МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю. М. Потебні

Кафедра електроніки, інформаційних систем
та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему : *Дослідження процесів поглинання світла напівпровідниками та розробка фотоприймального пристрою.*

Виконав: студент __*II*___курсу, групи___*8.1764*_____
спеціальності ____*176 Мікро- та наносистемна техніка*_____
(код і назва спеціальності)
освітньої програми *176 Мікроелектронні інформаційні системи*_____
(код і назва освітньої програми)
_____*Ничик Олекасндр Петрович* _____
(ініціали та прізвище)

Керівник *доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.т.н.,* _____*Небеснюк Оксана Юріївна*_____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _*інженер-конструктор «Конструкторське бюро Колосова» Григор'єва І.К*. _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2025

МІНІСТЕРСТВО СВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. Потебні

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
(перший (бакалаврський) рівень
Спеціальність 176 Мікро- та наносистемна техніка
(назва)
Освітня програма Мікроелектронні інформаційні системи
(шифр)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Т. В. Критська

« 01 » грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)
Ничику Олександру Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкту) *Дослідження процесів поглинання світла напівпровідниками та розробка фотоприймального пристрою*
керівник роботи *Небеснюк О.Ю., к.т.н.,доцент*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від " 27 " лютого 2025 року № 313-с

2.Строк подання студентом роботи 28.11 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: *напівпровідниковий матеріал – Si; домішка p++ - бор (B); домішка n++ і n- - фосфор (P); концентрація домішки бору - 10^{20} $см^{-3}$; концентрація домішки фосфору – 10^{14} $см^{-3}$ і 10^{20} $см^{-3}$; спектр світла – від 1– 3 еВ; фотоприймальний пристрій на PIN-діоді*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *1 Процеси взаємодії світлового випромінювання з напівпровідниковими матеріалами. 2 Розробка фотоприймального пристрою та розрахунок параметрів поглинання світла напівпровідниками. 3 Техніко-економічне обґрунтування 4 Охорона праці та техногенна безпека*
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *Л1 Структурна схема автоматизованого пристрою "Зонд-1" для вимірювання питомого опору приконтактних шарів до Si Л2 Блок - схема програми для розрахунку параметрів поглинання Л3 Дослідження процесів поглинання світла та генерації в оптоструктурі на основі кремнію Л4. Залежності власного поглинання: експериментальні – зліва і розрахункові – справа Л5 Залежності поглинання світла вільними носіями заряду: експериментальні – зліва і*

розрахункові – справа Л6 Залежності домішкового поглинання: експериментальні -зліва і розрахункові – справа Л7 Залежності поглинання світла екситоном: експериментальні – зліва і розрахункові- справа Л8 Залежності поглинання світла кристалічною решіткою: експериментальні – зліва і розрахункові- справа Л9 Розробка фотоприймального пристрою

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	21.10.24	23.12.24
II	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	24.12.24	06.10.25
III	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	13.10.25	03.11.25
IV	Небеснюк О.Ю., доц. каф. ЕІСПЗ	10.11.25	24.11.25

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магітсра

7. Дата видачі завдання *21.10.2024 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1	*Аналіз матеріалу за темою кваліфікаційної роботи*	*04.11. -29.11.24*	
2	*Дослідження оптичних властивостей напівпровідників*	*01.12.24 -23.12.24*	
3	*Розробка математичної моделі*	*24.12.24 -26.02.25*	
4	*Розробка програмного забезпечення*	*03.03-30.04.25*	
5	*Розробка схеми електричної принципової та топології друкованої плати*	*05.05.25-23.09.25*	
5	*Оформлення другого розділу*	*29.09 -06.10.25*	
6	*Розділ «Техніко-економічне обґрунтування»*	*13.10-03.11.25*	
7	*Розділ «Охорона праці та техногенна безпека»*	*10.11. -24.11.25*	
8	*Оформлення пояснювальної записки, виконання креслень*	*24.11. -27.11.25*	

Студент _____ *Ничик О.П.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проєкту) _____ *Небеснюк О.Ю.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Верьовкін Л. Л.*
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить 87 сторінок, 34 рисунка, 13 таблиць, 24 джерела літератури.

Об’єкт дослідження – процеси поглинання світла напівпровідниками.

Ціль роботи – розробка фотоприймального пристрою та розрахунок параметрів поглинання світла напівпровідниками.

Задачі роботи - провести аналіз процесів поглинання світла напівпровідниковими структурами та дослідити чинники їх впливу на якість фотоприймачів; розробити модель приладової n++ - n – p++структури на основі Si та визначити коефіцієнт поглинання світла; розробити фотоприймальний пристрій на основі PIN- діоду.

Методика досліджень – програмування С++, схемотехнічне моделювання в SPlan, EveryCircuit.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено фотоприймальний пристрій на основі PIN-діоду, що здатен реєструвати електромагнітне випромінювання ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазону Розрахункові габаритні розміри пристрою складають 20 х 20 мм.

НАПІВПРОВІДНИК, ФОТОН, ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА, КОЕФІЦІЄНТ ПОГЛИНАННЯ, МОДЕЛЬ, ПРОГРАМА, ФОТОПРИЙМАЧ, PIN -ДІОД

Робота виконана на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення в період з 01 вересня по 28 листопада 2025 р.

ЗМІСТ

ВСТУП 6

1 ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ СВІТЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ 7

1.1 Оптичні властивості напівпровідників 7

1.2 Теоретичні основи поглинання світла 9

1.3 Коефіцієнт поглинання та його залежність від енергії фотона 12

1.4 Енергетичні зони та ширина забороненої зони 15

1.5 Механізми переходів електронів у напівпровідниках 19

2 РОЗРОБКА ФОТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА НАПІВПРОВІДНИКАМИ 23

2.1 Домішкове поглинання 23

2.2 Ексітонне поглинання 27

2.3 Поглинання граткою 29

2.4 Оптична генерація вільних носіїв заряду у напівпровіднику 30

2.4.1 Квантовий вихід і розподіл за енергіями носіїв, що генеруються в напівпровіднику випромінюванням 30

2.4.2 Просторовий розподіл вільних носіїв, що генеруються в напівпровіднику випромінюванням 33

2.5 Методи вимірювання питомого опору зразків Si,Ge 36

2.6 Розробка моделі процесів поглинання світла в напівпровідниках 40

2.6.1 Вибір інструменту 40

2.6.2 Вибір інтерфейсу програми 41

2.6.3 Розробка блок - схеми програми для розрахунку параметрів поглинання 43

2.7 Дослідження процесів поглинання світла та генерації в оптоструктурі на основі кремнію 47

2.8 Розробка фотоприймального пристрою 59

2.9 Моделювання роботи фотоприймального пристрою 62

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ 65

3.1 Порівняльний аналіз приладових структур за критеріями 65

3.2 Розрахунок витрат на виконання досліджень 70

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 71

4.1 Техніка безпеки при виробництві фотометричних приладів 71

4.2 Електробезпека 73

4.3 Пожежна та техногенна безпека 76

4.4 Розрахунок параметрів мікроклімату в приміщенні при роботі з комп'ютерною технікою 78

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 82

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 83

ВСТУП

Світло є одним із фундаментальних явищ природи, а взаємодія світлового випромінювання з речовиною — ключем до розуміння безлічі фізичних процесів. Серед матеріалів, що виявляють найцікавіші оптичні властивості, особливе місце займають напівпровідники. Їхня здатність поглинати, випромінювати та перетворювати світло лежить в основі функціонування сучасних електронно-оптичних пристроїв — від сонячних елементів до лазерних діодів.

Поглинання світла напівпровідниками визначається складними процесами переходу електронів між енергетичними зонами, впливом домішок, дефектів кристалічної ґратки та квантовими ефектами. Аналіз цих процесів має не лише теоретичне значення, а й практичну цінність для створення нових матеріалів з оптимізованими оптичними характеристиками.

Актуальність теми зумовлена стрімким розвитком фотоніки, оптоелектроніки та нанотехнологій, де ефективне керування світловими потоками відіграє ключову роль. Дослідження механізмів поглинання світла дозволяє покращувати енергетичну ефективність сонячних батарей, підвищувати чутливість фотодетекторів і розширювати спектральний діапазон світлодіодів.

Фотоприймачі, що перетворюють оптичний сигнал в електричний, знаходять широке практичне застосування в сенсорній електроніці, при детектуванні лазерного випромінювання, спектрофотометрії, медикобіологічних дослідженнях тощо. Правильно вибраний фотоприймач не лише допомагає вирішити проблеми, пов'язані із прийманням оптичних сигналів, але й спрощує електронні схеми та зменшує ймовірність виникнення помилок [1].

1 ПРОЦЕСИ ВЗАЄМОДІЇ СВІТЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ

1.1 Оптичні властивості напівпровідників

Напівпровідники — це речовини, електрична провідність яких займає проміжне положення між провідниками та діелектриками. Їхня особливість полягає у тому, що провідність значною мірою залежить від температури, освітлення, домішок та інших зовнішніх чинників. Класичними прикладами напівпровідників є кремній (Si), германій (Ge), селен (Se), арсенід галію (GaAs) тощо.

Основною рисою, що визначає поведінку електронів у напівпровідниках, є зонна структура енергетичних рівнів. У твердому тілі енергетичні рівні окремих атомів перекриваються, утворюючи суцільні зони — валентну зону та зону провідності, розділені забороненою зоною (енергетичним проміжком).

На схемі енергетичної структури (рис. 1.1) показано, що електрони, які знаходяться у валентній зоні, пов’язані з атомами, тоді як у зоні провідності — вільні, здатні брати участь у перенесенні заряду.

Різниця між найвищим рівнем валентної зони Ev і найнижчим рівнем зони провідності Ec визначає ширину забороненої зони Eg [2]:

$$E_g = E_c - E_v$$

Ширина забороненої зони є ключовим параметром, що визначає оптичні й електричні властивості матеріалу. Якщо Eg <3 матеріал зазвичай вважається напівпровідником; якщо Eg>5 — діелектриком.

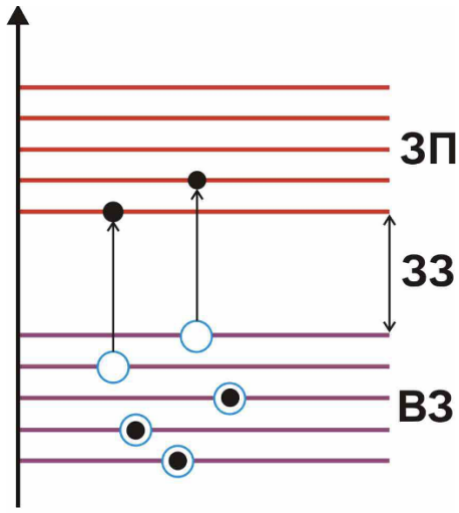


Рисунок 1.1- Енергетична структура напівпровідника

За чистотою кристалічної решітки розрізняють:

- Власні напівпровідники (інтринсикні) — ідеально чисті, без домішок (наприклад, Si, Ge).
- Домішкові (екстринсикні) — з навмисно введеними атомами домішок, що змінюють концентрацію носіїв заряду.

Домішки створюють у забороненій зоні додаткові енергетичні рівні, завдяки яким з’являються два типи провідності:

- n-тип (електронна) — коли домішки віддають електрони (донори).
- p-тип (діркова) — коли домішки захоплюють електрони, залишаючи “дірки” (акцептори).

На відміну від металів, провідність напівпровідників зростає зі збільшенням температури. Це пояснюється тим, що нагрівання сприяє переходу електронів через заборонену зону в зону провідності. Кількість носіїв заряду при цьому експоненційно залежить від температури:

$$n_i = AT^{3/2}e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

де

n_i— концентрація власних носіїв заряду,

A — коефіцієнт пропорційності,

k — стала Больцмана,

T — температура в Кельвінах,

Eg — ширина забороненої зони.

Цей вираз показує, що навіть незначне зменшення Eg чи підвищення температури істотно збільшує кількість носіїв заряду.

Оптична поведінка напівпровідників зумовлена можливістю поглинання фотонів**,** енергія яких дорівнює або перевищує ширину забороненої зони. Це поглинання веде до утворення пар “електрон–дірка” і лежить в основі фотопровідності, фотолюмінесценції та фотоелектричних ефектів.

Інтенсивність поглинання залежить від енергетичного спектра фотонів, типу переходів (прямих чи непрямих) та концентрації домішок. Ці закономірності детально розглядаються в наступних розділах.

