений у чотирьох главах. Його структура достатньо повно характеризується змістом.

Для самостійної роботи студентам додатково можна використовувати наведену в посібнику довідникову літературу, яка допоможе в поглибленні знань з практичних досліджень оптоелектронних приладів. Крім того, відомості про сучасні досягнення в області практичної оптоелектроніки завжди можна отримати на сайтах мережі Internet.

## Перелік основних позначень

- A - амплітуда електромагнітної хвилі, точка, апертура;  
a - число;
- B - амплітуда електромагнітної хвилі, точка,  
ослаблення оптичного сигналу;
- $A_{(0)}$ ,  $B_{(0)}$  - амплітуда електромагнітної хвилі;  
B - магнітна індукція;  
C - константа;
- $C_{д}$ ,  $C_{бар}$ ,  $C_{диф}$  - ємності діода: сумарна, бар'єрна, дифузійна;  
c - швидкість світла у вакуумі;  
d - товщина;  
D - індукція електричного поля;  
D - розмір випромінювальної апертури;
- $D_n$ ,  $D_p$  - коефіцієнти дифузії електронів, дірок;  
e - заряд електрона, основа натурального логарифму;  
E - енергія, освітленість;  
E' - енергія електрона в зоні провідності до рекомбінації;
- $E^*$ ,  $E_n$ ,  $E_f$ ,  $\Delta E$  - енергія: активації, накачки, фотона,  
що виділяється в процесі рекомбінації;
- $E_0$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  - енергія рівня: основного, метастабільного, смуги поглинання;
- $E_c$ ,  $E_v$ ,  $E_g$  - енергетичний рівень: дна зони провідності, дозволений,  
вершина валентної зони;  
 $E_g$  - ширина забороненої зони;
- $E_{(0)}$  - амплітуда електричного поля хвилі;
- E,  $E_0$  - напруженість електричного поля, амплітуда напруженості  
електричного поля;
- F(k) - залежність амплітуди від хвильового числа;
- $\hat{H}$  - гамільтоніан;
- H,  $H_0$  - напруженість магнітного поля, амплітуда напруженості  
магнітного поля;
- H - світлова експозиція;
- $h$ ,  $\hbar$  - стала Планка;
- $G_0$  - кількість генерованих електронно-діркових пар;
- $G_n^0$  - інтенсивність рівноважної генерації;  
g - об'ємна швидкість генерації носіїв, коефіцієнт збирання носіїв;  
i - струм;
- $i_n$ ,  $i_p$  - електронна та діркова складові струму;
- $i_s$ ,  $i_t$  ( $I_t$ ),  $i_f$  ( $I_f$ ) - повний струм насичення, струм темновий, фотострум;
- $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_z$  - орти;
- I,  $I_c$  - струм, інтенсивність випромінювання;
- $I_R$  - інтенсивність відбитого світла;
- $I_D$ ,  $I_{пр}$  - струм діода (накачки), прямиий струм;

- $I_0$  - тепловий струм, енергетична сила точкового джерела випромінювання;  
 $I_n$  - інтенсивність люмінесценції;  
 $j$  - густина струму, уявна одиниця;  
 $j_s, j_f$  - густина повного струму насичення, фотоструму;  
 $K$  - коефіцієнт світловіддачі, функція спектральної чутливості;  
 $K_{фз}$  - коефіцієнт фотоелектричного зв'язку;  
 $k$  - хвильове число у вакуумі, стала Больцмана;  
 $a_c$  - хвильове число у середовищі;  
 $k_n, k_{в}, k_z$  - хвильові числа у середовищах падаючої, відбитої і заломленої хвиль;  
 $k_0$  - змінна;  
 $\mathbf{k}$  - вектор, хвильовий вектор;  
 $L$  - яскравість, довжина;  
 $L_n, L_p$  - дифузійна довжина електронів, дірок;  
 $l$  - довжина, відстань;  
 $l_\phi$  - середня довжина вільного пробігу фотона в поглинальному середовищі;  
 $l$  - вектор, промінь;  
 $m$  - маса, маса електрона, порядок інтерференції, номер моди, число, поправковий коефіцієнт;  
 $m^*$  - ефективна маса вільних носіїв заряду;  
 $M$  - світимість, коефіцієнт лавинного помноження;  
 $N$  - поглинальний центр;  
 $N_\phi$  - кількість фотонів, які проникають в напівпровідник;  
 $N_e$  - кількість розділених полем  $p$ - $n$  переходу носіїв заряду;  
 $N_{e,кв}, N_{inf,кв}$  - кількість квантів емітованих, генерованих;  
 $n$  - показник заломлення середовища, нормаль, число;  
 $n, p$  - концентрації нерівноважних носіїв заряду;  
 $n_i$  - власна концентрація носіїв заряду;  
 $n_0, p_0$  - концентрації рівноважних носіїв заряду;  
 $\Delta n, \Delta p$  - концентрації надлишкових носіїв заряду;  
 $n_p, p_n^0$  - концентрації електронів в  $p$ -області, дірок в  $n$ -області;  
 $n^0$  - концентрація збуджених електронів в початковий момент часу;  
 $\Delta n(0)$  - надлишкова концентрація електронів в початковий момент часу;  
 $P$  - потужність;  
 $P_{вип.}$  - потужність вихідного випромінювання;  
 $P_{ген}$  - потужність випромінювання, яке генерується в середині кристалу;  
 $P_r$  - імовірність рекомбінації;  
 $P_{гб}, P_{гв}$  - імовірності рекомбінаційних переходів безвипромінювальних, випромінювальних;  
 $P_{гб0}$  - коефіцієнт рекомбінації, що не залежить від температури;

- $p, p', Q$  - квазіімпульс електрона в зоні провідності після рекомбінації, до рекомбінації, переданий електроном кристалічній ґратці;  
 $Q$  - добротність, коефіцієнт збирання носіїв;  
 $q$  - заряд;  
 $r$  - радіус, циліндрична координата;  
 $\mathbf{r}$  - радіус-вектор;  
 $R$  - швидкість (інтенсивність) рекомбінації, коефіцієнт відбиття, опір;  
 $R_\lambda$  - коефіцієнт відбиття на довжині хвилі  $\lambda$ ;  
 $R_0$  - швидкість рекомбінації електронно-діркових пар;  
 $R_B^0$  - густина енергії рівноважного випромінювання, інтенсивність процесу випромінювальної рекомбінації;  
 $R_\Pi^0$  - кількість квантів, що поглинаються в одиниці об'єму за одиницю часу;  
 $\Delta R$  - зміна швидкості рекомбінації;  
 $S$  - площа, поверхня, чутливість;  
 $S_E$  - ефективна швидкість емісії дірок;  
 $U, u$  - напруга, число;  
 $u_{\text{вен}}$  - вентилярна фото-ЕРС;  
 $T$  - період електромагнітної хвилі, коефіцієнт пропускання, температура;  
 $t$  - час, час життя електрона на збудженому рівні центра;  
 $t_n, t_p$  - час дрейфу носіїв заряду;  
 $v, v_r$  - швидкість, групова швидкість;  
 $\alpha$  - кут, коефіцієнт поглинання;  
 $\beta$  - квантовий вихід фотоіонізації, коефіцієнт підсилення струму;  
 $\gamma_r$  - коефіцієнт рекомбінації;  
 $\gamma_{\text{гб}}, \gamma_{\text{гв}}$  - коефіцієнт рекомбінації безвипромінювальної, випромінювальної;  
 $\gamma$  - згасання електромагнітних хвиль, частка непрорекомбінованих пар носіїв заряду, що прийшли до  $p$ - $n$  переходу;  
 $\gamma_k$  - коефіцієнт інжекції  $p$ - $n$  переходу;  
 $\Delta$  - оптична довжина шляху хвилі, різниця ходу променів;  
 $\Delta_r$  - геометрична відстань, яку проходить хвиля в середовищі;  
 $\epsilon_0$  - діелектрична стала (проникність вакууму);  
 $\epsilon$  - діелектрична проникність середовища;  
 $\epsilon_r$  - відносна діелектрична проникність;  
 $\epsilon(x, y, z)$  - діелектрична проникність середовища в точці  $(x, y, z)$ ;  
 $\eta$  - ефективність, квантовий вихід люмінесценції, ККД, змінна;  
 $\eta_{\text{вн}}, \eta_{\text{зовн}}, \eta_d$  - квантова ефективність внутрішня, зовнішня, диференціальна;  
 $\eta_{\text{опт}}$  - оптична ефективність;  
 $\theta, \theta_k$  - кут, критичний кут;  
 $\theta_n, \theta_n, \theta_z$  - кут хвилі падаючої, відбитої, заломленої;



$\lambda, \lambda_c$  - довжина електромагнітної хвилі в вакуумі, в середовищі;  
 $\lambda_0, \lambda_m$  - довжина електромагнітної хвилі резонансна, моди;  
 $\Delta\lambda$  - діапазон довжин хвиль;  
 $\mu_0$  - магнітна стала (проникність вакууму);  
 $\mu$  - магнітна проникність середовища;  
 $\mu_r$  - відносна магнітна проникність середовища;  
 $\mu(x, y, z)$  - магнітна проникність середовища в точці  $(x, y, z)$ ;  
 $\mu_n, \mu_p$  - рухомість носіїв заряду;  
 $\tau$  - постійна часу, час життя, частотний коефіцієнт;  
 $\tau_n, \tau_p$  - час життя носіїв заряду;  
 $\tau_{\text{мит}}$  - час життя миттєвий;  
 $\tau_\mu$  - діелектричний, або максвеллівський, час релаксації,  
 $\tau_b, \tau_b'$  - час життя неосновних носіїв, зумовлені випромінювальними  
 чи безвипромінювальними переходами;  
 $\tau_{\text{тв}}, \tau_{\text{тв}}'$  - час життя рекомбінації: випромінювальної,  
 безвипромінювальної;  
 $\tau_{\text{нг}}, \tau_{\text{рг}}$  - час життя нерівноважних носіїв заряду при міжзонній  
 випромінювальній рекомбінації;  
 $\varphi_t$  - температурний потенціал;  
 $\varphi_{\text{хх}}$  - величина напруги холостого ходу або фото-ЕРС;  
 $\varphi_k$  - контактна різниця потенціалів;  
 $\nu$  - частота коливань (лінійна), частота випромінювання;  
 $\rho$  - густина просторового заряду;  
 $\rho_0$  - густина об'ємного заряду в початковий момент часу;  
 $\delta$  - різниця фаз, товщина області, похибка;  
 $\sigma$  - питома провідність, провідність;  
 $\sigma_0$  - власна провідність;  
 $\sigma_t, \sigma_b, \sigma_{\text{фст}}$  - темнова провідність, фото- і стаціонарна фотопровідності;  
 $f, F$  - частота, функція;  
 $\Phi$  - світловий потік;  
 $\psi$  - власна хвильова функція;  
 $\omega$  - частота коливань (циклічна);  
 $\omega_0, \omega_m$  - резонансна частота, частота моди;  
 $\Delta\omega$  - частотний інтервал;  
 $\Omega$  - тілесний кут;  
 $\omega t, \mathbf{kr}, \varphi$  - фаза хвилі;  
 $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$  - одиничні вектори;  
 $x$  - товщина шару;  
 $\xi_\omega$  - уявна частина показника заломлення середовища;  
 $\zeta$  - змінна;  
 $w$  - ширина затвора.

## ВСТУП

Оптоелектроніка відноситься до однієї з підгалузей функціональної електроніки. Значний розвиток оптоелектроніки спричинився через недостатню завадостійкість власно електронних схем, їх порівняльно великі масогабаритні параметри і труднощі подальшої мікромініатюризації, порівняльно невисокі рівні передачі інформації та об'єми пам'яті суто електронних пристроїв пам'яті.

Сучасні оптоелектронні прилади (ОЕП) будуються на основі використання електрофізичних явищ у твердих тілах [1-4], виготовляються як в дискретному, так і в інтегральному виконанні. Тому знання методів дослідження їх оптичних і електричних параметрів та характеристик відіграє значну роль у підвищенні ефективності їх розробки і застосуванні.

До ОЕП відносять такі прилади, в яких основні електрофізичні процеси протікають за участю електричних і оптичних носіїв заряду. Тому метою даного посібника є практичне вивчення фізичних процесів взаємодії світла з речовиною в ОЕП, що є основою об'єднання оптичної та електронної частин.

Відповідно до цього, ОЕП технічно найчастіше реалізуються на конструктивно-технологічних засадах сучасної мікроелектроніки.

Основними задачами при практичному засвоєнні правил і методів дослідження ОЕП, є придбання студентами навичок в аналізі процесів в оптоелектронних структурах, методах та схемах визначення їх параметрів та застосування їх на практиці при дослідженні, проектуванні та у виробництві ОЕП.

Посібник призначений для полегшення практичного засвоєння студентами курсу "Оптоелектроніка", відповідно до типів і особливостей ОЕП.

В першій главі розглянуті питання взаємодії світла з речовиною, які далі, достатньо повно для даного курсу, представлені в контрольних питаннях та задачах. В другій главі розглянуті методики визначення і дослідження світлогенеруючих ОЕП як в теоретичному плані, так і в лабораторних роботах та контрольних питаннях. В третій главі, за тими ж принципами розглянуті прості фотоприймальні прилади. В четвертій главі наведені методи дослідження деяких більш складних ОЕП.

Даний посібник є практичним продовженням навчального посібника "Оптоелектроніка" [1], з яким доцільно попередньо ознайомитися при практичному вивченні методів дослідження ОЕП.

# 1 ОПТОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

## 1.1 Загальні поняття

В оптоелектроніці використовують різні типи оптичних та оптоелектронних приладів для створення оптичного випромінювання і його інформаційного застосування. Ці прилади забезпечують процеси генерації оптичного випромінювання, його перетворення в середовищах з керованими оптичними і електричними властивостями, розповсюдження оптичних сигналів в різних середовищах і схемах [1-5].

Загальну типову схему оптичної системи створення, передачі і обробки інформації, на основі якої побудована структура даного посібника, можна представити у вигляді (рис.1.1).

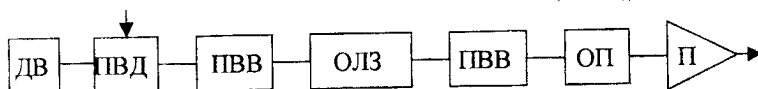


Рисунок 1.1

де ДВ - джерело випромінювання, ПВД - пристрій введення даних, ПВВ - пристрій введення-виведення випромінювання в оптичну лінію зв'язку (ОЛЗ), ОП - оптичний приймач, П - підсилювач електричного сигналу.

Дані, що вводяться в оптичну систему, кодується за допомогою задаючого пристрою, який може модулювати початковий світловий потік.

Промодульований світловий потік вводиться в лінію передачі (ОЛЗ) за допомогою пристрою введення оптичної інформації.

Оптичний сигнал після передачі по ОЛЗ поступає на оптичний фотоприймач.

Після оптоелектронного перетворення потужність сигналу стає значно меншою в порівнянні з початковим значенням. Послаблення сигналу виникає внаслідок втрат на з'єднаннях, поглинання, розсіювання, випромінювання, дисперсії і перетворення мод.

Тому після перетворення на фотоприймачі, сигнал обов'язково необхідно підсилювати.

Оптоелектронні системи характеризуються як електронними, так і оптичними параметрами і характеристиками.

Для загальної характеристики оптичної частини розглянутої оптоелектронної системи прийнято використовувати певні основні параметри [1-4, 6-8].

1. Апертура або діючий отвір (зіниця) оптичної системи.

Вона визначається половиною максимального кута конічного світлового пучка, який перетворюється в оптичній системі за  $F$  алгоритмом.

При попаданні випромінювання в отвір, його перетворення визначається узагальненою апаратною функцією  $F$ .

Оптична система має вхідну і вихідну апертури, які в загальному випадку неоднакові.

Кількісно апертура характеризується лінійними розмірами зіниці (для круглої зіниці це її діаметр  $D$ ); кутовою апертурою  $A$ , що визначається половиною максимального кута конічного світлового пучка, який перетворюється в системі за  $F$  алгоритмом; числовою апертурою  $NA$ , яка залежить від показника заломлення  $n$ ,  $NA = n \sin \alpha$ .

Оптична система виконує задані функції лише в межах своєї апертури і поняття апертури для оптичних приладів аналогічне поняттю динамічного діапазону радіотехнічних пристроїв.

## 2. Коефіцієнт (показник) перетворення.

Він може бути постійним або змінним. Оптичні системи, які розглядаються в оптоелектроніці, звичайно лінійні, тому більшість перетворень, які вони виконують, характеризуються постійними коефіцієнтами.

Звичайно, система служить для лінійного або кутового збільшення або зменшення розмірів елемента в просторах зображень і предметів, відповідно.

Лінійна зміна може бути різною при поперечному і повздовжньому (відносно направлення світлового пучка) розташуванні елемента.

## 3. Затухання сигналу.

При проходженні світла через оптичну систему воно втрачає енергію за рахунок відбиття від границь розділу різних середовищ, границь оптичного каналу, його неоднорідностей, поглинання в оптичних (прозорих) матеріалах, розсіювання на поверхні оптичних елементів і в середині них, а також поглинання в атомах речовини.

Розсіювання світла і відхилення ходу променів від розрахункового напрямку призводять до їх поглинання, тому всі механізми втрат можна звести до відбиття і поглинання.

## 4. Порогові характеристики.

Кожна оптична система має свої граничні параметри, які її характеризують. Це граничні значення дозволених до перетворення параметрів світлового потоку, які характеризують оптичну систему.

## 5. Вибірковість.

В оптичних системах можна перетворювати оптичний потік з різними показниками для різних діапазонів частот. Тому кожна оптична система повинна не тільки проводити відповідні перетворення певного світлового сигналу, але й подавляти всі інші сигнали, які виходять за межі дозволених параметрів.

## 6. Спотворення сигналу.

Більшість оптичних систем використовується для роботи в лінійному режимі, але всі вони (особливо напівпровідникові) мають певну нелінійність. Через це в їх елементах виникають порушення лінійності перетворень. Ці порушення в оптиці називають аберациями.

## 1.2 Взаємодія світла з речовиною

Існують три типи взаємодії між фотонами і електронами в твердому тілі [1-4, 7-13].

Фотон може:

1. Поглинутись в результаті переходу електрона із валентної зони в зону провідності.
2. Стимулювати випромінювання подібного собі фотона, викликаючи перехід електрона із зони провідності у валентну зону.
3. Можуть також виникати спонтанні зворотні переходи електронів із зони провідності на вільні стани у валентній зоні, які викликають випромінювання фотонів.

Енергія фотона дорівнює:

$$E_{\phi} = h\nu = hc/\lambda = 1.23/\lambda \text{ [eV]}, \quad (1.1)$$

де  $h$  - постійна Планка,  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\nu$  - частота, Гц;  $c$  - швидкість світла,  $c = 3 \cdot 10^8$  м·с<sup>-1</sup>;  $\lambda$  - довжина хвилі, мкм.

Енергетичні властивості твердого тіла визначаються зонною діаграмою відповідного матеріалу.

Якщо зона провідності і валентна зона перекриваються (ширина забороненої енергетичної зони  $E_g < 0$ ), то це метал. У діелектриків між зонами провідності і валентною значний проміжок ( $E_g > 4 \dots 5$  eV). Проміжний випадок описує напівпровідники.

Крайні значення  $E_g$  для напівпровідників, які використовуються в оптоелектроніці, складають 0.18 eV для InSb і 3.7 eV для Zn, але найбільш типові 1.45 eV для GaAs і 1.12 eV для Si при температурі  $T = 300$  K.

Ширина забороненої зони дещо зменшується при підвищенні температури.

Зонна структура, яка визначається на певному інтервалі, повторюється до нескінченності. Такий інтервал називається зоною Брілюена.

Повна зонна структура визначається залежністю енергії електрона від його імпульсу  $\rho$  або, що є тим же самим, від хвильового вектора  $\mathbf{k}$ .

Енергетичні діаграми матеріалів оптоелектроніки будуються в кінцевому інтервалі значень хвильової функції. Цей інтервал теж визначається першою зоною Брілюена, яка тотожна другій і всім наступним через періодичність розподілу потенціалу в кристалі [7-11].

При отриманні кванта світла електрони в речовині збуджуються і переходять на більш високі рівні. Зміна енергетичного стану в цьому випадку може проводитися і без зміни просторового положення електрона.

Найбільш поширеними матеріалами в ОЕ є напівпровідники. В цих матеріалах є декілька зон Брілюена, на границях яких відбувається розрив

неперервності генерації. Фізично на границі таких зон потенціальна енергія електронів змінюється стрибкоподібно. Це відбувається в ґратці поблизу місця розташування атомів.

В таких матеріалах, визначивши границі зон Брілюена за трьома координатами, можна визначити замкнуті ізоенергетичні поверхні, де енергія  $E = \text{const}$ .

В оптоелектронних матеріалах міжатомні відстані в кристалах різні за різними кристалографічними напрямками. Тому ізоенергетичні поверхні мають екстремальні максимуми (у валентній зоні) та мінімуми (в зоні провідності).

Квант світла може виділитися в процесі рекомбінації носіїв заряду при переході електрона із збудженого стану в нормальний. Ця можливість, в значній мірі, залежить від часу життя носіїв заряду міжзонної випромінювальної рекомбінації  $r_{rg}$ .

В свою чергу, час життя  $r_{rg}$  залежить від ступеня легування, тобто концентрації носіїв заряду, при постійній температурі.

Така залежність, в приведених до власної концентрації носіїв заряду одиницях, для випадку малого рівня збудження, показана на рис. 1.2.

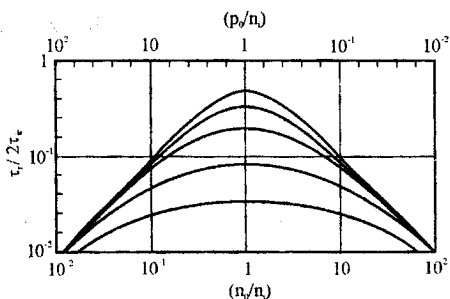


Рисунок 1.2

В максимумах відношення  $\Delta n / \Delta n_i = 0$  для верхньої кривої і для наступних, відповідно, дорівнює 1, 3, 10, 30.

На цьому рисунку логарифмічну шкалу концентрації носіїв заряду можна розглядати так само, як лінійну шкалу положення рівня Фермі, тому що

$$n = N_c e^{-(E_c - F)/kT}, \quad (1.2)$$

де  $N_c$  - ефективна щільність станів в зоні провідності,  $E_c$  - енергетичний рівень дна зони провідності,  $F$  - рівень Фермі,  $k$  - стала Больцмана.

Причому середня точка шкали відповідає значенню рівня Фермі для власного напівпровідника.

З наведених залежностей видно, що із збільшенням рівня збудження, час життя у власному напівпровіднику різко знижується, а в домішковому змінюється порівняно слабо.

Величину густини рівноважного випромінювання  $R_e^0$  можна визначити, використовуючи для цього теорію Ейнштейна для рівноважного випромінювання.

Густина квантових станів для фотонів в інтервалі імпульсів між  $P$  і  $P + dP$  складає:

$$\frac{P^2 dP}{h^3} \quad (1.3)$$

де  $h^3$  - фазовий об'єм.

Щоб визначити кількість комірок, зайнятих фотонами, цю величину треба помножити на функцію розподілу Бозе-Ейнштейна:

$$f_\phi = \frac{1}{e^{hv/kT} - 1} \quad (1.4)$$

Загальне число фотонів з імпульсом  $P$ , що випромінюються в тілесний кут  $d\Omega$ , дорівнює:

$$dn_\phi = \frac{2}{h^3} f_\phi P^2 dP d\Omega, \quad (1.5)$$

де коефіцієнт 2 враховує різну поляризацію світла.

Імпульс фотона зв'язаний з енергією ( $E = h\nu$ ) в такий спосіб:

$$P = \frac{E}{V_\phi} = \frac{h\nu}{V_\phi} = \frac{nh\nu}{c} \quad (1.6)$$

де  $v_\phi = c/n$  - швидкість фотона в даному середовищі;  $c$  - швидкість світла у вакуумі;  $n$  - показник заломлення середовища.

З формули (1.6) отримаємо:

$$dP = \frac{nh}{c} dv, \quad (1.7)$$

що при підстановці в рівняння (1.5), після інтегрування по всіх кутах від 0 до  $4\pi$ , дає вираз для визначення концентрації фотонів:

$$dN = \int_0^{4\pi} \frac{2}{h^3} f_\phi P^2 dP d\Omega = \frac{8\pi}{h^3} f_\phi P^2 dP = \frac{8\pi}{c^3} \frac{n^3 v^2 dv}{e^{hv/kT} - 1} \quad (1.8)$$

Якщо позначити імовірність поглинання фотона з частотою  $\nu$  через  $g(\nu)$ , то для інтенсивності поглинання, що в умовах термодинамічної рівноваги дорівнює інтенсивності випромінювання, отримасмо такий вираз:

$$R_n^0 = R_g^0 = \int_0^\infty g(\nu) dN = \frac{8\pi}{c^3} \int_0^\infty n^3 g(\nu) \nu^2 d\nu \quad (1.9)$$

Час життя фотона  $\tau_\phi$  є величина, зворотна імовірності його поглинання.

Величину  $\tau_\phi$  можна визначити, якщо відома довжина вільного пробігу  $l_\phi$  і швидкість фотона  $\nu_\phi$ .

В той же час, довжина вільного пробігу фотона обернено пропорційна коефіцієнту поглинання  $\alpha(\nu)$ , тобто  $l_\phi = 1/\alpha(\nu)$ .

В результаті будемо мати:

$$\tau_\phi = \frac{1}{g(\nu)} = \frac{l_\phi}{V_\phi} = \frac{n}{c\alpha(\nu)} \quad (1.10)$$

Підставляючи значення  $g(\nu)$  з формули (1.10) в (1.9), знаходимо:

$$R_g^0 = \gamma_r n_i^2 = \frac{8\pi}{c^2} \int_0^\infty n^2 \alpha(\nu) \nu^2 d\nu \quad (1.11)$$

Значення власної концентрації носіїв заряду  $n_i$ , густини рівноважного випромінювання  $R_{ig}^0$  і часу життя  $\tau_{igs}$ , для випромінювальних переходів зона провідності - валентна зона, для деяких напівпровідників при  $T = 300$  К, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Напів- провід- ник	Ширина заброненої зони, еВ	$n_i$ , см <sup>-3</sup>	$R_{ig}^0$ , см <sup>-3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$\tau_{igs}$ мкс
Si	1.12	$1.6 \cdot 10^{10}$	$4.5 \cdot 10^5$	2500
Ge	0.66	$2.5 \cdot 10^{13}$	$2.0 \cdot 10^{13}$	150
GaAs	1.43	$1.1 \cdot 10^6$	$2.4 \cdot 10^{14}$	0.37
IaAs	0.36	$1.6 \cdot 10^{15}$	$5.4 \cdot 10^{19}$	0.24
InSb	0.18	$2.0 \cdot 10^{15}$	$1.6 \cdot 10^{22}$	0.12
PbS	0.39	$7.1 \cdot 10^{14}$	$2.4 \cdot 10^{19}$	0.21
PbTe	0.32	$4.0 \cdot 10^{15}$	$8.3 \cdot 10^{20}$	0.19
PbSe	0.27	$6.2 \cdot 10^{15}$	$1.5 \cdot 10^{21}$	0.25



З табл. 1.1 видно, що час життя нерівноважних носіїв заряду, у випадку міжзонної випромінювальної рекомбінації, знижується із зменшення ширини забороненої зони. Слід відзначити також, що при збільшенні ступеня легування, час життя нерівноважних носіїв заряду теж знижується.

Наприклад, для сильно легованого германія ( $n_0 \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) воно складає:

$$\tau_{rs}^n = 2 \frac{n_i}{n_0} \tau_{ir} \approx 2 \frac{2,4 \cdot 10^{13}}{10^{19}} 0,61 \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 3 \text{ мкс.}$$

Але, з ростом ступеня легування матеріалу імовірність міжзонної випромінювальної рекомбінації не збільшується. Це протиріччя виникає за рахунок того, що з підвищенням концентрації домішки з'являється велика кількість дефектів і починає переважати рекомбінація через рекомбінаційні пастки.

Тому, для дослідження процесів міжзонної випромінювальної рекомбінації, варто використовувати найбільш чисті напівпровідникові матеріали.

Оптичне випромінювання характеризується фотометричними параметрами, які є енергетичними та світловими.

Енергетичні параметри характеризують випромінювання безвідносно до його дії на будь-який приймач випромінювання і пов'язані з енергією світла  $W$ , яка переноситься випромінюванням.

За допомогою світлових параметрів оцінюють випромінювання у випадку, якщо приймачем випромінювання є людське око.

Чутливість ока до світла з різними довжинами хвиль неоднакова. Вона має максимум при  $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$  і швидко знижується при віддаленні від цього максимуму.

На границях видимого діапазону ( $\lambda = 0,38$  і  $\lambda = 0,78 \text{ мкм}$ ) чутливість ока практично спадає до нуля.

Таким чином, енергетичні і світлові параметри випромінювання за змістом однакові, але характеризують випромінювання в різних діапазонах хвиль та мають різні одиниці вимірювання.

Кількісні характеристики видимого світла пов'язують із зримою чутливістю. В інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазонах оптичного випромінювання, які не сприймаються оком, параметри характеризують безпосередньо енергію, яка переноситься випромінюванням.

Світлові та енергетичні параметри пов'язані між собою пропорційними залежностями.

Для кількісного описання оптичного випромінювання, а також джерел та приймачів випромінювання використовуються п'ять основних енергетичних параметрів: потік випромінювання та сила випромінювання - це параметри, які характеризують випромінювання; енергетична світність

і енергетична яскравість - це параметри, які характеризують джерело випромінювання з врахуванням площі випромінювальної поверхні; енергетична освітленість - цим параметром характеризують поверхню, яку опромінюють.

Для видимого випромінювання теж застосовуються відповідно п'ять світлових параметрів: світловий потік, сила світла, світність, яскравість і освітленість.

Співвідношення цих параметрів наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Енергетичні параметри			Світлові параметри			Формула для визначення параметра
Параметр	Позначення	Одиниця вимірювань	Параметр	Позначення	Одиниця вимірювань	
Потік випромінювання	$\Phi_e$	Вт	Світловий потік	$\Phi_v$	Лм	$\Phi = dW/dt$
Сила випромінювання	$I_e$	Вт/ср	Сила світла	$I_v$	кд·лм/ср	$I = d\Phi/d\Omega$
Енергетична світність	$M_e$	Вт/м <sup>2</sup>	Світність	$M_v$	лм/м <sup>2</sup>	$M = d\Phi/dS$
Енергетична яскравість	$L_e$	Вт/(ср·м <sup>2</sup> )	Яскравість	$L_v$	кд/м <sup>2</sup>	$L = \frac{dI}{dS \cos \varphi}$
Енергетична освітленість (опромінювання)	$E_e$	Вт/м <sup>2</sup>	Освітленість	$E_v$	лк·лм/м <sup>2</sup>	$E = d\Phi/dS$

### 1.3 Завдання, контрольні питання та задачі

1. Назвіть основні механізми поглинання світла в напівпровідниках. Які з механізмів є фотоактивними?

2. Як змінюється фотопровідність напівпровідників при збільшенні числа рекомбінаційних пасток?

3. Які причини обумовлюють нелінійну зміну фотопровідності напівпровідників в залежності від інтенсивності випромінювання?

4. Визначте енергію фотонів для червоного випромінювання ( $\lambda = 700$  нм). Вкажіть, які напівпровідники прозорі для цього випромінювання, а які поглинають його.

ІНТЕ ВІНТУ  
М. ВІННИЦЯ

5. На рис. 1.3 показаний спектр власного поглинання антимоніду індію для двох різних температур.

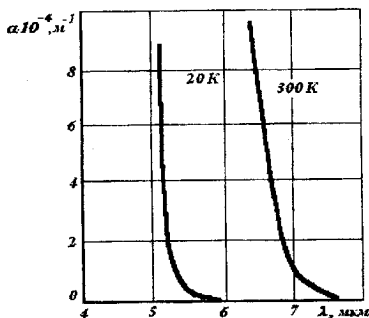


Рисунок 1.3

На основі цих даних оцінити ширину забороненої зони напівпровідника при вказаних температурах.

