

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

**ТЕМА:** ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ФОТО ЕРС ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТУ ВІД ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ

**МЕТА:** Дослідити залежність та побудувати світлові характеристики вентильного фотоелементу

При прямому зміщенні переходу в області значень струмів і напруг, відповідних першому квадранту вольтамперної характеристики, що виникає під дією світла фотострум віднімається з дифузійного струму переходу і ця частина вольтамперних характеристик відповідає меншим значенням струму в порівнянні з неосвітленим переходом. Вольт-амперні характеристики освітленого переходу в четвертому квадранті є характеристиками напівпровідникового фотоелемента, що є джерелом електричної енергії.

Вольтамперну характеристику освітленого переходу можна представити у вигляді:

$$I(U) = I_0 \left( \exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) - I_\phi = I_0 \left( \exp \frac{U}{\phi_T} - 1 \right) - I_\phi, \quad (3.1)$$

$$I_\phi = q \frac{P_\phi}{h\nu} \eta \delta, \quad (3.2)$$

тут  $P_\phi$  - потужність падаючого оптичного випромінювання,  $h\nu$  - енергія фотонів на заданій довжині хвилі оптичного випромінювання,  $\eta$  - квантова ефективність, що характеризує відношення числа, які генеруються в одиницю часу електронно-діркових пар до загальної кількості падаючих фотонів  $P_\phi / h\nu$ ,  $\delta$  - коефіцієнт збирання носіїв заряду, що визначає число пар носіїв зарядів, що не рекомбінують в товщі і на поверхні напівпровідника і досягають замикаючого шару ( $\delta \leq 1$ ). При розрахунках квантової ефективності необхідно враховувати поглинання оптичного випромінювання

в напівпровідниковій структурі, яке загальному випадку можна оцінити за допомогою співвідношення:

$$\beta = (1 - R) [1 - \exp(-\alpha_0 W_1)], \quad (3.3)$$

в цьому співвідношенні  $R$  - коефіцієнт відбиття світлового потоку від поверхні активної структури фотодіода,  $\alpha_0$  - коефіцієнт поглинання випромінювання світла в напівпровіднику, що характеризує зменшення інтенсивності світлового потоку на одиниці довжини і має розмірність  $см^{-1}$ ,  $W_1$  - товщина області поглинання світла в структурі фотодіода.

Падаюче на діодну структуру світло, затухаючи в напівпровіднику за експоненціальним законом в залежності від значення коефіцієнта поглинання  $\alpha_0$ , викликає появу порушених світловим потоком носіїв заряду. При зменшенні коефіцієнта відбиття від поверхні кристала і збільшенні товщини області поглинання світла підвищується квантова ефективність фотодіода. При цьому слід враховувати, що час дифузії носіїв заряду до переходу і час дрейфу їх в поле переходом визначають інерційні властивості фотодіода. Як показує аналіз, найкраще співвідношення між квантовою ефективністю і швидкодією фотодіода досягається за умови  $W_1 \approx 1/\alpha_0$ .

Використання формули (3.3) для визначення квантової ефективності фотодіода вимагає знання оптичних характеристик використаного напівпровідника, що залежать від конкретної структури фотодіода і технології виготовлення. У зв'язку з цим при проведенні розрахунків можна обмежитися результатами теоретичних досліджень і випробувань типових фотодіодних структур, які в розрахунковій роботі розглядаються в якості вихідних даних. Ці дані представлені на рис.2.2 у вигляді залежності квантової ефективності від довжини хвилі.