Таким чином, напівпровідники — це матеріали, чутливі до світла, температури та домішок, їхні властивості визначаються зонною структурою та механізмами переходу носіїв заряду. Саме тому вони становлять фундамент для сучасної оптоелектроніки й фотоніки [3].

1.2 Теоретичні основи поглинання світла

Світло, або електромагнітне випромінювання, взаємодіє з речовиною через електричні та магнітні поля фотонів, які можуть викликати збудження електронів у матеріалі. У випадку напівпровідників цей процес проявляється переважно як поглинання фотонів, коли енергія фотона (h\v) (де h — стала

Планка, ν — частота випромінювання) використовується для переведення електрона з валентної зони в зону провідності.

$$h\nu \geq E_g$$

де E_g — ширина забороненої зони.

Якщо енергія фотона менша за E_g, він не може бути поглинутий у зонному переході — випромінювання лише проходить крізь матеріал або розсіюється.

Згідно з квантовою теорією, ймовірність переходу електрона під дією електромагнітного поля визначається за допомогою правил відбору і може бути описана формулою Фермі для швидкості переходів [4]:

$$W_{if} = \frac{2\pi}{\hbar}|M_{if}|^2\rho(E)$$

де:

W_{if} — ймовірність переходу між початковим станом і та кінцевим f,

M_{if} — матричний елемент взаємодії електрона з полем,

p(E) — густина кінцевих станів,

$\frac{2\pi}{\hbar}$— приведена стала Планка.

Ця формула вказує, що інтенсивність поглинання визначається як величиною M_{if}^2, так і кількістю доступних енергетичних станів, на які може перейти електрон.

Для опису макроскопічного ефекту використовують закон Бугера–Ламберта–Бера**,** який встановлює експоненційну залежність інтенсивності світла від товщини матеріалу:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

де

I_0 — початкова інтенсивність світла,

I — інтенсивність після проходження шару товщиною d,

α— коефіцієнт поглинання.

Коефіцієнт α характеризує здатність матеріалу поглинати світло певної частоти. Для напівпровідників він змінюється в широкому діапазоні — від 10^2 до 10^6 $см^{-1}$ залежно від енергії фотонів і типу переходу.

У наближенні вільних електронів густина станів у зоні провідності та валентній зоні зростає пропорційно квадратному кореню з енергії. Тому для прямих міжзонних переходів коефіцієнт поглинання виражається як:

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2}$$

а для непрямих переходів, де одночасно беруть участь фотони та фонони, як:

$$\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g \pm E_p)^2$$

де

A, B — константи, що залежать від властивостей матеріалу,

E_p — енергія фонона (знак «±» означає поглинання або випромінювання фонона).

Ці залежності дозволяють експериментально визначати тип переходів і ширину забороненої зони.

Поглинання тісно пов’язане з комплексною діелектричною проникненістю де дійсна частина ε_1 відповідає за заломлення, а уявна ε_2— за втрати енергії (поглинання).

де $|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}$.

Показник заломлення n та коефіцієнт екстинкції k пов’язані з цими параметрами співвідношеннями:

$$n = \sqrt{\frac{|\varepsilon| + \varepsilon_1}{2}}, \quad k = \sqrt{\frac{|\varepsilon| - \varepsilon_1}{2}}$$

Коефіцієнт поглинання тоді виражається через k [5]:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

де λ — довжина хвилі світла у вакуумі.

Таким чином, оптичні властивості напівпровідника визначаються його мікроскопічною електронною структурою, що безпосередньо впливає на взаємодію з електромагнітним полем.

Поглинання світла напівпровідниками є квантово-механічним процесом, що відбувається через міжзонні переходи електронів. Кількісно воно описується законом Бугера–Ламберта–Бера та залежить від типу переходів і енергетичної структури матеріалу.

1.3 Коефіцієнт поглинання та його залежність від енергії фотона

Коефіцієнт поглинання α визначає, наскільки інтенсивно матеріал поглинає світло певної частоти. Він показує, яка частка енергії електромагнітного випромінювання втрачається на одиницю довжини шляху в речовині. Ця величина безпосередньо пов’язана зі структурою енергетичних зон і кількістю доступних для переходів станів.

Вираз для інтенсивності світла після проходження шару матеріалу товщиною d:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

,

звідки

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Отже, чим більше значення α, тим швидше зменшується інтенсивність світла з глибиною — матеріал є більш “оптично непрозорим” у даному діапазоні. Для виникнення міжзонного переходу необхідно, щоб енергія фотона не була меншою за ширину забороненої зони:

$$h\nu \geq E_g$$

При hν<Eg коефіцієнт поглинання є практично нульовим (за винятком дефектних і домішкових переходів). Коли ж hν≈ Eg, починається різке зростання α, яке характеризує поріг оптичного поглинання**.**

Ця ділянка спектра є особливо важливою для визначення типу переходу (прямого чи непрямого) та точного значення Eg.

В енергетичній зонній діаграмі розрізняють два основні типи переходів [6]:

- Прямі переходи — електрон переходить із валентної зони в зону провідності без зміни імпульсу.
- Непрямі переходи — супроводжуються поглинанням або випромінюванням фонона, щоб компенсувати зміну імпульсу.

Відповідно, коефіцієнт поглинання має різну залежність від енергії фотона:

$$\alpha_{\text{прям}} = A(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad h\nu > E_g$$

$$\alpha_{\text{непрям}} = B(h\nu - E_g \pm E_p)^2$$

де

Ep — енергія фонона,

A, B — константи, що враховують густину станів і ймовірність переходів.

Типовий спектр α для напівпровідників має три області:

1. Низькоенергетична область hν<Eg: Поглинання зумовлене домішковими рівнями або дефектами (оптичні хвости). Значення α тут не перевищує 10^2–10^3 $см^{-1}$.
2. Область фундаментального поглинання hν≈Eg: Спостерігається різке зростання коефіцієнта поглинання до 10^5–10^6 $см^{-1}$. Ця ділянка характеризує власне міжзонні переходи.
3. Високоенергетична область hν>Eg: Відбуваються переходи на більш високі зони або до рівнів, пов'язаних із внутрішніми станами атомів. Тут α може досягати 10^6–10^7 $см^{-1}$.

Залежність α часто має експоненційний характер поблизу Eg (так звані "оптичні хвости Урбаха"), що описується співвідношенням [7]:

$$\alpha(h\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu - E_0}{E_U}\right)$$

де

E_U — енергія Урбаха, що характеризує рівень безладу в кристалічній решітці,
E_0 — енергія початку експоненційного зростання.

Коефіцієнт поглинання пов'язаний з уявною частиною комплексного показника заломлення:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

Ця залежність визначає повну картину оптичної поведінки напівпровідника. Зокрема, в області сильного поглинання показник заломлення має тенденцію до зниження через посилення дисперсії.

Визначення α(hν) є основним методом встановлення ширини забороненої зони Eg з оптичних вимірювань. Цей параметр є фундаментальним при проектуванні фотоелектричних перетворювачів, лазерних діодів, світлодіодів і фотодетекторів.

Для практичного прикладу:

у кремнії E_g=1,12 еВ, α≈10^3 $см^{-1}$ при 1,1 еВ;

у GaAs E_g=1,42 еВ, α≈10^5 $см^{-1}$ при 1,5 еВ

у CdS E_g=2,42 еВ, що відповідає жовтому діапазону спектра.

Коефіцієнт поглинання є ключовим параметром, який описує оптичну взаємодію світла з напівпровідником. Його залежність від енергії фотона відображає зонну структуру матеріалу і дозволяє визначати ширину забороненої зони, тип переходів і ступінь структурного безладу.

Отже, аналіз α(hν) є потужним інструментом як для фундаментальних досліджень, так і для практичного проєктування фотоактивних пристроїв.

1.4 Енергетичні зони та ширина забороненої зони

Електронна структура твердих тіл описується за допомогою зонної теорії, згідно з якою енергетичні рівні електронів в атомах об’єднуються у зони, коли атоми формують кристалічну решітку.

У напівпровідниках існують дві основні зони, що визначають їхні електронні властивості [8]:

- Валентна зона — заповнена електронами, які беруть участь у хімічних зв’язках.
- Зона провідності — вища за енергією, у ній можуть вільно рухатися електрони, що створюють електричну провідність.

Між цими зонами розташована заборонена зона шириною E_g, у якій не існує дозволених енергетичних станів.

Ширина забороненої зони — це енергетична різниця між нижнім краєм зони провідності E_c і верхнім краєм валентної зони Ev:

$$E_g = E_c - E_v$$

Цей параметр визначає оптичні та електричні властивості матеріалу:

- якщо (E_g <1, eB) — матеріал легко проводить електрику (наприклад, Ge);
- якщо (1 < E_g < 3, eB) — типовий напівпровідник (Si, GaAs);
- якщо (E_g > 5 ,eB) — діелектрик (Al_2O_3, SiO_2).

Залежно від розташування мінімуму зони провідності та максимуму валентної зони в просторі хвильових векторів (k-просторі), розрізняють:

- Прямі напівпровідники — Ec і Ev мають однакове значення k. Переходи між зонами можливі без участі фононів.
  Приклади: GaAs, CdS, InP.
- Непрямі напівпровідники — Ec і Ev знаходяться при різних k -значеннях. Переходи вимагають участі фононів для збереження імпульсу. Приклади: Si, Ge.

Цей фактор має істотний вплив на ефективність оптичних процесів: прямі напівпровідники добре поглинають і випромінюють світло (важливо для лазерів і світлодіодів), тоді як непрямі — менш ефективні в цьому плані.

Ширина E_g не є сталою — вона зменшується з підвищенням температури через теплове розширення решітки та зміну взаємодії електронів. Ця залежність описується емпіричною формулою Варшні:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

де:

$E_g(0)$ — ширина забороненої зони при абсолютному нулі, (α) і (β) — матеріалозалежні коефіцієнти.

Для прикладу:

- кремній (Si): $E_g(0)$= 1.17 еВ, α = 4.73 10^{-4}, еВ/К, β = 636 К;
- арсенід галію (GaAs): $E_g(0)$= 1.52 еВ, α = 5.4 10^{-4}, еВ/К, β = 204 К;

Таким чином, зі збільшенням температури ширина забороненої зони зменшується, що призводить до зсуву краю поглинання в довгохвильову область спектра.

Визначення E_g є важливою експериментальною задачею, яка здійснюється кількома способами:

1. Оптичний метод (спектроскопія поглинання).
2. Фотопровідність: вимірювання порогової енергії фотонів, при якій зростає електрична провідність матеріалу під дією освітлення.
3. Фотолюмінесценція: спостереження максимуму випромінювання, який часто відповідає енергії, близькій до E_g.
4. Температурна залежність провідності: визначення E_g із нахилу лінійної ділянки на графіку $ln\sigma\left(\frac{1}{T}\right)$, де :

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

Таблиця 1.1- Приклади типових значень E_g [9]

Матеріал	Тип переходу	E_g при 300 K (еВ)	Область спектру
Ge	непрямий	0.66	інфрачервона
Si	непрямий	1.12	ближнє ІЧ
GaAs	прямий	1.42	видима (червона)
CdS	прямий	2.42	видима (жовта)
ZnO	прямий	3.37	ультрафіолетова

Таблиця 1.1 показує, що зі збільшенням E_g зростає енергія поглинаємого фотона, тобто зменшується довжина хвилі світла, яке може бути поглинуте напівпровідником.

Ширина забороненої зони є одним із найважливіших параметрів напівпровідників, що визначає їхні оптичні, електричні та фотофізичні властивості.

Тип переходу (прямий або непрямий) визначає ефективність поглинання, тоді як температурна залежність E_g впливає на роботу пристроїв при змінних умовах.

Знання величини E_g дозволяє прогнозувати спектральні властивості матеріалу і підбирати оптимальні комбінації для фотонних застосувань.

1.5 Механізми переходів електронів у напівпровідниках

Поглинання фотона відбувається, коли енергія світла передається електрону, який переходить із заповненої валентної зони до вільного стану в зоні провідності.

Цей процес описується законом збереження енергії та імпульсу:

$$h\nu = E_c(k') - E_v(k) \pm E_p$$

де:

- $h\nu$ — енергія фотона,
- $E_c(k')$, $E_v(k)$ — енергії електрона у відповідних зонах,
- E_p — енергія фонона (позитивний знак — поглинання, негативний — випромінювання фонона).