Відповідь:  $\Delta W(20) = 0.233$  eВ;  $\Delta W(300) = 0.177$  eВ.

6. Обчислити мінімальну довжину світлової хвилі, для якої арсенід галію, що має ширину забороненої зони 1.43 eВ при температурі 300 К, є оптично прозорим.

Як буде змінюватися ця гранична довжина хвилі із зниженням температури?

Відповідь:  $\lambda_{\min} = 869$  нм.

7. За допомогою даних, приведених у додатках, визначити граничну довжину хвилі власного поглинання арсеніду галію при температурі кипіння рідкого азоту.

Відповідь:  $\lambda = 0.82$  мкм.

8. Визначити швидкість оптичної генерації  $g$  нерівноважних носіїв заряду в пластині кремнію на глибині 100 мкм від поверхні, що освітлюється, при фотозбудженні монохроматичним випромінюванням інтенсивністю  $I_0 = 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , якщо показник поглинання матеріалу на довжині хвилі випромінювання  $\alpha = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ , а коефіцієнт відбиття випромінювання  $R = 0.3$ .

Розв'язання.

Швидкість оптичної генерації, тобто число носіїв заряду, що збуджуються світлом за одиницю часу в одиниці об'єму напівпровідника, залежить від показника поглинання і інтенсивності випромінювання на заданій глибині  $x$ . Зміна інтенсивності випромінювання підкоряється закону Бугера-Ламберта

$$I(x) = I_0(1-R)\exp(-\alpha x).$$

Число квантів, що поглинаються в шарі одиничної площі товщиною  $dx$ , визначається виразом  $d=I(x)\alpha dx$ .

Швидкість оптичної генерації

$$g(x) = dI/dx = \alpha I_0(1-R)\exp(-\alpha x) = \\ = 5 \cdot 10^4 \cdot 10^{20} \cdot (1 - 0.3)\exp(-5 \cdot 10^4 \cdot 100 \cdot 10^{-6}) = 2.36 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

9. При температурі 300 К для монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі 1 мкм показник поглинання  $\alpha = 10^4 \text{ м}^{-1}$ , а коефіцієнт відбиття випромінювання  $R = 0.3$ . Визначити, яка частка потоку випромінювання  $\Phi(h)$  пройде через пластину кремнію товщиною  $h = 300$  мкм при нормальному падінні променів.

Відповідь:  $\Phi(h)/\Phi_0 = 3.5 \%$ , де  $\Phi_0$  - потік випромінювання, що падає на пластину.

10. Визначити надлишкову концентрацію носіїв заряду в епітаксіальному шарі кремнію, товщиною  $b = 20$  мкм при оптичному збудженні монохроматичним випромінюванням з інтенсивністю  $I = 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , якщо час життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau = 10$  мкс, а показник власного поглинання кремнію на довжині хвилі випромінювання  $\alpha = 2000 \text{ м}^{-1}$ . Квантовий вихід внутрішнього фотоэффекта  $\eta$  прийняти рівним одиниці.

Розв'язання.

Через те, що  $b \ll 1/\alpha$ , то швидкість оптичної генерації  $g$  практично постійна по всьому об'єму епітаксіального шару.

Надлишкова концентрація носіїв заряду в сталому режимі

$$\Delta n = \tau g = \tau \eta \alpha I = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2000 \cdot 10^{21} = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}.$$

11. За тих самих умов, що й у задачі 10, знайти відносну зміну питомої провідності кремнію під дією оптичного збудження, якщо питомий опір матеріалу в темряві  $\rho_t = 0.2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а рухливість електронів і дірок  $0.14$  і  $0.05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , відповідно.

Відповідь:  $\Delta\gamma/\gamma_t = 0.12$ .

12. Визначити відношення питомих провідностей півки сульфїду кадмію  $n$ -типу товщиною 100 мкм у темряві і при однорідному оптичному збудженні  $\gamma_c$  монохроматичним випромінюванням інтенсивністю  $I_0(1-R) = 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , якщо рівноважна концентрація електронів у зразку  $n_0 = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , показник поглинання  $\alpha = 10^2 \text{ м}^{-1}$ , а час життя нерівноважних носіїв заряду  $\tau_n = 10$  мкс. Внеском дірок у фотопровідність знехтувати. Квантовий вихід внутрішнього фотоэффекту покласти рівним одиниці.

Відповідь:  $\gamma_c/\gamma_t = 11$ .

13. Зобразіть (якісно) спектральні характеристики власної фотопровідності напівпровідника при двох різних швидкостях поверхневої рекомбінації.

14. В якому з напівпровідникових матеріалів власна фотопровідність спостерігається при найбільшій довжині хвилі падаючого на напівпровідник випромінювання: Ge, Si, SiC, InSb, GaAs, GaP, CdS?

15. Довгохвильовій границі зовнішнього фотоэффекту сурьмяноцезієвого фотокатода при температурі біля абсолютного нуля відповідає довжина хвилі  $\lambda_1 = 0.65$  мкм, а поріг фотопровідності в цьому матеріалі спостерігається при  $\lambda_2 = 2.07$  мкм. Визначити положення дна зони провідності даного напівпровідника відносно енергетичного рівня вакууму.

Відповідь:  $W_c - W_0 = -1.31$  еВ.

16. На пластину з арсеніду галію площею  $S = 100$  мм<sup>2</sup> і товщиною  $b = 0,5$  мм падає монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 556$  нм. Визначити, яке число електронно-діркових пар щосекундно генерується в об'ємі напівпровідника при освітленості  $E = 100$  лк. Квантовий вихід внутрішнього фотоэффекту прийняти рівним одиниці. Процесами відбиття знехтувати. На заданій довжині хвилі показник поглинання матеріалу  $\alpha = 10^6$  м<sup>-1</sup>.

Розв'язання.

На заданій довжині хвилі показник поглинання GaAs великий, глибина поглинання  $1/\alpha \ll b$ . Тому фотони падаючого випромінювання поглинаються в об'ємі напівпровідника, а кожний поглинений фотон народжує нову пару носіїв заряду. На пластину падає світловий потік  $\Phi = ES = 100 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 10^{-2}$  лм. На довжині хвилі  $\lambda = 0.556$  мкм потужність випромінювання 1 Вт відповідає світловому потоку 683 лм.

Потужність випромінювання, що падає на пластинку напівпровідника,  $P = (683^{-1}) \cdot 10^{-2} = 1.46 \cdot 10^{-5}$  Вт. Даній довжині хвилі відповідає енергія фотонів  $h\nu = hc/\lambda = 2.23$  еВ. Звідси знаходимо число фотонів, що поглинаються в об'ємі напівпровідника в одиницю часу. Воно дорівнює числу генерованих електронно-діркових пар

$$N_\Phi = P/h\nu = (1.46 \cdot 10^{-5}) / (1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2.23) = 4.1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}.$$

17. Пластина германія *n*-типу довжиною  $l = 10$  мм, шириною  $a = 2$  мм і товщиною  $b = 0.5$  мм має повздовжній опір  $R = 2$  кОм. Час життя неосновних носіїв заряду  $\tau = 100$  мкс.

На зразок, нормально до поверхні, падає монохроматичне випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 0.546$  мкм. На цій довжині хвилі світловий еквівалент потоку випромінювання  $K_\lambda = 625$  лм/Вт. Вважаючи, що весь світловий потік, який падає на зразок, цілком витрачається на генерацію електронно-діркових пар, визначити, при якій освітленості зразка його опір зменшиться в два рази.

Квантовий вихід внутрішнього фотоелектру  $\eta$  прийняти рівним одиниці, а рухливість електронів  $\mu_n$  і дірок  $\mu_p$ , відповідно, 0.39 і 0.19 м<sup>2</sup>/(В·с). При даній температурі власна концентрація носіїв  $n_i = 2.1 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>. Повернемою рекомбінацією знехтувати.

Розв'язання.

Знайдемо питомий опір германію:

$$\rho_0 = Rab/l = 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-6} / 10^{-2} = 0.2 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Питомий опір пов'язаний з концентрацією носіїв заряду співвідношенням

$$1/\rho_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) = e(n_0\mu_n + \mu_p n_i^2/n_0).$$

Звідси одержуємо рівняння для рівноважної концентрації електронів

$$n_0^2 - n_0/(e\mu_n\rho_0) + n_i^2\mu_p/\mu_n = 0.$$

Підставляючи в нього значення з умови задачі, маємо

$$n_0^2 - n_0/(1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.39 \cdot 0.2) + (2.1 \cdot 10^{19})^2 \cdot 0.19 / 0.39 = 0$$

чи

$$n_0^2 - 8 \cdot 10^{19} n_0 + 2.15 \cdot 10^{38} = 0.$$

Розв'язком цього рівняння є  $n_0 = 7.72 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>.

Рівноважна концентрація дірок

$$p_0 = n_i^2/n_0 = (2.1 \cdot 10^{19})^2 / (7.72 \cdot 10^{19}) = 5.7 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}.$$

При поглинанні світла в зразку генерується рівне число нерівноважних електронів  $\Delta n$  і дірок  $\Delta p$ . Тому питома провідність освітленого зразка

$$\gamma_c = e(\Delta n + n_0)\mu_n + e(\Delta p + p_0)\mu_p = 2/\rho_0 = 10 \text{ См/м}$$

чи

$$10 = 1.6 \cdot 10^{19} \cdot \Delta n (0.39 + 0.19) + 1/0.2.$$

Звідси  $\Delta n = \Delta p = 5.4 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>.

Загальне число нерівноважних електронів і дірок, які створюються при поглинанні фотонів у всьому об'ємі зразка  $V$ :

$$\Delta n_{\Sigma} = \Delta p_{\Sigma} = \Delta n = 5.4 \cdot 10^{19} (10 \cdot 2 \cdot 0.5) 10^{-9} = 5.4 \cdot 10^{11}.$$

Внаслідок рекомбінації число електронно-діркових пар в зразку зменшується із швидкістю

$$r = \Delta n_{\Sigma} / \tau = 5.4 \cdot 10^{11} / 10^{-4} = 5.4 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.$$

Для того, щоб в зразку підтримувалася необхідна динамічна рівновага, тобто незмінне число нерівноважних носіїв заряду, повинна виконуватися умова  $r = \eta N_{\phi}$ , де  $N_{\phi}$  – число фотонів, які щосекундно поглинаються в об'ємі напівпровідника.

Необхідний світловий потік

$$\Phi = N_{\phi} (hc/\lambda) K_{\lambda} = 5.4 \cdot 10^{15} \cdot 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 625 / (0.546 \cdot 10^{-6}) = 1.23 \text{ лм}.$$

Тоді освітленість зразка

$$F = \Phi / S = 1.23 / (10 \cdot 2 \cdot 10^{-6}) = 6.15 \cdot 10^4 \text{ лк}.$$

18. Довгохвильовій границі фотопровідності власного напівпровідника відповідає  $\lambda = 1.86$  мкм. Обчислити температурний коефіцієнт питомого опору матеріалу для  $T = 300 \text{ K}$ .

Відповідь:  $\alpha_p = -4.3 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

19. Зобразіть (якісно) на одному графіку спектральні характеристики власної фотопровідності для кремнію і германію. Поясніть розходження в положенні кривих.

20. На рис. 1.4 показані спектральні характеристики оптичного пропускання  $T_0$  двох прозорих електродів різної товщини на основі діоксиду олова з однаковою питомою провідністю.

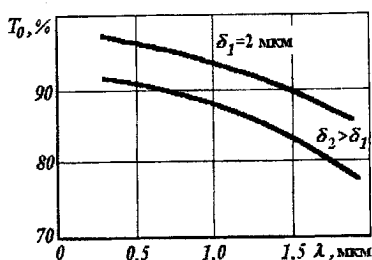


Рисунок 1.4

Визначити для діоксиду олова показник поглинання  $\alpha$  випромінювання зеленого кольору, використовуючи верхню криву, отриману для електрода товщиною 2 мкм. Яка товщина  $\delta$  іншого електрода?

Відповідь:  $\alpha = 2.56 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ ;  $\delta = 4.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

21. Зобразіть (якісно) спектральні характеристики власної фотопровідності арсеніду галію і сульфїду свинцю при двох різних температурах. Поясніть якісні відмінності в температурній зміні фотоелектричних властивостей цих матеріалів.

22. Якою повинна бути ширина забороненої зони напівпровідникового матеріалу, щоб довжина хвилі рекомбінаційного випромінювання відповідала видимій області спектру?

Відповідь:  $\Delta W > 1.7$  еВ.

23. На пластину напівпровідника розмірами  $l \times b \times d$ , нормально до його поверхні, падає потік монохроматичного випромінювання інтенсивністю  $I_0$ . Показник заломлення напівпровідника  $n_0$  і показник оптичного поглинання  $\alpha$ . Вважаючи, що в створенні фотоструму  $I_\phi$  беруть участь тільки електрони і нехтуючи темновим струмом, довести, що

$$I_\phi = e\mu_n \tau_n \eta \frac{b}{l} I_0 \frac{4n_0 U}{(n_0 + 1)^2} (1 - e^{-\alpha d}),$$

де  $\tau_n$  – час життя електронів;  $\eta$  – квантовий вихід внутрішнього фотоефекту;  $d$  – розмір напівпровідникової пластини (в напрямку падіння світла);  $U$  – напруга, яка прикладена вздовж пластини (по розміру  $l$ ).

Розв'язання.

У відповідності з законом Бугера-Ламберта зміна інтенсивності випромінювання при віддаленні від поверхні в глиб напівпровідника  $I(x) = I_0(1-R)\exp(-\alpha x)$ .

При нормальному падінні світлових променів коефіцієнт френелівського відбиття  $R = (n_0 - 1)^2 / (n_0 + 1)^2$ .

Виділимо тонкий шар товщиною  $dx$ , в межах якого інтенсивність випромінювання можна вважати постійною. Тоді в стаціонарних умовах для надлишкової концентрації електронів справедливий вираз

$$\Delta n(x) = g(x) \tau_n = \eta \alpha \tau_n I_0 (1-R) \exp(-\alpha x),$$

де  $g(x)$  – швидкість оптичної генерації носіїв заряду (дивись розв'язок задачі 8).

Електричний струм, що протікає в шарі  $dx$  на глибині  $x$ ,

$$dI_\phi = \gamma(x) E b dx = e b \Delta n(x) \mu_n \frac{U}{l} dx.$$

Підсумовуючи провідність всіх шарів й переходячи до інтегралу, знайдемо повний фотострум



$$I_{\phi} = e\mu_n b \frac{U}{l} \int_0^d \Delta n(x) dx = e\mu_n \tau_n \eta U \frac{b}{l} I_0 \frac{4n_0}{(n_0 + 1)^2} (1 - e^{-ad}).$$

24. Використовуючи розв'язок попередньої задачі, визначити фотострум  $I_{\phi}$  через фоторезистор сульфїду кадмію площею  $10 \times 1$  мм і товщиною 1 мкм при падінні на нього монохроматичного випромінювання з  $\lambda = 0.5$  мкм і густиною потоку  $10$  Вт/м<sup>2</sup>, який падає нормально на плоскій поверхні напівпровідника.

Прийняти електричну напругу, яка прикладена вздовж фоточутливої плівки, 5 В. В розглянутому спектральному діапазоні коефіцієнт поглинання  $\alpha = 10^4$  см<sup>-1</sup>, показник заломлення  $n_0 = 2.26$ . Рухливість електронів  $\mu_n = 0.03$  м<sup>2</sup>/(В·с), час їх життя  $\tau_n = 10^{-3}$  с. Квантовий вихід внутрішнього фотоелектру покласти рівним одиниці. Темновим током знехтувати.

Вказати, як зміниться фотострум, якщо на фоточутливу плівку з CdS впливати монохроматичним випромінюванням ( $\lambda = 1$  мкм).

Відповідь:  $I_{\phi} = 32.5$  мкА.

На довжині хвилі 1 мкм фотоактивне поглинання різко ослаблюється або зовсім відсутнє (в залежності від типу фоторезистора), тому фотострум набагато менший, ніж в області власного поглинання.

25. Відомо, що у фоторезисторах з власного сульфїду кадмію фотострум створюється головним чином електронами. Довести, що відношення числа електронів, які проходять в зовнішньому колі під впливом зовнішнього поля, до числа носіїв заряду, які збуджуються світлом в напівпровіднику, визначається виразом

$$G = \tau_n / t,$$

де  $\tau_n$  - час життя електронів;  $t$  - час їх дрейфу між електродами.

Розв'язання.

Для спрощення аналізу розглянемо випадок слабкого поглинання, коли швидкість оптичної генерації носіїв заряду практично постійна у всьому об'ємі напівпровідника.

Тоді

$$G = (I_e) / (gV),$$

де  $V = lbd$  - об'єм напівпровідника;  $l$  - відстань між електродами;  $g$  - швидкість оптичної генерації носіїв заряду.

Нехтуючи темновим струмом, отримуємо вираз для струму в освітленому фоторезисторі:

$$I = I_{\phi} = \sigma_{\phi} U = \gamma_{\phi} b d U l l = e \Delta n \mu_n b d E,$$

де  $\Delta n = \tau_n g$ .

Тоді

$$G = \frac{\tau_n g \mu_n b d E}{g b l d} = \frac{\tau_n U_n}{l} = \frac{\tau_n}{t}$$

Аналогічно можна роз'язати задачу і для випадку нерівномірного поглинання світла.

26. Визначити відношення числа носіїв заряду, що проходять в одиницю часу через електроди fotocутливого напівпровідника, до числа фотонів, що поглинаються напівпровідником за цей же відрізок часу, якщо відомо, що при повному поглинанні монохроматичного випромінювання ( $\lambda = 565$  нм) потужністю 100 мкВт фотострум складає 10 мА. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту прийняти рівним одиниці.

Відповідь: 2200.

27. Визначити максимальну ширину забороненої зони, яку може мати напівпровідник, що використовується в якості фотодетектора, якщо він повинен бути чутливим до випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 565$  нм.

Відповідь:  $\Delta W = 2.20$  еВ.

28. На напівпровідниковий фотодетектор площею  $0.5 \text{ мм}^2$  падає потік монохроматичного випромінювання ( $\lambda = 0.565$  мкм) густиною  $20 \text{ мкВт/м}^2$ .

Визначити : а) число електронно-діркових пар, які щосекундно генеруються в об'ємі напівпровідника, вважаючи, що кожний фотон створює тільки одну пару носіїв заряду; б) у скільки разів зміниться швидкість генерації, якщо густина потоку випромінювання зменшиться удвічі; в) як зміниться швидкість оптичної генерації, якщо довжина хвилі  $\lambda$  зменшиться вдвічі.

Відповідь: а)  $2.84 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ;

б) зменшиться в два рази;

в) не зміниться через те, що енергія падаючого випромінювання зростає в два рази.

29. Який з матеріалів, цезій чи фольфрам, придатний для виготовлення fotocутливого шару для видимої області спектра?

Відповідь: цезій.

30. На киснево-цезієвий фотокатод падає монохроматичний потік світла, під дією якого з фотокатода вилітають електрони з максимальною швидкістю 600 км/с. Визначити довжину хвилі падаючого потоку світла. Робота виходу матеріала катода дорівнює 1.0 еВ.

Відповідь:  $6.13 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

31. Визначити енергію фотонів:

а) жовтого кольору з довжиною хвилі  $\lambda = 0.5893$  мкм;

б) синього кольору з довжиною хвилі  $\lambda = 0.421$  мкм;

в) ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 0.2557$  мкм.

Визначити максимальну швидкість електронів, що вибиваються кожним з вищевказаних фотонів з поверхні цезієвого фотокатода, який має роботу виходу 1.81 еВ.

- Відповідь: а) 2.11 еВ;  $3.25 \cdot 10^5$  м/с;  
б)  $6.33 \cdot 10^5$  м/с;  
в) 4.87 еВ;  $10.37 \cdot 10^5$  м/с.

32. Обчислити максимальну швидкість електронів, що вибиваються з поверхні сурм'яно-цезієвого фотокатода під дією монохроматичного потоку світла з довжиною хвилі  $\lambda = 0.4$  мкм. Робота виходу сурм'яно-цезієвого фотокатода дорівнює 1.5 еВ.

Відповідь:  $7.52 \cdot 10^5$  м/с.

33. Визначити максимальну швидкість емітованих з металу електронів при опроміненні фотокатода світлом з довжиною хвилі 0.2 мкм, якщо робота виходу електронів 1 еВ.

Відповідь:  $13.52 \cdot 10^5$  м/с.

34. Обчислити роботу виходу фотокатода при довжині хвилі, що дорівнює 1.2 мкм, яка відповідає довгохвильовій межі фотоэффекту.

Відповідь: 1.032 еВ.

35. Монохроматичним світлом з довжиною хвилі  $\lambda = 0.6$  мкм освітлюють матеріали, дані яких в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Матеріал	Робота виходу, еВ	Матеріал	Робота виходу, еВ	Матеріал	Робота виходу, еВ
Кальцій	2.24	Молібден	4.44	Тантал	4.07
Вуглець	4.0	Нікель	2.77	Торій	3.35
Цезій	1.81	Платина	5.08	Вольфрам	4.52

З якого матеріалу електрони будуть вибиватися з найбільшою швидкістю? Чому дорівнює ця швидкість?

Відповідь: з цезію;  $U_{\max} = 3 \cdot 10^5$  м/с.

36. Визначити граничні частоти для матеріалів, вказаних у попередній задачі. В якій частині спектра вони розташовані?

Відповідь: для кальцію  $5.42 \cdot 10^{14}$  Гц; для вуглецю  $9.68 \cdot 10^{14}$  Гц; для цезію  $4.38 \cdot 10^{14}$  Гц; для молібдену  $10.73 \cdot 10^{14}$  Гц; для нікелю  $6.71 \cdot 10^{14}$  Гц; для платини  $12.3 \cdot 10^{14}$  Гц; для танталу  $9.85 \cdot 10^{14}$  Гц; для торію  $8.11 \cdot 10^{14}$  Гц; для вольфраму  $10.92 \cdot 10^{14}$  Гц;

37. Визначити довгохвильову межу фотоелемента для чистого цезію.

Відповідь: 0.685 мкм.

38. Обчислити довжину хвилі монохроматичного пучка світла, падаючого на киснево-цезієвий фотокатод, робота виходу якого дорівнює 1.5 еВ, якщо відомо, що максимальна швидкість електронів, що вибиваються з поверхні катода, дорівнює 500 км/с.

Відповідь: 0.726 мкм.

39. Під дією монохроматичного пучка світла з довжиною хвилі 0.5 мкм з сурм'яно-цезієвого фотокатода, робота виходу якого дорівнює 1.5 еВ, вилітають електрони.

Визначити їх максимальну швидкість.

Відповідь: 931.1 км/с.

40. Чому дорівнює темновий струм фотоелемента, обумовлений термоелектронною емісією сурм'яно-цезієвого катода, що має площу  $10 \text{ см}^2$  і температуру 300 К?

Відповідь:  $1.9 \cdot 10^{-15} \text{ А}$ .

41. Магнієвий фотокатод опромінюється ультрафіолетовими променями, довжина хвилі яких 0.35 мкм.

При якій анодній напрузі жоден електрон не досягне анода?

Відповідь: 1.26 В.

42. Анодом фотоелемента є циліндр, діаметр якого 1.5 см; катодом - платинова нитка діаметром 0.1 см.

Яке зміщення червоної межі фотоелемента, якщо до анода прикласти напругу в 2 кВ?

Відповідь:  $46.3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ .

43. Алюмінієва плівка товщиною 3 мкм бомбардується електронами.

Визначити: а) яку енергію повинні мати електрони, щоб вони змогли пройти цю плівку; б) на якому відрізку свого шляху в матеріалі електрон розтрачує енергію інтенсивніше - на кінцевому чи початковому?

Відповідь: а) 7616 еВ;

б) на кінцевому.

44. При якій енергії первинних електронів коефіцієнт вторинної емісії для нікеля буде мати максимальне значення?

Для нікеля постійна Віддінгтона  $c = 7.4 \cdot 10^{13} (\text{еВ})^2/\text{м}$  для малих енергій 0.5-1 кеВ. Середня довжина вільного пробігу  $l = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ .

Відповідь: 470 еВ.

## 2 ОПТИЧНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ

### 2.1 Загальні поняття

Основними базовими елементами оптоелектронних систем, за якими визначаються параметри всіх інших складових, є оптичні випромінювачі [1- 4, 8, 14, 15].

Оптичне випромінювання виникає за рахунок виділення енергії елементарними частинками. При їх переході з рівня на рівень, енергія поглинається або випромінюється, в залежності від направлення руху та орієнтації частинок.

Якщо населеність верхнього рівня більша, ніж нижнього, така речовина має інверсну населеність. В цьому випадку існує імовірність того, що за певний проміжок часу частинки придуть у рівноважний стан, перейшовши з верхнього рівня на нижній і виділивши енергію.

Коли на частоті переходу наводиться додаткове електромагнітне поле, то імовірність таких переходів значно збільшується.

Наявність додаткового поля збільшує імовірність переходу, тому що воно викликає додаткове випромінювання частинок на різних рівнях, які знаходяться в певному фазовому співвідношенні з електромагнітним полем.

Випромінювання, яке виникає під впливом цього поля називають вимушеними або індукованим, а без впливу поля - спонтанним.

Всі напівпровідникові випромінювачі, які використовуються в оптоелектроніці, характеризуються як спонтанним, так і індукованим випромінюванням.

До оптичних випромінювачів висуваються такі загальні вимоги, які витікають з особливостей оптоелектроніки:

- 1) висока ефективність перетворення енергії збудження в енергію оптичного випромінювання;
- 2) вузька спектральна смуга випромінювання;
- 3) направленість випромінювання;
- 4) мала інерційність і, відповідно, висока швидкодія;
- 5) як правило, генерація має бути одномодовою в широкому діапазоні робочих потужностей;
- 6) сумісність з інтегральними технологіями;
- 7) висока технологічність та низька вартість;
- 8) довговічність з високими експлуатаційними характеристиками;
- 9) мініатюрність.

Крім того, в багатьох галузях оптоелектроніки значна увага приділяється когерентності випромінювання, тому до них пред'являється ще одна вимога - високий ступінь когерентності.

Для визначення і аналізу основних параметрів і особливостей випромінювачів всіх оптичних діапазонів і призначень прийняті такі загальні параметри:

1. Довжина хвилі -  $\lambda$ , на якій генерується випромінювання.

Вона є основним параметром оптичного генератора і залежить від ширини забороненої зони  $E_g$  в активній області напівпровідникового прилада.

Цю залежність прийнято визначати формулою:

$$\lambda = 1.239/E_g \text{ [мкм]}. \quad (2.1)$$

2. Потужність випромінювання -  $P$ .

Вона визначає режим роботи оптичного генератора.

Загальна потужність потоку випромінювання абсолютно чорного тіла, що має температуру  $T$ , визначаються законом Стефана - Больцмана:

$$P = \sigma \cdot T^4 \cdot A, \quad (2.2)$$

де  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{К}^4)$  стала Стефана - Больцмана.

Температуру  $T$ , що відповідає даній потужності випромінювання, називають кольоровою.

3. Коефіцієнт корисної дії (ККД) -  $\eta$ .

Він характеризує ефективність перетворення електричної енергії в оптичну і навпаки.

4. Імовірність випромінювальної рекомбінації -  $P_{гб}$ .

Вона прямо пропорційна швидкості рекомбінації або обернено пропорційна часу випромінювальної рекомбінації  $\tau_{гб}$ :

$$P_{гб} = 1/\tau_{гб}. \quad (2.3)$$

5. Квантова ефективність (внутрішня) -  $\eta_{вн}$ .

Це відношення імовірності випромінювальної рекомбінації до імовірності безвипромінювальних переходів  $P_{гб}$ :

$$\eta_{вн} = P_{гв}/(P_{гв} + P_{гб}) = 1/[1 + (\tau_{гв}/\tau_{гб})]. \quad (2.4)$$

6. Зовнішня ефективність -  $\eta_{зовн}$ .

Це кількість емітованих квантів віднесена до кількості інжектованих квантів:

$$\eta_{зовн} = N_{с.кв.}/N_{инф.кв.} \quad (2.5)$$

7. Диференціальна квантова ефективність -  $\eta_{д}$ .

Вона визначається як:

$$\eta_{д} = dP/dI_n, \quad (2.6)$$

де  $P$  - потужність випромінювання,  $I_n$  - струм накачки.

Ефективність переходу з зони в зону в напівпровідниках з прямими переходами, таких як GaAs, InP та ін., а також в 3-х і 4-х компонентних компаундах дуже висока і може досягати 100%.

Тому такі напівпровідникові матеріали широко використовують для створення дискретних і інтегральних світловипромінювальних діодів і лазерів.

І світловипромінювальні діоди і лазери відносяться до класу люмінісцентних приладів.

## 2.2 Світлодіоди

Світловипромінювальні діоди (СВД) - найбільш поширені прилади оптоелектроніки. В основі їх роботи лежать перетворення електричної енергії в електромагнітне випромінювання, спектр якого може знаходитися у видимій та інфрачервоній частинах спектру [1- 5, 8, 14].

Аналіз принципів роботи СВД повинен починатися з аналізу світлодіодної структури (рис. 2.1), яка, в загальному випадку, представляє собою електронно-дірковий перехід, в якому одна із зон, наприклад  $n$ , є смітною, а друга  $p$  - базовою.

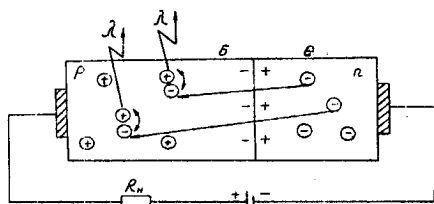


Рисунок 2.1.

Струм, якій протікає крізь СВД, вміщує електронну  $i_n$  та діркову  $i_p$  складові:

$$i_D = i_n + i_p.$$

Випромінювальний діод, структура якого показана на рис. 2.1, - основний і найбільш універсальний випромінювач некогерентної оптоелектроніки.

Така структура обумовлює основні переваги СВД:

- високе значення ККД перетворення електричної енергії в оптичну;
- відносно вузький спектр випромінювання (квазімонохроматичність) для одного типу діодів і перекриття майже всього оптичного діапазону випромінювання діодами різних типів;

- високу для некогерентного випромінювача спрямованість випромінювання; малі значення прямої напруги, що забезпечує електричну сумісність СВД з інтегральними схемами;

- високу швидкодію;

- малі габарити;

- технологічну сумісність з мікроелектронними пристроями;

- високу надійність і довговічність.

СВД використовуються як випромінювачі в різних схемах індикації, відображення інформації, у волоконно-оптичних лініях зв'язку і в багатьох інших пристроях. При цьому діод може використовуватися як окремий самостійний елемент пристрою - дискретний оптоелектронний прилад, або може входити до складу іншого оптоелектронного приладу, наприклад оптопари.

Для випромінювальних діодів, що входять до складу оптоелектронного приладу, випромінювальна структура повинна забезпечувати одночасно високу потужність випромінювання, вузьку діаграму спрямованості і високу швидкодію. Тільки при такому поєднанні параметрів випромінювач буде добре узгоджуватися з фотоприймачем.

Для випромінювальних діодів, що не входять до складу іншого оптоелектронного приладу, вимоги до спрямованості випромінювання, звичайно, істотно нижчі. Крім того, такі СВД можуть мати меншу швидкодію, тобто низьку швидкість перетворення електричної енергії у світлову.

В залежності від способу сприймання випромінювання СВД (візуального чи не візуального), його випромінювальні властивості описуються світловими або енергетичними параметрами.

При візуальній передачі інформації (в знакових індикаторах, при підсвічуванні написів і кнопок, для індикації стану електронного пристрою і т. і.) приймачем випромінювання є людське око.

Невізуальна передача інформації характеризується тим, що виявлення потоку випромінювання від діода, що працює в інфрачервоному діапазоні, усуває людський зір і здійснюється фотоприймачем. До невізуальної області застосування відносяться, наприклад, всілякі оптичні пристрої зв'язку і сигналізації і т. і.

Типові випромінювальні характеристики, залежності сили світла  $\Phi$  від величини прямого струму діода  $I_{пр}$  для цих двох видів СВД наведені на рис. 2.2.