Розрахунок вольтамперних характеристик фотодіода пов'язаний з визначенням складової зворотного струму переходу  $I_0$ . Це струм неосвітленого фотодіода при зворотному зміщенні переходу, який залежить

від площі переходу, ступеня легування матеріалу ( $p_{n0}$  і  $n_{p0}$ ) і параметрів напівпровідника ( $D_p$ ,  $D_n$ ,  $L_p$  і  $L_n$ ). При ширині  $p$ - і  $n$ - областей переходу  $W_n \gg W_p$  величину струму  $I_0$ , можна визначити із співвідношення:

$$I_0 = qS \left( \frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right), \quad (3.4)$$

в якому  $p_{n0}$  і  $n_{p0}$  - концентрації неосновних носіїв в  $p$ - і  $n$ - областях в рівноважному стані переходу,

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}, \quad n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}, \quad (3.5)$$

$n_i$  - концентрація носіїв у власному напівпровіднику,  $N_D$  і  $N_A$  - концентрації донорної і акцепторної домішок,  $L_n$  і  $L_p$  - дифузійні довжини електронів і дірок,  $D_n$  і  $D_p$  - коефіцієнти дифузії електронів і дірок.

Величину температурного потенціалу у формулі (3.1)  $\varphi_T = kT/q$  ( $q = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл - заряд електрона) можна визначати за наближеною формулою  $\varphi_T \approx T/11600$  В, в якій температура  $T$  виражена в одиницях К. При розрахунках приймається значення  $T = 300$  К, при цьому  $\varphi_T \approx 0,026$  В.

Вольтамперні характеристики фотодіода за своїм виглядом аналогічні вихідним характеристикам транзистора в схемі із загальною базою. Світловий потік виконує роль емітера, інжектуються носії заряду в напівпровідникову структуру, які дифундують потім до переходу, що виконує роль колектора транзистора. При модуляції світлового потоку на навантажувальних резисторах в ланцюзі фотодіода створюється падіння напруги, пропорційне модулюючому сигналу. Ця властивість фотодіода дозволяє використовувати його в якості приймачів світлового опромінювання в кінцевих пристроях ліній оптичного зв'язку і вимірювати енергетичні параметри світлових потоків.

Значення струмів і напруг, відповідних частині вольтамперної характеристики фотодіода, розташованої в четвертому квадранті, відповідає нагоді, коли освітлений  $p - n$ - перехід є джерелом електричної енергії. У режимі холостого ходу, коли  $I(U)=0$ , визначають значення ЕРС

$$U_{xx} = \varphi_T \ln \left( \frac{I_\Phi}{I_0} + 1 \right) \quad (3.6)$$

напівпровідникового фотоелемента, напруга на зажимах якого при  $I_\Phi \gg I_0$  росте зі збільшенням потужності світлового потоку згідно логарифмічного закону.

Зв'язок фотосьоруму освітленого світлом напівпровідникового діода з потужністю світлового потоку зазвичай висловлюють через монохроматичну (Спектральну) чутливість приладу  $s_\Phi(\lambda) = I_\Phi P_\Phi(\lambda)$  на заданній довжині хвилі  $\lambda$ :

$$s_\Phi(\lambda) = \delta \eta \frac{q}{hc} \lambda. \quad (3.7)$$

Межа чутливості в області великих довжин хвиль визначається шириною забороненої зони напівпровідникового матеріалу  $\Delta E_g$ . Порогова довжина хвилі (червона межа фотоефекту), виражена в мікрометрах,

$$\lambda_{cp} = 1,24 / \Delta E_g, \quad (3.8)$$

обчислюється з простого співвідношення 3.8, в цьому наближеному чисельному співвідношенні ширина забороненої зони виражена в еВ. У роботі необхідно обчислити порогові довжини хвиль для напівпровідникових матеріалів (кремнію, германію та арсеніду галію), виходячи з даних по ширині забороненої зони для обраних у варіанті завдання напівпровідників. В області коротких хвиль максимальну чутливість для розглянутих фотодіодів можна наближено визначити за співвідношенням:

$$s\Phi_{\text{макс}} \approx 0,8 \lambda_{\text{зр}} \approx \Delta E_g^{-1}, \quad (3.9)$$

(тут  $s\Phi_{\text{макс}}$ ,  $A/Vm$ ;  $\lambda_{\text{зр}}$ ,  $мкм$ ;  $\Delta E_g$ ,  $eB$ ). У цій області довжин хвиль зменшення чутливості фотодіода, яке пояснюється зменшенням довжини поглинання світла поблизу поверхні і зростанням втрат за рахунок поверхневої рекомбінації порушених світловим потоком носіїв заряду.