Якщо максимум валентної зони та мінімум зони провідності мають однакове значення хвильового вектора (k), то імпульс фотона практично не впливає на процес (оскільки він у тисячі разів менший за імпульс електрона в зоні Бріллюена). У цьому випадку перехід відбувається без зміни імпульсу — тобто прямий перехід.

Графічно це можна зобразити як вертикальний перехід на діаграмі “енергія — хвильовий вектор”.

Ймовірність таких переходів велика, а коефіцієнт поглинання може досягати:

$$\alpha \sim 10^5 - 10^6 \, \text{см}^{-1}.$$

Це пояснює, чому прямозонні матеріали (GaAs, InP, CdTe) активно використовують в лазерах, світлодіодах і фотовольтаїці.

У напівпровідниках типу Si або Ge мінімум зони провідності та максимум валентної зони розташовані при різних k-значеннях. Тому для збереження імпульсу в процесі переходу електрон взаємодіє з фононом — квантом коливань кристалічної решітки.

Відповідно, непрямий перехід вимагає одночасної участі фотона і фонона:

- або фонон поглинається (якщо електрону не вистачає імпульсу),
- або фонон випромінюється (якщо надлишок імпульсу треба компенсувати).

Таким чином, ймовірність таких переходів менша, а коефіцієнт поглинання у кілька порядків нижчий [10]:

$$\alpha \sim 10^2 - 10^3 \, \text{см}^{-1}.$$

Фонони відіграють ключову роль у забезпеченні збереження імпульсу. Їхня енергія зазвичай становить E_p = 0.01–0.1 еВ, що є невеликим внеском порівняно з енергією фотонів у видимому діапазоні.

Температура безпосередньо впливає на концентрацію фононів, а отже — на ймовірність непрямих переходів. При підвищенні температури:

- зростає кількість доступних фононів,
- збільшується ймовірність поглинання фотона з одночасною участю фонона,
- край оптичного поглинання зміщується у довгохвильову область.

Ймовірність переходу визначається квадратом матричного елемента взаємодії електрона з електромагнітним полем:

$$W_{cv} \propto \left| \langle \psi_c | \hat{H}' | \psi_v \rangle \right|^2$$

де: $\hat{H}$ оператор взаємодії електрона з фотоном.

Для прямих переходів цей елемент є великим, оскільки хвильові функції ψ_c і ψ_ϑ добре перекриваються у просторі.

Для непрямих — перекриття менше, і тому W_{cv} значно нижче.

Крім міжзонних переходів, у реальних кристалах існують домішкові або дефектні рівні всередині забороненої зони.

Електрони можуть здійснювати переходи:

- з валентної зони на домішкові рівні (донори чи акцептори),
- або з цих рівнів в зону провідності.

Такі переходи формують додаткові смуги поглинання при ($h\nu < E_g$), що особливо характерно для легованих або аморфних напівпровідників. У спектрах вони проявляються як “оптичні хвости” або низькоенергетичні плечі.

Поблизу краю фундаментального поглинання часто спостерігаються вузькі піки, пов’язані з утворенням екситонів — зв’язаних станів електрона та дірки. Енергія зв’язку екситона становить кілька десятків міліелектронвольт:

$$E_{ex} = \frac{\mu e^4}{2(4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r\hbar)^2}$$

де:

μ — зведена маса електрона й дірки,

ε_r— відносна діелектрична проникність матеріалу.

Екситонні піки часто служать додатковим індикатором якості кристалу: чим вони виразніші, тим менш дефектний матеріал.

Механізм поглинання світла напівпровідником визначається його зонною структурою.

У прямих напівпровідниках оптичні переходи відбуваються без зміни імпульсу, що забезпечує високу ефективність.

У непрямих — потрібна участь фононів, тому ймовірність процесу нижча. Додатково, дефекти, домішки й екситони формують складну структуру спектра поглинання, яка є “візитною карткою” кожного конкретного матеріалу.

Мета кваліфікаційної роботи - дослідження та розрахунок коефіцієнту поглинання світла кремнієм і розробка фотоприймального пристрою.

Для цього необхідно вирішити задачі:

- провести аналіз процесів поглинання світла напівпровідниковими структурами та дослідити чинники їх впливу на якість фотоприймачів;
- розробити модель приладової n++ - n – p++ структури на основі Si та визначити коефіцієнт поглинання світла;
- розробити фотоприймальний пристрій на основі PIN- діоду.

2 РОЗРОБКА ФОТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА НАПІВПРОВІДНИКАМИ

Для дослідження було взято дві напівпровідникові структури : кремній та германій. Створення моделі розподілу носіїв заряду при поглинанні світла зразками матеріалів потребує розрахунку їх параметрів та характеристик. З цією метою досліджено три види поглинання : домішкове, ексітонне та граткою.

2.1 Домішкове поглинання

Різноманітні електронні переходи в домішкових атомах, що індукуються падаючим випромінюванням відповідної частоти, приводять до утворення спектру домішкового поглинання [11]. Нехай E_l— глибина домішкового рівня під дном зони провідності, тоді при $hv>E_l$ виходить безперервна смуга домішкового поглинання, обумовлена переходами електронів з домішкових рівнів в зону провідності. Якщо енергія E_l мала, то таке поглинання спостерігається лише при дуже низьких температурах, коли основна частина атомів домішки виявляється неіонізованою. Аналогічним чином падаюче випромінювання може перевести електрон з валентної зони на акцепторний рівень, що розташований поблизу цієї зони і належить неіонізованому атому домішки. Домішкові центри мають ряд збуджених станів, наприклад, елементи III і V групи періодичної системи елементів дають в Si і Ge серію водневоподібних рівнів. Збудження електронів домішки, тобто перехід електрона з основного стану в який-небудь із збуджених станів приводить до появи лінійчатого спектру поглинання. У більшості напівпровідників донорні і

акцепторні рівні розміщуються, як правило, дуже близько до країв зон, так що поглинання, обумовлене такими процесами, лежить в далекій ІЧ-області спектру; у Ge, наприклад, основному стану донорів V групи відповідає рівень енергії, розташований на глибині 0,01 еВ під дном зони провідності, тому межа іонізації повинна лежати приблизно близько 100 мкм.

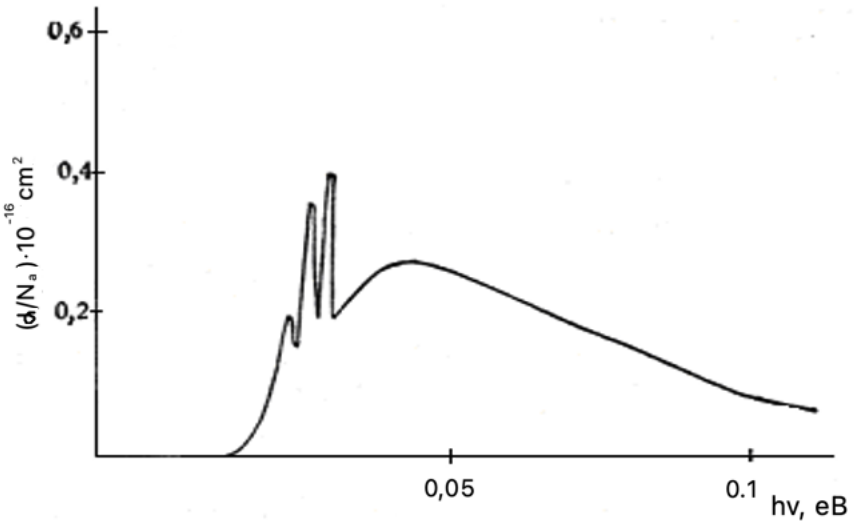


Рисунок 2.1 - Поглинання, обумовлене домішкою A1 в Si [12]

Проте в Si, де основному стану атомів V групи відповідає рівень, який знаходиться на 0,05 еВ нижче за дно зони провідності, лінії домішкового поглинання потрапляють вже в доступнішу для вимірювань область спектру.

На рис. 2.1 [12] показана типова крива поглинання для Si з домішкою A1. На цій кривій з довгохвильової сторони спектру поглинання спостерігаються три лінії поглинання, обумовлені збудженням електрона з основного рівня, а потім з'являється суцільна смуга, пов'язана з фотоіонізацією домішкових центрів. Хростовській і Кайзер виявили не менше семи ліній збудження акцепторної домішки B. Для збуджених станів домішки, особливо донорної домішки,

положення ліній знаходиться в дуже хорошій згоді з прогнозами теорії, заснованої на простій водневоподібній моделі.

Припущення про те, що кулонівський характер поля домішки зберігається і в безпосередній близькості до центру, невірно, причому таке припущення в більшій мірі позначається на значенні енергії в основному стані, де орбіти менші, ніж у разі збуджених станів. Для прикладу відзначимо, що акцепторний домішковий рівень B в Si лежить на 0,045 еВ вище за стелю валентної зони, тоді як відповідний рівень In знаходиться над зоною вже на висоті 0,16 еВ.

Коефіцієнт поглинання *a* на домішці можна записати у вигляді формули [13]:

$$a = \frac{2^9 \pi e^2 N_D}{3 m_e c n \Delta E_D} \left(\frac{\Delta E_D}{h\nu}\right)^4 \frac{\exp[-4(1-\frac{(\Delta E_D)}{h\nu}) arctg(1-\frac{(\Delta E_D)}{h\nu})]}{1-\exp[-2\pi(1-\frac{(\Delta E_D)}{h\nu})]}, \quad (2.1)$$

де N_D- концентрація атомів домішки; ΔE_D - енергія активація домішки.

У фізиці дуже часто розглядають і розраховують залежність коефіцієнтів поглинання світла від світлового спектру, що вимірюється в мікрометрах (мкм), тобто залежність поглинання світла від довжини хвилі. Для розрахунку застосовується формула [14]:

$$E = \frac{hc}{\lambda},$$

де h – постійна планка, с – швидкість світла і λ – довжина хвилі. При цьому, якщо всі розмірності було взято згідно системи СІ, то енергія виходить в джоулях. Значення еВ в системі СІ складає – $1{,}6 \cdot 10^{19}$ Дж.

Також потрібно враховувати, що енергія, на яку відгукується напівпровідник, лежить в інтервалі до 10^2 еВ і введення енергії поза цим інтервалом може привести до несподіваних результатів. І ще фундаментальним поглинанням світла напівпровідником є власне поглинання, воно відбувається тільки в тому випадку, якщо величина спектру світла, що впливає на напівпровідник, більш ніж ширина забороненої зони даного напівпровідника, тому у разі сильного легування на величину ширини забороненої зони напівпровідника впливає концентрація домішки.

Таблиця 2.1 – Основні матеріали, що використовуються як домішка для Si, Ge.

Група періодичної таблиці Менделєєва	Домішка	Донор (D) або акцептор (A)	Відстань від дна зони провідності, еВ	Відстань від стелі валентної зони, еВ
1	2	3	4	5
У германії				
1	Li	D	0,01	-
1	Cu	A	-	0,04
	Au	A	-	0,15
2	Zn	A	-	0,09
3	B	A	-	0,014
	Al	A	-	0,0102
	Ga	A	-	0,0108
	In	A	-	0,0112
	Ti	A	-	0,014
5	P	D	0,012	-
	As	D	0,0127	-
	Sb	D	0,0097	-
	Bi	D	0,012	-

7	Mn	A	0,38	-
1	2	3	4	5
7	Fe	A	0,27	-
8	Co	A	0,31	-
	Ni	A	0,3	-
	Pt	A	0,2	-
		У кремнії		
1	Li	D	0,033	-
	Au	D	0,3	-
2	Zn	A	-	0,31
3	B	A	-	0,046
	Al	A	-	0,057
	Ga	A	-	0,065
	In	A	-	0,16
	P	D	0,045	-
5	As	D	0,049	-
	Sb	D	0,039	-

Для введення величини домішки потрібно враховувати, яка кількість атомів може знаходитися в 1 $см^3$ у вибраного напівпровідника. Дана величина характеризується постійною Авагадро $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ $моль^{-1}$.

2.2 Ексітонне поглинання

В результаті власного або домішкового поглинання в напівпровіднику утворюються вільні носії заряду у валентній зоні і зоні провідності [15].

Можливий ще і інший механізм поглинання, який тим сильніше, чим більше властивості напівпровідника наближаються до властивостей діелектриків. В результаті цього поглинання електрон збуджується, але залишається на орбіті, пов'язаній з його атомом, або поблизу дірки, що утворюється. У першому випадку збудження може переходити від атома до атома, а в другому — зв'язана пара електрон-дірка може переміщатися уздовж кристала. Така пара називається екситоном.