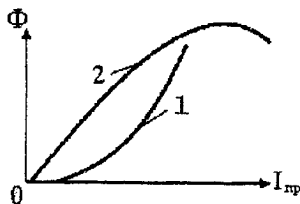


Рисунок 2.2



Сила світла  $\Phi$  - це світловий потік, який припадає на одиницю тілесного кута, в напрямку, перпендикулярному площині випромінювального кристала. Вона вимірюється в канделах, кд.

Залежність параметрів оптичного випромінювання від довжини його хвилі (чи від енергії фотонів, які випромінюються) називається спектральною характеристикою випромінювального діода. Довжина хвилі випромінювання визначається різницею двох енергетичних рівнів, між якими відбувається перехід електронів при люмінесценції.

В зв'язку з різною шириною забороненої зони, у різних матеріалів довжина хвилі випромінювання різна. Спектр випромінювання у СВД виявляється розмитим тому, що перехід електронів при рекомбінації носіїв зарядів відбувається не між двома енергетичними рівнями, а між двома групами енергетичних рівнів.

Спектральний діапазон випромінювального діода характеризують шириною спектра випромінювання  $\Delta\lambda_{0,5}$ , який вимірюється на висоті 0,5 максимуму потужностної характеристики. Випромінювання більшості СВД близьке до квазімонохроматичного ( $\Delta\lambda/\lambda_{\max} \ll 1$ ) і має відносно високу спрямованість розподілу потужності в просторі.

Тому до частотних параметрів СВД відносяться:

$\lambda_{\max}$  - довжина хвилі випромінювання, що відповідає максимальній спектральній щільності потоку випромінювання СВД;

$\lambda_{0,5}$  - ширина спектра випромінювання (інтервал довжин хвиль, в якому потужність випромінювання СВД складає половину максимальної);

$\lambda_{\text{дом}}$  - довжина хвилі випромінювання  $\lambda_{\max}$ , що домінує в довжині хвилі випромінювання при силі світла  $I_s$  і куті випромінювання  $\theta$ .

Слід відзначити, що сучасні СВД структури одного типу мають малий розкид значень по довжині хвилі випромінювання.

Визначивши  $\lambda_{\text{дом}}$  із довідникових даних, за відповідними залежностями, можна визначити колір випромінювання СВД.

Сила випромінювання залежить від напрямку (спрямованості) випромінювання.

Спрямованість випромінювання описують діаграмою спрямованості (рис. 2.3) та кутом випромінювання  $\theta$ .

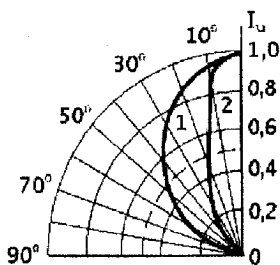


Рисунок 2.3

Сила випромінювання повинна складати не менше половини її максимального значення в межах кута випромінювання.

За допомогою діаграми спрямованості і кута випромінювання можна визначити світловий потік, який зорово сприймається при погляді під деяким кутом до геометричної осі випромінювача.

Паспортна діаграма спрямованості дозволяє визначити значення сили світла  $I_v$  при будь-якому конкретному куті зору.

Так, на рис. 2.3 наведені діаграми двох різних СВД (криві 1 і 2). Кут випромінювання  $\theta$  для діаграми 1 дорівнює приблизно  $45^\circ$ , а для діаграми 2 - приблизно  $15^\circ$ .

Крім наведених, в довідниках СВД характеризуються також такими параметрами:

- яскравість  $\alpha$ , яка визначається як відношення сили світла до площини світловипромінювальної поверхні,  $\text{кд/м}^2$ ;
- потужність випромінювання  $P_{\text{вип}}$ , мВт;
- максимально допустимі прямиї струм  $I_{\text{прmax}}$  і пряма напруга  $U_{\text{прmax}}$ , максимальна зворотна напруга (напруга пробою)  $U_{\text{звmax}}$ , прямиї імпульсний струм  $I_{\text{пmax}}$ ;
- інерційність, яка характеризується часом переключення (сучасні СВД мають час переключення  $10^{-9}$  с);
- коефіцієнт корисної дії -  $\eta$ ;
- надійність;
- термін служби.

Останній параметр необхідний для того, щоб визначити ступінь деградації при довготривалій роботі СВД, яка визивається збільшенням з часом центрів безвипромінювальної рекомбінації. Цей процес тим швидший, чим вища температура експлуатації.

Звичайно, термін експлуатації встановлюється рівним 10 тисячам годин.

Найкращими матеріалами для СВД є арсенід галію, фосфід галію, карбід кремнію та деякі інші.

Потужності випромінювання СВД на основі AsGaAl складають від долей до декількох міліват при прямому струмі в десятки міліампер. Такі СВД мають високу швидкодію (близько 0.5 нс), споживають порівняно невеликий струм (до  $30 \text{ А/см}^2$ ), але така їх характеристика, як ККД, не перевищує 1..5%.

Відповідно, до основних характеристик СВД також відносяться:

- яскравісна (для СВД видимої зони випромінювання),  $\alpha = f(I_{\text{пр}})$ ;
- вольтамперна характеристика (ВАХ),  $I_{\text{пр}} = f(U)$ ;
- потужнісна характеристика (для СВД ІЧ-спектра випромінювання,

$$P_{\text{вип}} = f(I_{\text{пр}});$$

Величина і характер зміни інтенсивності випромінювання СВД, при

зміні температури навколишнього середовища, визначаються їх фізико-хімічними властивостями. У випадку лінійного характеру зміни інтенсивності випромінювання СВД в заданому діапазоні температур, температурна нестабільність обумовлена температурним коефіцієнтом  $K_T$ .

Значення  $K_T$  знаходиться з виразу:

$$K_T = [\Delta\Phi_0 / (\Phi_{max} \Delta T)] \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

де  $\Delta\Phi_0$  - величина зміни інтенсивності випромінювання СВД;  $\Phi_{max}$  - максимальна інтенсивність випромінювання;  $\Delta T$  - зміна температури світловода.

Для визначення наведених параметрів і характеристик використовуються різні схеми вмикання СВД.

Розглянемо деякі з них (рис. 2.4).

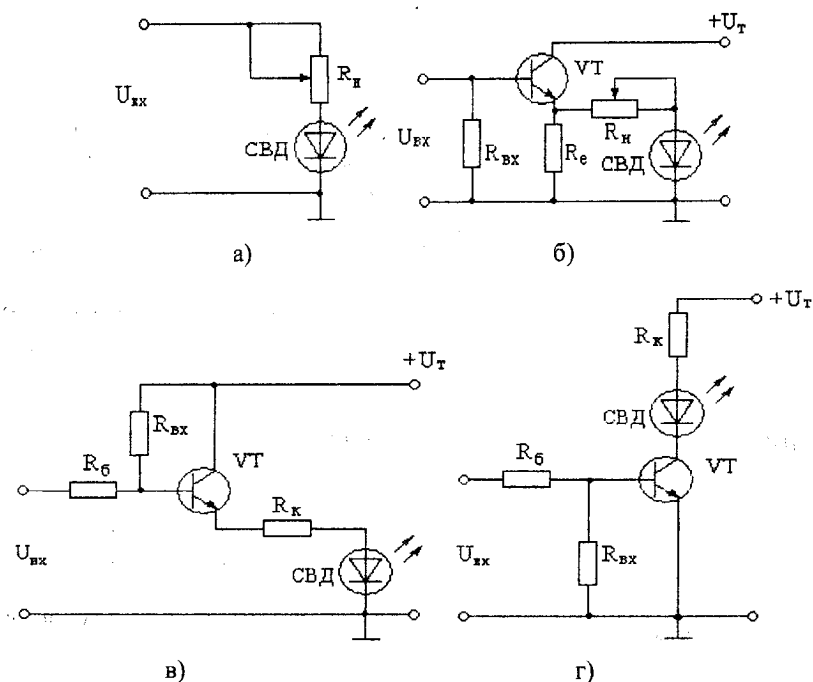


Рисунок 2.4

Для схеми (рис. 2.4, а) значення струму  $I_d$ , який протікає крізь СВД, залежить від опору  $R_n$ , напруги живлення  $U_n$  та падіння напруги на СВД:

$$I_d = (U_n - U_{сд}) / R_n. \quad (2.8)$$

Для схеми (рис. 2.4, б) вхідна напруга  $U_{вх} \approx U_{вих}$ , а струм

$$I_d = I_{вх} (1 + \beta), \quad (2.9)$$

де  $\beta$  - коефіцієнт підсилення струму транзистора.

Якщо врахувати, що вхідний опір каскаду приблизно дорівнює вхідному опору транзистора -  $R_{вх} \approx r_{вх}$ , а опір навантаження - динамічному опору СВД -  $R_n \gg r_o$ , що легко забезпечити при живленні більшою напругою, то будемо мати:

$$I_d = I_{вх} (1 + \beta) \cdot (R_c + R_n) / R_c. \quad (2.10)$$

Для схеми (рис. 2.4, в, г) струм через СВД:

$$I_d = (U_n - U_{сд} - U_{не відкр}) / (R_k + r_d), \quad (2.11)$$

де  $U_{не відкр}$  - залишкова напруга на транзисторі у відкритому стані.

Якщо врахувати, що  $U_n \gg U_{сд}$ ,  $U_n \gg U_{ке}$ ,  $R_k \gg r_o$ , то будемо мати

$$I_b = U_n / R_k. \quad (2.12)$$

Струм бази транзистора

$$I_b = (U_{вх} - U_{бс}) / R_b. \quad (2.13)$$

Опір  $R_b$  повинен забезпечити струм насичення транзистора

$$I_b = S I_{к} / \beta, \quad (2.14)$$

де  $S = I_b / I_{бср}$  - коефіцієнт насичення,  $I_{бср}$  - граничне значення струму бази.

Аналіз схем вмикання СВД показує, що схеми на рис. 2.4, в, г, мають більш високу швидкодію та є генераторами напруги, отже струм через СВД в них визначається опором резистора навантаження.

Визначення параметрів СВД, звичайно, проводиться з використанням фотоприймальних пристроїв.

На рис. 2.5 зображена одна з найпростіших схем для дослідження режимів роботи і параметрів СВД.

При підключенні СВД до джерела живлення, на нього подається напруга  $U_{вх}$ , величина якої може змінюватися зміною величини опору  $R_n$ .

Струм  $I_o$ , який протікає крізь СВД, визиває його свічення.

СВД оптично зв'язаний з фоторезистором (ФР)  $R_\phi$  і тому, при включенні СВД, опір ФР понижується з деякою постійною часу доки струм  $I_{ФР}$ , який протікає крізь ФР, не досягне певного максимуму. Величина цього

струму залежить від інтенсивності випромінювання СВД, внутрішніх властивостей ФР та параметрів його електричного кола.

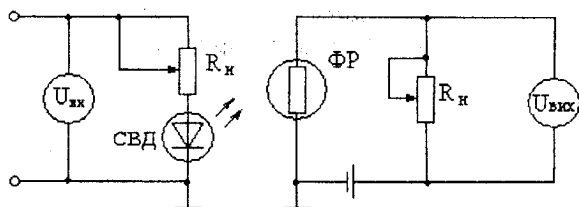


Рисунок 2.5

Використання СВД в імпульсних пристроях дозволяє значно спростити різні схеми автоматики.

На рис. 2.6 зображена схема для дослідження оптоелектронного мультівібратора.

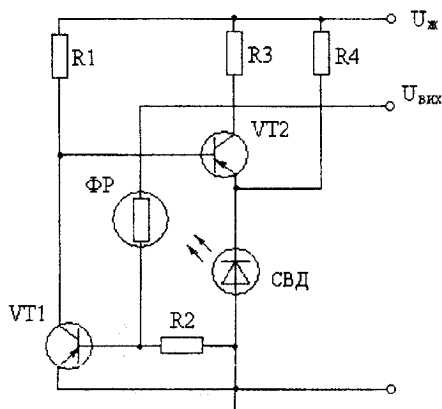


Рисунок 2.6

При підключенні генератора до джерела живлення VT1 закритий через те, що темновий опір фоторезистора великий, а транзистор VT2 відкритий.

Через СВД, який включений в коло транзистора, протікає струм. Цей струм визиває світіння СВД. Останній оптично зв'язаний з фоторезистором і тому опір ФР знижується з деякою постійною часу, доки струм, який протікає через ФР, не буде достатній для відмикання транзистора VT1. Через те, що опір на колекторі відкритого транзистора невеликий, то для відмикання VT1 необхідне значне зменшення нижньої границі частотного діапазону.

При відкриванні транзистора VT1 негативна напруга на його колек-

торі зменшується і при деякому її значенні починається процес замикання транзистора VT2.

В цей час (під час виведення робочих точок транзисторів на активну ділянку характеристик) вступає в дію гальванічний зворотний зв'язок через фоторезистор, який призводить до швидкого переключення схеми. Транзистор VT2 повністю закривається, а VT1 відкривається до насичення.

При включеному СВД опір ФР зростає до того часу, доки струм зміщення, заданий ФР, не виявиться недостатнім для насичення транзистора VT1. Транзистор VT1 закривається, а VT2 відкривається. Потім цикл повторюється.

СВД можуть виготовлятися, як звичайні діоди з  $n$  та  $p$  областями, а також у спеціальному виконанні як структурному, так і конструктивному.

Перспективними є СВД з використанням штучних квантових комірок і надграток. Використання цих елементів обумовлено необхідністю значного зменшення товщини областей СВД, а це необхідно для підвищення швидкості їх переключення.

При певній товщині ділянок в СВД значного впливу набувають квантові розмірні ефекти. В цьому випадку вони починають переважати над хвильовими. Це відбувається тому, що електрон, при певних умовах, може знаходитися у вигляді хвильового пакета, амплітудні максимуми якого і дають ефект квантування.

При зменшенні розмірів ділянок до певної величини, електрони починають вести себе подібно двовимірному газу, тобто в певний момент часу вони визначаються по осях  $Y$  та  $Z$ , а по осі  $X$  розмазані по всій площині. Така надтонка структура являє собою квантову яму або квантову комірку.

В загальному випадку, з цих комірок будуються надгратки, елементи яких можуть бути однаковими або різними за глибиною і товщиною (рис. 2.7).

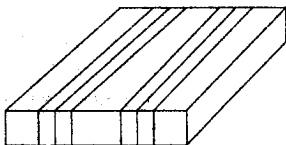


Рисунок 2.7

Такі надгратки призводять до зміни зонної діаграми і появи додаткових дозволених енергетичних станів для електронів. В такий спосіб можна отримати матеріал із зонною структурою будь-якого типу.

Іншим ефектом такої структури є зміна кінетики електронів. Вона проявляється в можливості пробігу електронів між гетерограницями без співударів і без втрати енергії на домішкових атомах.

Технологічними особливостями при виготовленні надграток є те, що внаслідок надтонкості їхніх шарів, вони мають однакові механічні характеристики (однакова механічна напруженість).

Перевагами надграток є також значно більша величина коефіцієнта підсилення хвилі в активному середовищі, зниження рівня порогового струму, збільшення швидкості переключення, можливість переведу непрямоzonних напівпровідників в прямоzonні, можливість зміни довжини хвилі випромінювання.

Але технологічно СВД на надгратках значно складніші за звичайні СВД.

Найбільш проста і дешева плоска конструкція в звичайного СВД. Вона застосовується для СВД, які використовуються в індикаторах і оптронах. Але характеристики СВД таких конструкцій не є задовільними для їх використання в багатьох швидкодіючих приладах.

Покращення характеристик СВД можна досягти за рахунок нанесення верхнього омичного контакту у вигляді вузької смужки.

Виготовляються СВД також у вигляді мезаструктур. Така конструкція складніша за плоску, але вона дає можливість зменшити площу випромінювання і покращити діаграму направленості.

В мезаструктури вставляють фокусуючі лінзи, які виготовляються із спеціальної пластмаси або з напівпровідника.

Конструкції для оптоволоконних ліній зв'язку отримали назву барас-діодів. В них, для виведення світлового потоку в світлодіод, вбудовується скляна шарикова лінза.

Суперлюмінісцентні діоди - це модифікація лазерного діода. Такі прилади працюють не в режимі генерації, а в режимі підсилення біжучої хвилі.

В цьому режимі вихідне випромінювання підсилюється за допомогою спонтанного випромінювання. Цей ефект досягається за рахунок певних конструктивних елементів (сколи, зміна форми на торцях активного середовища та ін.).

## 2.3 Лазери

На відміну від СВД, лазери є когерентними джерелами світла [1-4, 8, 15].

Лазерне випромінювання характеризується такими особливостями:

1. Вузконаправленістю, яка досягається тим, що випромінюються тільки ті хвилі, які багаторазово відбиті від стінок резонатора і не отримали значного відхилення від оптичної осі.

2. Монохроматичністю, яка обумовлюється тим, що вихідне випромінювання є резонансним процесом, який пов'язаний з процесами переходу частинок з одного енергетичного рівня.

3. Можливістю досягнення значної вихідної потужності тому, що в процесі випромінювання одночасно бере участь велика кількість збуджених частинок, а збіг фаз окремих коливань призводить до значного збільшення результуючої амплітуди вихідної хвилі.

4. Просторовою когерентністю, оскільки всі хвильові фронти плоскі і перпендикулярні напрямленню розповсюдження хвилі.

5. Часовою когерентністю, оскільки випромінювання монохроматичне і має чіткі фазові відношення між хвилями, які випромінюються в різні інтервали часу.

В загальному випадку лазерна структура має будову (рис. 2.8)

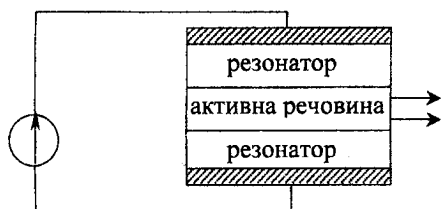


Рисунок 2.8

В активній речовині генерується одно- або багатомодове випромінювання.

Мода - власне коливання електромагнітного поля, яке характеризується певною частотою і особливістю розподілення поля в просторі. Кожній моді відповідає власне значення, яке є постійним комплексним числом, що визначає згасання і фазові набіги - моди.

Отримане випромінювання підсилюється в резонаторі, які бувають кількох типів.

В лінійному резонаторі світлова хвиля відбиваючись від дзеркала, перетворюється в зустрічну хвилю таким чином, що в оптичному середовищі утворюється суперпозиція двох хвиль - стояча хвиля.

В кільцевих резонаторах рух хвилі проходить без повернення по замкнутій траєкторії.

Конфокальним резонатором є оптична система, яка складається з двох відбивачів. В такому резонаторі проходить змінне фокусування лазерного пучка зеркала таким чином, що запасена енергія майже не виходить за межі стінок резонатора, які не є вивідними для випромінювання.

Однією з важливих характеристик резонатора є його добротність  $Q$ , яка визначає властивість резонатора зберігати запасену світлову енергію.

Швидкість дисипації енергії може бути характеризувана часом життя фотона в резонаторі  $T_p$ , яке дорівнює інтервалу, в якому потужність випромінювання при відсутності підсилення зменшується в  $e$  разів.



Час життя фотона  $T_p$  і добротність  $Q$  резонатора на частоті  $\nu$  пов'язані співвідношенням:

$$Q = 2\pi\nu T_p. \quad (2.15)$$

Напівпровідникові лазери мають переваги за рядом параметрів і характеристик перед іншими типами лазерів.

Разом з тим, за рядом важливих характеристик вони суттєво відрізняються від них.

1. В звичайних лазерах квантові переходи відбуваються між дискретними енергетичними рівнями, тоді як в напівпровідникових лазерах переходи обумовлені зонною структурою матеріалу.

2. Просторові і спектральні характеристики випромінювання напівпровідникового лазера сильно залежать від властивостей матеріалу, з якого виготовлений  $p$ - $n$  перехід (найбільше від таких властивостей, як структура забороненої зони і коефіцієнт заломлення).

3. В лазері з  $p$ - $n$  переходом лазерне випромінювання виникає безпосередньо під дією струму, який протікає через прямозміщений діод. В результаті цього система в цілому дуже ефективна, оскільки дозволяє легко здійснити модуляцію випромінювання за рахунок модуляції струму.

Через те, що напівпровідникові лазери характеризуються дуже малим часом стимульованого випромінювання, модуляція може проводитися на високих частотах.

Для зміни параметрів випромінювання використовуються модулятори.

Модуляція - це зміна параметрів випромінювання за заданим законом в часі або просторі.

1. Прості модулятори - це прилади для зміни за заданим законом у часі одного або декількох параметрів (інтенсивність, фаза, частота або поляризація) лазерного випромінювання.

Найпростішими модуляторами є амплітудні.

2. Дефлектори - це прилади для зміни за заданим законом у часі положення пучка лазерного випромінювання.

3. Просторово-часові модулятори - це прилади для зміни за заданим законом у часі просторового розподілу інтенсивності, фази або поляризації пучка лазерного випромінювання.

Вибір типу модуляції визначається типом інформації, яка передається; необхідною глибиною модуляції; потужністю сигналу, який модулює; режимом роботи лазера і т. і.

Основними характеристиками модуляторів є:

- глибина модуляції, яка пов'язана з амплітудним значенням вихідного сигналу:

$$m_{\mu} = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}); \quad (2.16)$$

- спектр промодульованого сигналу, є сумою спектру сигналу до модуляції і сукупності гармонік після модуляції,

$$F_m(\nu) = m_0 F(\nu) + 0.5 \sum_{n=1}^m m_n [F(\nu - n\nu_m) + F(\nu + n\nu_m)]; \quad (2.17)$$

- ККД модуляції, яка визначається як відношення середньої потужності промодульованого сигналу до потужності вхідного сигналу,

$$\eta = P_{cp}/P_{н.} \quad (2.18)$$

Існує два основних типи модуляторів: електрооптичні і магнітооптичні.

### 1. Електрооптичні модулятори.

За допомогою цього типу модуляторів: забезпечується зовнішня модуляція лазерного випромінювання, тобто поза лазерною структурою.

Робота електрооптичної модуляційної системи (рис. 2.9) проходить таким чином.

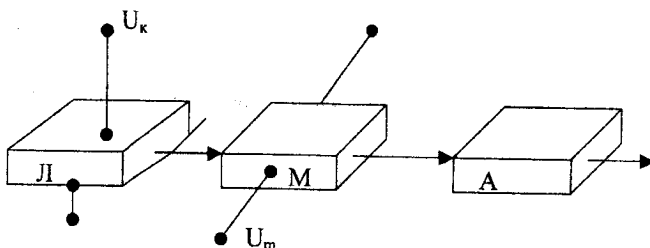


Рисунок 2.9

Під впливом керуючої напруги лазер  $L$  починає випромінювати. Пучок світла з нього попадає в модулятор  $M$ , який працює на ефекті Погкельса.

Зміна напруги  $U_m$  призводить до зміни напруженості електричного поля в ньому. В результаті змінюється фаза вихідного сигналу по відношенню до вхідного.

Аналізатор  $A$  потрібен для того, щоб перетворити зміну фази в зміну інтенсивності випромінювання.

Подібна модуляція, але не така стабільна і не в такому діапазоні може бути проведена і без модулятора - модуляцією керуючої напруги на лазері. Це так звана внутрішня модуляція.

Якщо в схемі (рис. 2.9) до модулятора прикласти певну початкову напругу зміщення, то амплітуда змінної складової і глибина модуляції збільшуються.

Граничні частоти цієї модуляційної системи дорівнюють декільком ГГц.

Якість модуляції характеризується добротністю  $Q_m$ , яка дорівнює відношенню граничної частоти модулятора  $f_{gr}$  до потужності модуляції  $P_m$ .

$$Q_m = f_{gr}/P_m. \quad (2.19)$$

Для сучасних модуляторів така добротність дорівнює 10 ГГц/мВт.

## 2. Магнітооптичні модулятори.

В них взаємодія проходить між потоком світла і магнітним матеріалом, на який діє магнітне поле.

В магнітотуляційній системі (рис. 2.10), як і в електрооптичній, на виході модулятора теж ставиться аналізатор А, а на вході - поляризатор П.

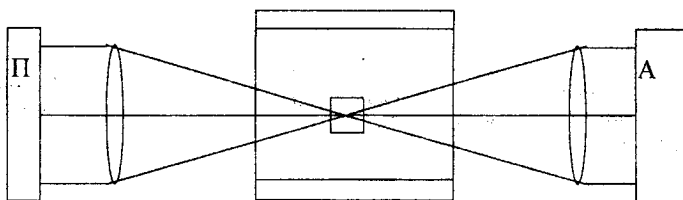


Рисунок 2.10

В магнітооптичних модуляторах при проходженні світла через нього спостерігається поворот площини поляризації променя.

Гранична частота цього типу модуляторів нижча за електрооптичну. До недоліків слід віднести і те, що для його керування потрібна велика напруженість магнітного поля.

Ці всі типи модуляторів можна виготовляти як у вигляді об'ємних приладів, так і в мікроелектронному виконанні. Все більшого поширення набувають тонкоплівкові і напівпровідникові модулятори через те, що фізичні процеси в них такі ж як і в об'ємних, а принцип роботи повністю аналогічний.

Дефлектори - це пристрої для зміни просторового положення променя. Вони отримали широке застосування в голографічних системах.

Серед найбільш поширених типів можна визначити електрооптичні та акустооптичні дефлектори.

Електрооптичні дефлектори - багатокаскадні прилади (рис. 2.11), в кожному каскаді яких відбувається розщеплення променя на два.

Найбільше розповсюдження отримали НПП лазери на кристалах арсеніду галія і твердих розчинах, таких, як  $(Ga+Al)As$ ,  $(Ga+In)As$ ,  $Ga(As+P)$ .

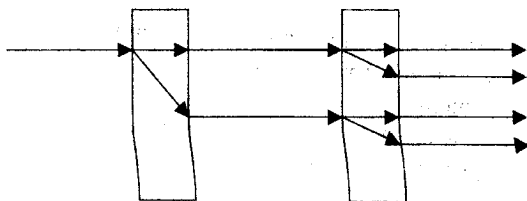


Рисунок 2.11

Потужність випромінювання НПП лазерів обмежена променевою стійкістю і гранично допустимою температурою кристала. Для одноелементних лазерів потужність випромінювання росте практично лінійно із збільшенням струму накачки, досягаючи імпульсної потужності в декілька десятків ват і неперервної потужності - в декілька міліват.

Основною причиною зниження потужності випромінювання лазера є його перегрів.

Використання гетеропереходів і реалізація гетероструктурних НПП лазерів стали можливими завдяки освоєнню епітаксiальної технології вирощування багатшарових структур на основі твердих розчинів GaAs, GeP і т. і.

На основі ізоперіодичного заміщення Ga, Al, As, As створені гетеролазери з довжиною хвилі 1.05...1.3 мкм, в яких використані дво- і багатшарові гетероструктури з зміною  $E$  в досить широких межах (1.43...2.2 eV).

Для покращення характеристик інжекційних лазерів застосовують гетероструктури з декількома гетеропереходами і  $p-n$  переходами. Особливість гетеропереходів полягає в різкому зниженні порогу генерації при кімнатній температурі, який досягається за допомогою так званої двосторонньої гетероструктури типу  $n(\text{Al}, \text{Ga})\text{As}-p\text{GaAs}-p(\text{Al}, \text{Ga})\text{As}$ . Завдяки цьому вдалося вперше отримати неперервну генерацію в інжекційних лазерах при кімнатній температурі.

Успішно застосовується в НПП лазерах і інша аналогічна гетероструктура  $(\text{In}, \text{Ga})(\text{As}, \text{P})$ . Порогова густина струму в такій гетероструктурі приблизно в 20 разів менше, ніж в гомолазерах.

При температурі 300 К такі гетеролазери мають потужність біля 5...7 мВт на довжині хвилі 0.82 мкм, з пороговим струмом збудження до 300 мА.

Ефективність інжекційних лазерів як в імпульсному, так і в безперервному режимах роботи обмежується тепловою дією - умовами нагрівання активного середовища і тепловідводу.

Найбільш перспективними для сучасної інтегральної оптоелектроніки є плівкові лазери з розподіленим зворотним зв'язком. Це НПП лазери

з періодичними просторовими неоднорідностями в плівковому активному мікрохвильоводі.

Такий лазер може бути рідинним на барвниках, волоконних активованих склах або з іншою структурою активного середовища.

Лазер з розподіленим зворотним зв'язком може бути створений в напівпровіднику, де він реалізується найбільш просто.

Принцип дії плівкового лазера з розподіленим зворотним зв'язком полягає в тому, що енергія накачки, у випадку інжекції носіїв, поступає в періодичну просторову структуру, якою може бути або плівковий НПП мікрохвильовід з періодичними неоднорідностями, або накладена на підкладку дифракційна ґратка. Це система локальних резонаторів, в якій збуджуються поверхневі хвилі випромінювання.

Кожний локальний резонатор представляє собою мініатюрний, майже співрозмірний за розмірами з довжиною хвилі генерованого випромінювання, елемент активного середовища. Цей елемент одночасно виконує такі функції: збуджує власні резонансні коливання, здійснює додатний зворотний зв'язок і формує вихідне вимушене коливання.

Збудження таких лазерів здійснюється за допомогою електричної напруги, що дає можливість модуляції вихідного випромінювання на частотах від 20 Гц до 0.1 ГГц з високим ККД.

Потужність їх випромінювання складає до 100 мВт; квантовий вихід дорівнює 0.55; розходимість в неперервному режимі випромінювання біля  $10^0$ ; поріг густини струму інжекції дорівнює 400...800 А/см<sup>2</sup>.

Тривалість імпульсу випромінювання, який генерується в плівковому лазері досягає 30...50 пс при піковій потужності до 1 Вт.

## 2.4 Завдання, контрольні питання та задачі

Метою лабораторних робіт, контрольних питань та задач є набуття практичних навичок в засвоєнні та використанні правил, методів та алгоритмів, які застосовуються для аналізу і визначення параметрів різних типів оптоелектронних приладів.

У відповідності до вимог ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення." [16], звіт про роботу виконується на стандартних аркушах паперу (210 x 297 мм) і повинен вміщувати:

1. Титульний аркуш (за формою).
2. Мету роботи.
3. Основні паспортні і технічні дані об'єкта, що досліджується, та вимірювальних приладів.
4. Хід роботи у вигляді короткого опису методики дослідження та лабораторного стенда (схеми вимірювання).
5. Результати досліджень (у вигляді таблиць та графіків).
6. Розрахунки за результатами досліджень.

7. Висновки по роботі.
8. Перелік використаної літератури.

На попередній лабораторній роботі студенти повинні отримати завдання на наступну роботу. За тематикою отриманого завдання, навчитися проводити інформаційні дослідження, визначати задачу досліджень і під час самостійної підготовки:

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по роботі.

2. Вивчити умовні позначення, маркування, параметри і характеристики основних типів оптоелектронних і вимірювальних приладів, які використовуються в роботі.

3. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

### Робота 1. Дослідження СВД.

Мета роботи:

Вивчення основних фізичних принципів функціонування інжекційних світлодіодів та дослідження їх характеристик.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по даній роботі.

2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів СВД і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.

3. Привести паспортні дані для СВД, які можуть використовуватися в схемі досліджень.

Наприклад.

Тип приладу: ЛЗ07АМ (рис. 2.12).

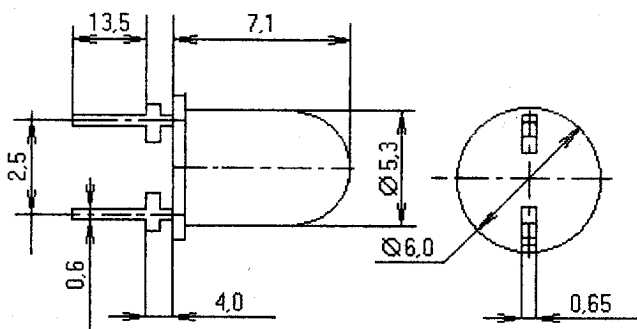


Рисунок 2.12

Колір свічення: червоний

$L_{\min}$ , нм: 650

$L_{\max}$ , нм: 675

$I_v$ , мКд: 0,15 при  $I_{пр}$ , мА: 10

$U_{пр\ max}$ , В: 2

$U_{зв\ max}$ , В: 2

$I_{\text{пр max}}$ , МА: 22

$I_{\text{пр и max}}$ , МА: 100 при  $t_{\text{н}}$ , мс: 2 і Q: 10

$T^{\circ}$ , С: -60...+70°

4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Скласти схему досліджень (рис. 2.5)

3. Дослідити залежність амплітуди вихідного сигналу  $U(I)_{\text{вих}}$  від величини напруги живлення  $U_{\text{вх}}$  при постійній температурі  $T = \text{const}$  на СВД та зміні температури  $T = \text{var}$ , при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$  (границі змін  $U_{\text{вх}}$  і  $T$  вказуються на стенді).