При проведенні розрахунків слід скористатися наближеними співвідношеннями для оцінки енергії квантів і потужності світлового випромінювання  $h\nu = \frac{1,986}{\lambda} 10^{-19} \text{ Дж}$ ,  $h\nu = \frac{1,24}{\lambda} \text{ эВ}$  (тут довжина хвилі  $\lambda$  виражена мікрометрах). При визначенні інтенсивності світлового потоку необхідно враховувати співвідношення між використовуваними одиницями вимірювань потужності:  $1 \text{ лм} = 10^{-7} \text{ Вт}$ .

### Порядок проведення розрахунків

I. Для кожного з варіантів роботи задаються параметри діодної структури, необхідні для проведення розрахунків :

- напівпровідниковий матеріал-германій, кремній і арсенід галія;
- дифузійні довжини електронів і дірок  $L_n$  и  $L_p$  в  $см$ ;
- концентрації донорів і акцепторів  $N_D$  и  $N_A$   $см^{-3}$ ;
- площа переходу  $S_{пер}$  в  $см^2$  ;
- довжини хвиль світлового випромінювання  $\lambda$  в  $мкм$ ,
- значення інтенсивності світлового потоку в  $лм$ .

II. За формулою (1.1) проводиться розрахунок вольтамперної характеристики діода при відсутності освітленості ( $P_{\Phi} = 0$ ) для заданих в табл.

III. За формулою (1.2) визначаються величини фотоструму при значеннях інтенсивності світлового потоку, зазначених у варіанті розрахунку. Квантова ефективність фотоефекту на заданих довжинах хвиль враховується відповідно даними, представленими на рис.1. При розрахунках використовується значення коефіцієнта збирання носіїв  $\eta \approx 1$ , що обґрунтовується оптимальною конструкцією фотодіода, при якій найбільш

ефективне поглинання в базі монохроматичного світлового випромінювання.

IV. Відповідно до формули (3.1) проводиться розрахунок і побудова вольтамперних характеристик фотодіода при його різній освітленості для значень світлового потоку, зазначених в табл. 2.1.

V. За формулою (3.6) проводиться розрахунок і побудова залежності напруги холостого ходу від освітленості р-п - переходу для значення температури  $T = 300$  К, при якій величина температурного потенціалу  $\varphi_T$  наближено дорівнює 0,025 В. Розрахунок проводиться для зазначених в табл. 2.1 матеріалів діодної структури і довжин хвиль оптичного випромінювання.

VI. Для цих напівпровідникових матеріалів за формулами (3.8) і (3.9) розраховуються граничні довжини хвиль оптичного випромінювання і максимальні значення чутливості фотодіодів, результати розрахунків має бути поданий у вигляді таблиці.