Хоча при ексітонному поглинанні і відбувається розділення негативного і позитивного заряду, результуючий заряд ексітону, що рухається в кристалі, рівний нулю. Ексітонне поглинання викликає захоплення енергії випромінювання напівпровідником, але не приводить до виникнення фотопровідності, а отже, є процесом, що знижує ефективність фотоелектричних приладів.

Спектр ексітонного поглинання складається з ряду дискретних ліній, відповідних ексітонним станам. Положення енергетичних рівнів ексітонів по відношенню дна зони провідності визначається формулою Бору [15]:

$$E_k = -\frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 \varepsilon^2 k^2}, \tag{2.2}$$

де m - ефективна маса системи електрон – дірка;

к – квантове число.

Величина енергії квантів, відповідна лініям ексітонного поглинання, дорівнює [14]:

$$h\nu = \Delta E - E_k \tag{2.3}$$

Коефіцієнт поглинання світла системою електрон-дірка описується за формулою [12]:

$$\alpha = \frac{2e^2(2m)^{5/2}}{3m_0^2 hcn}\left(\frac{13{,}5 * Z^2}{\varepsilon^2}\left(\frac{m}{m_0}\right)\right), \tag{2.4}$$

де *e*- енергія ексітону.

2.3 Поглинання граткою

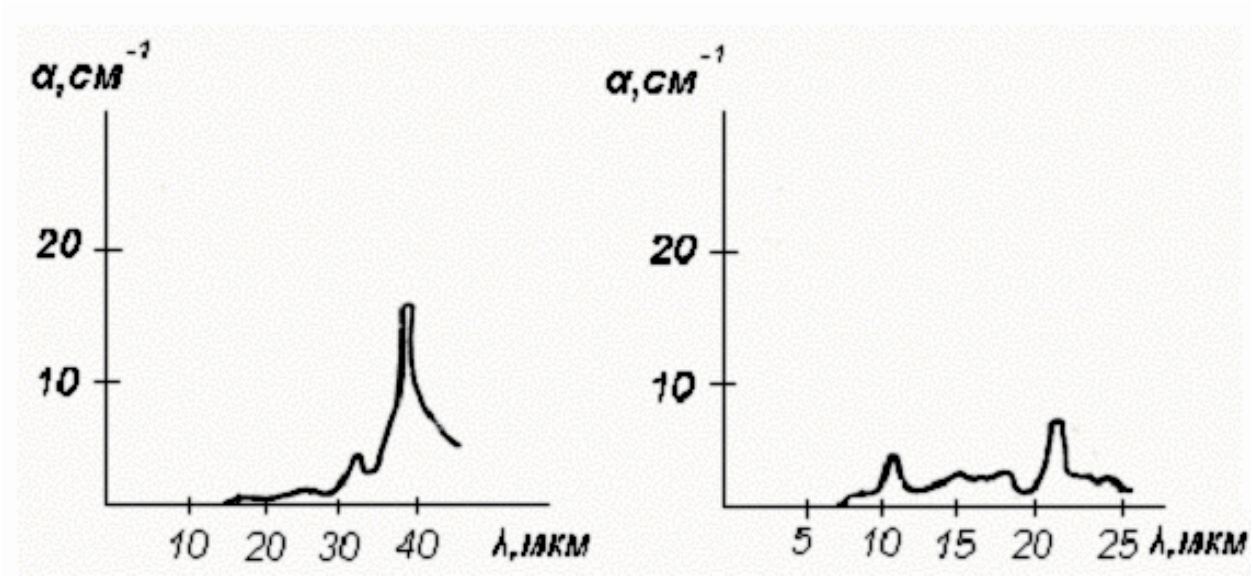
У іонних кристалах існує зона сильного поглинання в далекій інфрачервоній області, обумовлена коливаннями атомів і іонів [16]. Міжатомні сили зв'язку граток іонних кристалів порівняні з електронними силами, що діють в атомах. Але оскільки маса іонів приблизно в 104 разів більше маси електронів, то спектр поглинання, пов'язаного з коливаннями граток, лежить в далекій інфрачервоній області.

Зони поглинання в далекій інфрачервоній області з'являються у тому випадку, коли зв'язки між атомами кристала якоюсь мірою іонні. Навіть в спектрі поглинання антимоніду индію, в якому частка іонного зв'язку порівняно мала, існує сильна зона поглинання при довжині хвилі близько 50 мкм.

Зони гратчастого поглинання в германії і кремнії приведені на рис. 2.2 [9]. При цьому встановлено, що положення і величина цих зон не залежать від концентрації домішок аж до 10^{18} см-^{3} , а від інших дефектів гратки - до 10^{19} см- ^{3} .

Поглинання фотонів коливаннями граток описується формулою [12]:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 N^2 e^2 n(v_0 + 1)}{c\varepsilon M_{np}}, \tag{2.5}$$



а) б)

Рисунок 2.2 – Спектри поглинання гратками германію (а) і кремнію (б)

де $M_{пр}$ – маса приведена. Для граток з двома іонами $M_{пр} = \frac{M_1 \cdot M_2}{M_1 + M_2}$

$$v_0 = \frac{1}{\exp(\frac{hv}{kT} - 1)}. \qquad (2.6)$$

Поглинання фотонів коливаннями граток напівпровідника є однією з причин зниження ефективності фотоелектричних приладів.

2.4 Оптична генерація вільних носіїв заряду у напівпровіднику

2.4.1 Квантовий вихід і розподіл за енергіями носіїв, що генеруються в напівпровіднику випромінюванням

Для фотонів з енергією менше ΔЕ квантовий вихід рівний нулю. При перевищенні енергії ΔЕ квантовий вихід різко зростає і стає близьким до одиниці. Те, що квантовий вихід при цьому не стає рівним одиниці, пов'язане з існуванням шкідливих механізмів поглинання, що не приводять до генерації носіїв. При подальшому збільшенні енергії фотонів понад ΔЕ квантовий вихід не змінюється. При цьому надлишок енергії фотона передається електрону на збільшення його кінетичної енергії в зоні провідності. Якщо енергія фотонів буде вищий 2ΔЕ, то можна чекати подальшого збільшення квантового виходу, оскільки енергія фотона достатня для утворення двох пар електрон - дірка. Проте не кожен квант з енергією вище за 2ΔЕ утворює дві пари, тому при перевищенні енергії 2ΔЕ квантового виходу збільшується поступово, а не стрибком.

В даний час лише для не багатьох напівпровідників відомі експериментальні залежності квантового виходу від величини енергії.

На рисунку 2.3 [17] представлена така залежність від довжини хвилі для германію.

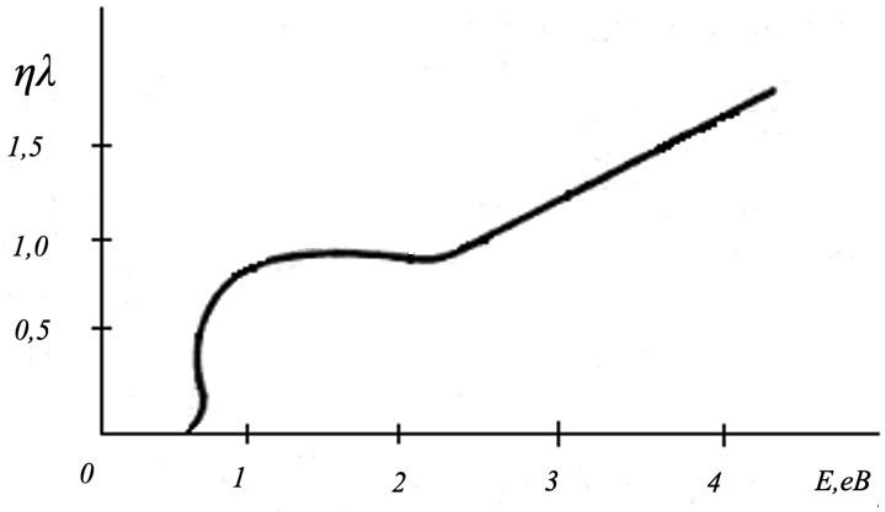


Рисунок 2.3- Залежності квантового виходу $\eta\lambda$ внутрішнього фотоефекту в германії від енергії випромінювання

Максимальна енергія, яка може викликати перехід електрона з валентної зони в зону провідності, на рис. 2.4 [9] позначена через $hv_{макс}$. Вона рівна різниці енергій між дном валентної зони і вершиною зони провідності. Таким чином, всі фотони з енергією, що знаходиться в інтервалі від $hv=\Delta E$ до $hv_{макс}$, здатні переводити електрони з валентної зони в зону провідності, а отже, викликати внутрішній фотоефект з квантовим виходом, залежним від їх енергії.

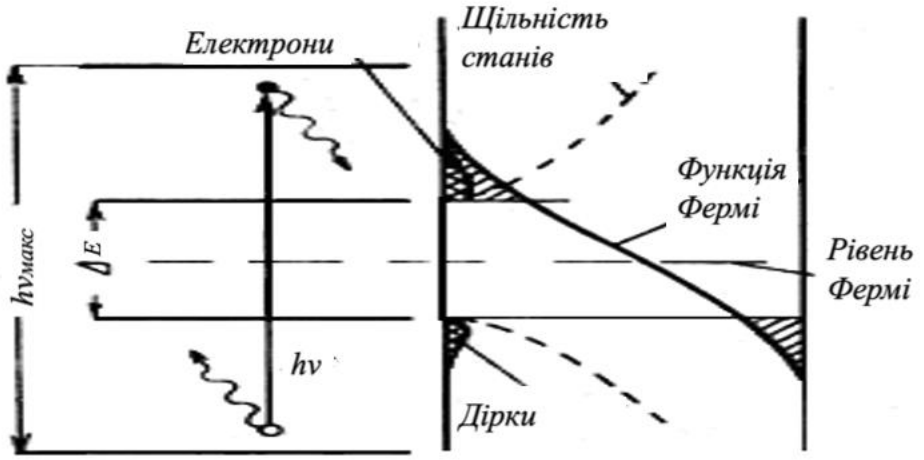


Рисунок 2.4 - Власна фотопровідність

Енергетичний розподіл рівноважних носіїв заряду в обох зонах, визначений виразом функції Фермі для функції розподілу енергетичних станів, для даної температури представлено двічі заштрихованими полями. Площі цих полів визначають рівноважні концентрації вільних носіїв n_0 і p_0.

Енергія нерівноважного електрона і дірки у момент їх освіти фотоном з достатньо великою енергією hv може значно перевищувати середню енергію рівноважних носіїв (рис. 2.4), яка має порядок kT. Проте унаслідок зіткнень з кристалічною граткою напівпровідника кінетична енергія нерівноважних носіїв дуже швидко зменшується і наближається до середньої величини, відповідної даної температури напівпровідника.

Розрахунок показує, що електрон з енергією ~ 1 еВ віддає надлишок енергії приблизно після 103 зіткнень. Це означає, що при довжині вільного пробігу електрона 10^{-6} *см* і швидкості 10^{7} см/·с електрон віддає надлишок енергії за час близько 10^{-10} с. Оскільки час життя нерівноважних носіїв заряду в зонах значно більша і знаходиться в проміжку 10^{-2}~ 10^{-7} *с,* то можна стверджувати, що майже протягом всього свого терміну існування нерівноважні носії перебувають в стані, в якому їх середня кінетична енергія не відрізняється від середньої енергії рівноважних носіїв. Звідси витікає, що енергетичні розподіли нерівноважних і рівноважних носіїв заряду в зоні однакові.

Таким чином, генерація нерівноважних носіїв заряду в напівпровіднику випромінюванням викликає тільки зміну концентрації вільних носіїв, тоді як характер енергетичного розподілу цих носіїв в зонах і їх середня кінетична енергія не змінюються.

2.4.2 Просторовий розподіл вільних носіїв, що генеруються в напівпровіднику випромінюванням

Інтенсивність поглиненого випромінювання в напівпровіднику зменшується по експоненті незалежно від механізму поглинання. Визначимо просторовий розподіл концентрації носіїв, що генеруються в напівпровідниковій пластині випромінюванням. Об'ємна швидкість поглинання фотонів в напівпровіднику (у фотонах/см^3•с*)* визначається наступним виразом [18]:

$$\beta = \alpha Q(x)\,. \qquad (2.7)$$

Оскільки кожен поглинений фотон проводить $\eta\lambda$ вільних носіїв в процесі домішкового поглинання або $\eta\lambda$ пар електрон—дірка у разі власного поглинання, то об'ємна швидкість генерації носіїв в площині, що знаходиться на відстані *x* від освітленої поверхні напівпровідника, визначається рівнянням [13]:

$$g(x) = \beta\eta_\lambda = \alpha\eta_\lambda Q(x) = \alpha\eta_\lambda(1 - R_\lambda)Q\exp(-\alpha x) \tag{2.8}$$

Швидкість генерації носіїв *g(x)* виражена в носіях/см^3 • сек.