4. Побудувати графіки  $U(I)_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$  та  $U(I)_{\text{вих}} = f(T)$ .

5. Провести вказані викладачем розрахунки параметрів СВД.

6. Пояснити отримані результати.

7. Відповісти на контрольні питання.

## **Робота 2. Дослідження пристроїв на основі СВД.**

Мета роботи:

Вивчення основних принципів функціонування та дослідження оптоелектронного мультивібратора.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по даній роботі.

2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів СВД і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.

3. Привести паспортні дані для СВД, які можуть використовуватися в схемі досліджень.

4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Скласти схему досліджень (рис. 2.6), підключивши до її виходу осцилограф та вольтметр.

2. Знайти паспортні дані для СВД, які використовуються в схемі досліджень і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.

3. Дослідити залежність частоти  $f$  і амплітуди коливань  $I_{\text{вих}}$  ( $U_{\text{вих}}$ ) оптоелектронного мультивібратора від величини напруги живлення (границі змін  $U_{\text{вх}}$ ).

4. Побудувати графіки  $I_{\text{вих}} = f(U_{\text{н}})$ ,  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{н}})$ .

5. Дослідити залежність частоти і амплітуди коливань  $U_{\text{вих}}$  оптоелектронного мультивібратора при зміні величини  $R_{33}$ .

6. Побудувати графіки  $I_{\text{вих}} = f(R_{33})$ ,  $U_{\text{вих}} = f(R_{33})$ .

7. Пояснити отримані результати.

8. Відповісти на контрольні питання.

## **Контрольні питання з першої і другої робіт:**

1. Пояснити хід досліджень в роботі.

2. В чому полягає відміна структури СВД від інших напівпровідни-

кових діодів?

3. Пояснити фізичні принципи електролюмінесценції на прямозміщеному  $p-n$  переході.
4. Пояснити характеристики і параметри СВД.
5. Як впливає температура на інтенсивність вихідного світлового потоку СВД?
6. Основні переваги і недоліки різних схем вмикання СВД.
7. Види СВД, їх недоліки і переваги.
8. Які фізичні процеси лежать в основі роботи СВД?
9. Визначити основні особливості випромінювальних діодів на основі гетероструктур.
10. Дати визначення оптичним параметрам СВД.
11. Чим відрізняються джерела когерентного і некогерентного випромінювання?

### Робота 3. Дослідження інжекційних лазерів.

Мета роботи:

Вивчення основних фізичних принципів функціонування та характеристик напівпровідникових лазерних випромінювачів.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по даній роботі.
2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів лазерів і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.
3. Привести паспортні дані для лазерів, які можуть використовуватися в схемі досліджень.
4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Скласти схему досліджень (рис. 2.13)

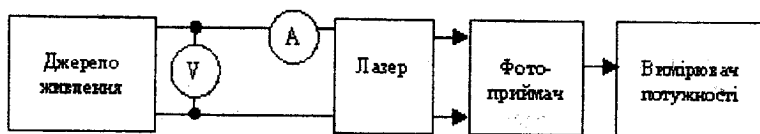


Рисунок 2.13

2. Знайти паспортні дані для лазера, який використовується в схемі досліджень, та вимірювача потужності і ознайомитися з їх параметрами, характеристиками та умовами використання.

В роботі може використовуватися вимірювач середньої потужності і енергії лазерного випромінювання ИМО-2Н призначений для вимірювання середньої потужності лазерного випромінювання безперервних і імпульсних лазерів з частотою повторення не менш 5 Гц при максимальній



щільності потужності не більше  $3 \text{ Вт/см}^2$  і енергії лазерного випромінювання в вільному режимі при тривалості імпульсів не менш  $0.1 \text{ мс}$  і максимальної щільності не більш  $20 \text{ Дж/см}^2$ .

Прилад використовується при таких параметрах лазерного променя:

середня потужність, Вт	$3 \cdot 10^{-4} \dots 100$ ,
енергія, Дж	$3 \cdot 10^{-3} \dots 10$ ;
діаметр пучка, мм	$4 \dots 12$ ;
діапазон довжин хвиль, мкм	$0.4 \dots 10.6$ ;
граничний кут падіння, град	2.

Склад приладу наведений на рис. 2.14, де 1 - блок реєстрації; 2 - голівка вимірювальна; 3 - послаблювач потужності; 4 - візир; 5 - механізм юстирування.

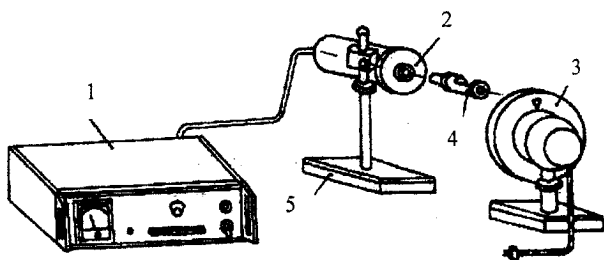


Рисунок 2.14

Принцип роботи приладу ИМО-2Н полягає в поглинанні приймальним елементом потужності (енергії) лазерного випромінювання і перетворенні її у еквівалентне значення термо-ЕРС, значення якої фіксується приладом блоку реєстрації.

Блок реєстрації містить голівку вимірювальну і підсилювач постійного струму, необхідний для підсилення сигналу з термобатареї. В якості реєструючого приладу (далі Р1) використовується прилад М 2027, відградуований в одиницях вимірювання потужності Вт і енергії Дж. Перемикач S1 служить для встановлення необхідного режиму роботи, кнопковим перемикачем S1 - 1..S1 - 7 виставляється необхідна межа вимірювань.

Для встановлення нуля Р1 блоку реєстрації на передній панелі розташована ручка плавної установки нуля, а на задній панелі - резистор грубої установки нуля. В блоці реєстрації є також можливість виведення інформації на зовнішній пристрій.

Для вимірювання середньої потужності лазерного випромінювання від 1 до 100 Вт передбачене використання дискового послаблювача потужності, який встановлюється на шляху пучка лазерного випромінювання.

Величина коефіцієнта послаблення потужності пучка лазерного випромінювання визначається числом секторних вікон і величиною кута се-

ктора. Змінні диски забезпечують додаткові межі вимірювання середньої потужності лазерного випромінювання 3, 10, 30 і 100 Вт.

Процес вимірювання приладом полягає у відліку сталого показу P1 при подачі на вхід приладу безперервного лазерного випромінювання, у відліку максимального показу у P1 при подачі на вхід вимірювальної головки імпульсу лазерного випромінювання. При цьому пучок лазерного випромінювання, що попадає в робочу секцію, викликає нагрівання приймального елемента і відповідно "гарячих" сплавів термобатареї. Термоелектричний струм, що виникає при цьому, реєструється блоком реєстрації.

В режимі калібрування вимірюється термоелектричний струм, який пропорційний потужності, що виділяється в нагрівачі термоелектричної секції від дії струму калібрування.

Конструктивно прилад виконаний у виді трьох блоків. Блок реєстрації вимірювача виготовлений у вигляді настільного переносного приладу. Головка вимірювальна з юстирувальним механізмом може встановлюватися на оптичній лаві типу ОСК-2 чи на столі. Послаблювач потужності, як і головка вимірювальна, може встановлюватися на оптичній лаві або на столі.

До експлуатації приладу допускаються особи, які вивчили дану інструкцію.

При експлуатації приладу повинні дотримуватися вимоги ГОСТ 24469-80.

При юстируванні приладу і вимірюваннях не можна допускати попадання відблисків, відбитих від кришок вхідних вікон, кожуха вимірювальної головки і дисків послаблювача в очі оператора.

Не допускаються установка і переміщення послаблювача потужності при ввімкненому електродвигуні.

Запобіжник треба замінити при відключеному від мережі приладі.

При роботі перемикач роду робіт і меж вимірювання встановити в необхідний режим. Встановити нуль приладу. Подати на головку вимірювальну пучок лазерного випромінювання і зробити відлік показів P1.

При вимірюванні середньої потужності відраховують сталі покази P1, при вимірюванні енергії імпульсів - максимальний показ P1.

При вимірюваннях середньої потужності на межах 3, 10, 30 і 100 Вт встановити послаблювач потужності з відповідним диском перед вхідним вікном вимірювальної головки таким чином, щоб вісь пучка лазерного випромінювання проходила поблизу середньої лінії секторних вирізів диску; встановити перемикач меж вимірювання в положення "1 Вт", включити електродвигун дискового ослаблювача, подати лазерне випромінювання на головку вимірювальну і зробити відлік. Для отримання дійсного значення середньої потужності при вимірюваннях помножити показання блоку реєстрації на величину коефіцієнта послаблення диска, зазначену в паспорті приладу.

При роботі з приладом необхідно робити калібрування через кожну годину роботи приладу.

3. Дослідити залежність потужності вихідного сигналу  $P_{вих}$  приймача від величини струму накачки  $I_n$  лазера при постійній температурі  $T = \text{const}$  на лазері та температури  $T$  при  $I_n = \text{const}$  (границі змін  $I_n$  і  $T$  вказані на стенді).

Для відключення приладу необхідно: перемикачі режиму роботи і меж вимірювання встановити в положення "АРРЕТИР" і "10 Дж", вимикач мережі блоку реєстрації встановити в нижнє положення, відключити прилад від мережі і закрити кришкою вікно головки вимірювальної.

4. Побудувати графіки  $P_{вих} = f(I_n)$  при  $T = \text{const}$  та  $P_{вих} = f(T)$  при  $I_n = \text{const}$ .

5. Провести вказані викладачем розрахунки параметрів лазера.

6. Пояснити отримані результати.

7. Відповісти на контрольні питання.

#### Робота 4. Дослідження оптичних випромінювачів.

Мета роботи.

Вивчення основних принципів функціонування та просторових характеристик оптичних випромінювачів.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями з даної роботи.

2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів лазерів і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.

3. Привести паспортні дані для лазерів, які можуть використовуватися в схемі досліджень.

4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Скласти схему досліджень (рис. 2.15).

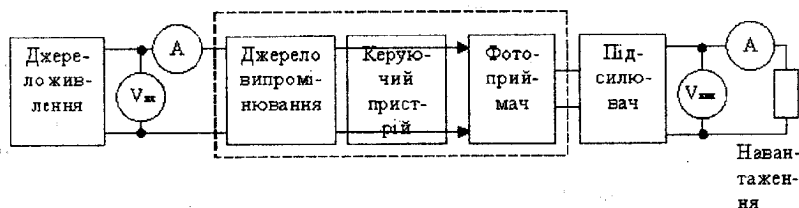


Рисунок 2.15

2. Знайти паспортні дані для випромінювача, який використовується в схемі досліджень і ознайомитися з його параметрами та характеристиками.

3. Дослідити залежність амплітуди вихідного сигналу  $U(I)_{вих}$  від напруги живлення  $U_{вх}$  і опору зворотного зв'язку підсилювача при  $\theta = 0$  (границі змін  $U_{вх}$  вказані на стенді).

4. Дослідити залежність амплітуди вихідного сигналу  $U(I)_{вих}$  від величини кута спрямованості  $\theta$  при  $U_{вх} = \text{const}$  і  $R_{33} = \text{const}$ .

5. Побудувати графіки  $U(I)_{вих} = f(U_{вх})$ ,  $I_{вих} = f(R_{33})$ ,  $U_{вих} = f(R_{33})$  при  $\theta = \text{const}$  і  $U_{вх} = \text{const}$ .

6. Побудувати діаграму спрямованості випромінювача  $U(I)_{вих} = f(\theta)$ .

7. Пояснити отримані результати.

8. Відповісти на контрольні питання.

### Робота 5. Дослідження пристроїв керування оптичним випромінюванням.

Мета роботи.

Вивчення основних принципів функціонування пристроїв керування оптичним випромінюванням.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями з даної роботи.

2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів лазерів і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.

3. Привести паспортні дані для лазерів, які можуть використовуватися в схемі досліджень.

4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Скласти схему досліджень (рис. 2.16).

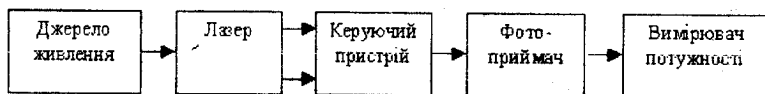


Рисунок 2.16

2. Вивчити паспортні дані для випромінювача і вимірювача, які використовуються в схемі досліджень і ознайомитися з його параметрами та характеристиками.

В роботі може використовуватися лазер газовий ЛГ-78 атомарний (гелій-неоновий) із збудженням поздовжнім тліючим розрядом, немодульований, багатомодовий, який призначений для роботи як джерело монохроматичного випромінювання в показниках напрямку, системах зчитування інформації і для юстирування складних оптичних систем.

Лазер ЛГ-78 складається з випромінювача - лазера ЛГ-78 і джерела живлення БП-2.

Випромінювач ЛГ-78 складається з оптичного резонатора і активного елемента, зібраних в єдину нерозбірну систему, що за допомогою компаунда закріплена в алюмінієвому корпусі, закритому з двох сторін кришками. До корпусу в задній частині прикріплений блок баластових опорів.

Оптичний резонатор утворений двома сферичними дзеркалами з діелектричним покриттям.

Збудження активного середовища (гелію і неону) в активному елементі з холодним катодом здійснюється розрядом постійного струму.

Напруга живлення підводиться до активного елемента по кабелю, що приєднується за допомогою роз'єму до джерела живлення БП-2.

Джерело живлення БП-2 є комбінованим джерелом, що складається з двох послідовно з'єднаних випрямлячів: випрямляча живлення і випрямляча підпалу.

Джерело живлення БП-2 виконане у вигляді настільного переносного блоку. На його лицьовій панелі розташовані органи керування, сигналізації і вимірювань:

- тумблер S3 «Сеть» — «Выкл.»;
- ручка перемикача S1 «Регулирование тока»;
- міліамперметр РА1;
- сигнальна лампочка HL1.

На задній стінці розташовані:

- мережний роз'єм ХС1 — «220 В»;
- високовольтний роз'єм ХС3 — «Выход»;
- запобіжник FP1 — 0,5А;
- клема ХС2 «1».

При виконанні роботи необхідно дотримуватися правил безпеки.

Працювати з газовим лазером ЛГ-78 дозволяється тільки при заземленому джерелі живлення БП-2.

Порядок установки лазера.

Розмістити випромінювач ЛГ-78 і джерело живлення так, щоб відстань між ними дозволяла з'єднати їх кабелем.

Перевірити відсутність механічних ушкоджень кабеля і з'єднати випромінювач ЛГ-78 із джерелом живлення.

Порядок ввімкнення лазера.

Ввімкнути вилку мережного шнура в розетку.

Встановити перемикач «Регулирование тока» в положення “у”.

Ввімкнути тумблер «Сеть» — «Вкл.».

Встановити перемикач «Регулирование тока» в таке положення, щоб струм по міліамперметру не перевищував 5 мА. При відсутності міліамперметра на джерелі живлення установити перемикач у найбільше крайнє ліве положення, що забезпечує стійку генерацію.

3. Дослідити залежність вихідного сигналу  $P$  приймача від величини кута поляризації  $P_{вих} = f(\alpha)$ , використовуючи в якості керуючого пристрою поляризатор.

4. Дослідити залежність вихідного сигналу  $P$  приймача при зміні спектральної характеристики випромінювання  $P_{вих} = f(\nu)$ , використовуючи в якості керуючого пристрою різні світлофільтри.

Порядок вимкнення лазера.

Вимкнути тумблер «Сеть» — «Вкл».

Вийняти вилку мережного шнура з розетки.

5. Побудувати графіки  $P_{вих} = f(\alpha)$  і  $P_{вих} = f(\nu)$ .

6. Пояснити отримані результати.

7. Відповісти на контрольні питання.

**Контрольні питання по третій, четвертій і п'ятій роботах:**

1. Пояснити хід досліджень в роботі.

2. Пояснити фізичні принципи лазерної оптичної генерації.

3. В чому полягає відміна структури інжекційних лазерів від інших?

4. Які основні характеристики і параметри лазерів?

5. Як впливає температура активного середовища на інтенсивність вихідного світлового потоку лазера?

6. Вказати основні переваги і недоліки різних типів лазерів.

7. В чому полягає відміна газових лазерів від інших?

8. Визначте умови лазерного підсилення в інжекційному лазері.

9. Як відбувається модуляція лазерного випромінювання?

10. Поясніть принцип дії основних типів оптичних модуляторів.

11. Які є види оптичних резонаторів і який їх принцип дії?

## 3 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ФОТОПРИЙМАЧІ

### 3.1 Загальні положення

Фотоприймачі (ФП) - це такі оптоелектронні прилади, принцип дії яких оснований на явищах, що пов'язані з поглинанням оптичного випромінювання, і які призначені для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію [1-4, 8, 9-14, 17-19].

Сучасні ФП представляють собою напівпровідникові прилади, в яких змінюється електричний режим роботи під дією оптичного опромінювання. Зміна електрофізичних параметрів ФП обумовлена виникненням додаткових вільних носіїв заряду в напівпровіднику під впливом дії оптичних сигналів. Носії електричного заряду, що генеруються в напівпровіднику під дією оптичного опромінювання, називають фотоносіями.

Дія більшості фоточутливих напівпровідникових приладів основана на поглинанні енергії випромінювання валентними електронами власних атомів кристала. Мінімальна енергія фотона, яку повинен поглинути електрон валентної зони, щоб перейти до зони провідності, відповідає ширині забороненої зони напівпровідника  $E_g$ .

В оптоелектроніці найбільш поширені ФП із внутрішнім фотоелектром, який пов'язаний з інерційністю носіїв заряду при поглинанні світла.

Внутрішнім або фотоелектричним ефектом називається процес виникнення додаткових носіїв заряду (фотоносіїв) в напівпровіднику під дією оптичного опромінювання.

Широке застосування ФП із внутрішнім фотоелектом пов'язане з такими показниками:

1. Високою ефективністю перетворення оптичної енергії в електричну.
2. Широкими функціональними можливостями.
3. Можливістю внутрішнього підсилення.
4. Високою швидкістю.

Властивості ФП, які задаються розробниками, перш за все залежать від параметрів та характеристик оптичних генераторів. Тому, за частотними характеристиками ФП завжди підбираються до них.

Усі фотометричні параметри ФП виявляються при його опромінюванні світловим потоком  $\Phi$ , величина якого визначається в лм.

В ІЧ області спектру потік випромінювання вимірюється у ваттах, а у видимій області використовують поняття світлового потоку, який вимірюється в люменах.

Зв'язок між світловим потоком  $\Phi$  і потужністю потоку монохроматичного опромінювання  $P_o$  визначається залежністю:

$$P_o = \Phi/K, [\text{Вт}], \quad (3.1)$$

де коефіцієнт  $K$  (лм/Вт) залежить від довжини хвилі і називається фотометричним еквівалентом опромінювання чи функцією спектральної чутливості.

Щільність потоку опромінювання вимірюють в Вт/м<sup>2</sup>. У видимій області їй відповідає освітленість  $E$ :

$$E = \Phi/A, [\text{лк}, 1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2], \quad (3.2)$$

де  $A$  - площа поверхні ФП, яка освітлюється, м<sup>2</sup>.

Розглянемо основні параметри та характеристики ФП.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ), яка має вигляд аналогічний ВАХ базового приладу.

Загальний світловий струм  $I$  у ФП складається з двох частин:

$$I = I_T + I_\Phi, \quad (3.3)$$

де  $I_T$  - темновий струм (струм при відсутності освітлення) - це струм, що проходить через ФП при вказаній напрузі на ньому при відсутності потоку випромінювання в діапазоні спектральної чутливості;  $I_\Phi$  - фотострум (додатковий струм через ФП, який виникає при його освітленні);

Спектральна характеристика, яка визначає реакцію ФП на дію опромінювання з різною довжиною хвилі. Вона визначає спектральну область застосування приймача, а також його спектральну й інтегральну чутливість.

Максимум спектральної характеристики ФП - довжина хвилі, що відповідає максимуму чутливості ФП.

Питома чутливість ФП  $S_0$  визначається як відношення фотоструму  $I_\Phi$  до добутку величин світлового потоку  $\Phi$ , що падає на фоточутливу поверхню ФП, і прикладеної до нього напруги  $U$ :

$$S_0 = I_\Phi / (\Phi \cdot U). \quad (3.4)$$

Інтегральна чутливість ФП  $S_i$  показує, на скільки зміниться фотострум при зміні світлового потоку на 1 лм, і визначається за формулою:

$$S_i = \Delta I_\Phi / \Delta \Phi. \quad (3.5)$$

Інтегральна струмова фоточутливість визначає значення фотоструму, що задається одиничним значенням потоку опромінювання  $\Phi$ :

$$S_i = (I - I_T) / \Phi, [\text{А/лк або А/Вт}]. \quad (3.6)$$

Вольтова фоточутливість характеризує значення сигналу у вольтах, відносно до одиниці падаючого потоку випромінювання:



відносно до одиниці падаючого потоку випромінювання:

$$S_1 = (U - U_T) / \Phi, [B/лк \text{ або } B/Вт]. \quad (3.7)$$

де  $U$  та  $U_T$  - відповідно загальна та темнова напруги на ФП.

Для порівняння величини фотопровідності різних напівпровідникових матеріалів використовують відношення фотопровідності  $\sigma_\phi$  до інтенсивності світла  $I_c$ , що визначає питому фоточутливість напівпровідника:

$$S_0 = \sigma_\phi / I_c, \quad (3.8)$$

Частотні характеристики визначають залежність фоточутливості від частоти модуляції світла. Вони є характеристикою інерційності ФП

Інерційність ФП характеризується постійними часу фронту наростання  $\tau_n$  і спаду  $\tau_{cn}$  фотовідповіді при імпульсному засвіченні. Ними визначаються граничні робочі частоти модуляції світла, при яких ще не відбувається помітного зменшення фотовідповіді.

Залежність фотоструму від потоку опромінювання називають світловою або енергетичною характеристикою ФП. Вона відображує залежність фотовідповіді від інтенсивності збуджувального потоку опромінювання і може бути ампер-ватна, вольт-ватна, люкс-амперна та люмен-амперна.

Типові світлові характеристики ФП показано на рис. 3.1.

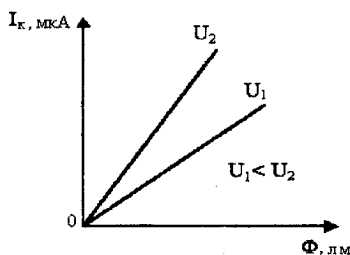


Рисунок 3.1

Динамічний діапазон лінійності ФП (в децибелах) характеризує область значень променевого потоку  $\Phi$  (від  $\Phi_{max}$  до  $\Phi_{min}$ ), для якого енергетична характеристика лінійна.

Енергетичною характеристикою називають також залежність інтегральної чи спектральної чутливості від інтенсивності засвічення.

Спектральна характеристика ФП, це залежність фотоструму від довжини хвилі випромінювання, що падає на нього. Наприклад, для кремнію та германію вона має вигляд (рис. 3.2).

Границя спектральної характеристики зі сторони більших довжин хвиль визначається шириною забороненої зони, а короткохвильова границя залежить від товщини області, що опромінюється, і швидкості поверхневої рекомбінації.

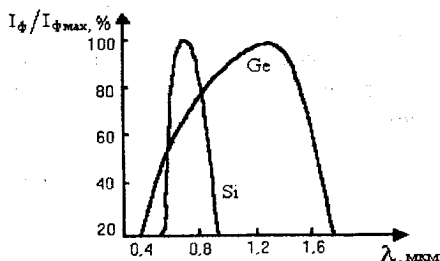


Рисунок 3.2

Положення максимуму спектральної характеристики залежить від швидкості зростання коефіцієнта поглинання  $\alpha$  із зменшенням довжини хвилі. При більш швидкому його зростанні, максимум характеристики лежить ближче до довгохвильової границі і слабо залежить від товщини області, що опромінюється.

Короткохвильова (довгохвильова) границя спектральної чутливості - це найменша (найбільша) довжина хвилі монохроматичного випромінювання, при якому монохроматична чутливість ФП дорівнює 0.1 її максимального значення.

Інтенсивність поглинання випромінювання в напівпровідниках зменшується за експонентою при проходженні світлового потоку  $\Phi$  вглиб кристалу:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-(\alpha \cdot x)}, \quad (3.9)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання ( $\text{см}^{-1}$ );  $\Phi_0$  - світловий потік, що падає на фоточутливу поверхню ФП (лм).

Температурні характеристики визначають залежність ряду параметрів (темновий струм, темновий опір, чутливість та ін.) від температури навколишнього середовища.

Темновий опір  $R_T$  - це опір ФП у відсутності падаючого на нього випромінювання в діапазоні його спектральної чутливості.

Температурний коефіцієнт фотоструму визначається співвідношенням:

$$TK = [(I_{\phi 2} - I_{\phi 1}) / I_1 (T_2 - T_1)] 100\%, \quad (3.10)$$

де  $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}$  - фотоструми при температурах  $T_1$  і  $T_2$ , відповідно.

Розігрів ФП визначається потужністю розсіювання  $P$ , що виділяється

ся при проходженні фотоструму. Некероване збільшення цієї потужності може привести до незворотної зміни струмів  $I_T$  та  $I_\phi$ .

Кожен ФП характеризується визначеним значенням максимальної потужності розсіювання  $P_{max}$ , яке не повинно перевищуватися. Значення  $P_{max}$  залежить від умов тепловідведення, розмірів робочої поверхні та інших робочих факторів.

Важливими властивостями ФП є стабільність, тобто здатність зберігати фотоелектричні параметри у визначених границях протягом заданого часу, і довговічність, тобто здатність довготривалої роботи у визначеному режимі при умові збереження фотоелектричних параметрів в межах норм ТУ.

Як правило, в якості критеріїв оцінки стабільності і довговічності виступають темновий струм і чутливість (для фотодіодів) і темновий опір (для фоторезисторів).

Робоча напруга ФП  $U$  - це постійна напруга, яка повинна прикладатися до ФП і при якій забезпечуються номінальні параметри при довготривалій роботі у заданих експлуатаційних умовах. Її вибирають із запасом по відношенню до пробивної напруги.

Максимально допустима напруга  $U_{max}$  - це максимальне значення постійної напруги, при якому відхилення параметрів приладу від номінальних значень не перевищує встановлених границь. При роботі в імпульсному режимі  $U_{max}$  може бути збільшено.

Диференціальний опір  $R_d$  характеризується відношенням мінімально можливих приростів напруг і струмів на ФП.

Порогові характеристики описують здатність ФП реагувати на світлові сигнали слабкої інтенсивності. В значній мірі ці характеристики визначаються власними шумами приладу, що являють собою флуктуації струму, який проходить через нього при відсутності засвічення або при дії немодульованого світлового потоку.

Основними власними шумами фотоелементів є тепловий шум, дробовий (генераційно-рекомбінаційний), струмовий і радіаційний.

Тепловий шум є білим і проявляється у вигляді неупорядкованих коливань на виводах ФП. Напругу цього шуму можна зменшити навантаженням приймача узгодженим опором.

Дробовий шум визначається флуктуацією концентрації та часу життя носіїв заряду. На низьких частотах ( $f \ll 1/2\pi\tau$ ) дробовий шум є білим.

До складу струмового чи залишкового шуму входять модуляційні і контактні шуми.

Радіаційний шум обумовлений випадковими флуктуаціями потоку випромінювання. Спектр потужності радіаційного (фотонного) шуму має постійну амплітуду, що слабо залежить від частоти.

Напруга шуму ФП  $U_{ш}$  - це середнє квадратичне значення флуктуації напруги на заданому навантаженні в колі ФП у смузі частот, що вказа-

на.

Струм шуму ФП  $I_{ш}$  - це середнє квадратичне значення флуктуації струму, який проходить через ФП у смузі частот, що вказана.

Порогова чутливість ФП  $P_{пор}$  визначає рівень потужності світлового потоку, при якому вихідний сигнал дорівнює шумовому.

Питання, якими шумами можна знехтувати при розрахунку порогової чутливості ФП, вирішується з врахуванням спектрального розподілу шумів.

Напруга шуму пропорційна напрузі, яка прикладена до приймача, і опору навантаження. Внаслідок цього, значення напруги шуму, яке обговорюється в ТУ на ФП, повинне розглядатися як величина, що характерна для чітко визначеного режиму включення приладу, коли відомі напруга на ньому, опір навантаження і рівень засвічення.

Як і темновий струм, шуми в ФП сильно залежать від температури навколишнього середовища.

Багатоелементні ФП повинні характеризуватися коефіцієнтом фотоелектричного зв'язку  $K_{фз}$ , який визначається як відношення напруги сигналу з неопроміненого елемента, в багатоелементному ФП, до напруги фотосигналу сусіднього опроміненого елемента, що визначається на лінійній ділянці енергетичної характеристики та при робочій напрузі на всіх елементах.

### 3.2 Фоторезистори

Фоторезистори (ФР) - це найпростіші і, відповідно, найбільш розповсюджені фотоперетворювачі. Найбільшого поширення отримали ФР, світлочутлива область яких виконана з напівпровідникового матеріалу, де зміна електропровідності відбувається при зміні режиму освітлення [1, 4, 11-13, 17].

Крім напівпровідників, для створення світлочутливої області, можуть застосовуватися і інші світлочутливі матеріали. Так, для видимої частини спектру широко використовуються матеріали на основі кадмію.

Конструктивно ФР найчастіше виконується з провідної пластини, на протилежних кінцях якої створені омичні контакти (рис. 3.3).

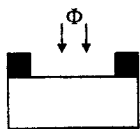


Рисунок 3.3

При освітленні, в ФР генеруються носії електричного заряду внаслідок або міжзонних переходів, або переходів з участю енергетичних рівнів у забороненій зоні, що призводить до збільшення кількості носіїв за-

ряду і, відповідно, до збільшення провідності резистора.

Провідність напівпровідника можна збільшити за рахунок внесення атомів інших елементів. При введенні в ґратку напівпровідника домішок виникає домішкова електронна провідність. При внесенні атомів з меншою валентністю, наприклад легуванні германію тривалентним індієм, або бором, в місці знаходження атома домішки виникає зайва дірка і з'являється додаткова діркова провідність.

В домішковому ФР фотозбудження може відбуватися між краєм зони і енергетичним рівнем в забороненій зоні.

Фотопровідність може виникати в результаті поглинання фотонів з енергією, яка рівна чи перевищує енергію, що відділяє домішковий рівень від зони провідності чи валентної зони. При цьому довгохвильова границя визначається глибиною залягання домішкового рівня в забороненій зоні.

Електрон переходить з валентної зони в зону провідності під дією світла, визиваючи внутрішній фотоэффект.

Беручи до уваги вищенаведене, можна прийти до висновку, що основною характеристикою ФР є світлова.

Світлова характеристика ФР - це залежність фотоструму від освітленості світлочутливої поверхні ФР, при постійній напрузі на ньому.

Світлові характеристики для різних матеріалів і різних частот різні, що видно з аналізу рис. 3.2.

На рис. 3.4 наведена світлова характеристика для кремнієвого ФР.

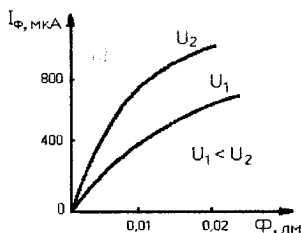


Рисунок 3.4

Як видно з рисунку вона нелінійна, але ФР, як правило, використовують на її лінійній ділянці, підбираючи відповідне зовнішнє зміщення.

Спектральна характеристика ФР (рис. 3.2) теж залежить від матеріалу, з якого виготовлений фотоприймач.

Оптичні властивості ФР достатньо повно можуть визначатися трьома параметрами: квантовою ефективністю, часом фотовідповіді і чутливістю. Всі вони залежать від процесів, що протікають в матеріалі ФР під дією опромінювання. Розглянемо їх.