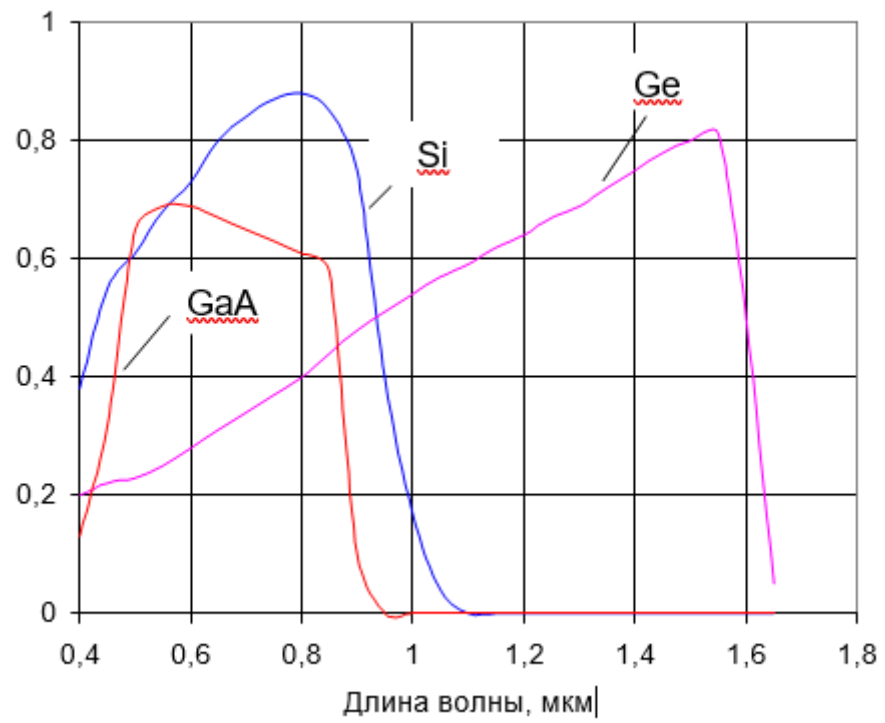


Рисунок 1 - Характеристики спектральної чутливості фотоприймачів для різних матеріалів діодних структур

Таблиця - Вихідні дані для проведення розрахунків

№ варі- анту	$L_p, L_n,$		$N_A,$ $\times 10^{16}$ $\text{см}^{-3}$	$N_D,$ $\times 10^{14}$ $\text{см}^{-3}$	$S_{nep},$ $\times 10^{-4}$ $\text{см}^2$	$\lambda,$ МКМ	$\Phi,$ $\times 10^{-3}$ ЛМ
	Si, Ge $\times 10^{-2}$ см	GaAs $\times 10^{-4}$ см					
1	0,4	1,0	1,0	2,0	1,0	0,4	0; 1; 2
2	0,45	1,5	2,5	3,0	2,0	0,45	0; 3; 4
3	0,5	2,0	3,0	4,0	3,0	0,5	0; 4; 8
4	0,55	2,5	3,5	5,0	4,0	0,55	0; 3; 6
5	0,6	3,0	4,0	6,0	5,0	0,6	0; 5; 10
6	0,65	3,5	4,5	7,0	6,0	0,65	0; 6; 9
7	0,7	4,0	5,0	8,0	7,0	0,7	0; 6; 12
8	0,75	4,5	6,5	9,0	8,0	0,75	0; 7; 14
9	0,8	5,0	7,0	10,0	9,0	0,8	0; 7; 12
10	0,85	5,5	7,5	20,0	10,0	0,85	0; 8; 16
11	0,9	6,0	8,0	30,0	20,0	0,9	0; 9; 18
12	0,95	6,5	8,5	40,0	40,0	0,4	0; 10; 20
13	1,0	7,0	9,0	50,0	50,0	0,45	0; 12; 24
14	1,02	7,5	9,5	60,0	60,0	0,5	0; 13; 26
15	1,05	8,0	10,0	70,0	80,0	0,55	0; 14; 28
16	0,65	3,5	4,5	15	8,5	0,6	0; 15; 30
17	0,7	4,0	5,0	8	9,0	0,65	0; 16; 32
18	0,75	4,5	5,5	9	9,5	0,7	0; 17; 34
19	0,8	5,0	6,0	10	10,0	0,75	0; 18; 36
20	0,85	5,5	6,5	15	10,5	0,8	0; 20; 40
21	0,9	6,0	7,0	20	11,0	0,85	0; 10; 20
22	0,95	6,5	7,5	30	11,5	0,9	0; 12; 24
23	1,0	7,0	8,0	40	12,0	0,59	0; 13; 26
24	0,55	2,5	3,5	15	12,5	0,64	0; 14; 28
25	0,6	3,0	4,0	10	13,0	0,4	0; 15; 30



### **Контрольні питання**

1. Пояснити механізм формування струму через освітлений р-n -перехід і дати визначення ефекту генерації фото-ЕРС.
2. За яких припущеннях отримано співвідношення , яке описує вольтамперну характеристику фотодіода.
3. Від яких параметрів напівпровідників і світлового потоку залежить чутливість фотоприймача на основі р-n - переходу.
4. В якій частині вольтамперної характеристики реалізується режим перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну енергію.
5. Пояснити, за яких умов фотоелемент видає максимальну вихідну потужність.