Швидкість генерації носіїв на поверхні напівпровідника визначається наступним виразом [13]:

$$g(0) = \alpha\eta_\lambda Q(x) = \alpha\eta_\lambda(1 - R_\lambda)Q \tag{2.9}$$

У тому випадку, коли коефіцієнт поглинання *a* малий і пластинка напівпровідника настільки тонка, що виконується нерівність *aw*<<1, то з хорошим наближенням можна прийняти, що об'ємна швидкість генерації носіїв *g(x)* не залежить від *x* (рис. 2.5) [11]. Таке наближення з успіхом може бути застосовано у разі генерації носіїв з домішкових рівнів.

Оскільки при слабкому поглинанні випромінювання проникає через пластинку, то стає істотним віддзеркалення від тильної поверхні пластинки.
Таким чином, для випадку слабкого домішкового поглинання і досить тонких пластинок врешті-решт одержуємо наступний вираз для об'ємної швидкості генерації носіїв [13]:

$$g = \alpha\eta_\lambda Q \tag{2.10}$$

яка не залежить від *x,* а залежить тільки від довжини хвилі падаючого випромінювання.

У разі, коли коефіцієнт поглинання *a* дуже великий і виконується нерівність *aw*>>1, випромінювання повністю поглинається дуже близько від поверхні. Цей випадок має місце при власному поглинанні. Так, для германію коефіцієнт поглинання в цьому інтервалі має порядок 10^4 $см^{-1}$; тому випромінювання ефективно поглинається в шарі товщиною близько 1 *мкм.* Проте, якщо ефективна дифузійна довжина неосновних носіїв велика завтовшки пластинки, то процес генерації носіїв можна розглядати як еквівалентний процес рівномірної генерації з швидкістю [13]:

$$g = \frac{\eta_\lambda (1 - R_\lambda) Q}{\omega} \tag{2.11}$$

У фотоелектричних приладах з *p-n* переходом повне поглинання випромінювання також походить дуже близько від поверхні в шарі товщиною близько 1 *мкм.* Але при цьому абсолютно необов'язково робити *p-n* перехід так близько від поверхні. Найбільша допустима відстань *p-n* переходу від поверхні визначається дифузійною довжиною неосновних носіїв і швидкістю поверхневої рекомбінації.

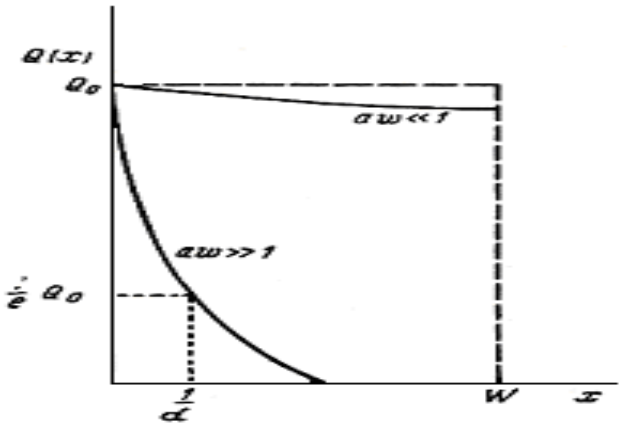


Рисунок 2.5 Просторовий розподіл потоку фотонів *Q(x)* в напівпровідниковій пластинці при слабкому і сильному поглинанні випромінювання

Для того, щоб фотоелектричний прилад діяв ефективно, відстань між поверхнею і переходом повинна відповідати наступним умовам [14]:

$$\omega << L; \qquad \omega << D/S,$$

де ω — відстань *p-n* переходу від поверхні, *см; L* — ефективна дифузійна довжина неосновних носіїв, *см;S* — швидкість поверхневої рекомбінації, *см·с; D* — коефіцієнт дифузії, $см^2/с$. При виконанні цих умов велика кількість носіїв, утворених випромінюванням поблизу поверхні, може дифузійним шляхом дійти до *p-n* переходу і потім піддатися рекомбінації.

Таким чином розроблена математична модель розрахунку швидкості розподілу генерації носіїв заряду. Дану модель можна застосувати для розрахунку швидкості розподілу генерації носіїв заряду, як в одноатомних напівпровідниках, так і в складних багатошарових напівпровідникових структурах.

2.5 Методи вимірювання питомого опору зразків Si,Ge

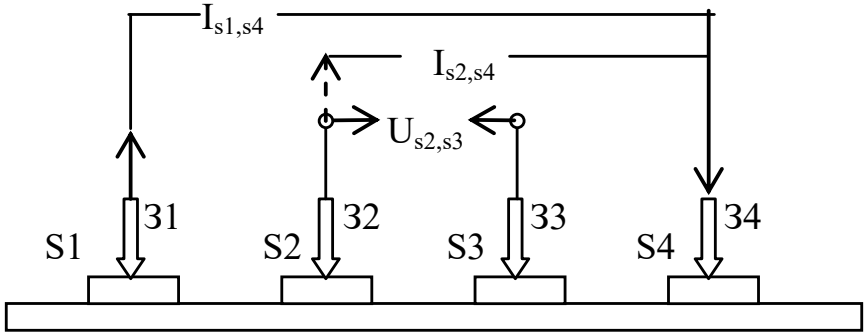
Як відомо, вимогою, яка багато в чому визначає якість напівпровідникових матеріалів, є однорідність структури. Її можна визначити за величиною питомого опору – $\rho_к$, що повинна бути достатньо малою.

Використання коректних процедур вимірювання питомого опору відіграє важливу роль в технології напівпровідникових приладів. Зазвичай для визначення величини питомого опору використовують зондові методи, за допомогою яких проводять вимірювання повного опору приконтактних шарів

кремнію. У свою чергу, вимірюваний опір залежить як від опору контакту, так і від опору розтікання в напівпровіднику.

Відомі декілька методів, що дозволяють визначити не тільки загальний опір контакту, але і опір розтікання в тонкому шарі напівпровідника. До таких належить 4 –х зондовий метод вимірювання.

Схема вимірювання питомого опору представлена на рис. 2.6



З1 ÷ З4 – вимірювальні зонди; S1÷S4 – області напівпровідникового матеріалу

Рисунок 2.6 Схема вимірювання питомого опору

Сутність 4-х зондового методу полягає в тому, що через два зовнішні зонди пропускають електричний струм I, на двох внутрішніх зондах вимірюють різницю потенціалів U. Через виміряні значення різниці потенціалів між внутрішніми зондами і відомому значенні струму, що протікає через зовнішні зонди, можна визначити питомий опір зразка. З рисунка 2.6 видно, що для вимірювання питомого опору напівпровідникових зразків також використовується вимірювальний пристрій, що містить 4 зонди. Якщо формувати струм I_{14} на контактах S_1 і S_4, а різницю потенціалів U_{23} вимірювати на контактах S_2 і S_3, то питомий опір напівпровідникової підкладки можна визначити таким чином:

$$\rho_p = 4{,}53 \cdot d \cdot \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{1}{Q(T)} \qquad (2.12)$$

де d - товщина напівпровідникової підкладки;

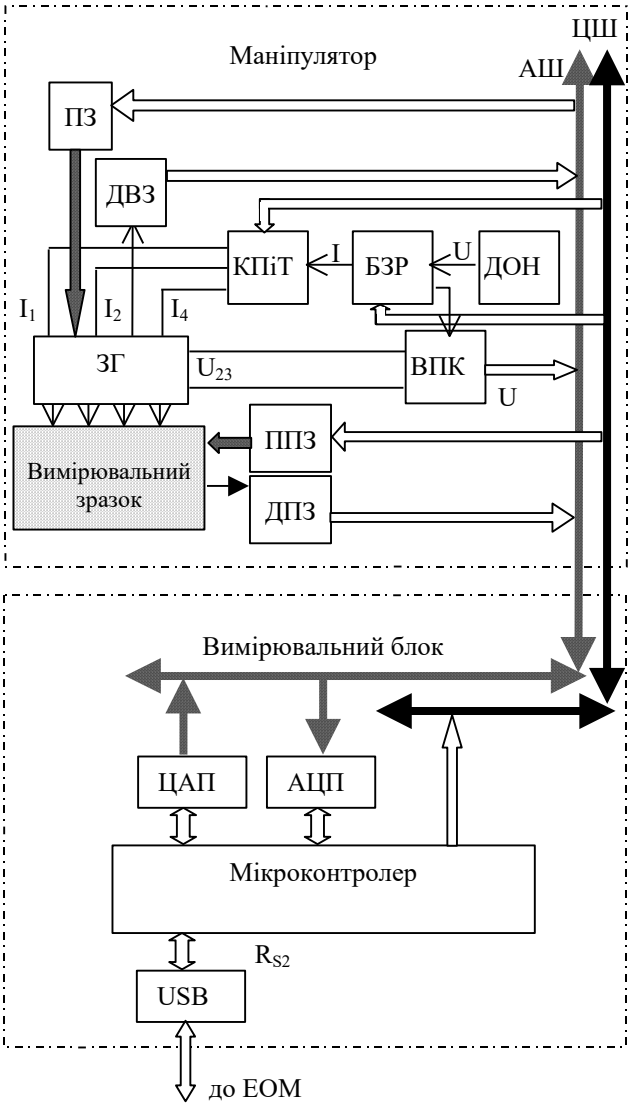
$Q(T)$ – поправочна функція, значення якої визначається за таблицею.

Вище описаний метод вимірювання питомого опору контактів викликає певні ускладнення, які пов‘язані з необхідністю використання контактних площадок прямокутної форми.

Для визначення питомого опору та обробки інформації з використанням ЕОМ застосовувалась функціональна схема автоматизованого пристрою “Зонд-1” представлена на рис. 2.7.

Основним елементом пристрою є маніпулятор, що містить зондову головку (ЗГ) з чотирма зондами, пристрій формування вимірювального зусилля (ПЗ), призначений для притиску зондів до напівпроводникового шару з зусиллям в межах 1.75 Н, яке контролюється датчиком зусилля (ДВЗ). Залежно від вибраної схеми вимірювання у варіантах метод з плоскопаралельними контактами або з радіальними контактами, на струмові зонди подається струм, який формується джерелом опорної напруги (ДОН) і блоком зразкових резисторів (БЗР). Комутація опорів дозволяє забезпечити стабільний струм заданого значення. Контроль струму проводиться за величною падіння напруги на зразковому резисторі.

Визначене падіння напруги на потенційних зондах посилюється підсилювальним каскадом (ВПК), що містить підсилювачі з диференційним входом і високим вхідним імпедансом. Блок дозволяє проводити як вимірювання падіння напруги на потенційних зондах, так і падіння напруги на зразковому резисторі для вимірювання значення струму, який протікає між струмовими зондами.



ЗГ – зондова голівка; КПіС – комутатор полярності і струму; БЗР – блок зразкових резисторів; ДОН – джерело опорної напруги; ВПК – високоомний підсилювальний каскад; ПЗ – пристрій формування вимірювального зусилля; ДВЗ – датчик вимірювального зусилля; АШ – аналогова шина даних; ППЗ – пристрій позиціонування вимірюваного зразка; ДПЗ – датчик положення зразка.

Рисунок 2.7 Структурна схема автоматизованого пристрою “Зонд-1” для вимірювання питомого опору приконтактних шарів до Si

Вимірювальний блок містить цифроаналоговий перетворювач (ЦАП), вихід якого через аналогову шину даних підключений до пристрою формування

вимірювального зусилля, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що перетворює в цифровий код значення падіння напруги на потенційних зондах і опорі зразка, датчик положення зразка (ДПЗ).

Мікроконтролер здійснює управління роботою АЦП і ЦАП, формує сигнал управління на комутатор блоку зразкових резисторів (БЗР) і комутатор полярності і струму (КПіС). Другим завданням мікроконтролера є формування сигналу управління на пристрій позиціонування вимірюваного зразка (ППЗ).