Нехай в початковий момент часу  $t = 0$  число носіїв заряду, що виникає в одиниці об'єму, за рахунок генерації потоком фотонів, дорівнює  $n_0$ . В цьому випадку концентрація носіїв  $n$  буде визначатися за формулою:

$$n = n_0 \cdot e^{(-t/\tau)}, \quad (3.11)$$

де  $\tau$  - час життя носіїв.

Швидкість рекомбінації нерівноважних носіїв дорівнює  $1/\tau$ .

Якщо потік фотонів постійний і розподілений рівномірно по поверхні ФР, то загальне число фотонів, що падають на поверхню в одиницю часу дорівнює:

$$n_{\phi} = P_0/h\nu. \quad (3.12)$$

Зв'язок між потужністю монохроматичного опромінювання  $P_0$ , що падає на одиницю поверхні, і числом фотонів, що падають на одиницю поверхні з площею  $A$  в одиницю часу, відповідає співвідношенню:

$$\begin{aligned} n_{\phi A} &= P_0/(A \cdot E_{\phi}) = P_0 \cdot \lambda / (A \cdot h \cdot c) = \\ &= P_0 \cdot \lambda / (A \cdot 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8) = 5 \cdot 10^{24} \cdot \lambda \cdot P_0 / A, \quad [\text{фотон}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})], \end{aligned} \quad (3.13)$$

де  $E_{\phi}$  - енергія фотона, Дж;  $\lambda$  - довжина хвилі випромінювання, м;  $P_0$  - потужність опромінювання, Вт.

Об'ємна швидкість поглинання фотонів в напівпровіднику визначається:

$$v_n = \alpha \cdot n_{\phi A}(x), \quad [\text{фотонів}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})]. \quad (3.14)$$

Число вільних носіїв заряду у випадку домішкового поглинання або число електронно - діркових пар у випадку власного поглинання створене одним фотоном називають внутрішнім квантовим виходом  $\beta$ .

Об'ємна швидкість генерації носіїв по глибині потоку випромінювання визначається:

$$g(x) = v_n \cdot \beta = \alpha \cdot \beta \cdot n_{\phi A}(x), \quad [\text{носії}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})]. \quad (3.15)$$

Якщо коефіцієнт поглинання  $\alpha$  і товщина опроміненої області  $\omega$  малі, то добуток  $\alpha \cdot \omega \ll 1$  і об'ємна швидкість генерації носіїв в області  $\omega$  практично не залежить від  $x$ :

$$g = \alpha \cdot \omega \cdot \Phi_0. \quad (3.16)$$

Якщо коефіцієнт поглинання великий і добуток  $\alpha \cdot \omega \gg 1$ , то випромінювання поглинається поблизу поверхні. Це характерно для власного поглинання.

Для германію  $\alpha \approx 10^4 \text{ см}^{-1}$ , тому випромінювання ефективно поглинається в шарі товщиною до 1 мкм.

Якщо дифузійна довжина генерованих світлом носіїв заряду  $L \gg \omega$ , то процес генерації можна розглядати як рівномірну генерацію в шарі товщиною  $\omega$  тому, що при дифузії носії порівняно рівномірно заповнюють весь шар  $\omega$ .

В цьому випадку швидкість генерації:

$$g = \beta \cdot \Phi_0 / \omega. \quad (3.17)$$

При схемотехнічному використанні ФР загальний робочий струм через нього, у відповідності до виразу (3.3), може складатися з двох частин:

$$I_R = I_T + I_\Phi. \quad (3.18)$$

Відповідно, структура ФР (рис. 3.3), на основі аналізу рівняння (3.18), моделюється двоелементною еквівалентною схемою, опір якої є змінним.

Таку електричну схему можна представити у вигляді з'єднання двох паралельних резисторів (рис. 3.5).

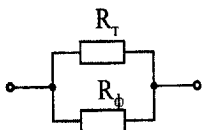


Рисунок 3.5

Де резистор  $R_T$  моделює опір ФР в темновому режимі, а  $R_\Phi$  - його зміну в освітленому.

Відповідно до цієї схеми, загальний опір ФР

$$R = R_T R_\Phi / (R_T + R_\Phi). \quad (3.19)$$

Звісно, це дуже спрощена математична модель ФР і вона, в принципі, може мати велику модельну похибку  $\delta$ . Але, приймаючи до уваги те, що для ФР, як правило  $R_T \gg R_\Phi$ , цією  $\delta$  моделі для інженерних розрахунків можна знехтувати.

Найчастіше ФР використовуються як сенсори для визначення зміни параметрів освітлення і як сенсори режимів "темно/світло". Тому однією з основних схемотехнічних характеристик ФР є сімейство ВАХ (рис. 3.6) при різних рівнях  $\Phi$ .

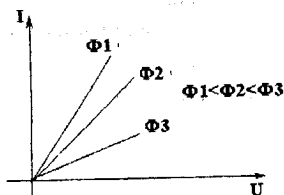


Рисунок 3.6

Рівень зовнішньої напруги  $U$  на ФР залежить від схемотехнічної різниці потенціалів в точках його підключення. Тому, в загальному випадку, ВАХ можуть і не проходити через початок координат.

При відсутності світлового струму  $I_{\phi}$ , струм  $I_t$ , що протікає через ФР, є мінімальним. В багатьох випадках вважається, що  $I_t \approx 0$ .

Якщо в якості резистивного матеріалу використовуються напівпровідники, то на початковій ділянці ВАХ нелінійна. Але ФР найчастіше режимно по напрузі використовують на лінійній частині ВАХ.

При опромінюванні ФР світловим потоком  $\Phi$  певної величини залежність струму від напруги на робочій ділянці завжди лінійна. Чим більша потужність світлового потоку тим більший кут нахилу ВАХ.

При розрахунках ФР вихідними даними, найчастіше, є параметри опромінювання і його електричні параметри. Після їх аналізу вибирають тип напівпровідникового матеріалу і визначають електрофізичні властивості ФР. Далі розраховують геометричні розміри фоточутливого елемента і світлові параметри приладу.

В якості прикладу розглянемо розрахунок ФР для ІК діапазону.

**Вихідними даними є:**

- параметри опромінювання: довгохвильова границя поглинання  $\lambda_{\text{гр}} \leq 1.55$  мкм, потужність потоку опромінювання на одиницю поверхні  $P/A = 1 \cdot 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>;

- електричні параметри: темновий опір  $R_t = 50$  кОм, робоча напруга  $U = 5$ В;

- геометричні розміри світлочутливого елемента: площа поверхні  $A = 0.05$  см<sup>2</sup>.

**Визначити:**

1. Тип напівпровідникового матеріалу і його електрофізичні параметри:  $\sigma$ ,  $\rho$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $\tau_n$ ,  $\tau_p$ .

2. Геометричні розміри ФР:  $\omega$ ,  $l$ ,  $d$ .

3. Світлові параметри ФР:  $\Delta\sigma_{\phi}$ ,  $I_{\phi}$ ,  $S_i$ .

**Порядок розрахунку.**

1. Розрахунок починаємо з вибору напівпровідникового матеріалу ФР, виходячи із заданої довгохвильової границі поглинання  $\lambda_{\text{гр}} \leq 1.55$  мкм.

Цій довжині випромінювання відповідає енергія квантів випромінювання з

$$E_{\text{гр}} = 1.24/\lambda_{\text{гр}} = 1.24/1.55 = 0.8 \text{ еВ.} \quad (3.20)$$

Найкраще підходить германій, властивості якого наведені в додатку Г.

Для виготовлення ФР використовують германій з власною провідністю. Рухливість електронів  $n$  і дірок  $p$  в такому матеріалі складають відповідно 3900 і 1900 см<sup>2</sup>/В·с.



Для розрахунку електропровідності необхідно знати концентрацію носіїв заряду при температурі  $T = 300$  К. Вона дорівнює  $n_i = 2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ .

Визначимо електропровідність за формулою:

$$\begin{aligned} \sigma &= q \cdot \mu_n \cdot n + q \cdot \mu_p \cdot p = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) = \\ &= 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{13} \cdot (3900 + 1900) = 1.86 \cdot 10^{-2} \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Питомий опір визначимо за формулою:

$$\rho = 1/\sigma = 1/1.86 \cdot 10^{-2} = 54 \text{ Ом} \cdot \text{см}. \quad (3.22)$$

В германії з власною провідністю час життя неосновних носіїв заряду великий, близько сотень мкс. Прийmemo  $\tau_n \approx \tau_p = 200$  мкс.

2. Напівпровідниковий fotocутливий елемент має товщину  $\omega$ , ширину  $d$ , довжину  $l$ .

Товщина  $\omega$  визначається на основі даних про коефіцієнт поглинання випромінювання.

На рис. 3.7 приведена залежність  $\alpha(\lambda)$  для германію.

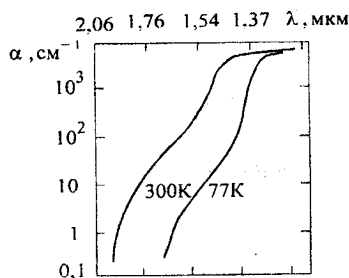


Рисунок 3.7

При  $T = 300$  К і  $E_{sp} = 0.8$  еВ,  $\alpha = 330 \text{ см}^{-1}$ .

В шарі, товщиною  $x_0 = 1/\alpha$ , потік випромінювання послаблюється в  $e$  разів. Для більш ефективного використання потоку випромінювання потрібно взяти  $\omega = (2 \dots 3) \cdot x_0$ .

Вибираємо:

$$\omega = 3 \cdot x_0 = 3/\alpha = 3/330 = 0.009 \text{ см} = 90 \text{ мкм}.$$

Приймаємо:

$$\omega = 100 \text{ мкм}.$$

Довжину і ширину fotocутливого елемента знаходимо за відомим темновим опором і освітленою площею:

$$R_T = \rho / l(\omega \cdot d). \quad (3.23)$$

Підставимо  $l = A/d$  в формулу (3.23):

$$R_T = \rho \cdot A / \omega \cdot d^2. \quad (3.24)$$

Звідки

$$d^2 = \rho \cdot A / (\omega \cdot R_T). \quad (3.25)$$

Або ширина ФР:

$$d = \sqrt{\rho \cdot A / (\omega \cdot R_m)} = \\ = \sqrt{54 \cdot 0.05 / (100 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^4)} = 7.35 \cdot 10^{-2} \text{ см} = 0.735 \text{ мм}. \quad (3.26)$$

Довжина ФР:

$$l = A/d = \\ = 0.05 / 7.35 \cdot 10^{-2} = 0.68 \text{ см} = 6.8 \text{ мм}. \quad (3.27)$$

3. Основними світловими параметрами ФР є фотопровідність  $\Delta\sigma_\phi$ , фотострум  $I_\phi$  і фоточутливість  $S$ .

Фотопровідність визначається за формулою:

$$\Delta\sigma_\phi = q \cdot \mu_n \cdot \Delta n + q \cdot \mu_p \cdot \Delta p. \quad (3.28)$$

Оскільки в германії з власною провідністю при освітленні генеруються електронно-діркові пари, то

$$\Delta n = \Delta p \text{ і } \Delta\sigma_\phi = q \cdot \Delta n (\mu_n + \mu_p). \quad (3.29)$$

Концентрацію фотоносіїв розраховуємо за формулою:

$$\Delta n = \alpha \cdot \beta \cdot n_{\phi\Delta}. \quad (3.30)$$

Внутрішній квантовий вихід приблизно дорівнює одиниці.

Для перерахунку потужності потоку опромінювання в інтенсивність потоку квантів використовуємо формулу:

$$n_{\phi\Delta} = 5 \cdot 10^{18} \cdot \lambda \cdot (P/A) = \\ = 5 \cdot 10^{18} \cdot 1.55 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 7.75 \cdot 10^{13} \text{ квант}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \quad (3.31)$$

Концентрація пар фотоносіїв визначається за формулою:

$$\Delta n = 330 \cdot 1 \cdot 7.75 \cdot 10^{13} \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}.$$

Тоді фотопровідність ФР визначиться як:

$$\Delta\sigma_\phi = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{12} (3900 + 1900) = 4.65 \cdot 10^{-3} (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}.$$

Додаткова провідність ФР, яка обумовлена фотопровідністю визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \Delta\Sigma &= \Delta\sigma_{\Phi} \cdot \omega \cdot d/l = \\ &= 4.65 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-4} \cdot 7.35 \cdot 10^{-2} / 0.68 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Фотострум, викликаний фотопровідністю, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} I_{\Phi} &= \Delta\Sigma_{\Phi} \cdot U = \\ &= 5 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 25 \cdot 10^{-6} \text{ А} = 25 \text{ мкА}. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Струмова чутливість ФР визначається за формулою:

$$\begin{aligned} S_i &= I_{\Phi} / P_0 = \\ &= 25 \cdot 10^{-6} / 10^{-5} \cdot 0.05 = 50 \text{ А/Вт}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

### 3.3 Фотодіоди

Фотодіоди (ФД) - це фотоелектричні напівпровідникові прилади, найчастіше на основі *p-n* переходу (рис. 3.8), режим роботи в яких задається електрично і керується подачею світла [1-4, 6, 8, 9, 17].

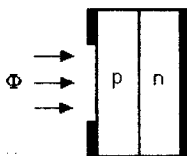


Рисунок 3.8

Простота їх конструкції дозволяє максимально використовувати падаючий світловий потік. До переваг ФД слід віднести високу чутливість і швидкодію, лінійність характеристик в широкому діапазоні зміни потужності опромінювання, малі значення паразитних параметрів і інші.

Крім того, у ФД краща температурна стабільність, в порівнянні із іншими фотоприймачами.

Напівпровідникові ФД з *p-n* переходом зручні для вимірювання енергетичних і світлових величин (в останньому випадку разом із корегуючими світлофільтрами). Ці приймачі, на відміну від теплових, пристосовані для роботи як в неперервному, так і імпульсному режимах роботи.

Фотометричне застосування напівпровідникових фотоелементів потребує правильного їх елементного вибору і додержання певного режиму роботи. При цьому потрібно знати параметри фотоелементів, які характеризують їх властивості і задають робочий режим, в якому проводяться вимірювання.

Властивості ФД досить повно визначаються такими характеристиками, як енергетична [ $I_{\phi} = f(\Phi)$  при  $U = \text{const}$ ], вольт-амперна [ $I = f(U)$ , при  $E = \text{const}$ ], світлова [ $I_{\phi} = f(E)$ , при  $U = \text{const}$ ], спектральна [ $k\lambda = f(\lambda)$ , де  $k$  - номер гармоніки], частотна [ $I_n = f(U_n)$ , при  $E = \text{const}$  і  $U = \text{const}$ ], інтегральна [ $k\lambda = I_{\phi}/\Phi$ , при  $E = \text{const}$ ] і спектральна [ $k\lambda = I_{\phi}/\Phi_{\lambda}$ , при  $E = \text{const}$ ] чутливості, робоча напруга і діапазон робочих температур.

Енергетичні характеристики ФД,  $I = f(\Phi)$  при  $U = \text{const}$ , лінійні і мало залежать від напруги, яка прикладена до ФД.

Так, наприклад, люкс-амперна характеристика для кремнієвого ФД, має вигляд (рис. 3.9).

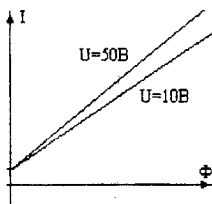


Рисунок 3.9

При прикладанні до ФД прямої напруги, електричне поле в області просторового заряду (ОПЗ) не змінюється за напрямком, тому напрямком фотоструму також залишається постійним і протилежним темновому струму.

Прикладання до ФД напруги в зворотному напрямку визиває протікання через нього темнового струму  $I_T$ , який дорівнює струму насичення для вузькозонних напівпровідників (InSb, Ge). Освітлення ФД при цьому визиває фотострум  $I_{\phi}$ , який за напрямком збігається із струмом насичення.

Через те, що з  $n$ - та  $p$ -областей в ОПЗ переходять неосновні носії заряду, вони збільшують зворотний струм переходу, тому що саме він утворюється за рахунок неосновних носіїв.

Вольт-амперна характеристика ФД описується рівнянням:

$$I = I_T \cdot (e^{qU/(kT)} - 1) - I_{\phi}. \quad (3.35)$$

Її характерний вигляд наведений на рис. 3.10. Як видно з ВАХ, при відсутності освітлення, зворотний струм дорівнює струму насичення, а при освітленні він зростає і практично не залежить від напруги.

Темнова ВАХ проходить через початок координат і відповідає ВАХ звичайного діода.

ВАХ ФД залежать від їх конструктивного виконання і від електрофізичних властивостей матеріалів напівпровідникової структури.

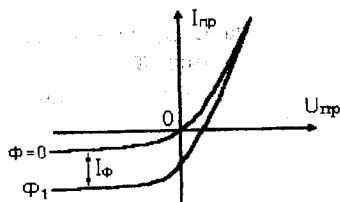


Рисунок 3.10

Так, наприклад, пряма та зворотна ВАХ Al-Si<sub>2</sub>-Si ФД наведена на рис. 3.11.

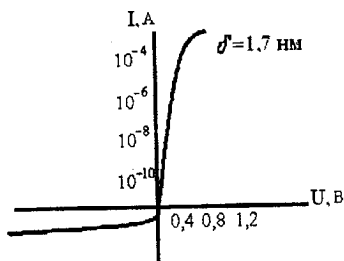


Рисунок 3.11

Робоча напруга у більшості ФД, звичайно, 5-30 В. Темновий струм не перевищує 20 мкА для германієвих приладів і 2 мкА для кремнієвих. Струм при освітленні може складати сотні мкА.

Фотострум, що виникає при освітленні ФД, можна визначати за формулою:

$$I_{\phi} = S_i \cdot \Phi. \quad (3.36)$$

При освітленні ВАХ зсувається по осі зворотних струмів. Навіть при відсутності зовнішньої напруги на ФД, через нього протікає зворотний струм внаслідок прояву фотогальванічного ефекту.

Основний робочий режим ФД, це режим при якому зовнішня напруга прикладається до ФД в заперітному напрямку. Такий режим називають фотодіодним режимом роботи *p-n* переходу.

При подачі на ФД напруги прямого зміщення, вони працюють подібно до звичайних діодів. При цьому нахил їх ВАХ залежить від потужності опромінювання.

Енергетична характеристика ФД залежить від довжини хвилі і має вигляд (рис. 3.12).

Частотна характеристика залежить від матеріалу напівпровідника і на робочій ділянці майже лінійна.

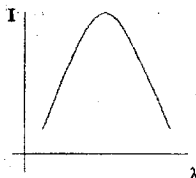


Рисунок 3.12

Всі ФД можуть працювати як генератори ЕРС, тобто у фотогальванічному (або вентиляльному) режимі. Параметри цього режиму визначаються за струмом короткого замикання (КЗ) і напругою холостого ходу (ХХ).

Типові залежності струму КЗ від напруги ХХ, для дифузійного  $p-n$  переходу (1) і МДН-діода (2), показані на рис. 3.13.

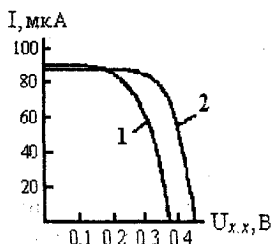


Рисунок 3.13

Для фотогальванічного режиму фотострум може бути обчислений за виразом:

$$I_{\psi} = I_s \left( e^{\frac{-q\varphi_{xx}}{kT}} - 1 \right), \quad (3.37)$$

де  $\varphi_{xx}$  - величина фото-ЕРС або напруги ХХ, В.

Звідки можна визначити напругу ХХ:

$$U_{xx} = (kT/q) \ln(1 + I_{\psi}/I_s). \quad (3.38)$$

Наявність освітлення призводить до збільшення тунельного струму як дірок, так і електронів і загального струму через структуру. При цьому тунельний струм дірок (в області насичення його залежності від  $U_{звор.}$ , при інтенсивностях освітлення  $\Phi > D_p D \sqrt{L_{диф}}$ ) дорівнює струму інжектованих світлом носіїв.

Коефіцієнт фотоелектричного підсилення тунельної МДН-структури, в розглянутому випадку, визначиться як:

$$M = (I_p + I_n) / I_p = 1 + I_n / I_p. \quad (3.39)$$

Оскільки тунельний струм основних носіїв відрізняється від струму неосновних на множник, постійний для даної структури, в області насичення зворотних гілок ВАХ діода, люкс-амперна характеристика  $I_n = f(\Phi)$  лінійна (рис. 3.1).

Таким чином, коли струм основних носіїв є домінуючим, реалізується ефект підсилення, оскільки тунельний струм неосновних носіїв в  $M$  разів менший.

При освітленні ФД промодульованим світлом, фотострум з'являється тільки після того, як фотоносії досягають  $p$ - $n$  переходу.

Внаслідок зменшення градієнта концентрації фотоносіїв із їх наближенням до  $p$ - $n$  переходу, швидкість дифузії фотоносіїв зменшується під час дії світлового імпульсу. Тому і зростання, і спадання фотоструму відбувається поступово і тим довше, чим більша товщина  $p$ -області, оскільки при цьому збільшується вплив розкиду швидкостей фотоносіїв.

Із збільшенням частоти світлових імпульсів, фронт зростання фотоструму накладається на фронт спаду фотоструму від попереднього імпульсу. При деякій частоті ФД не встигає розрізняти окремі імпульси світла - фотострум через нього стає майже постійним.

Швидкодія, в значній мірі, залежить від товщини області, що освітлюється, і чим тонша ця область, тим вища швидкодія.

ФД, відповідно до реалізації основних параметрів, виготовляються за кількома різновидами. Конструкція (рис. 3.8) характеризується поглинанням світла в обох областях структури, причому  $p$  і  $n$  шари повинні бути якомога тоншими. Але реально такі структури характеризуються невеликим коефіцієнтом перетворення і малою швидкістю.

Для покращення цих характеристик використовуються інші різновиди ФД,  $p$ - $i$ - $n$ -структури, контакт метал-напівпровідник (бар'єр Шоттки) і гетерпереходи.

В  $p$ - $i$ - $n$  структурах  $i$ - область, що знаходиться між  $p$  та  $n$ -областями (рис. 3.14), має більший опір, ніж  $p$  та  $n$ - області.

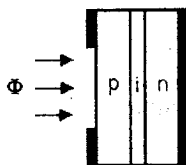


Рисунок 3.14

При значних зворотних напругах однорідне електричне поле повністю розповсюджується на всю  $i$ - область. Технологічно ця область може бути зроблена достатньо широкою і з її допомогою можна значно розширити ОПЗ.

В цьому випадку розділення носіїв заряду проходить швидко, тому що в сучасних *p-i-n* ФД в *i* області поглинається до 90% опроміювання.

*P-i-n* ФД мають такі переваги:

- значно більша чутливість та швидкодія;
- можливість забезпечення високої чутливості в довгохвильовій області спектра за рахунок збільшення *i* - області;
- маленька бар'єрна ємність;
- мала робоча напруга ( $U \approx 0$  за рівнем інтегральних елементів).

Основний недолік технологічний. Дуже складно забезпечити високу чистоту та однорідність *i* - шару. Ще одним недоліком є погана сумісність при створенні тонких легованих шарів з інтегральними схемами.

Кращими характеристиками відзначаються ФД Шотткі. Вони мають швидкодію до  $10^{-10}$  секунд, характеризуються малим опором бази, простою створення структур із різних напівпровідників та ін.

Конструкція такого ФДШ зображена на рис. 3.15.

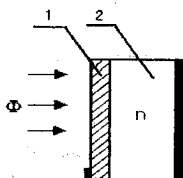


Рисунок 3.15

Перехід Шотткі - це контакт між тонкою оптично прозорою металевою плівкою 1 і напівпровідником *n*-типу 2.

Випроміювання проходить через напівпрозору металеву плівку і поглинається в ОПЗ напівпровідника. Інерційність ФД Шотткі визначається перезарядкою бар'єрної ємності і часом прольоту носіїв крізь ОПЗ.

Для германію та кремнію максимальна швидкість руху носіїв в електричному полі та час прольоту ОПЗ дорівнюють, відповідно,  $v_{\max} \approx 5 \times 10^6$  см/с та  $\tau \approx 10^{-10}$  с.

ФД на складених напівпровідниках найбільш чутливі до інфрачервоного випроміювання.

Одним із різновидів ФД є ще конструкція на гетероструктурах. В якості матеріалів для таких ФД використовують матеріали типу  $A^{III}B^V$ , серед яких найчастіше GaAs. Але в сучасній оптоелектроніці найбільшої перспективи набули три- і більше компонентні структури. Наприклад, GaAlAs, який використовується в якості однієї з областей ФД.

Такі структури дозволяють отримати ККД фотоперетворення близько 100%.

Конструктивно такі прилади мають вигляд:



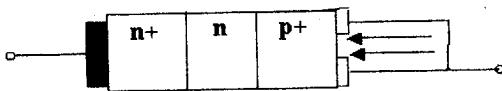


Рисунок 3.16

Ширина активної  $n$  - області вибирається так, щоб забезпечити поглинання всього випромінювання, яке пропускається через  $p^+$  - область. Такі структури мають всі переваги розглянутих вище приладів при більш високому ККД.

Для підвищення швидкодії високочутливих ФД, використовується явище лавинного пробію (лавинні ФД). В таких приладах під дією випромінювання починається генерація носіїв із їх подальшим розповсюдженням. Відбувається підсилення первинного фотоструму, який визначається коефіцієнтом лавинного розмноження:

$$M = I_{\phi} / I_{\phi 0}, \quad (3.40)$$

де  $I_{\phi}$  - струм із врахуванням розмноження;  $I_{\phi 0}$  - без врахування.

Цей коефіцієнт одночасно є коефіцієнтом підсилення фотоструму.

В режимі лавинного пробію на окремих ділянках діодної структури відбувається значне збільшення щільності струму. В цих ділянках утворюються невеликі центри, в яких відбуваються мікроплазмові процеси. Тому, для роботи лавинних ФД, вирішальним фактором є необхідність підтримання однорідності лавинного процесу.

Теоретично такий процес можна підтримати тільки в ідеальному  $p$ - $n$  переході. В реальних приладах, в місцях неоднорідних вкrapлень мікроплазми, відбуваються регулярні кидки струмів, а це призводить до великого рівня власних шумів і виходу приладу з ладу.

Стійка робота ЛФД забезпечується при однорідності легування, точніший за 0.1%.

ЛФД - це одні з технологічно складних ФД і, відповідно, найдорожчі. Застосування вони знаходять для реєстрації слабких оптичних сигналів.

До основних параметрів ФД, що досить повно описують його як приймач оптичних сигналів і як елемент електричного кола, відносяться:

1. Монохроматична чутливість  $S_{\phi}$  ( $S_{\phi}(\lambda)$ ), А/Вт.

Вона дорівнює відношенню фотоструму до повної потужності випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$ , що падає на чутливу площадку ФД:

$$S_{\phi} = I_{\phi} / P_{\text{вх}}(\lambda). \quad (3.41)$$

2. Темновий струм  $I_{\tau}$ , який дорівнює струму витоку ФД при повно-

му затемненні і при заданій зворотній напрузі.

3. Максимально допустима зворотна напруга  $U_{звор. макс. прип}$ , що характеризує граничні можливості ФД при його включенні в електричне коло.

4. Час наростання (спаду)  $t_{нр(сп)}$  фотоструму, обумовлений по фронту (зрізу) фотовідповіді (звичайно по рівнях 0.1 і 0.9 амплітуди імпульсу фотоструму), при впливі на ФД ідеально прямокутного імпульсу випромінювання.

Іноді в якості характеристичного часу використовують параметр  $\tau_{рел}$  - постійну часу релаксації фотовідгуку.

При експонентному наростанні і спаданні фотоструму справедливо:

$$t_{нр(сп)} = 2.2\tau_{рел}. \quad (3.42)$$

5. Гранична частота  $f_{гр}$ , що визначається при зміні частоти модуляції оптичного випромінювання по спаду чутливості  $S_{\phi}$  до значення 0.707 від чутливості при немодульованому випромінюванні.

6. Сміність ФД  $C_{\phi\delta}$ , яка дорівнює сумі зарядної ємності активної структури і паразитної ємності корпусу.

В багатьох режимах роботи саме параметр  $C_{\phi\delta}$ , а не  $t_{нр(сп)}$  - визначає інерційність ФД.

7. Площа фоточутливої площадки  $A$ .

Поріг чутливості ФД оцінюють за відомими значеннями інтегральної (струмової) чутливості і темного струму  $I_{т}$ , який протікає в зовнішньому ланцюзі ФД при відсутності опромінювання чутливого шару.

Однозначність параметрів ФД задається певним режимом їхнього вимірювання:  $U_{звор}$ ,  $P_o$  і  $\lambda_{випр}$ .

Більшість ФД використовуються в колах із низьковольтними джерелами живлення ( $E_{ж} = 5$  В). Тому, при зміні параметрів, величина  $U_{звор}$  вибирається не вище ніж 5...10 В. Взагалі бажано щоб  $S_{\phi}$  і  $t_{нр(сп)}$  зберігали свої значення до  $U_{звор} = 0$ .

Основними матеріалами для ФД є германій і кремній. Кремнієві ФД звичайно чутливі в вузькій області спектра (від  $\lambda = 0.6...0.8$  мкм до  $\lambda = 1.1$  мкм) з максимумом  $\lambda = 0.85$  мкм, а германієві ФД мають границі чутливості  $\lambda = 0.4...1.8$  мкм з максимумом при  $\lambda = 1.5$  мкм.

У фотодіодному режимі, при напрузі живлення 20 В, темновий струм кремнієвих ФД звичайно не перевищує 3 мкА, в цей час як у германієвих ФД при напрузі живлення 10 В він досягає 15...20 мкА.

При використанні ФД в фотовентильному режимі, необхідно знати напругу ХХ ( $U_{хх}$ ) і струм КЗ ( $I_{кз}$ ).

Їх можна визначити через режимні залежності параметрів напівпровідника таким чином.

Якщо потік фотонів  $N_{\phi}$  ( $c^{-1}$ ) повністю поглинається в базі кремнієвого  $p-i-n$  ФД, то темп генерації зарядів складає  $\eta N_{\phi} q$  (де  $\eta$  - квантовий

вихід фотоэффекта) і фоточутливість визначається за виразом:

$$S_{\phi} = I_{\phi} / P_o = Q \frac{\eta N_{\phi} q}{N_{\phi} h \nu} = Q \eta \frac{q}{hc} \lambda, \quad (3.43)$$

де  $Q$  - коефіцієнт збирання носіїв.

Вважаючи, що для кремнію практично завжди  $\eta = 1$ , остаточно отримаємо:

$$S_{\phi} = 0.8Q\lambda. \quad (3.44)$$

Як показали дослідження, вираз (3.46) справедливий лише при  $Q \approx 1$ . В інших випадках необхідно враховувати конкретні види функцій поглинання фотонів в базі і збирання генерованих носіїв:

$$S_{\phi} = \frac{\eta}{N_{\phi}} \frac{q}{hc} \lambda \int_0^w N_{\phi}(x) Q(x) dx. \quad (3.45)$$

Якщо покласти, що при усіх  $\lambda$ ,  $Q = 1$ , то спектральна залежність  $S_{\phi}(\lambda)$ , аж до  $\lambda_{ер}$ , буде представляти пряму, що проходить через початок координат.

Припущення  $Q \approx 1$  виконується при малих рекомбінаційних втратах, тобто якщо  $t_{пр}/\tau_p < 1$ , де  $t_{пр}$  - середній час прольоту носіїв через базу ФД,  $\tau_p$  - час життя дірок, що прийнятий постійним у всій  $i$ -області незалежно від концентрації носіїв.

В області просторового заряду  $\omega_1$  є електричне поле, в якому носії дрейфують, і час прольоту

$$t_{пр,др} \approx \frac{1}{\mu_{р,ефф}} \frac{\omega_1^2}{U_{ззар} + \varphi_0}, \quad (3.46)$$

де  $\mu_{р,ефф}$  - ефективна рухливість дірок;  $\varphi_0$  - стрибок потенціалу на  $p^+$ -і переході.