2.6 Розробка моделі процесів поглинання світла в напівпровідниках

2.6.1 Вибір інструменту

Сучасні інтегровані засоби розробки додатків Windows дозволяють автоматизувати процес створення додатку. Для цього використовуються генератори додатків. Генератор додатків створює додаток, що відповідає вимогам, і надає початкові тексти. Користуючись ним як шаблоном, можна швидко розробляти свої додатки.

Подібні засоби автоматизованого створення додатків включені в компілятор Microsoft Visual C++ і називаються MFC AppWizard. Заповнивши декілька діалогових панелей, можна вказати характеристики додатку і одержати його тексти, забезпечені обширними коментарями. MFC AppWizard дозволяє створювати одновіконні і багатовіконні додатки, а також додатки, що не мають головного вікна, замість нього використовується діалогова панель. Можна також включити підтримку технології OLE, баз даних, довідкової системи.

2.6.2 Вибір інтерфейсу програми

Програма є SDI – додаток, тобто дозволяє в кожен момент часу мати відкритим тільки одне стандартне вікно Windows (рис. 2.8). На панелі інструментів винесені декілька стандартних кнопок, за допомогою яких можна працювати в програмі (рис. 2.9). Всі ті ж операції можна виконати, якщо скористатися меню File (рис. 2.10). При виборі меню File -> New або натиснувши на ікону New на панелі інструментів, відкривається вікно для введення нових даних (рис. 2.12).

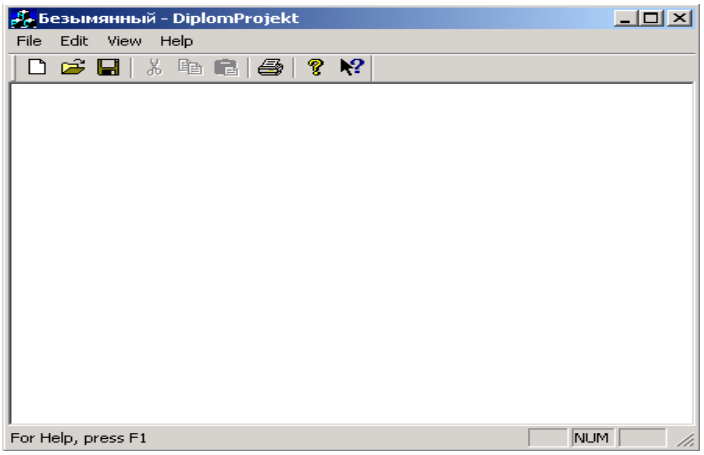


Рисунок 2.8 – Вид вікна програми



Рисунок 2.9 – Вид панелі інструментів

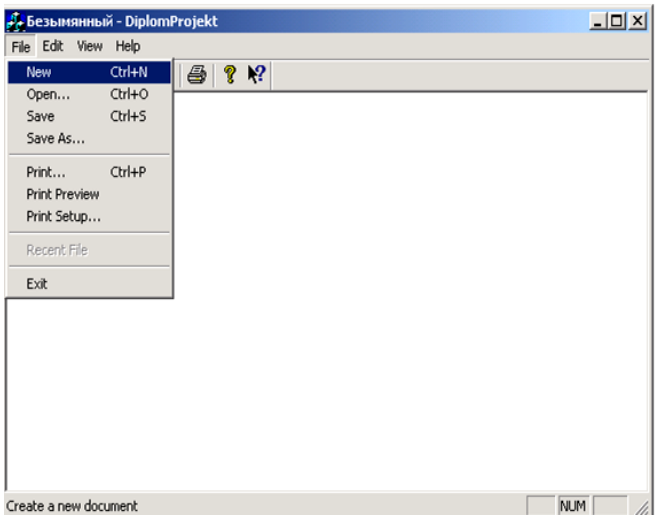


Рисунок 2.11 – Меню File

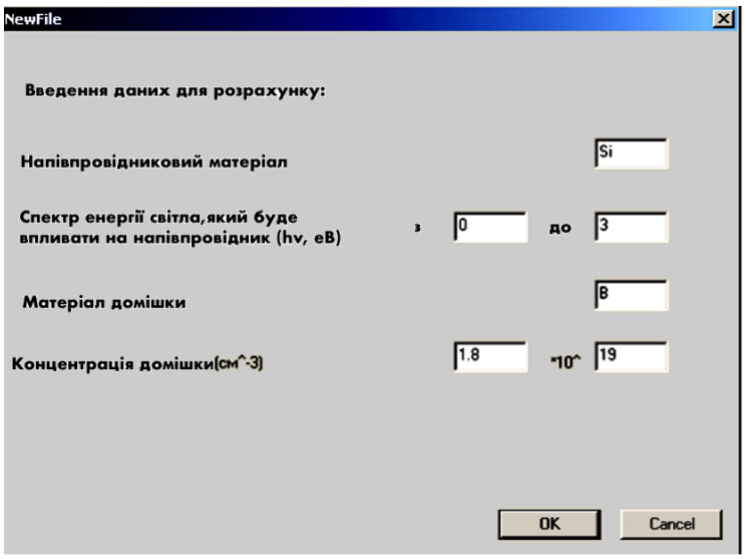


Рисунок 2.12 – Діалогове вікно для введення даних

Після завдання даних на робочій області вікна програми прорисовуються графіки залежності коефіцієнтів поглинання світла.

2.6.3 Розробка блок - схеми програми для розрахунку параметрів поглинання

Дані в програмі моделювання процесів поглинання світла напівпровідниками вводяться користувачем в спеціальному немодальному діалоговому вікні. Після цього змінні ініціалізувалися введеними даними. Процес ініціалізації відбувається у функції *OnNewDocument()* класу *CDiplomProjektDoc*, тобто в класі «документ» для даної програми.



Рисунок 2.13 – Блок - схема процесу виконання програми

Використовуючи блок –схему (рис. 2.13), було розроблено програму та розраховано параметри і характеристики напівпровідникових структур:

```
if (!CDocument::OnNewDocument())
return FALSE;
material="Si";
max_energy=3;
min_energy=0;
m_snachenie_N=1.8;
m_stepen_N=19;
return TRUE;
```

Блок програми, що виконує розрахунок параметрів власного поглинання світла напівпровідником:

```
for ( x=max_energy; x>min_energy; x-=((max_energy-min_energy)/2000))
{
CPen pen(PS_SOLID, 2, RGB(255,50,100));
CPen* oldPen=pDC->SelectObject(&pen);
hv_x=(e*(powl(x-dE,0.5))*pi*(powl(e,2))*(powl(2*mr,1.5)));
hv_x=15000*hv_x/(n*c*(powl(h,2))*m0*Eps);
hv_x/=os_y.k_sgatie_max;
if ( stop==0)
stop=1;max_a=hv_x,end_x=((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+210;}
if ( x>=min_energy) min_a=hv_x;
pDC->MoveTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, otstup-hv_x);
pDC->LineTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, otstup-hv_x+1);
pDC->SelectObject(oldPen);
}
```

Блок програми, що виконує розрахунок коефіцієнта поглинання світла основними носіями заряду:

```
for ( x=max_energy; x>min_energy; x-=((max_energy-min_energy)/2000))
        {
        CPen pen(PS_SOLID, 2, RGB(0,0,250));
        CPen* oldPen=pDC->SelectObject(&pen);
        hv_x=2*(powl(e,2));
        hv_x=hv_x*powl(2*mr*me,2.5);
        hv_x=hv_x/((3*n*(powl(me,2))*c*(powl((h),2))));
        hv_x=hv_x*((powl((x*e-dE*e),1.5))/(x*e));
        hv_x=2*hv_x*(1/(4*3.14*8.85*powl(10-12)));
        hv_x/=os_y.k_sgatie_max;
        if ( stop==1) {       stop=2;max_b=hv_x;
                }
        if ( x>=min_energy) min_b=hv_x;
        pDC->MoveTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, otstup-hv_x);
        pDC->LineTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, otstup-hv_x+1);
        pDC->SelectObject(oldPen);
        }
```

Блок програми, що виконує розрахунок коефіцієнта домішкового поглинання від енергії світлового спектру:

```
for ( x=max_energy; x>min_energy; x-=((max_energy-min_energy)/2000))
        {
        CPen pen(PS_SOLID, 2, RGB(0,200,100));
        CPen* oldPen=pDC->SelectObject(&pen);
        if (m_stepen_N!=19){
        temp=m_snachenie_N*(powl(10,m_stepen_N/po_stepen_N.k_sgatie_max));
        else{
```

```
temp=m_snachenie_N*(powl(10,m_stepen_N));
        }
hv_x=(powl(2,9))*pi*temp*h*(powl(e,2));
hv_x=hv_x/(3*n*c*me*0.046*e);
hv_x=hv_x*(powl((0.046/(x)),4));
temp=-4*(1-0.046/x);
hv_x=hv_x*(expl((temp)*atanl(1-0.046/x)));
temp=-2*pi*(1-0.0046/x);
hv_x=hv_x*(1-expl(temp));
hv_x=900*hv_x*(1/(4*3.14*8.85*powl(10-12)));
hv_x*=powl(10,6);
hv_x/=os_y.k_sgatie_max;
hv_x/=po_N.k_sgatie_max;
if ( stop==2) {
stop=3;max_c=hv_x;}//end_x=((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+210;}
if ( x>=min_energy) min_c=hv_x;
pDC->MoveTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, otstup-hv_x);
pDC->LineTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, otstup-hv_x+1);
pDC->SelectObject(oldPen);
}
```

Блок програми, що виконує розрахунок коефіцієнта ексітонного поглинання від енергії світлового спектру:

```
for ( x=max_energy; x>min_energy; x-=((max_energy-min_energy)/2000))
    {
    CPen pen(PS_SOLID, 2, RGB(207,130,160));
    CPen* oldPen=pDC->SelectObject(&pen);
    hv_x=2*(powl(e,2));
    hv_x=hv_x*powl(2*mr*me,2.5);
    hv_x=hv_x/((3*n*(powl(me,2))*c*(powl((h),2))));
```

```
temp=powl(pi,2)*(0.03/(x-dE));
hv_x=hv_x*((13.5*temp/powl(Eps,2))*(mr*me/ me))*3;
hv_x/=os_y.k_sgatie_max;
if ( stop==3) {                    stop=4;max_b=hv_x;}
if ( x>=min_energy) min_b=hv_x;
pDC->MoveTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, (otstup2-hv_x));
pDC->LineTo(((x/os_y.k_sgatie_max)*50)+400, (otstup2-hv_x+1));
pDC->SelectObject(oldPen);
}
```

2.7 Дослідження процесів поглинання світла та генерації в оптоструктурі на основі кремнію

При дослідженні процесів поглинання світла і генерації носіїв заряду у фотоприймачі необхідно розрахувати параметри і характеристики, за якими потім підбираються оптимальні параметри фотоприймача.

Для вирішення цієї задачі використано структуру фотоприймача (рис 2.14), визначено для неї залежності коефіцієнтів поглинання від світлового спектру і за даними залежностей розраховано процес генерації носіїв заряду для даної структури.

Початкові дані:

напівпровідниковий матеріал – Si;
домішка p++ - бор (B); домішка n++ і n- - фосфор (P);
концентрація домішки бору - 10^{20} $см^{-3}$;
концентрація домішки фосфору – 10^{14} $см^{-3}$ і 10^{20} $см^{-3}$;
спектр світла – від 1– 3 еВ.

Сумарний коефіцієнт поглинання визначався з суми власного, домішкового, екситонного, гратчастого поглинань і поглинання вільними носіями зарядами. При цьому коефіцієнт поглинання світла гратками, екситоном і вільними носіями зарядами береться із знаком мінус, оскільки ці поглинання не беруть участі в генерації носіїв заряду. Оскільки – залежності коефіцієнтів поглинань вільними носіями заряду, поглинання кристалічною граткою і також власного, екситонного поглинань, поглинання для n- і n++ областей профілю однакові, то приведемо тільки залежність коефіцієнта домішкового поглинання від спектру світлової енергії.

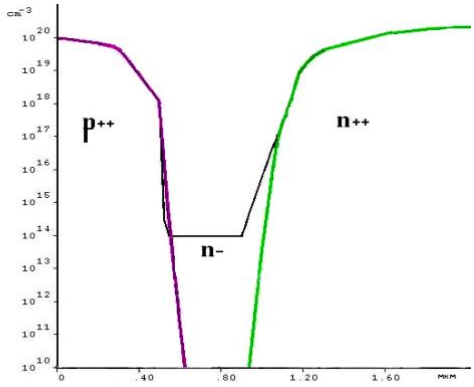
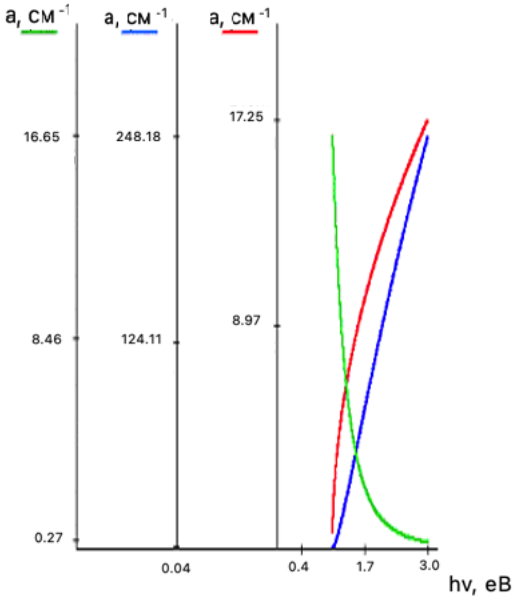


Рисунок 2.14 – Профіль напівпровідникової структури



j домішкове поглинання

j поглинання світла вільними носіями заряду

j власне поглинання світла напівпровідником.

Рисунок 2.15 – Залежності коефіцієнта поглинання від світлового спектру для p++ - області

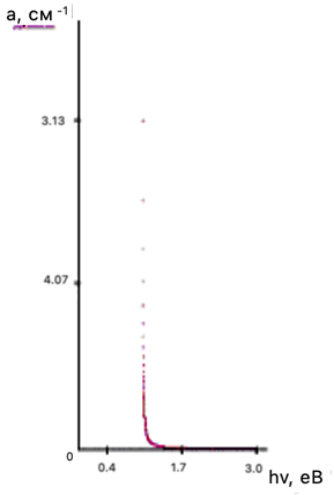


Рисунок 2.16 – Залежність коефіцієнта поглинання світла екситоном для p++ - області

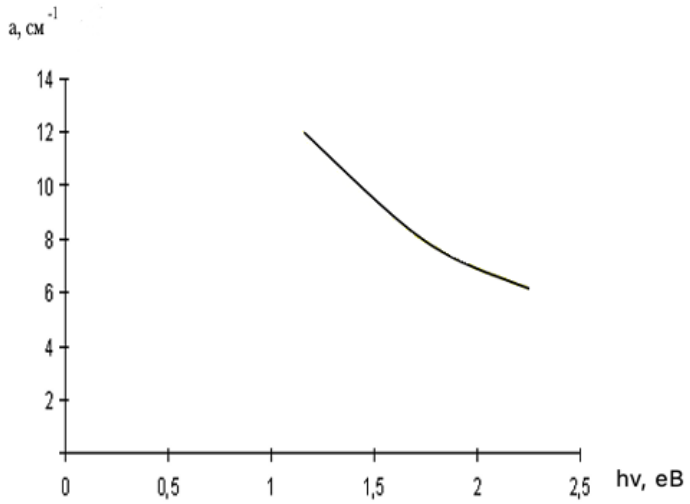


Рисунок 2.17 – Залежність коефіцієнта поглинання світла кристалічною граткою для p++ - області

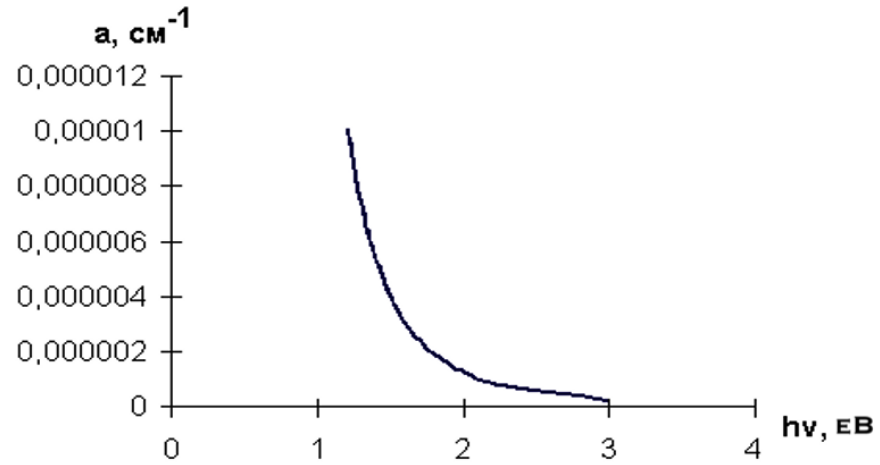
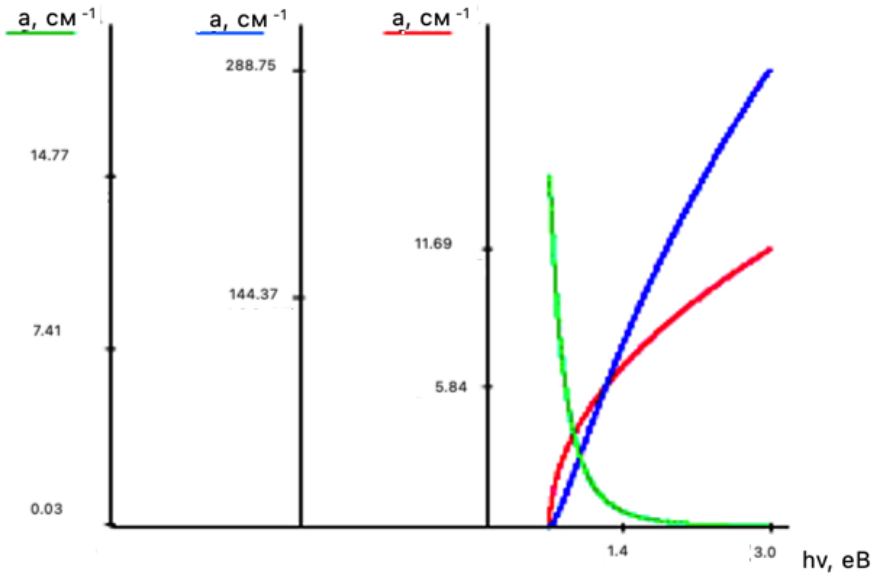


Рисунок 2.18 – Залежність коефіцієнта домішкового поглинання світла для n- -області



j домішкове поглинання

j поглинання світла вільними носіями заряду

j власне поглинання світла напівпровідником.

Рисунок 2.19 – Залежності коефіцієнта поглинання від світлового спектру для n++ - області

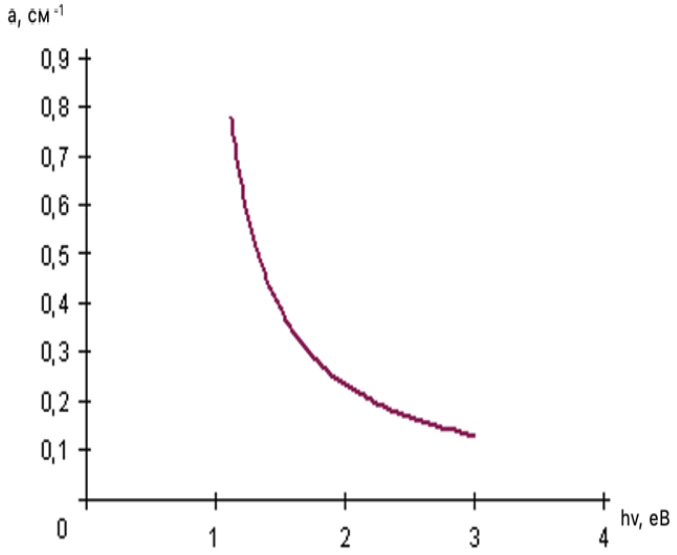


Рисунок 2.20 – Залежність коефіцієнта поглинання світла екситоном для n++ - області

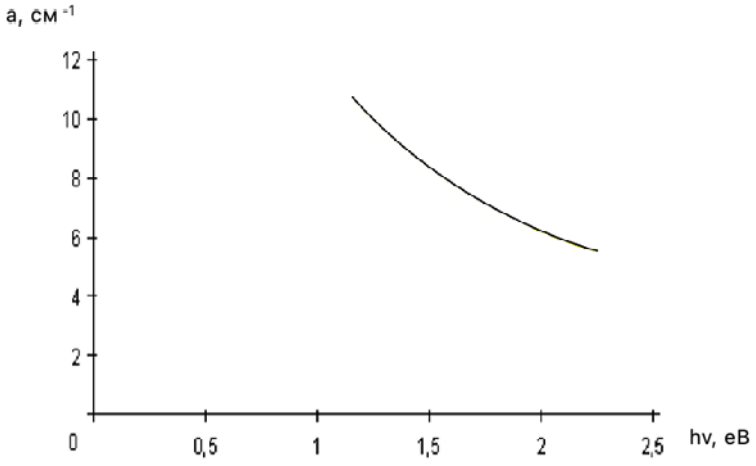


Рисунок 2.21 – Залежність коефіцієнта поглинання світла кристалічною граткою для n++ - області

На основі одержаних даних визначимо залежність розподілу генерації носіїв заряду в глибині напівпровідника за формулою [9]:

$$g(x) = \alpha\eta_\lambda(1 - R_\lambda)Q\exp(-\alpha x),$$

де η_λ - квантовий вихід, в даному випадку $\eta_\lambda = 1{,}25$;

R_λ - показник віддзеркалення світла, для Si R_λ =0,05;

Q- потік фотонів квант/см^2 ·с, ми приймаємо для використовуваного випромінювання $Q = 2 \cdot 10^{13}$ квант/см^2 · с.

Одержуємо для даного профілю наступну залежність:

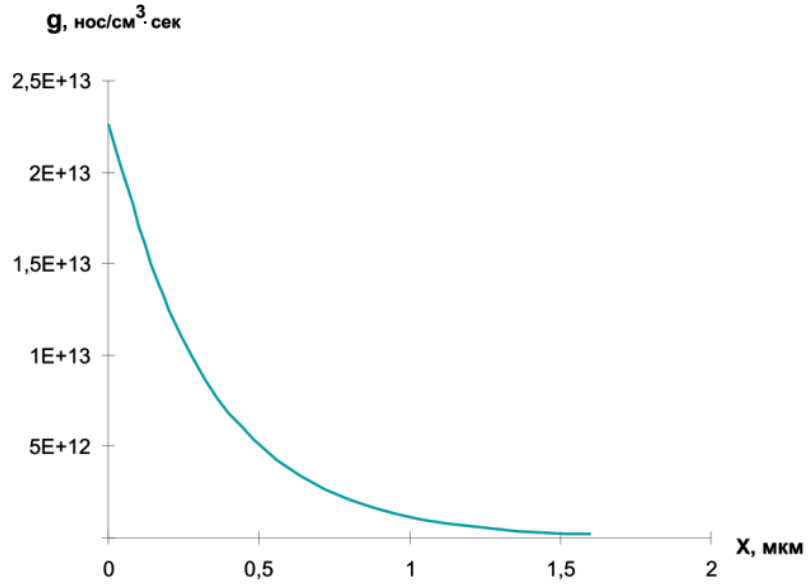


Рисунок 2.22– Просторовий розподіл швидкості генерації носіїв заряду

Як підсумок можна сказати, що запропоновані моделі процесів поглинання світла напівпровідниками реалізовані успішно. Програма пройшла пробні розрахунки коефіцієнтів поглинання для заданого профілю. І що найважливіше, так це те, що за допомогою даної програми можна позбавитися тривалих,

монотонних розрахунків процесів поглинання світла і швидкості генерації носіїв заряду в напівпровідникових структурах. Що в свою чергу є і за мету, яка була поставлена, щоб спростити процес проектування оптоелектронних приладів.