В частині бази  $\omega_2$ , що залишилася, іде процес дифузії і час прольоту:

$$t_{пр,диф} \approx \frac{1}{2} \frac{\omega_2^2}{D_p} = \frac{1}{\mu_{р,ефф}} \frac{\omega_2^2}{(2kT/q)}. \quad (3.47)$$

Напруга, при якій виконується умова збіднення всієї базової області, називається напругою відсічки.

Вона визначається за формулою:

$$U_{виск} \approx \frac{\omega^2}{2\epsilon\epsilon_0\rho_i\mu_i} - \varphi_0, \quad (3.48)$$

де  $\rho_i$ ,  $\mu$  - питомий електричний опір і рухливість основних носіїв в базі ФД.

Залежність  $Q = f(\lambda)$  визначається виглядом функції  $\alpha = \phi(\lambda)$ .

Беручи до уваги закон Бугера, для зниження втрат потужності в  $p^+$  - і  $n^+$  областях до 10% (по кожній складовій), необхідно виконати умови:

$$\omega > 2.3\alpha, \quad \omega_{p^+} \leq \alpha. \quad (3.49)$$

Особливість кремнію полягає в тому, що для основного оптоелектронного випромінювача GaAlAs-лазера або СВД із  $\lambda_{\text{випр}} \approx 0,85$  мкм, коефіцієнт поглинання  $\alpha \approx 500 \text{ см}^{-1}$  і легко виконується умова (3.49).

В той же час  $U_{\text{відс}} \approx 0$  і  $t_{\text{np}}/\tau_p \ll 1$ .

Найважливіший параметр, що визначає роботу ФД у фотодіодному режимі,  $U_{\text{xx}}$ , легко знайти з формули Больцмана для зміни висоти потенціального бар'єра  $p^+$ -і переходу при впливі випромінювання:

$$U_{\text{xx}} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_1 + p_{n0}}{p_{n0}} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{p_1}{p_{n0}}, \quad (3.50)$$

де  $p_{n0}$  - рівноважна концентрація дірок в базі неосвітленого ФД, а  $p_1$  - концентрація фотогенерованих дірок при  $x = 0$ .

При розімкненому колі діода (фотострум відсутній), із врахуванням закону Бугера, отримаємо:

$$p(x) = p_1 \exp(-\alpha x); \quad p_1 = 5 \cdot 10^{11} \lambda P_{\phi} \tau_p \alpha, \quad (3.51)$$

де  $p_1$ ,  $\text{см}^{-3}$ ;  $\lambda$ , мкм;  $\alpha$ ,  $\text{мкм}^{-1}$ ;  $P_{\phi}$ ,  $\text{мВт}/\text{см}^2$ ;  $\tau_p$ , с.

Підставляючи  $p_1$  в вираз для  $U_{\text{xx}}$ , отримаємо:

$$U_{\text{xx}} = \frac{kT}{q} \ln 5 \cdot 10^{11} \frac{\lambda n_{i0} \tau_p \alpha}{n_i^2} P_{\phi}. \quad (3.52)$$

Для типового кремнієвого  $p$ - $i$ - $n$  ФД ( $n_{i0} = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_p = 10^{-6}$  с) при  $\lambda = 0,85$  мкм,  $P_{\phi} \approx 100 \text{ мВт}/\text{см}^2$  і кімнатній температурі,  $U_{\text{xx}} \approx 400$  мВ.

За тих самих умов у  $p$ - $n$  ФД ( $n_{i0} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ),  $U_{\text{xx}} \approx 580$  мВ.

Для визначення динамічних параметрів  $t_{\text{np}}$  і  $t_{\text{оп}}$  при повністю збідненій базі, але при не занадто великих зворотних напругах, використовується наближене співвідношення:

$$t_{\text{np(сп)}} \approx 10^{-2} \omega^2 U_{\text{звор}}^{-1}, \quad (3.53)$$

де  $t_{\text{np(сп)}}$ , нс;  $\omega$ , мкм;  $U_{\text{звор}}$ , В.

При типових  $\omega = 30$  мкм і  $U_{\text{звор}} = 5$  В,  $t_{\text{np(сп)}} \approx 1,8$  нс.

При збільшенні зворотної напруги, поле в базі зростає і, при

$$E = U_{звор}/\omega > 5 \cdot 10^3 \text{ В/см}, \quad (3.54)$$

починає проявлятися ефект насичення дрейфової швидкості (значення  $t_{нр(сп)}$  спадають).

При дуже великій напруженості поля швидкість носіїв заряду досягає деякого максимального постійного значення (біля  $(0.5...1) \cdot 10^7$  см/с для кремнію).

В цих умовах  $t_{нр(сп)} = (1..2) \cdot 10^{-2} \omega$ , де  $t_{нр(сп)}$ , нс;  $\omega$ , мкм.

Якщо прийняти мінімальне реальне значення  $W \approx 1$  мкм, то для граничної швидкодії  $p-i-n$  ФД отримаємо  $t_{нр(сп)} \approx 10...20$  пс.

Граничну частоту можна розрахувати, використовуючи відоме з радіотехніки співвідношення:

$$f_{гр} \approx 0,35/t_{нр(сп)}. \quad (3.55)$$

Таким чином, для типових  $p-i-n$  конструктивів гранична частота  $f_{гр} \approx 200...500$  МГц, а її граничне значення  $f_{гр} \approx 18...35$  ГГц.

Параметри  $I_T$ ,  $C_{фд}$  і  $U_{звор.макс}$  звичайні для діодів взагалі і ніякої фотоелектричної специфіки не несуть. Для  $p-i-n$  ФД з повністю збідненою базою, формули для їх, наближеного визначення досить прості:

$$I_T \approx 0,5qn_i\omega A/\tau_p; \quad (3.56)$$

$$C_{фд} \approx \epsilon\epsilon_0 A/\omega; \quad (3.57)$$

$$U_{звор.макс} \approx (0.5...0.7)U_{проб}, \quad (3.58)$$

де  $U$ , В;  $\omega$ , мкм.

Слід зазначити, що при великих товщинах бази припустиме значення  $U_{звор.макс}$  встановлюється набагато нижче, ніж за цим виразом. Причиною цього є недостатня стабільність темнового струму при високих напругах.

### 3.4 Фототранзистори

В оптоелектроніці широко використовуються як біполярні фототранзистори (ФТ)  $p-n-p$  та  $n-p-n$  типу, так і польові [1, 2, 4-6, 8, 17-20].

Біполярні ФТ використовуються в різних схемах їх підключення по дво- (рис. 3.17, а) або по триелектродних схемах (рис. 3.17, б).

Відповідно до цього вони випускаються конструктивно з двома і з трьома виводами (рис. 3.18).

Наявність у ФТ оптичного і електричного виходів одночасно дозволяє створити зміщення, необхідне для роботи на лінійному відрізку його енергетичної характеристики, а також компенсувати зовнішній вплив.

Для виявлення малих сигналів необхідно збільшувати опір вихідному змінному струму при мінімальному темновому струмі в ланцюзі колектора. Для цього необхідно створити позитивне зміщення на базі.

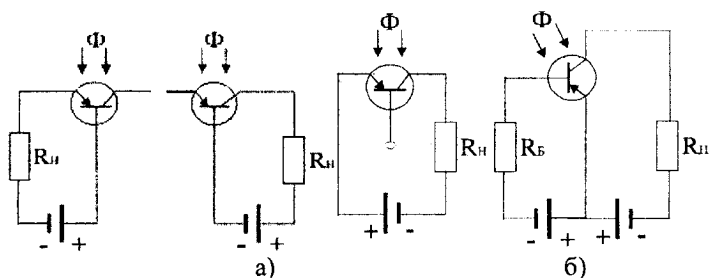


Рисунок 3.17

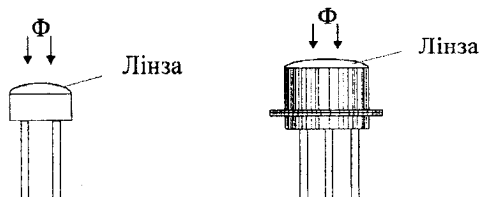


Рисунок 3.18

Біполярні ФТ особливо ефективні в складі оптронів, оскільки забезпечують високий коефіцієнт перетворення по струму (відношення вихідного струму фотодетектора до вхідного струму СВД), який досягає 50%, коли при використанні ФД цей коефіцієнт не перевищує 0.2%.

Процес оптичної генерації носіїв заряду у БФТ виникає, головним чином, в базовій зоні (рис. 3.18). Генеровані носії приводяться в дифузійний рух та розділяються  $p-n$  переходами база-емітер та база-колектор. Внаслідок цього зона бази збагачується основними носіями - електронами, знижуючи бар'єрні потенціали переходів.

Тому на емітері, завжди зміщеному в прямому напрямку, починається додаткова інжекція дірок. При цьому опір бази зменшується, а ємність переходу база-емітер зростає, особливо її дифузійна складова, яка, як відомо, пропорційна струму інжекції.

В режимі роботи з плаваючою базою (рис. 3.19), фотоносії дають вклад в струм колектора у вигляді струму  $I_{кф}$ .

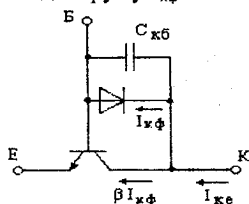


Рисунок 3.19

Крім того, дірки, фотогенеровані в базі, а також дірки, що приходять в базу з колектора, зменшують різницю потенціалів між собою і емітером, що призводить до інжекції електронів через базу до колектора.

В цьому випадку загальний колекторний струм визначається за формулою:

$$I_{кк} = I_{кф} + h_{21e}I_{кф} = (1 + h_{21e})I_{кф}, \quad (3.59)$$

де  $h_{21e}$  - статичний коефіцієнт підсилення транзистора в схемі із загальним емітером, який може бути суттєво більше одиниці.

Внаслідок цього, квантовий вихід БФТ буде в  $(1 + h_{21e})$  більший ніж квантовий вихід ФД.

Вихідні ВАХ такого БФТ мають вигляд (рис. 3.20).

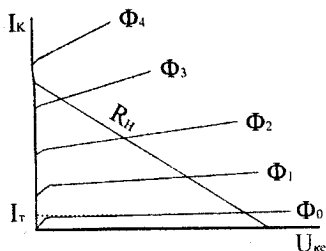


Рисунок 3.20

Вони аналогічні характеристикам звичайного транзистора для включення за схемою із загальним емітером, але різні криві відповідають різним значенням світлового потоку, а не струму бази.

Основними параметрами ФТ є: інтегральна чутливість, робоча напруга (4-15 В), темновий струм (до сотень мкА), робочий струм (до десятків мА), максимально-допустима потужність розсіювання (до десятків мВт), гранична частота.

Коефіцієнт підсилення БФТ лежить в межах 50-200, що забезпечує значно більшу чутливість, ніж у ФД.

БФТ може бути інтегрально суміщений з іншими НПП приладами. Наприклад, використовуючи додатковий транзистор можна сформувати складений транзистор із більшим коефіцієнтом підсилення.

Швидкодія розглянутих структур обмежена великою ємністю переходу бази-колектор і знижується при збільшенні підсилення за рахунок ефекту зворотного зв'язку. Так, типовий час відгуку для ФД складає близько 0.01 мкс, тоді як для БФТ він дорівнює приблизно 5 мкс, а для складеного транзистора - 50 мкс.

Фототранзистор може бути виготовлений на основі гетероструктури  $n\text{-AlGaAs}/p\text{-GaAs}/n\text{-AlGaAs}$ . Такий прилад характеризується високим значенням напруги закривання і коефіцієнта підсилення для обох полярностей зміщення і лінійною залежністю струму від напруги, що прохо-

дить через початок координат.

Ефективна інжекційна властивість забезпечується за рахунок того, що шар бази має більш вузьку заборонену зону, ніж шари колектора та емітера. Таким шляхом усувається властиве звичайним транзисторам обмеження, що проявляється в необхідності створення слабо легovanого базового шару, і можна реалізовувати умови, при яких збіднена зона запираючого переходу сконцентрована, в основному, в шарі колектора.

Це дозволяє отримати в одному приладі велике підсилення і високу напругу закривання. Такий прилад має симетричний коефіцієнт підсилення, який, при напрузі закривання  $\pm 10$  В, відповідній товщині бази GaAs - 2.1 мкм, складає 180, а при напрузі закривання  $\pm 2.6$  В, що відповідає базі товщиною 0.3 мкм, до 3000.

Широке поширення отримали кремнієві МДН ФТ, які мають достатню фоточутливість для їх використання в інфрачервоній області, при відповідній технології виготовлення і режимах роботи.

Найчастіше їх виготовляють з ізолюванням затвором на підкладинці  $p$  типу, легованої бором, що дає мілкий акцепторний рівень, і індієм, що дає глибокий акцепторний рівень (рис. 3.21).

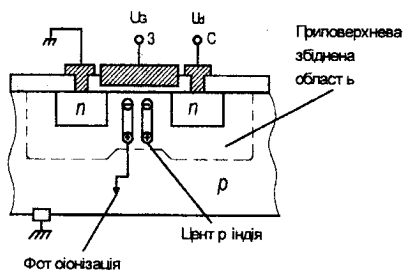


Рисунок 3.21

В заповненому стані центри індію нейтральні, а при збудженні дірок в валентну зону, стають від'ємно зарядженими.

Подача від'ємної напруги на занулений електрод викликає збагачення каналу. При цьому центри індію захоплюють дірки і переходять в нейтральний стан.

Під дією інфрачервоного випромінювання в діапазоні 2-7 мкм, відбувається збудження дірок в валентну зону. Цей процес призводить до збільшення густини заряджених акцепторів в області збіднення, що, в свою чергу, модулює провідність поверхневого каналу.

На рис. 3.22 наведена залежність фотоструму кремнієвого МДН ФТ, з  $p$ -каналом і електродами затвора з  $Sn_2$ , від напруги на затворі.

Оскільки ефективний час життя неосновних не рівноважних носіїв в області інверсії провідності слабо залежить від вигину зон,  $I_{\phi}(U_3)$  визна-



ається для всіх довжин хвиль відповідною залежністю  $\mu P$  від  $U_3$ .

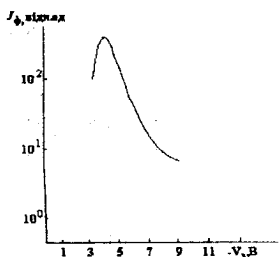


Рисунок 3.22

Дійсно, хід кривої  $I_\phi = f(U_3)$  якісно відповідає залежності холлівської рухливості дірок в МДН ФТ.

Фотострум МДН ФТ можна визначити з виразу:

$$I_\phi = I_c - I_r = ewU_{bc}(\mu_1 P_1 - \mu P)/L. \quad (3.60)$$

де  $I_c$  - струм стоку;  $w, L$  - ширина і довжина затвору.

Крім високої чутливості, МДН ФТ мають схемотехнічну гнучкість, а також повну електричну і технологічну сумішеність із інтегральними схемами. Але вони характеризуються помітною інерційністю, час їх переключення складає  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  с.

Для усунення цього недоліку необхідно роздільне виготовлення ФД і транзистора на одному кристалі. Роздільна оптимізація цих структур дозволяє отримати ефективний і мало інерційний ФД і високочастотний транзистор, а їх конструктивне з'єднання дає якісний ФП.

### 3.5 Фототиристри

Фототиристор (ФТР) - напівпровідниковий фотоелектричний прилад із трьома  $p$ - $n$  переходами, на ВАХ якого є ділянка, що відповідає від'ємному диференціальному опору [1, 8, 18, 19].

Подібно до звичайних тиристорів, ФТР виготовляють у вигляді чотиришарової  $p$ - $n$ - $p$ - $n$  структури (рис. 3.23).

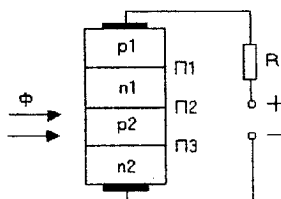


Рисунок 3.23

Напругу до ФТР прикладають таким чином, щоб  $p$ - $n$  переходи П1 і П3 були відкриті, а П2 - закритий. При відсутності освітлення робота ФТР не відрізняється від роботи звичайного тиристора.

Якщо напруга на ФТР не перевищує напругу вмикання  $U_{вм}$ , при якій відбувається різке збільшення струму тиристора за рахунок лавинного множення носіїв заряду, то струм ФТР, зумовлений рухом неосновних носіїв заряду через закритий  $p$ - $n$  перехід П2, дуже малий і являє собою темновий струм  $I_T$ .

При освітленні ФТР, за рахунок енергії фотонів, в області напівпровідника, що освітлюється, виникають нові вільні носії заряду (електронно-діркові пари). Електрони, що виникають в  $p_2$ -області бази і є неосновними носіями для цієї області, дифундують до переходу П2, поле якого є прискорюючим для них, і переходять в  $n_1$ - область бази.

Частина електронів проходить через  $p$ - $n$  перехід П1 і потрапляє на анод, збільшуючи струм ФТР. Інша частина електронів, із наближенням до  $p$ - $n$  переходу П1, рекомбінує з нерухомими позитивними іонами. За рахунок цього зменшується товщина  $p$ - $n$  переходу і висота потенціального бар'єра. Завдяки цьому створюються умови для інжекції дірок із  $p_1$ - області бази в  $n_1$ -область бази, що призводить до збільшення струму ФТР.

В цей же час дірки, створені в  $p_2$ -області бази, за рахунок дії падаючого на неї світла, зменшують висоту потенціального бар'єра  $p$ - $n$  переходу П3, що також сприяє збільшенню струму ФТР.

Складова струму, що зумовлена процесами, які викликані освітленням напівпровідникових шарів, являє собою фотострум ФТР.

При збільшенні світлового потоку  $\Phi$ , напруга вмикання  $U_{вм}$  зменшується (рис. 3.24).

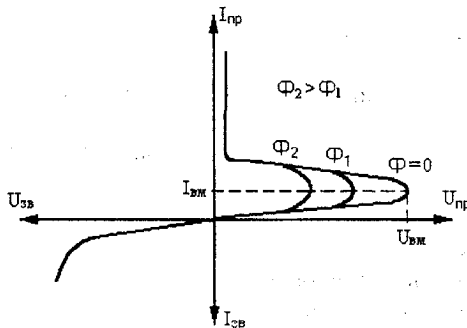


Рисунок 3.24

Таким чином, світловий потік  $\Phi$ , при роботі ФТР, відіграє таку ж роль, як керуючий струм при роботі звичайного тиристора, і дозволяє змінювати напругу вмикання ФТР.

Залежність струму ФТР, при постійній напрузі на ньому, від величини потоку випромінювання називають світловою, або енергетичною характеристикою ФТР (рис. 3.25).

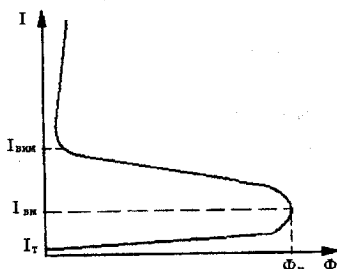


Рисунок 3.25

З цієї характеристики видно, що при певному значенні світлового потоку  $\Phi_p$ , який називається пусковим, струм ФТР зростає і досягає величини  $I_{вк}$ , що відповідає його відкритому стану.

Інерційність ФТР визначається часом вимикання  $\tau_s$ , протягом якого (після вимикання напруги живлення) заряди в базі розсмоктовуються і ФТР переходить з відкритого стану у закритий. Цей час становить десятки мікросекунд, тому ФТР можуть працювати на частотах модуляції світлового потоку в декілька десятків кілогерц.

ФТР найчастіше використовуються в складі оптопар у високовольтних схемах, де потрібна висока ізоляція схем керування і в умовах, де електричні наводки створюють завади в колі керування.

### 3.6 Завдання, контрольні питання та задачі

#### Робота 6. Дослідження характеристик фоторезисторів.

Мета роботи:

Вивчення та дослідження ВАХ і світлових характеристик фоторезистивних елементів.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями по роботі.
2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів ФР.
3. Знайти паспортні дані для ФР (наприклад СФ2-5), який використовується при дослідженнях.
4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Зібрати схему установки для досліджень (рис. 3.26).
2. Зняти ВАХ ФР в темновому режимі ( $U_l = 0$  В), змінюючи напругу на ньому резистором  $R_n$ .

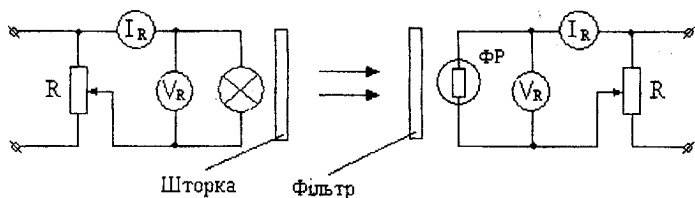


Рисунок 3.26

3. При певному значенні напруги зміщення на ФР  $U_R = 0 \dots 1$  В, яке виставляється ручкою  $R_n$  в темновому режимі, провести вимірювання  $I_{\phi R}$  і  $U_{\phi R}$  ФР, при зміні інтенсивності опромінювання  $E$  ( $U_I = 0 \dots 9$  В), для трьох вказаних викладачем значень  $U_I$ , які виставляються ручкою  $R$  (зміна  $E$  може проводитися і шторкою при повній робочій напрузі на випромінювачі).

4. Повторити пункт 3, використовуючи послідовно синій, зелений та червоний світлофільтри.

5. Побудувати ВАХ і графіки залежностей  $I_{\phi R} = f(E)$  і  $U_{\phi R} = f(E)$  за результатами п. 2-4.

6. Провести розрахунки вказаних викладачем параметрів ФР.

7. Пояснити отримані результати.

#### Контрольні питання.

1. Пояснити хід досліджень в роботі.  
 2. Пояснити фізичні явища, на яких основана робота ФР?  
 3. Пояснити як змінюється опір ФР при збільшенні світлового струму?

4. Для чого застосовують охолодження ФР?

5. Що таке питома, спектральна та інтегральна чутливість ФР?

6. Пояснити основні характеристики ФР.

7. Розказати про області використання ФР.

8. Пояснити поняття "власні шуми ФР".

9. Які існують основні типи і конструкції ФР?

10. Назвати основні області застосування фоточутливих НПП?

**Робота 7. Дослідження фотогальванічних характеристик фотодіодів.**

Мета роботи:

Вивчення та дослідження основних фізичних закономірностей, які визначають властивості та параметри ФД як фотогальванічного елемента, а також при подачі на нього напруги прямого зміщення (дослідження ВАХ і світлових характеристик).

Домашнє завдання.

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями по роботі.

2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів ФД і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.

3. Привести паспортні дані для ФД, наприклад ФД-26КП, які можуть використовуватися в схемі досліджень.

4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Зібрати схему установки для досліджень (рис. 3.27).

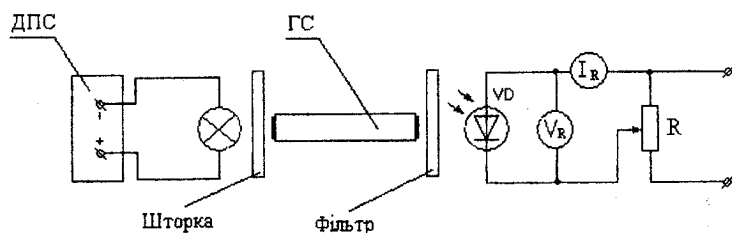


Рисунок 3.27

Світло, що використовується для опромінювання ФД, транспортується від джерела випромінювання за допомогою гнучкого світловода (ГС).

В якості джерела світла може використовуватися джерело когерентного випромінювання (лазерний СВД) або джерело некогерентного випромінювання.

У випадку використання лазерного СВД, інтенсивність випромінювання змінюють, змінюючи напругу живлення, що подається від джерела постійного струму (ДПС) в межах від 1...4 В.

У випадку використання джерела некогерентного світла, інтенсивність випромінювання змінюють за допомогою зміни діаметра діафрагми, через яку проходить світло.

Фото-ЕРС вимірюють потенціометром, струм - мікроамперметром.

2. При відключеній напрузі зміщення на ФД ( $U_D = 0$  В), за допомогою потенціометра  $R_n$  зняти ВАХ ФД для трьох значень інтенсивності його освітлення, змінюючи її за рахунок зміни діаметра діафрагми ГС, або напруги джерела некогерентного світла.

3. Повторити пункт 2, використовуючи послідовно синій, зелений та червоний світлофільтри.

4. В темновому режимі подати на ФД напругу прямого зміщення і зняти пряму гілку ВАХ ФД, при зміні значення напруги на ФД  $U_D$  рукою резистора  $R_n$ .

5. Повторити пункт 4 при повному освітленні ФД.

6. Провести розрахунки вказаних викладачем параметрів ФД і визначити  $I_\phi$  і  $I_T$ .

7. Побудувати ВАХ і графіки за п. 2 - 5, а також залежності фото-ЕРС і фотоструму насичення ФД від освітлення:

$$\varphi_{xx} = f(E), I_{\Phi} = f(E) \text{ і } \varphi_{xx} = f[\ln(I_{\Phi 1} / I_S + 1)].$$

8. Пояснити отримані результати.

### Робота 8. Дослідження фотодіодних характеристик ФД.

Мета роботи:

Вивчення та дослідження основних фізичних закономірностей, які визначають властивості та параметри ФД при подачі на них напруги зворотного зміщення (дослідження ВАХ і світлових характеристик).

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по даній роботі.
2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів ФД і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.
3. Привести паспортні дані для ФД, наприклад ФД-К-155, які можуть використовуватися в схемі досліджень.
4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Зібрати схему установки для досліджень (рис. 3.28).

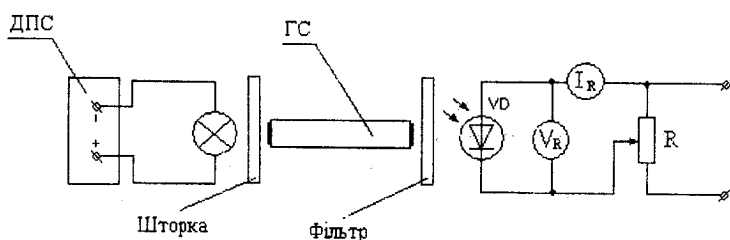


Рисунок 3.28

2. В темновому режимі подати на ФД напругу зворотного зміщення і зняти зворотну гілку ВАХ ФД, при зміні значення напруги на ФД  $U_D$  ручкою резистора  $R_n$ .

3. Повторити пункт 2 при зміні інтенсивності опромінювання ФД, використовуючи шторку або зміну напруги живлення, що подається від джерела постійного струму (ДПС) в межах від 1...4 В.

4. Повторити пункт 2, використовуючи послідовно синій, зелений та червоний світлофільтри.

5. Побудувати ВАХ за результатами вимірювань п. 2 - 4.

6. Провести розрахунки вказаних викладачем параметрів ФД і визначити  $I_{\Phi}$  і  $I_s$ .

Рівняння фотоелемента для фотодіодного режиму (рис. 3.28) можна записати таким чином:

$$I = \frac{\varphi - U}{R_H} = I_\phi - I_s \left[ \frac{q(\varphi_k - U)}{kT} - 1 \right], \quad (3.61)$$

де  $U$  - напруга, прикладена до ФД;  $\varphi_k$  - різниця потенціалів на  $p$ - $n$  переході;  $I$  - струм в зовнішньому ланцюзі ФД;  $R_H$  - опір навантаження.

Величина фотоструму пропорційна кількості квантів світла, що поглинається в напівпровіднику за одиницю часу в одиниці об'єму:

$$I_\phi = q\beta \cdot \alpha \cdot x \cdot \Delta l \frac{\Phi_\lambda}{h\nu}, \quad (3.62)$$

де  $\beta$  - квантовий вихід;  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання;  $x$  - коефіцієнт переносу, який враховує долю непрорекомбінованих носіїв заряду від загальної кількості носіїв, які виникають під дією світла;  $\Delta l$  - товщина світлочутливого шару фотоелемента;  $\Phi_\lambda$  - світловий потік, що поглинається в одиниці об'єму.

Для кількісної перевірки основних співвідношень для ФД звичайно використовується вираз (3.5).

Величина  $U$  встановлюється такою, щоб струм в ланцюзі ФД відповідав зоні насичення. При цьому струм в ланцюзі ФД, при відсутності освітлення дорівнює  $I_s$ .

При великих  $U$  вираз

$$\exp[q(\varphi_k - U)/(kT)] \rightarrow 0.$$

В цьому випадку  $I = I_\phi + I_s$ .

7. Пояснити отримані результати.

### Контрольні питання по роботах 7 і 8.

1. Пояснити хід досліджень в роботі.
2. Пояснити фізичні явища, що відбуваються в ФД, при його освітленні.
3. Пояснити фотодіодний режим роботи  $p$ - $n$  переходу.
4. Чим пояснюється висока чутливість ФД?
5. Що таке питома, спектральна та інтегральна чутливість ФД?
6. Чим пояснюється обмеження швидкодії ФД і які шляхи її підвищення?
7. Розказати про області використання ФД.
8. Від чого залежить величина темного струму ФД?
9. Яка залежність інтегральної чутливості та темного струму ФД від площі приймача?
10. Пояснити явище виникнення фотогальванічного ефекту при освітленні  $p$ - $n$  переходу.

11. Чим обмежене максимальне значення фото-ЕРС фотоелемента?
12. Поясніти ВАХ і світлові характеристики ФД.

### Робота 9. Дослідження статичних параметрів фототранзисторів.

Мета роботи:

Дослідження основних фізичних закономірностей, які визначають властивості та статичні параметри ФТ (дослідження ВАХ та світлових характеристик).

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по даній роботі.
2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів ФТ і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.
3. Привести паспортні дані для ФТ, наприклад для ФТ-1К, які можуть використовуватися в схемі досліджень.
4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Зібрати схему установки для досліджень (рис. 3.29).

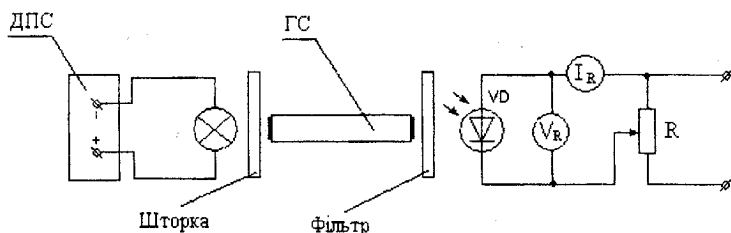


Рисунок 3.29

Установка конструктивно складається з тубуса, в якому міститься ФТ, джерела світла, діафрагми та світлофільтрів.

Інтенсивність освітлення змінюється шляхом переміщення лампи вздовж тубусу, довжина хвилі змінюється шляхом використання світлофільтрів (синього, зеленого та червоного).

Зміщення на ФТ подається з опорного джерела напруги.

2. Змінюючи інтенсивність освітлення, за рахунок зміни положення джерела світла в тубусі, провести вимірювання ВАХ через ФТ без світлофільтра.

3. Повторити пункт 2, використовуючи послідовно синій, зелений та червоний світлофільтри.

4. Змінюючи інтенсивність освітлення, за рахунок зміни положення джерела світла в тубусі, провести вимірювання люкс-амперних і люкс-вольтових характеристик.

5. Побудувати ВАХ і графіки залежностей  $I_{\phi} = f(E)$  і  $U_{\phi} = f(E)$  для п. 2 і 4.



6. Провести вказані викладачем розрахунки.

7. Пояснити отримані результати.

### Робота 10. Дослідження динамічних параметрів фототранзисторів.

Мета роботи:

Вивчення основних фізичних особливостей біполярних ФТ та дослідження їх динамічних характеристик ( $h$ -параметрів).

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по роботі.

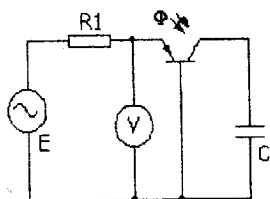
2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів ФТ та вимірювальних приладів, які використовуються в роботі, і ознайомитися з їх особливостями, параметрами та характеристиками.

3. Привести паспортні дані для ФТ, наприклад для ФТ-1К, які можуть використовуватися в схемі досліджень, а також розглянути особливості і умови використання вимірювальних приладів.

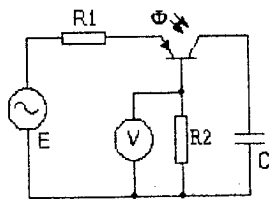
В роботі може використовуватися вимірювач  $h$ -параметрів малопотужних ФБТ - Л2-22.

Вимірювання  $h$ -параметрів із його використанням оснований на методах КЗ і ХХ, прийнятих для вимірювання параметрів чотириполосників.

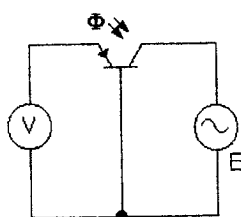
Принципи вимірювання  $h$ -параметрів в схемі із загальною базою приведені на рис. 3.30.



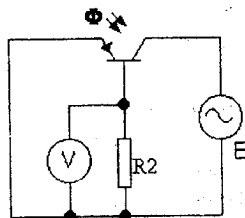
а) принцип вимірювання  $h_{115}$



б) принцип вимірювання  $(1-\alpha)$



в) принцип вимірювання  $h_{126}$



г) принцип вимірювання  $h_{226}$

Рисунок 3.30

Вони обчислюються за результатами вимірювань із виразів:

$$\begin{aligned} h_{11e} &= U_e/I_e = R_1 \cdot U/E, \\ h_{12e} &= U_e/I_k = U/E, \\ h_{22e} &= I_k/U_k = U/(E \cdot R_2), \\ 1 - \alpha &= I_0/I_e = (U \cdot R_1)/(E \cdot R_2). \end{aligned}$$

Як видно, для визначення  $h$ -параметрів і параметру  $1-\alpha$ , за даними схемами, необхідно підтримувати постійним відношення  $U/E$ . Це досягається шляхом підбору елементів схеми калібрування (рис. 3.31) для забезпечення рівності  $U/E = R/(R_k + R)$ .

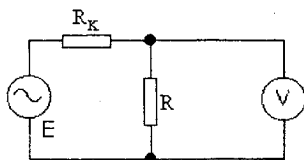
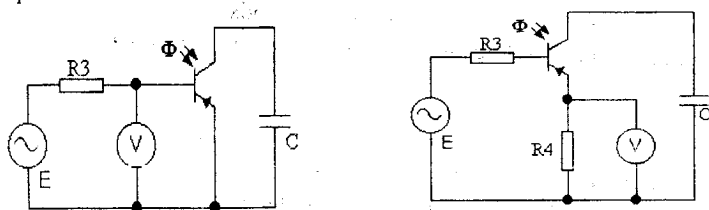


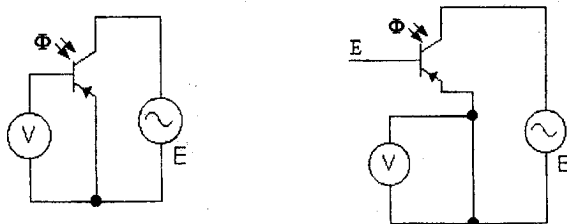
Рисунок 3.31

При вимірюванні  $h$ -параметрів в схемі із загальним емітером (рис. 3.32) використовуються ті ж самі принципи, що і при вимірюванні  $h$ -параметрів в схемі із загальною базою.



а) принцип вимірювання  $h_{11e}$

б) принцип вимірювання  $(\beta+1)$



в) принцип вимірювання  $h_{12e}$

г) принцип вимірювання  $h_{22e}$

Рисунок 3.32

Вони обчислюються за результатами вимірювань із виразів:

$$\begin{aligned}h_{11e} &= U_6/I_6 = R3 \cdot U/E, \\h_{12e} &= U_6/U_k = U/E, \\h_{22e} &= I_k/U_k = U/(E \cdot R4), \\ \beta + 1 &= I_c/I_6 = R3/(R4 \cdot E).\end{aligned}$$

4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Підготовка до роботи.

Перед роботою з вимірювачем Л2-22 необхідно уважно вивчити технічний опис, інструкцію з експлуатації, ознайомитися з його схемою і конструкцією.

**Вказівки заходів безпеки.**

У вимірювачі є постійна напруга 150 В відносно корпусу і змінна напруга 220 В. Тому необхідно дотримуватись обережності при ремонті вимірювача і не допускати дотику до струмопровідних частин.

Корпус в вимірювача повинний бути заземлений через клему захисного заземлення.

Перед включенням вимірювача необхідно всі ключі встановити в середнє положення, а ручки установки режимів - в нульове положення. Поставити перемикач «ГРАНИЦЬ h» у крайнє праве положення.

Включити вимірювач і дати йому прогрітисся 15 хвилин.

З'єднати перемичкою виводи емітера і бази. Закрити кришку блокування. Поставити ключ "h<sub>11</sub> - (1-α), (β-1)" у положення "h<sub>11</sub>". Резистором R76 («УСТ. НУЛЯ h» на задній стінці вимірювача) стрілку відлікового приладу встановити на нуль. Забрати перемичку, поставити ключ у середнє положення.

Встановити ручкою «КАЛИБР, h» стрілку відлікового приладу на кінць шкали (цифра 10).

Встановити ключ «ТОКИ—ОБЦ. БАЗА—ОБЦ. ЕМИТТЕР» у положення «ТОКИ». Встановить резистором «УСТ. НУЛЯ» стрілку відлікового приладу па нуль. Натисніть кнопку «КАЛИБР. ТОКА» і встановить резистором «КАЛИБР. ТОКА» стрілку відлікового приладу на кінць шкали (цифра 10).

Повернути ключ у середнє положення.

2. Порядок роботи.

Установка режиму може робитися без або з вставленим у колодку транзистором, але з відкритою кришкою блокування:

а) установка колекторної чи емітерної напруги робиться ручками U<sub>к</sub>, U<sub>е</sub> ступеннями через 1 В чи 10 В.

б) установка струму емітера робиться ручками  $I_E$  мА для випадку:  $I_E > 0.1$  мА ступенями через 0.1 мА, 1 мА і 10 мА.

Для випадку  $I_E < 0.1$  мА струм встановлюється ручкою  $I_{E\mu A}$ . В цьому випадку ручки  $I_E$  мА можуть знаходитися в будь-якому положенні, тому що струм, встановлюваний цими ручками, не подається на транзистор.

**Вимірювання  $h$ -параметрів в схемі із загальною базою робиться в такий спосіб:**

а) встановити тумблер «р-п-р – п-р-п» в положення, яке відповідає типу транзистора, що підключається;

б) встановити необхідний режим випробувань;

в) встановити транзистор в колодку для його підключення і закрити кришку;

Примітки.

- при включенні транзистора варто пам'ятати, що в колодці вивід емітера продубльований. Це дозволяє підключати будь-які транзистори, уникаючи перекручування виводів.

- у транзисторів із чотирма виводами корпусний вивід може бути приєднаний до будь-якого виводу колодки (Е, Б чи К).

- параметри  $h_{11E}$ ,  $(\beta+1)$  в положенні 0.3 перемикача «Границы  $h$ » і параметри  $h_{11B}$ ,  $(1-\alpha)$  в положенні 10 того ж перемикача при струмах емітера менше 0.1 мА не вимірюються.

г) встановити ключ «ТОКИ—ОБЩ. БАЗА—ОБЩ. ЕМИТТЕР» в положення «ОБЩ. БАЗА»;

д) використовуючи ключі « $h_{11}—(1-\alpha)(\beta+1)$ », « $h_{12}-h_{22}$ », перемикачем «ГРАНИЦЬ  $h$ » відрахувати величину параметрів за стрілковим приладом.

**Вимірювання  $h$ -параметрів в схемі із загальним емітером робиться в такий спосіб:**

а) встановити тумблер «р-п-р—п-р-п» в положення, яке відповідає типу транзистора, що підключається;

б) встановити необхідний режим;

в) встановити транзистор в колодку для підключення транзистора і закрити кришку;

г) встановити ключ «ТОКИ—ОБЩ. БАЗА—ОБЩ. ЕМИТТЕР» в положення «ОБЩ. ЕМИТТЕР»;

д) користаючись ключами « $h_{11}—(1-\alpha)(\beta+1)$ », « $h_{12}-h_{22}$ », перемикачем «ГРАНИЦЬ  $h$ » відрахувати величину параметрів по стрілочному приладу.

Примітка. Параметр  $h_{12}$  в схемі з загальним емітером може бути обмірюваний лише в транзисторів із  $f_t < 100$  МГц.

**ЗАПОБІЖНІ ЗАХОДИ.** Для того, щоб цілком виключити пошкодження транзисторів при вимірюваннях, необхідно пам'ятати:

а) не допускається регулювання  $U_K$  і  $U_S$  при вставленому транзисторі і закритій кришці;

б) не допускається встановлювати  $U_K$  більше допустимого за ТУ для даного типу транзистора;

в) не допускається встановлювати  $I_E$  більше допустимого за ТУ для даного типу транзистора;

г) тумблер «р-п-р—п-р-п» повинний бути встановлений в положення, що відповідає типу;

д) встановлювати транзистор в колодку лише в строгій відповідності до цоколівки на даний тип транзистора.

Варто пам'ятати, що при вимірюванні  $h$ -параметрів деяких високо-частотних транзисторів можлива їхня генерація. При генерації стрілка відлікового приладу різко відхиляється в зворотну сторону.

Як правило, допустима зворотна напруга переходу емітер-база значно менша допустимої напруги переходу колектор-база. Тому необхідно бути дуже уважним при вимірюванні основних параметрів.

3. Дослідити залежність  $h$ -параметрів БТ від величини освітленості  $h = f(\Phi)$ .

4. Дослідити спектральну залежність параметрів БТ за наведеними схемами  $h = f(\Phi)$ , використовуючи синій, зелений та червоний світлофільтри.

5. Побудувати графіки  $h = f(\Phi)$  і  $h = f(\lambda)$ .

6. Провести вказані викладачем розрахунки.

7. Пояснити отримані результати.

### **Контрольні питання до робіт 9 і 10.**

1. Пояснити хід досліджень в роботі.

2. Пояснити фізичні явища що відбуваються в БФТ при його освітленні.

3. Пояснити фізичні принципи роботи ПФТ.

4. В чому полягає відмінність ФТ від інших ФП?

5. Які основні характеристики і параметри БФТ?

6. Як впливає температура на параметри БФТ?

7. Навести основні конструкції та схемне застосування ФТ.

8. Навести еквівалентну схему БФТ та пояснити її.

9. Які є основні типи ФТ?

10. Чим викликана менша швидкодія ФТ порівняно з ФД?

11. Навести основні матеріали та домішки до них, що використовуються при виготовленні ФТ.

12. Від чого залежить темновий струм ФТ?

13. Чому фоточутливість ФТ більша, ніж фоточутливість ФД?

### **Робота 11. Дослідження статичних параметрів фототиристорів.**

Мета роботи:

Вивчення та дослідження основних фізичних закономірностей, які визначають властивості та статичні параметри ФТР (дослідження ВАХ і світлових характеристик).

Домашнє завдання.

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями по даній роботі.

2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів ФТР і ознайомитися з їх параметрами та характеристиками.

3. Привести паспортні дані для ФТР, наприклад для ТО142-80, які можуть використовуватися в схемі досліджень.

4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Зібрати схему установки для досліджень (рис. 3.33).

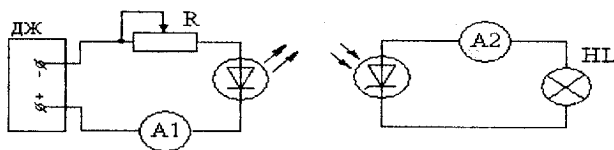


Рисунок 3.33

Як показано на схемі (рис. 3.33), джерело світла живиться від джерела (ДЖ) постійного струму. На ФТР підтримується постійна напруга  $U = 12$  (В). За допомогою потенціометра  $R$  змінюють значення вхідного струму і відповідно, величину світлового потоку, що падає на ФТР.

Напруга зміщення на ФТР подається з опорного джерела напруги.

В момент відкривання ФТР лампочка НЛ починає світитися. Вхідний струм вимірюють за амперметром А1, вихідний струм - амперметром А2.

2. В темновому режимі подати на ФТР пряму напругу і зняти гілку ВАХ, при зміні значення напруги на ФТР  $U_T$  рукою потенціометра  $R_n$ .

3. Зняти світлові ВАХ ФТР для трьох значень вхідного струму А1 за допомогою потенціометра  $R_n$ .

4. Змінюючи інтенсивність освітлення за допомогою потенціометра  $R$ , провести вимірювання люкс-амперних характеристик.

5. Побудувати ВАХ і графіки залежностей  $I_{\phi} = f(E)$  для п. 2 і 4.

6. Провести вказані викладачем розрахунки і визначити вхідний струм, при якому відбувається відкривання ФТР.

7. Пояснити отримані результати.

#### Контрольні питання.

1. Пояснити хід досліджень в роботі.

2. Пояснити фізичні явища, що відбуваються в ФТР при його освітленні.

3. Чим пояснюється наявність темнового струму ФТР?

4. Що таке питома, спектральна та інтегральна чутливість ФТР?

5. Пояснити основні характеристики ФТР.

6. Чим пояснюється обмеження швидкодії ФТР і які шляхи підвищення швидкодії існують?

#### Задачі.

1. Користуючись люкс-амперною характеристикою ФСК - 1, що зображена на рис. 3.34, визначити його питому чутливість, якщо темновий струм  $I_T = 15 \text{ мкА}$ , освітленість  $E = 800 \text{ лк}$ , напруга на ФР  $U = 25 \text{ В}$ , площа світлочутливої поверхні  $S = 0.3 \text{ см}^2$ .

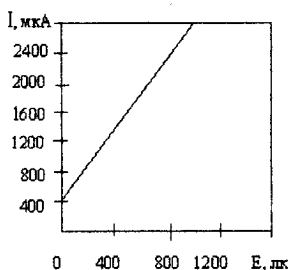


Рисунок 3.34

Відповідь:  $3.98 \text{ мА}/(\text{лм}\cdot\text{В})$

2. Фоторезистор ФСК - 1, люкс-амперна характеристика якого зображена на рис. 3.34, використовується в схемі на рис. 3.35.

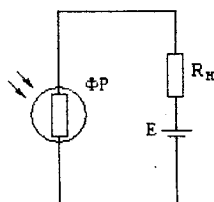


Рисунок 3.35

Напруга джерела струму  $E = 50 \text{ В}$ , опір резистора навантаження  $R_n = 10 \text{ кОм}$ , максимально допустима потужність, що розсіюється ФР,  $P_{max} = 125 \text{ мВт}$ . Площа світлочутливої поверхні  $S = 0.3 \text{ см}^2$ .

Визначити:

а) світловий потік  $\Phi$ , при якому падіння напруги на навантаженні  $U_R = 25 \text{ В}$ ;

б) потужність  $P$ , що розсіюється фоторезистором в цьому випадку;

в) мінімальне значення опору резистора навантаження  $R_{n \text{ min}}$ , при якому потужність, що розсіюється ФР, не перевищує максимально допустиму, якщо значення світлового потоку  $\Phi = 0.03 \text{ лм}$ .

Відповідь: а)  $2.55 \cdot 10^{-2} \text{ лм}$ ; б)  $62.5 \text{ мВт}$ ; в)  $4.44 \text{ кОм}$ .

3. Наведіть схему ввімкнення ФД, що працює в фотодіодному режимі, нарисуйте та поясніть його ВАХ і світлові характеристики.

4. Наведіть схему ввімкнення ФД, що працює в вентиляльному режимі, нарисуйте та поясніть характеристики ФД для декількох світлових потоків. Укажіть на характеристиках режими ХХ і КЗ.

5. Якими фізичними явищами можна пояснити зменшення фотоструму з ростом частоти модуляції світлового потоку?

9. Чим обмежена максимальна фото-ЕРС ФД, що працює в вентиляльному режимі?

10. Електронно-дірковий перехід площею  $10^{-2} \text{ см}^2$  германієвого ФД освітлюється джерелом світла, який викликає генерацію носіїв заряду зі швидкістю  $4.6 \cdot 10^{18} \text{ 1/(см}^3 \cdot \text{с)}$ .

Визначити фотострум КЗ ФД при зворотній напрузі, якщо концентрація домішок в областях *p-n* переходу  $N_a = N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , час життя носіїв  $\tau = 10 \text{ нс}$ . Порівняти струм КЗ із темновим фотострумом при зворотній напрузі. Розрахувати напругу ХХ ФД при  $T = 300 \text{ К}$ .

Відповідь:  $I_{\text{то}} = 3.9 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ ;  $I_{\text{зв}} = 80 I_{\text{то}}$ ;  $U_0 = 0.11 \text{ В}$ .

11. Який зв'язок між інтегральними чутливостями ФТ при ввімкненні його в схему із загальною базою і із загальним емітером?

12. Визначити повний струм ФД, якщо на нього падає світловий потік  $\Phi = 0.015 \text{ лм}$ , інтегральна чутливість  $S_i = 20 \text{ мА/лм}$ , а темновий струм  $I_{\text{т}} = 25 \text{ мкА}$ .



## 4 ОПТОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ

### 4.1 Оптропари

Одними з найпоширеніших ОЕП є оптрони, за допомогою яких можуть виконуватися різні приладові функції [2, 5, 8, 17-22]. Тому, в оптоелектроніці їх широко використовують як самостійні окремі прилади, так і в складі інших ОЕП.

Широке розповсюдження оптронів пояснюється такими перевагами оптопар:

1. Відсутністю електричного зв'язку між входом і виходом та зворотнього зв'язку між фотоприймачем і випромінювачем.

Опір ізоляції між входом і виходом оптопар може сягати  $10^{14}$  Ом, а прохідна ємність не перевищувати 2 пФ і в деяких оптронах знижується до долі пФ.

2. Широкою смугою робочих частот.

Передача сигналів можлива з частотою від 0 до  $10^{14}$  Гц.

3. Можливістю керування вихідними сигналами шляхом впливу на оптичну частину приладу.

4. Високою завадостійкістю оптичного каналу, за рахунок його несприйнятливості до впливу зовнішніх електромагнітних полів.

5. Можливістю конструктивного і технологічного суміщення з іншими напівпровідниковими і мікроелектронними приборами.

Але оптрони характеризуються і недоліками:

1. Відносно великою споживаною потужністю, внаслідок того, що в оптроні двічі проходить перетворення енергії, із невисоким їх ККД.

2. Невисокою температурною стабільністю і радіаційною стійкістю.

3. Погіршенням параметрів протягом деякого (порівняно невеликого) часу.

4. Порівняно високим рівнем власних шумів.

Загальна схематична структура оптопар, яка найчастіше застосовується в оптоелектроніці, наведена на рис. 4.1, де В - випромінювач; ОК - оптичний канал; ФП - фотоприймач.

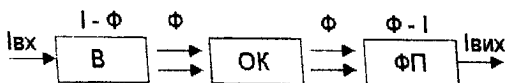


Рисунок 4.1

В таких оптопарах вхідними параметрами є параметри випромінювача, а саме:

номінальний вхідний струм  $I_{вх.ном}$  - значення струму, що рекомендується для оптимальної експлуатації оптопари і використовується при вимірюванні її основних параметрів;

вхідна напруга  $U_{вх}$  - падіння напруги на випромінюючому діоді в прямому напрямку, при відповідному значенні прямого струму ( $I_{вх.ном}$ );

вхідна ємність  $C_{вх}$  - ємність між вхідними виводами оптопари в заданому режимі.

Крім того, використовуються граничні вхідні параметри:

максимальний вхідний струм  $I_{вх.мах}$  - максимальне значення постійного прямого струму, що допускається пропускати через випромінювальний діод оптопари;

зворотна вхідна напруга  $U_{вх,зв}$  - максимальне значення зворотної напруги будь-якої форми (постійне, імпульсне, синусоїдальне і ін.), що може бути прикладена до входу оптопари в зворотному напрямку.

Ці параметри визначають яскравість свічення  $L_{вих}$  випромінювача і характеризують світловий потік  $\Phi_{вх}$ , який попадає на фотоприймач. Тому, вихідні параметри оптопар - це параметри їх фотоприймачів - напруга  $U_{вих}$  і струм  $I_{вих}$ .

Параметри та характеристики оптронів визначаються як параметрами їх складових елементів, так і конструктивною реалізацією.

Основні схемотехнічні властивості оптронів визначаються, головним чином, характеристиками фотоприймача. Його особливості визначають різновиди оптронів: резисторні, діодні, транзисторні, тиристорні, із складеним транзистором.

Резисторні оптопари мають в якості випромінювача мініатюрну лампочку розжарювання або світлодіод, який дає видиме або інфрачервоне випромінювання. Приймачем випромінювання є фоторезистор із селеніда кадмія або сульфїду свинцю, який може працювати як на постійному, так і на змінному струмі. В деяких оптопарах, призначених для комутації, розміщується декілька ФР.

Для роботи резисторної оптопари необхідно узгодження випромінювача та ФР по спектральним характеристикам.

Резисторні оптопари застосовуються для автоматичного регулювання, підсилення, зв'язку між каскадами, керування безконтактними подільниками напруги, модуляції сигналів, формування різних сигналів і т. і.

В якості фотоприймачів оптопар цього типу використовують ФР на основі CdS і CdSe. При засвіченні їх опір зменшується від  $R_T$  (темного) до  $R_{св}$  (при освітленні). Одним з головних параметрів резисторних оптопар є відношення цих опорів; значення  $R_T/R_{св}$  може досягати  $10^4-10^7$ .

Фоторезистори, як правило, характеризуються великою інерційністю. Саме тому в ФР оптопарах в якості джерел випромінювання шей досі використовуються мініатюрні лампи розжарювання, до переваг яких відносяться: хороше відтворення параметрів, довгий час роботи без зміни характеристик, мала вартість.

Невисока швидкодія (час переключення - порядку  $1 \cdot 10^{-2}$  с) ламп розжарювання в оптопарах цього типу не є недоліком, оскільки загальний час переключення (до  $10^{-1}$  с) визначається фотоприймачем.

На рис. 4.2. наведені деякі характеристики резисторних оптопар.

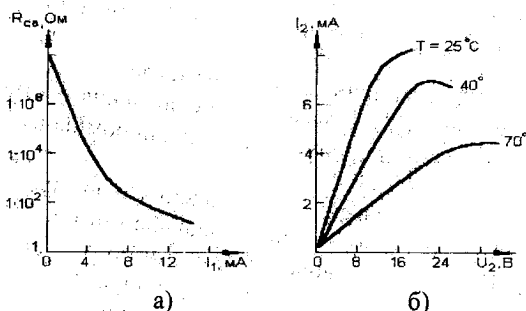


Рисунок 4.2

Збільшення струму  $I_1$  на вході оптрона забезпечуються збільшенням світлового потоку випромінювання, в результаті чого  $R_{св}$  знижується (рис. 4.2, а).

Збільшення температури  $T$  веде до зменшення рухливості вільних носіїв заряду в фоторезисторі і збільшення  $R_{св}$ , і, відповідно, до зменшення  $I_2$  при тій самій напрузі  $U_2$  на виході (рис. 4.2, б).

З ростом  $T$  не тільки проходить збільшення  $R_{св}$ , але і понижується і  $R_T$  (росте концентрація власних носіїв заряду в зоні провідності напівпровідника). При цьому відношенні  $R_T/R_{св}$  дуже сильно падає (при  $70^\circ\text{C}$  може складати  $1 \cdot 10^2$ ), що робить резисторну оптопару непридатною для використання при високих температурах.

Більш перспективним, в сучасних резисторних оптопарах, є застосування світлодіодів на основі GaP, спектр випромінювання яких добре узгоджений зі спектрами збудження фотопровідності CdS- і CdSe-фотоприймачів.

Резисторні оптрони характеризуються лінійністю і симетричністю вихідної ВАХ, відсутністю внутрішніх ЕРС. Тому, незважаючи на значну інерційність (0.1 - 0.01 с), їх широко використовують в оптоелектроніці.

В діодних і транзисторних оптопарах (рис. 4.3), в якості випромінювача використовуються, в основному, інфрачервоні AsGa СВД.

В діодних оптопарах, в якості фотоприймача використовуються, в основному, кремнієві ФД, які можуть працювати у фотогенераторному режимі, створюючи фото-ЕРС до 0.8 В, або у фотодіодному режимі.

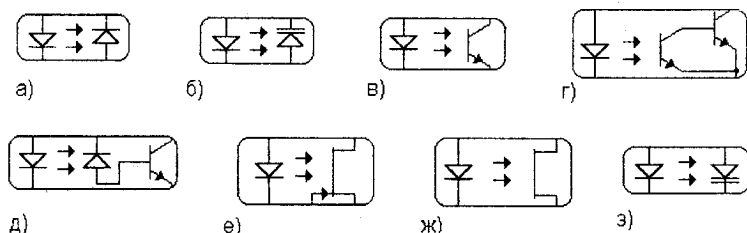


Рисунок 4.3

Діодні оптопарі мають найбільш лінійну передатну характеристику серед інших типів оптопар і широко застосовуються для передачі аналогового сигналу.

Широкий діапазон робочих частот, малий рівень власних шумів, слабка температурна залежність параметрів - це також переваги діодних оптопар з погляду їхнього застосування в аналогових пристроях.

На основі діодних оптопар створюються імпульсні трансформатори, які не мають обмоток. Оптопарі використовуються для передачі сигналів між блоками складної РЕА, для керування роботою різних мікросхем, особливо мікросхеми на МДН транзисторах, у яких вхідний струм дуже малий.

Багатоканальні діодні оптопарі мають в одному корпусі декілька оптопар.

Використовуючи сучасні діодні оптопарі (наприклад, АОД 101), при хорошій термостабілізації, можна забезпечити передачу аналогового сигналу з нелінійністю 1-5% при  $I_{ex,max}/I_{ex,min} = 2-3$ . Але зниження нелінійності веде до різкого звуження робочого діапазону струмів.

Діодні оптрони, виготовлені на базі *p-i-n* фотоприймачів, відрізняються найбільшою швидкодією (до 0.01 мкс), проте їх коефіцієнт передачі по струму складає одиниці відсотка.

При експлуатації оптопар такого типу важко одержати час переключення  $t_{nep} = 20 - 40$  нс, що приводиться в паспорті таких приладів тому, що при тих малих вихідних струмах, які забезпечує ця оптопара, її навантаження повинне бути 1 - 10 кОм. Таке навантаження, при власній вихідній ємності оптопарі близько 10 пФ, дає постійну часу перезаряду 0.1 - 1 мкс.

Таким чином, швидкодія такого типу оптопар визначається, найчастіше, їх вихідною ємністю, а швидкодія оптопар, що задається в довідниках, визначається при роботі на навантаження 50 Ом, що практично характеризує граничну швидкодію оптопарі, яка може бути досягнута при особливій побудові ланцюга навантаження.

Зміна вхідного струму оптопарі по-різному впливає на зміну часу наростання  $t_{нар}$  і спаду  $t_{сп}$  сигналу (рис. 4.4), тобто загальна величина  $t_{nep}$  практично не змінюється.

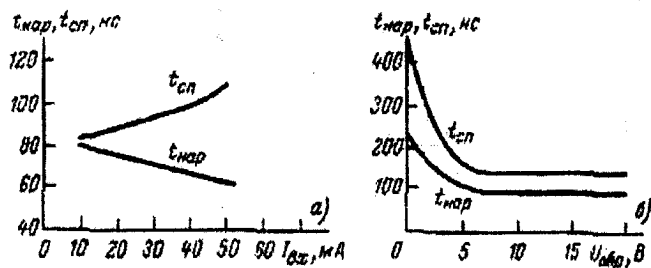


Рисунок 4.4

При  $U_{зв} = 3 - 5$  В, перехідні процеси в  $p - i - n$  фотодіоді протікають настільки швидко, що швидкодія оптопари вже визначається випромінювачем і тому від напруги на фотодіоді не залежить.

В транзисторних оптронах (рис. 4.3), в якості приймача найчастіше використовуються біполярні кремнієві фототранзистори  $p-n-p$  типу.

Основні параметри вхідного кола таких оптопар аналогічні діодним оптопарам. Оптрони цього виду працюють, в основному, в ключовому режимі і застосовуються в комутаційних схемах, пристроях зв'язку різних датчиків з вимірювальними блоками, в якості реле і в багатьох інших випадках.

Транзисторні оптрони, відносно діодних, характеризуються більшою схемотехнічною гнучкістю, високим коефіцієнтом передачі по струму, але меншою швидкодією (2 - 5 мкс).

Оптрони із складеними транзисторами характеризуються великими коефіцієнтами передачі струму.

Тиристорні оптрони мають в якості фотоприймачів кремнієві фототиристори і застосовуються в ключових режимах. Основна область їх застосування - схеми для формування потужних імпульсів, керування потужними тиристорами, керування комутацією різних пристроїв з потужним навантаженням з  $U_{ком} = 50 - 600$  В і  $I_{ком} = 0.1 - 10$  А, а також в мережах електротехнічного призначення ( $U_{ком} = 100 - 1300$  В,  $I_{ком} = 0 - 320$  А).

В інтегральних діодних і транзисторних оптронах з оптичним зв'язком, особливо в приладах на основі GaAs, велике значення має ефект самопідсвічування. Він призводить до додаткової модуляції глибоких областей бази, а також сприяє інтенсивному рекомбінаційному випромінюванню.

Принцип дії такого оптрону простий. Електричний сигнал поступає на емітерний  $p-n$  перехід і перетворюється в світловий. Світло, поширюючись через базу, поглинається в колекторі і викликає в ньому виникнення фотоструму.

Такий оптотранзистор являє собою монолітну оптопару, в якій не треба будь-яких додаткових вимог до розв'язки її елементів. Практично він реалізується у вигляді гетероструктури на основі з'єднання GaAlAs.

Завдяки миттєвій передачі оптичних посилення через область бази, може бути суттєво підвищена швидкодія транзистора (до 10 нс) при одночасному забезпеченні високої колекторної напруги (сотні вольт).

Не дивлячись на значні втрати енергії в процесі подвійного перетворення (в емітері і колекторі), загальний коефіцієнт передачі такого прилада може досягати декількох одиниць.

Використання оптотранзисторів в якості складових частин тиристора дозволяє скоротити час включення при збереженні високих значень комутаційних струму і напруги та забезпечення стійкості до пульсаційних ефектів.

В гібридних мікросхемах використовуються мініатюрні безкорпусні оптрони з відкритим оптичним каналом (рис. 4.5).

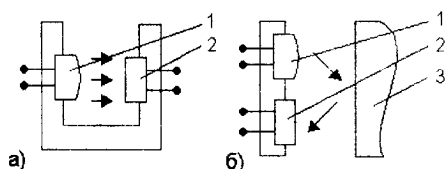


Рисунок 4.5

У них, між випромінювачем 1 та фотоприймачем 2 (рис. 4.5, а), існує повітряний зазор, в якому може переміщуватися світлонепроникна перешкода. В іншому варіанті, світловий потік випромінювача попадає на фотоприймач, відбиваючись від якого небудь об'єкта 3 (рис. 4.5, б).

Оптоелектронні інтегральні мікросхеми (ОЕІМС), в переважній більшості, - це гібридні ІМС, що містять безкорпусні оптрони, безкорпусні узгоджувальні компоненти або ІМС, підключені до виходу фотоприймача.

Виділяють три основні групи ОЕІМС: перемикальні, лінійні і релейного типу (оптореле).

В перемикальній ОЕІМС, як правило, діодний оптрон навантажений на один з вентилів базового кристалу ТТЛ ІМС, із якої вилучений багатомітерний транзистор і збільшений опір резистора навантаження в базовому колі вхідного транзистора.

В схемах оптоелектронних лінійних ключів оптрони виконують функції імпульсних трансформаторів.

В схемах оптореле передбачаються два вхідні кола: включення і виключення.

Оптрони із зовнішнім оптичним і внутрішнім електричним зв'язками є основним структурним елементом оптоелектронних підсилювачів і перетворювачів зображення.

Режим їх роботи можна описати як:

$$U_0 = \text{const}, B_{\text{вх}} = \text{var.}$$

Вхідним керуючим сигналом тут є світловий потік або потужність випромінювання. Зміна  $B_{\text{вх}}$  викликає зміну імпедансу фотодвополюсника  $Z_{\text{фд}}$ , що приводить до зміни струму і перерозподілу напруги на елементах оптрону.

Якщо яскравість свічення пропорційна до струму, що протікає, то всякій зміні  $B_{\text{вх}}$  буде відповідати нове значення  $B_{\text{вих}}$ .

При однаковому спектральному складі вхідного і вихідного випромінювань спостерігається монохроматичне підсилення світлового потоку. Якщо  $B_{\text{вх}}$  і  $B_{\text{вих}}$  різного спектрального складу, випромінювання перетворюється. В цьому випадку відбувається гетерохроматичне підсилення.

Оптрони з додатним зворотним зв'язком, в якому приймач і джерело випромінювання зв'язані електрично, називаються регенеративними оптронами. На їх ВАХ можуть бути ділянки спаду, які забезпечують можливості генерування, підсилення і переключення електричних і світлових сигналів.

При додатному зворотному зв'язку оптрон має два входи: оптичний і електричний.

Конструктивно він виконаний таким чином, що частина вихідного світлового потоку попадає знову на фотоприймач, ввімкнутий послідовно з джерелом світла. Це призводить до зменшення імпедансу  $Z_{\text{фд}}$  і зростання яскравості свічення джерела. Процес буде наростаючим до тих пір, поки зміна  $Z_{\text{фд}}$  не буде суттєво впливати на величину струму або напруги, яка підводиться до джерела світла.

Характеристики цього оптрона нагадують характеристики електромагнітного реле або тригера. Наявність двох виходів суттєво розширює область застосування таких оптронів і збільшує набір можливих схемних рішень.

В оптронах з від'ємним зворотним зв'язком фотоприймач і джерело світла з'єднуються паралельно. При такому зворотному зв'язку зміна свічення джерела впливає на імпеданс двополюсника, що призводить до зменшення величини  $B_{\text{вх}}$ . Такі оптрони можуть виконувати функції нелінійного опору з регульованими характеристиками.

Основні параметри різних інтегральних діодних оптронів наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Тип елемента	Число каналів	$U_{\text{вих max, В}}$	$R_{\text{вих, ГОм}}$	$U_{\text{вих, В}}$	$I_{\text{вих опт max, МА}}$	$I_{\text{вт вих, мКА}}$	$U_{\text{вих опт max, В}}$	$U_{\text{вих зв, В}}$	$K_I \text{ min, \%}$	$T, ^\circ\text{C}$
МОСД213	2	3000	100	500	60	0.05		70	10	-55...+100
МОСД217	2	3000	100	500	60	0.05		30	100	-55...+100
МОСД223	2	3000	100	500	60	0.05		70	1000	-55...+100
ЗОД109А	3	100	1.0	100	10	2.0	1.5	40	1.	-60...+70
ЗОД109Б	3	100	1.0	100	10	2.0	1.5	12.6	1.	-60...+70
ЗОД109В	2	100	1.0	100	10	2.0	1.5	40	1.2	-60...+70

Аналіз параметрів і конструктивних особливостей основних типів діодних оптопар з цієї таблиці показує, що серед них можуть бути виділені прилади декількох груп.

Середній технічний рівень діодних оптопар універсального призначення характеризується значеннями  $K_I = 1...1.5\%$  і  $t_{\text{нар(сн)}} = 100...300$  нс.

Оптопари, призначені для роботи у вентиляльному режимі, характеризуються підвищеним значенням  $K_I > 3...4\%$ . На відміну від інших типів оптопар, у них цей параметр повинен вимірюватися в найбільш жорсткому режимі, без прикладення зворотної напруги на фотоприймач.

Безкорпусні оптопари, призначені для використання в гібридних мікросхемах, як правило, характеризуються невисокими значеннями зворотної напруги на ФД.

Оптопари широко використовуються як датчики.

За конструктивними ознаками серед оптоелектронних датчиків можна виділити чотири основні групи.

1. Оптопари з відкритим оптичним каналом, в якому розміщується проміжний чутливий елемент (ЧЕ) (або контрольованне середовище), модулюючий випромінювання.

2. Інтегрально-оптичні датчики, в яких в якості ЧЕ використовується планарний світловод, виготовлений методами інтегральної оптики.

3. Датчики з волоконно-оптичними зв'язками, в яких передача оптичної енергії до ЧЕ і від нього здійснюється оптичними волокнами.

4. Волоконно-оптичні датчики, в яких саме волокно є чутливим елементом.

Оптопари з відкритим оптичним каналом зручні для контролю кількості та положення об'єктів, а також стану їх поверхні, вимірювання



швидкості обертання і т. і. Через складність розрізнення двох близьких положень такі оптопари використовуються переважно в якості лічильників ситуацій "є-немає".

Конструктивно найбільш зручні відбивальні оптопари, одностороннє розташування яких відносно об'єкта, що контролюється, дозволяє вбудовувати їх практично в будь-яке існуюче обладнання.

В інтегрально-оптичних датчиках, в якості чутливого елемента використовують плоский одношаровий світлопровід, який виготовляється методами інтегральної оптики на діелектричній підкладинці. З одного боку до світлопроводу під'єднують випромінювач (лазер або світлодіод), з другого - фотоприймач.

Введення-виведення випромінювання в інтегрально-оптичні датчики здійснюється прийнятими для інтегрально-оптичних пристроїв методами: за допомогою призм, дифракційних ґраток, волоконних світловодів, лінз, вмонтованих в торець світловодів. Можливі і повністю інтегровані структури.

В датчиках з волоконно-оптичними лініями зв'язку (ВОЛЗ) різні чутливі елементи розташовуються в місці розриву звичайної ВОЛЗ. Вони змінюють свої властивості під впливом зовнішніх діючих факторів, впливаючи на світлопередачу ВОЛЗ.

Найбільш поширеними є датчики з чутливими елементами мембранного типу, в яких такі зовнішні впливи, як тиск, прискорення, вібрація, мікропереміщення перетворюються в зміну положення мембрани відносно торців світловодів і тим самим в зміну сигналу фотоприймача.

Переваги цих датчиків - малі втрати, широкосмуговість, робота з оптичним сигналом без перетворення, відсутність електричних кіл, вибухобезпечність.

В волоконно-оптичних датчиках чутливим елементом є частина волокна.

Волоконно-оптичні датчики з амплітудною модуляцією звичайно засновані на керованому порушенні умови повного внутрішнього відбиття в місці різкого згину волокна або на деякій довжині волокна, що зазнає деформації. При цьому частина світлового потоку виходить із серцевини в оболонку волокна, а з оболонки повертається всередину або розсіюється в навколишньому середовищі.

Модуляція світлопропускання здійснюється внаслідок зміни ступеня деформованості волокна або шляхом поміщення зігнутої ділянки в середовища з різними показниками заломлення.

Волоконно-оптичні датчики з фазовою модуляцією рееструють зміну фази оптичної хвилі, яка виникає за рахунок зміни властивостей світловода при різних зовнішніх впливах.

Поляризаційні волоконно-оптичні датчики основані на тому, що в волокнах, виготовлених з оптично активного матеріалу, поляризація вип-

роміювання, яке проходить по ньому, може змінюватися під впливом зовнішніх впливаючих факторів.

## 4.2 Використання ОЕП

Елементарні ОЕП широко використовуються в аналогових і цифрових схемах: перетворювачах різних фізичних величин, генераторах, трансформаторах, підсилювачах, логічних схемах, різних системах аналогового і цифрового перетворення [2-4, 8, 17-24].

Схема найпростішого релаксаційного генератора на БФТ наведена на рис. 4.6.

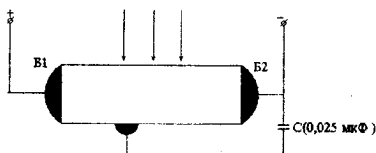


Рисунок 4.6

При необхідності мати на виході прямий та інверсний світлові потоки може використовуватися схема (рис. 4.7).

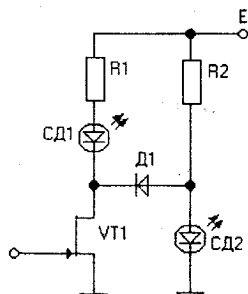


Рисунок 4.7

Значення резисторів для цієї схеми можна визначити із системи рівнянь:

$$\begin{cases} R1 \geq \frac{E - U_{CD1} - U_{Kset}}{I_{CD1}}; \\ R2 \geq \frac{E - U_{CD2}}{I_{CD2}}; \\ I_{Kmax} \geq I_{CD1} + \frac{E - U_{Kset} - U_{D1}}{R2} \end{cases}$$

де  $U_{CD1}$ ,  $U_{CD2}$  – напруга запалювання відповідно першого та другого СВД;  $U_{Kset}$  – напруга насичення транзистора;  $I_{CD1}$ ,  $I_{CD2}$  – струм, відповідно, пер-

першого та другого СВД;  $U_{D1}$  – пряма напруга діода;  $I_{Kmax}$  – максимально допустимий струм транзистора.

Схема (рис. 4.7) працює таким чином.

При збудженні вхідним сигналом транзистор відкривається, струм через  $R2$  збільшується, потенціал колектора понижається і при виконанні умови

$$I_{CDпор}R + U_{CD1} = E - U_{KE},$$

де  $I_{CDпор} \leq I_{CD1}$  - порогове значення  $CD1$ , запалюється  $CD1$  - збуджується прямий оптичний вихід. Якщо транзистор закривається, струм через  $R1$  і  $R2$  зменшується, потенціал колектора підвищується,  $D1$  закривається, гаситься  $CD1$ , запалюється  $CD2$  і на інверсному оптичному виході з'являється сигнал.

Така схема дозволяє працювати з напругами живлення  $> 2V$ . Можливе також використання даної схеми без діода  $D1$ , тоді напруга живлення обмежується за значенням і складає не більше подвоєної напруги запалювання СВД.

Досягнення сучасної оптоелектроніки вже дозволяють створювати ОЕП із різними властивостями не тільки за схемотехнічними принципами, а і за рахунок застосування нових конструктивних і технологічних рішень.

### 4.3 Завдання, контрольні питання та задачі

#### Робота 12. Дослідження характеристик оптопар.

Мета роботи.

Вивчення та дослідження основних властивостей та характеристик різних типів оптопар.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями по роботі.
2. Вивчити умовні позначення та маркування основних типів оптопар.
3. Привести паспортні дані для оптопар (наприклад АОД102А, АОТ105Б, ОЕП-204), які можуть використовуватися при дослідженнях.
4. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Зібрати схему установки для досліджень (рис. 4.8).
2. Зняти вхідні характеристики для трьох типів оптронів в схемі  $I_{ex} = f(U_{ex})$ .
3. Зняти вихідні характеристики для трьох типів оптронів в схемі  $I_{vix} = f(I_{ex})$ .
4. Побудувати графіки залежностей для п. 2 і 3.
5. Провести вказані викладачем розрахунки параметрів.

6. Пояснити отримані результати.

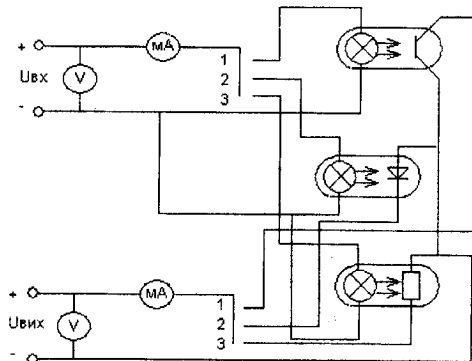


Рисунок 4.8

### Контрольні питання.

1. Пояснити хід досліджень в роботі.
2. Пояснити фізичні явища, що відбуваються в ФР при його освітленні.
3. Пояснити принцип роботи оптрона.
4. Назвати основні характеристики і параметри оптопар.
5. Пояснити фізичні явища, що відбуваються в ФД при його освітленні.
6. Вказати основні переваги і недоліки різних типів оптопар.
7. Накреслити конструкцію і пояснити принцип дії оптичного модуля.
8. Пояснити фізичні явища, що відбуваються в ФТ при його освітленні.
9. Чим визначаються схемотехнічні можливості оптронів?
10. Визначити галузі використання різних типів оптронів.

### Робота 13. Дослідження характеристик приладів з оптичним керуванням.

Мета роботи.

Дослідження характеристик генераторів з оптичним керуванням частотою.

Домашнє завдання.

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями по роботі.
2. Привести паспортні дані генераторів, які можуть використовуватися при дослідженнях.
3. Підготувати заготовки звітів і таблиці для результатів експериментальних досліджень.

Хід роботи.

1. Зібрати схему установки для досліджень (рис. 4.9).

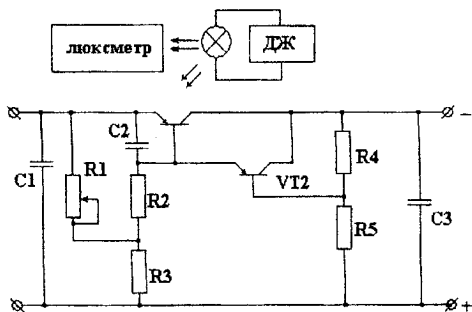


Рисунок 4.9

Коливальний контур генератора, який перебудовується оптично, утворений паралельним з'єднанням конденсатора  $C_2$  і емітер-базового переходу ФТР  $VT_1$ , який, при відповідному виборі елементів схеми та режиму живлення, має індуктивний характер реактивної складової повного вхідного опору. Транзистор  $VT_2$  служить для підвищення стабільності вихідної частоти, конденсатори  $C_1$  і  $C_2$  призначені для додержання балансу фаз, резистори  $R_2$ - $R_3$  використовуються як підстроювальні елементи з метою забезпечення балансу амплітуд (для чого служить також резистивний подільник).

Режим живлення активних елементів схеми задається подільником.

2. Провести вимірювання частоти  $f$  на виході генератора в залежності від рівня освітленості  $E$  при п'яти фіксованих значеннях керованої напруги  $U_{кер}$  джерела,  $I_{вх} = f(U_{вх})$ .

3. Побудувати графік залежності  $f(E)$  при параметричній зміні  $U_{кер}$ .

4. Провести вимірювання залежності амплітуди коливань  $U$  від освітленості  $E$  для вибраних значень керованої напруги (використати для цього осцилограф).

5. Побудувати графік залежності  $U = f(E)$  при параметричній зміні  $U_{кер}$ .

6. Провести вказані викладачем розрахунки.

7. Пояснити отримані результати.

### Контрольні питання.

1. Пояснити хід досліджень в роботі.

2. Пояснити природу бар'єрної і дифузійної ємностей  $p$ - $n$  переходу, механізм їх залежності від інтенсивності світлового потоку.

3. Пояснити еквівалентну схему фотодіода і частотну залежність її параметрів.

4. Дати якісну характеристику фотоємнісного ефекта в МДН-структурах.

5. Яка природа фотореактивності приладу з негативним опором?

6. Пояснити залежність еквівалентної індуктивності біполярного фо-

тотранзистора від інтенсивності світлового потоку.

7. Запропонувати сферу практичного використання оптично керованих генераторів.

8. Накреслити структурну схему системи оптичного зв'язку, назвати її переваги і недоліки.

9. У чому полягає ефект Костера і як він використовується для побудови лазерних комутаційних елементів?

## ПІСЛЯМОВА

Сучасні оптоелектронні прилади, в порівнянні зі звичайними електронними приладами, мають значні технічні і економічні переваги. Особливий інтерес в цьому плані визивають системи обробки і зберігання інформації.

Але, якими б складними не були б ці системи, всі вони складаються з наборів елементарних оптоелектронних приладів. Тому, подальший розвиток оптоелектроніки може мати місце тільки на основі практичного підтвердження теоретичних досягнень в розробці нових оптоелектронних приладів і технологій. Практичне знання методів дослідження оптичних і електричних параметрів та характеристик оптоелектронних приладів відіграє значну роль у підвищенні ефективності їх розробки і застосування.

Розвиток сучасної оптоелектроніки багато в чому також залежить від знання методів і засобів практичного і метрологічного дослідження параметрів та характеристик оптоелектронних приладів.

Відповідно до цього, в даному посібнику розглянуті основи практичного дослідження і аналізу оптоелектронних приладів, відповідні методики і вимірювальні схеми.

Знання з практичних основ дослідження оптоелектронних приладів, отримані при засвоєнні матеріалу даного посібника, можуть бути використані при вивченні інших дисциплін та при вирішенні практичних задач в області електронного приладобудування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Семеренко М.М. Оптоелектроніка. Навч.посібник / М.М. Семеренко. - Вінниця: ВДГУ, 2003. - 125 с.
2. Носов Ю.Р. Оптоелектроника. – М.: Сов.радио, 1989.- 360 с.
3. Чео П.К. Волоконная оптика: Приборы и системы: Пер. с англ.- М.: Энергоатомиздат, 1988. - 280 с.
4. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Л. М. Андрушко и др.- К: Техника, 1988. - 239 с.
5. Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники: Учебное пособие / В.П.Кожемяко, Л.И.Тимченко, Г.Л.Лысенко, Ю.Ф.Кутаев. - К.: УМК ВО, 1990. - 251 с.
6. Семеренко М.М. Математичне моделювання технологічних процесів та пристроїв ЕТ. Навч.посібник / М.М. Семеренко. - Вінниця: ВДГУ, 2001. - 127 с.
7. Шимони К. Физическая электроника: Пер. с нем. – М.: Энергия, 1977. - 608 с.
8. Тугов Н.М. и др. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 57 с.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов.: В 2-х кн. Кн. 2 / Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 456 с.
10. Зеегер К. Физика полупроводников. - М.: Мир, 1977. – 617 с.
11. Шалимова К. В. Физика полупроводников. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы». - М.: Энергия, 1976. – 416 с.
12. Терехов В.А. Задачник по электронным приборам: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 280 с.
13. Антипов Б.Л. и др. Материалы электронной техники: Задачи и вопросы. Учебное пособие. /Под ред. В.А.Терсхова. – М.: Высш. шк., 1990. – 208 с.
14. Берг А., Дип.П. Светодиоды. – М.: Мир, 1979.- 686 с.
15. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники.- К.:Высш шк., 1981.- 408 с.
16. ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення.
17. Крутякова М.Г., Чарыкова Н.А., Юдин В.В. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования: Учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1983. – 352 с.
18. Справочник по приемникам оптического излучения/ В.А. Волков, В.К. Вялов, Л.Г. Гассанов и др.; Под ред. Л.З. Криксунова и Л.С. Кременчугского. – К.: Техника, 1985. – 216 с.
19. Чебровский и др. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник/ О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.



20. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. Оптроны и их применение. - М.: Радио и связь, 1981. - 280 с.
21. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер.с англ.- М.: Радио и связь, 1989. - 504 с.
22. Иванов В.И. и др. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник / В.И.Иванов, А.И.Аксенов, А.М.Юшин. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 448 с.
23. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высшая школа, 1991. - 351 с.
24. Функціональна мікроелектроніка. Опто- і акустоелектроніка: Навч. Посібник для вузів /В. А. Хорунжий, В. О. Письменецький, Б. Т. Семен та ін.; За ред. В. А. Хорунжего. - Х.: Основа, 1995. - 136 с.

## ДЕЯКІ ФІЗИЧНІ СТАЛІ

Електрична стала	$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$
Маса спокою електрона	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$
Заряд електрона	$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$
Швидкість світла	$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$
Число Авогадро	$N_0 = 6.022 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1} = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$
Стала Планка	$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} = 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ еВ}\cdot\text{с.}$
Стала Больцмана	$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8.62 \cdot 10^{-5} \text{ еВ/К.}$
Магнетон Бора	$\mu_B = 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл.}$
Радіус Бора	$a_0 = 0.5292 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$
Стала Фарадея	$F = 9.648 \cdot 10^4 \text{ Кл}\cdot\text{моль}^{-1}.$
Число Лоренця	$L_0 = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2 \cdot \text{К}^{-2}.$
Універсальна газова стала	$R = 8.314 \text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$

1 ампер (А) = 1 Кл/с.

1 ангстрем =  $10^{-10} \text{ м} = 10^{-4} \text{ мкм.}$

1 атмосфера = 760 мм рт. ст. = 101325 Па.

1 кулон (Кл) = 1 А·с.

1 електрон-вольт (еВ) =  $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$

1 фарада (Ф) = 1 Кл/В.

1 калорія (кал) = 4.1868 Дж.

1 генрі (Гн) = 1 В·с/А.

1 джоуль (Дж) =  $10^7 \text{ ерг} = 1 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 6.25 \cdot 10^{18} \text{ еВ} = 1 \text{ Н}\cdot\text{м} = 1 \text{ Кл}\cdot\text{В.}$

1 ньютон (Н) =  $1 \text{ кг}\cdot\text{м/с}^2.$

1 сименс (См) =  $1 \text{ Ом}^{-1}.$

1 тесла (Тл) =  $1 \text{ Вб/м}^2 = 10^4 \text{ Гс.}$

1 вольт (В) = 1Вт/А.

1 ват (Вт) = 1Дж/с.

1 вебер (Вб) = 1В·с.

1 піко (п) =  $10^{-12}.$

1 нано (н) =  $10^{-9}.$

1 мікро (мк) =  $10^{-6}.$

1 мілі (мл) =  $10^{-3}.$

1 санти (с) =  $10^{-2}.$

1 деци (д) =  $10^{-1}.$

1 кіло (к) =  $10^3.$

1 мега (М) =  $10^6.$

1 гіга (Г) =  $10^9.$

## Додаток Б

## Параметри кремнію і арсеніду галію

Параметры	Si	GaAs
Атомна (молекулярна) маса	28.1	144.6
Атомний номер	14	
Щільність, г/см <sup>3</sup>	2.33	5.32
Відносна діелектрична проникність	12	13
Атомна (молекулярна) щільність, г/см <sup>3</sup>	$5.0 \cdot 10^{22}$	$2.21 \cdot 10^{22}$
Ширина забороненої зони $E_d$ , еВ, при температурі абсолютного нуля	1.22	1.42
Тип забороненої зони	непряма	пряма
Ширина забороненої зони $E_d$ , еВ при $T=300^\circ \text{K}$	1.12	1.43
Концентрація $n_i$ , см <sup>-3</sup> при $T=300^\circ \text{K}$	$1.5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^6$
Питомий опір, Ом·см, при $T=300^\circ \text{K}$	$2.3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^8$
Температура плавлення, С°	1420	1238
Рухомість електронів $\mu_n$ , см <sup>2</sup> ·В <sup>-1</sup> ·С <sup>-1</sup> , при $T=300^\circ \text{K}$	1300	8500
Рухомість дірок $\mu_p$ , см <sup>2</sup> ·В <sup>-1</sup> ·С <sup>-1</sup> , при $T=300^\circ \text{K}$	500	450
Коефіцієнт дифузії електронів $D_n$ , см <sup>2</sup> /с	34	
Коефіцієнт дифузії дірок $D_p$ , см <sup>2</sup> /с	13	
Ефективні щільності станів, см <sup>-3</sup>		
в зоні провідності	$2.8 \cdot 10^{19}$	$4.7 \cdot 10^{17}$
в валентній зоні	$1.02 \cdot 10^{19}$	$7.0 \cdot 10^{18}$
Ефективна маса		
електронів	0.33m	0.072m
дірок	0.56m	0.50m
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(см·С°)	1.5	0.81
Стала кристалічної ґратки, нм	0.543	0.565
Гранична допустима напруга електричного поля, В/мкм	≈30	≈35

## Фізичні параметри чистих металів (при 20°C)

Метал	Щільність, Мг/м <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	Температурний коефіцієнт лінійного розширення $\alpha, \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	Питомий опір, мОм·м	Температурний коефіцієнт питомого опору ( $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ )	Робота виходу, еВ	Абсолютна питома термо ЕРС, мкВ К <sup>-1</sup>	Кристалічна структура	Період ґратки, нм
Алюміній	2.7	660	21.0	0.027	4.1	4.25	-1.3	мцк	a=0.404
Вольфрам	19.3	3400	4.4	0.055	5.0	4.54	+2.0	оцк	0.316
Залізо	7.87	1540	10.7	0.097	6.3	4.31	+16.6	оцк	0.286
Золото	19.3	1063	14.0	0.023	3.9	4.30	+1.5	мцк	0.407
Кобальт	8.85	1500	13.5	0.064	6.0	4.41	-20.1	гекс	a=0.251 z=0.407
Мідь	8.92	1083	16.6	0.017	4.3	4.40	+1.8	мцк	a=0.361
Молібден	10.2	2620	5.3	0.050	4.3	4.30	+6.3	оцк	0.314
Натрій	0.97	98	72.0	0.042	5.5	2.35	-8.7	оцк	0.428
Нікель	8.96	1453	13.2	0.068	6.7	4.50	-19.3	мцк	0.352
Олово	7.29	232	23.0	0.113	4.5	4.38	-1.1	тетраг	a=0.583 z=0.318
Платина	21.45	1770	9.5	0.098	3.9	5.32	-5.1	мцк	a=0.392
Свинець	11.34	327	28.3	0.190	4.2	4.00	-1.2	мцк	0.494
Срібло	10.49	961	18.6	0.015	4.1	4.30	+1.5		0.408
Тантал	16.6	3000	6.6	0.124	3.8	4.12	-2.5	оцк	0.330
Хром	7.19	1900	6.2	0.130	2.4	4.58	+18.0	оцк	0.288
Цинк	7.14	419	30.0	0.059	4.1	4.25	+1.5	гкс	a=0.266 z=0.494

\*Позначення кристалічних структур:

оцк - об'ємно центрована кубічна;

мцк - гранецентрована ;

гекс - гексагональна щільного упакування;

тетраг - тетрагональна.

Додаток Г

Фізичні параметри напівпровідників (T=300°K)

Напівпровідники	Щільність, Мг/м <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	Температурний коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	Ширина забороненої зони $\Delta W, eV$	$\frac{d(\Delta W)}{dT} \cdot 10$ eV/K	Рухомість $\mu, m^2/(V \cdot c)$		Низькочастотна діелектрична проникність
						Електронів	Дірок	
Ge	5.43	937	5.8	0.66	3.9	0.39	0.19	16.0
Si	2.33	1415	2.3	1.12	2.8	0.14	0.05	12.5
a-SiC	3.22	2205	-	3.02	-	0.033	0.06	10.0
GaN	6.11	1700	5.7	3.40	3.9	0.03	-	12.2
AlP	2.37	2000	4.2	2.45	2.6	0.008	0.003	9.8
GaP	4.07	1467	4.7	2.26	4.7	0.019	0.012	11.1
InP	4.78	1070	4.6	1.35	2.8	0.46	0.015	12.4
AlAs	3.60	1770	3.5	2.16	4.0	0.028	-	10.1
GaAs	5.32	1238	5.4	1.43	4.0	0.95	0.045	13.1
InAs	5.67	942	4.7	0.36	3.5	3.3	0.046	14.6
AlSb	4.28	1060	4.2	1.58	3.5	0.02	0.055	14.4
GaSb	5.65	710	6.1	0.72	3.6	0.4	0.14	15.7
InSb	5.78	525	4.9	0.18	3.0	7.8	0.75	17.7
ZnS	4.09	1020	-	3.67	5.3	-	-	5.2
ZnS	4.10	1780	6.2	3.74	3.8	0.014	0.0005	5.2
CdS	4.82	1750	5.7	2.53	4.9	0.034	0.011	5.4
ZnSe	5.42	1520	1.9	2.73	7.2	0.026	0.0015	9.2
CdSe	5.81	1264	-	1.85	4.1	0.072	0.0075	10.0
ZnTe	6.34	1239	8.3	2.23	-	0.053	0.003	10.4
CdTe	5.86	1041	4.0	1.51	4.1	0.12	0.006	10.2
HgTe	8.09	670	4.8	0.08	-	2.5	0.02	-
PbS	7.61	1114	-	0.39	3.3	0.06	0.07	17.0
PbSe	8.15	1076	-	0.27	4.0	0.12	0.10	-
PbTe	8.16	917	-	0.32	4.3	0.08	0.09	30.0

Додаток Д

Параметри діелектричних матеріалів (при 293 К)

Діелектричні матеріали	Питомий об'ємний опір, Ом·м	Відносна діелектрична проникність	Температурний коефіцієнт діелектричної проникності $\alpha_\epsilon \times 10^6, K^{-1}$	Тангенс кута діелектричних втраг при 1 МГц	Електрична міцність
Поліетилен	$10^{14}-10^{15}$	2.3 – 2.4	- (200 - 300)	$(2 - 5) \cdot 10^{-4}$	40 – 105*
Полістирол	$10^{14}-10^{16}$	2.5 – 2.6	- (150 - 200)	$(2 - 4) \cdot 10^{-4}$	20 - 110*
Фторопласт-4	$10^{14}-10^{16}$	1.9 – 2.2	- (150 - 300)	$(2 - 3) \cdot 10^{-4}$	40 - 250*
Поліпропілен	$10^{12}-10^{15}$	2.0	- (200 - 300)	$(3 - 5) \cdot 10^{-4}$	30 - 150*
Лавсан	$10^{14}-10^{15}$	3.1 – 3.2	+ (400 - 600)	$(3 - 10) \cdot 10^{-3}$	20 - 180*
Полікарбонат	$10^{14}-10^{15}$	3.0	+ (50 - 100)	$(2 - 60) \cdot 10^{-3}$	30 - 150*
Поліімід	$10^{15}-10^{16}$	3.5	-	$(1 - 2) \cdot 10^{-3}$	30 - 200*
Полівінілхлорид	$10^9-10^{13}$	3.1 – 3.4	-	0.015- 0.018	35 – 45
Гетинакс	$10^8-10^{10}$	3.0 – 6.0	-	0.04 – 0.08	15 – 30
Стеклотекстоліт	$10^8-10^{11}$	5.5 – 6.0	-	0.02 – 0.04	15 – 35
Бакеліт	$10^8-10^{11}$	4.0	-	0.01	12 – 50*
Епоксидні компаунди	$10^{12}-10^{14}$	3.3 – 6.0	-	0.01	20 - 35*
Слода	$10^{12}-10^{14}$	6.0 – 8.0	+ (10 - 20)	$(1 - 6) \cdot 10^{-4}$	100 – 250*
Кварцове скло	$10^{16}$	3.8 – 4.2	-	$(2 - 3) \cdot 10^{-4}$	40 – 400*
Лужне скло	$10^{10}-10^{15}$	5 – 10	+ (30 - 500)	$(5-250) \cdot 10^{-4}$	40 – 400
Ситали	$10^8-10^{12}$	5 – 10	-	$(1 - 80) \cdot 10^{-3}$	25 – 85
Ізоляторна порцеляна	$10^9-10^{11}$	5 – 8	-	0.02 – 0.03	25 – 30
Ультрафарфор	$10^{12}-10^{15}$	7 – 10	+ (80 - 140)	$(1 - 10) \cdot 10^{-4}$	20 – 45
Алюмінксид	$10^{14}-10^{15}$	8.5 9.5	+ (100 - 120)	$(1 - 2) \cdot 10^{-4}$	25 – 30
Полікор	$10^{16}$	9	+ (80 - 100)	$(1 - 2) \cdot 10^{-4}$	30 – 45
Брокерит	$10^{16}$	6 - 7	+ (40 - 80)	$(2 - 5) \cdot 10^{-4}$	30 – 45
Стеатитова кераміка	$10^{13}-10^{15}$	6 - 8	+ (70 - 180)	$(6 - 8) \cdot 10^{-4}$	25 – 40
Цельзіанова кераміка	$10^{12}-10^{13}$	6 - 7	+ (60 - 70)	$(1 - 2) \cdot 10^{-4}$	35 – 45
Рутилова кераміка	$10^9-10^{12}$	40 - 300	- (80 - 2200)	$(2 - 10) \cdot 10^{-4}$	10 – 30
Сегнетокераміка	$10^9-10^{11}$	900-20000	-	0.05 – 0.3	4 - 10

\* Верхні межі зазначені для тонких плівок

Навчальне видання

М.М. Семеренко, Є.О. Смольков

## ПРАКТИКУМ З ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

Практикум

Оригінал-макет підготовлено авторам **Смольковим Є.О.**

Редактор В.О. Дружиніна

Коректор З.В. Поліщук

Навчально-методичний відділ ВДТУ

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК № 746 від 25.12.2001

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ

Підписано до друку **29.08.03** Гарнітура Times New Roman

Формат 29.7x42 1/4

Папір офсетний

Друк різнографічний

Ум. друк. арк. **4.96**

Тираж **85** прим.

Зам. № **2665-132**

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького державного технічного університету

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК № 746 від 25.12.2001

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95