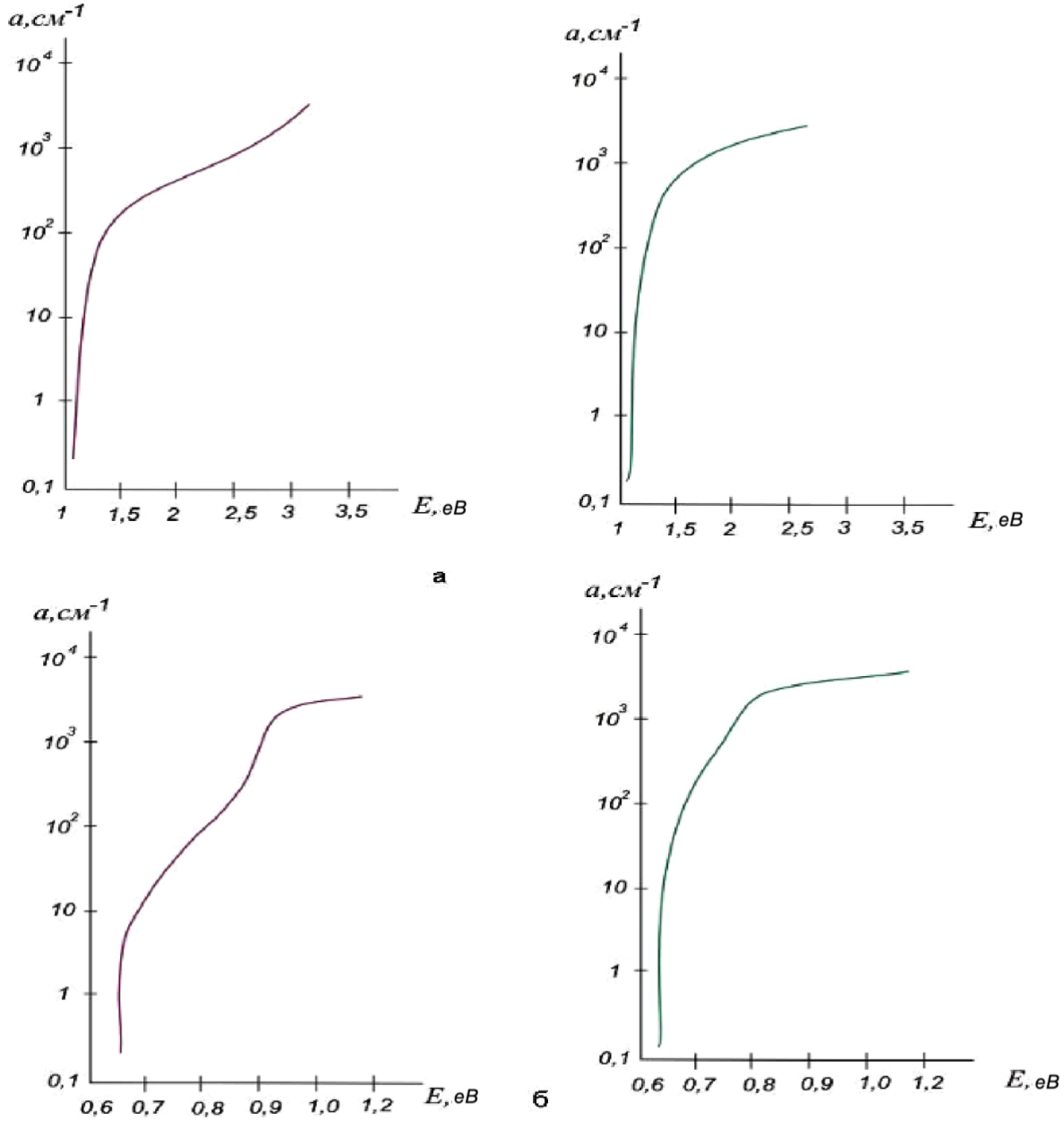
На залежностях поглинання світла вільними носіями заряду (рис 2.24) одержаних в результаті дослідів є ряд спадів і підйомів характеристики. Це пояснюється тим, що, наприклад, у кремнію особлива структура зони провідності. Тому на монотонну спектральну залежність поглинання вільними носіями заряду накладається поглинання із-за внутрішньозонних переходів.

На графіках домішкового поглинання світла є ряд екстремумів (рис 2.25). Це відбувається із – за збудження нейтрального атома домішки переходом його на інший енергетичний рівень або переходом межу основним і збудженим станом. Піки на залежностях поглинання світла ексітоном (рис 2.26) пояснюються тим, що дипольні переходи заборонені [13], лінії спектру починаються з числа n=2.

У Si і Ge поглинання, обумовлене збудженням коливань гратки, хоч і слабке, але все таки присутнє, при чому в досить широкій спектральній області (рис 2.27). На спектрах поглинання цих напівпровідників видно ряд виразних піків, а також безперервне поглинання в проміжках між ними. Таке поглинання повинно бути обумовлено процесами, в яких беруть участь, принаймні, два фонони.

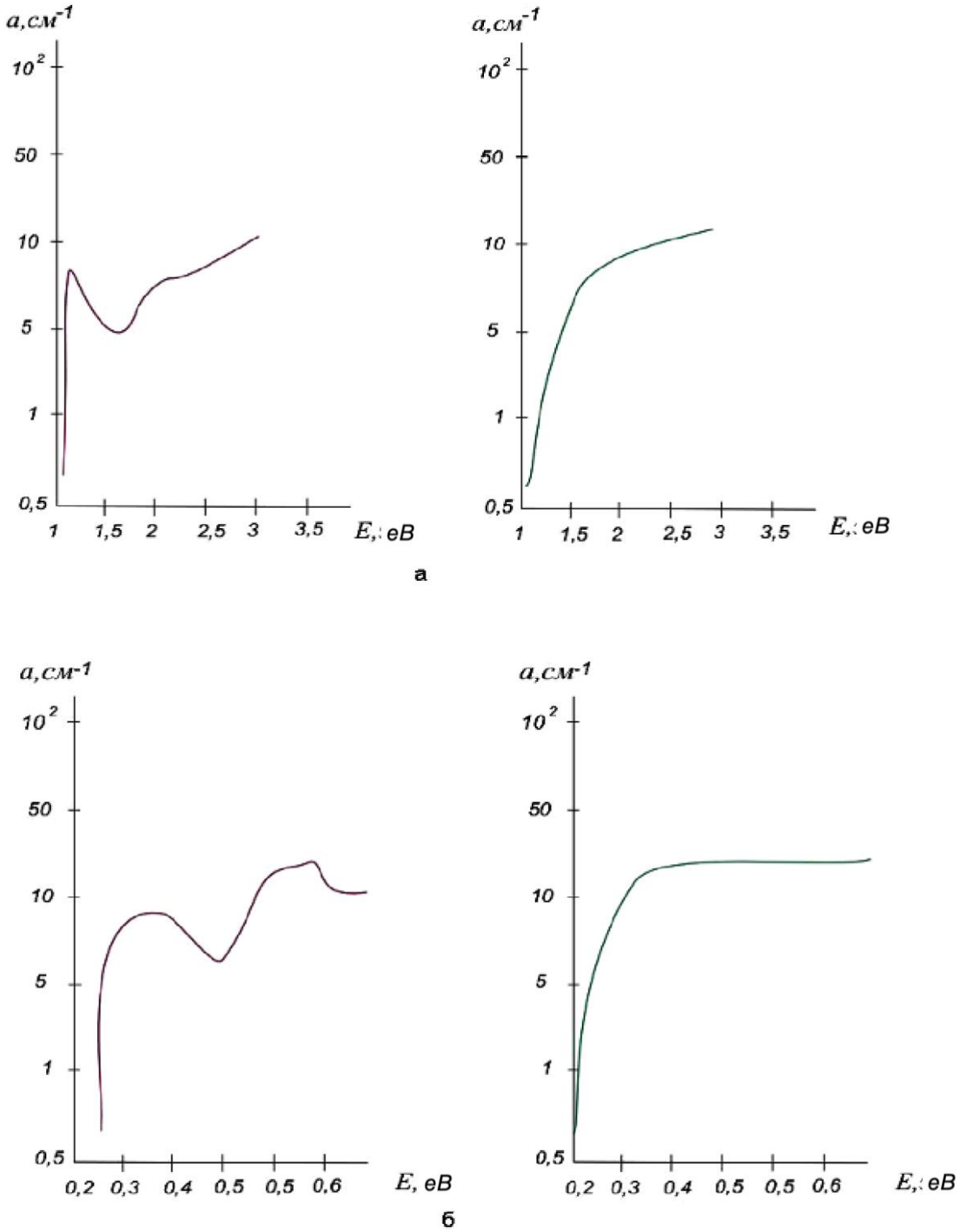
Розбіжності між одержаними експериментально характеристиками і за допомогою моделей, реалізованих в програмі, пояснюються також тим, що ці моделі є аналітичними, і вони містять спрощуючі припущення. Тому певної погрішності при виконанні розрахунків за допомогою даних моделей не можна не уникнути. Але, не дивлячись на це, проектування оптоелектронних приладів, застосовуючи дані моделі можливо. Тим більше що дані моделі дуже добре

показують вплив того або іншого процесу поглинання на сумарний коефіцієнт поглинання світла напівпровідником.



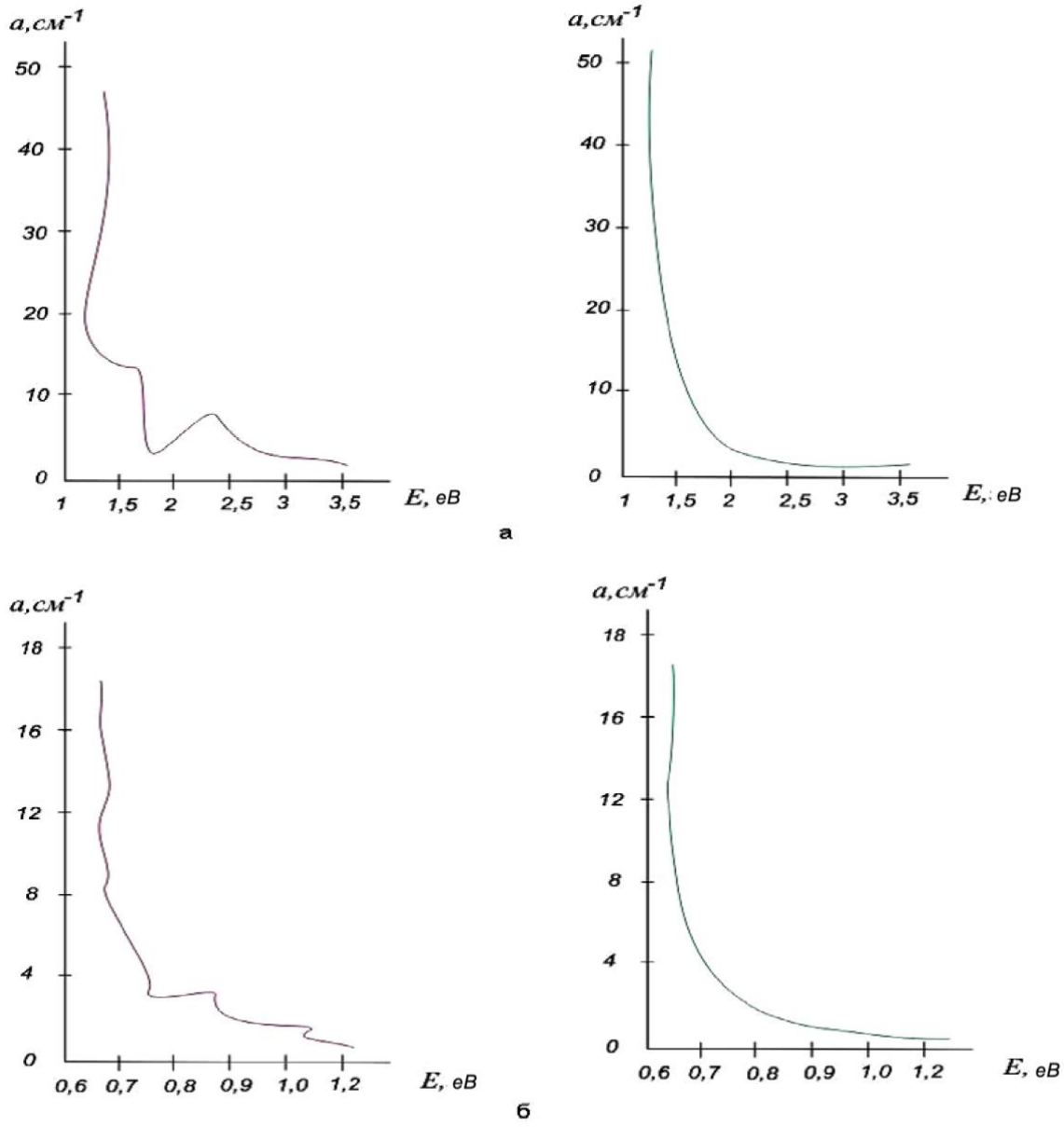
а- Si; б – Ge

Рисунок 2.23 – Залежності власного поглинання: експериментальні – зліва і розрахункові - справа



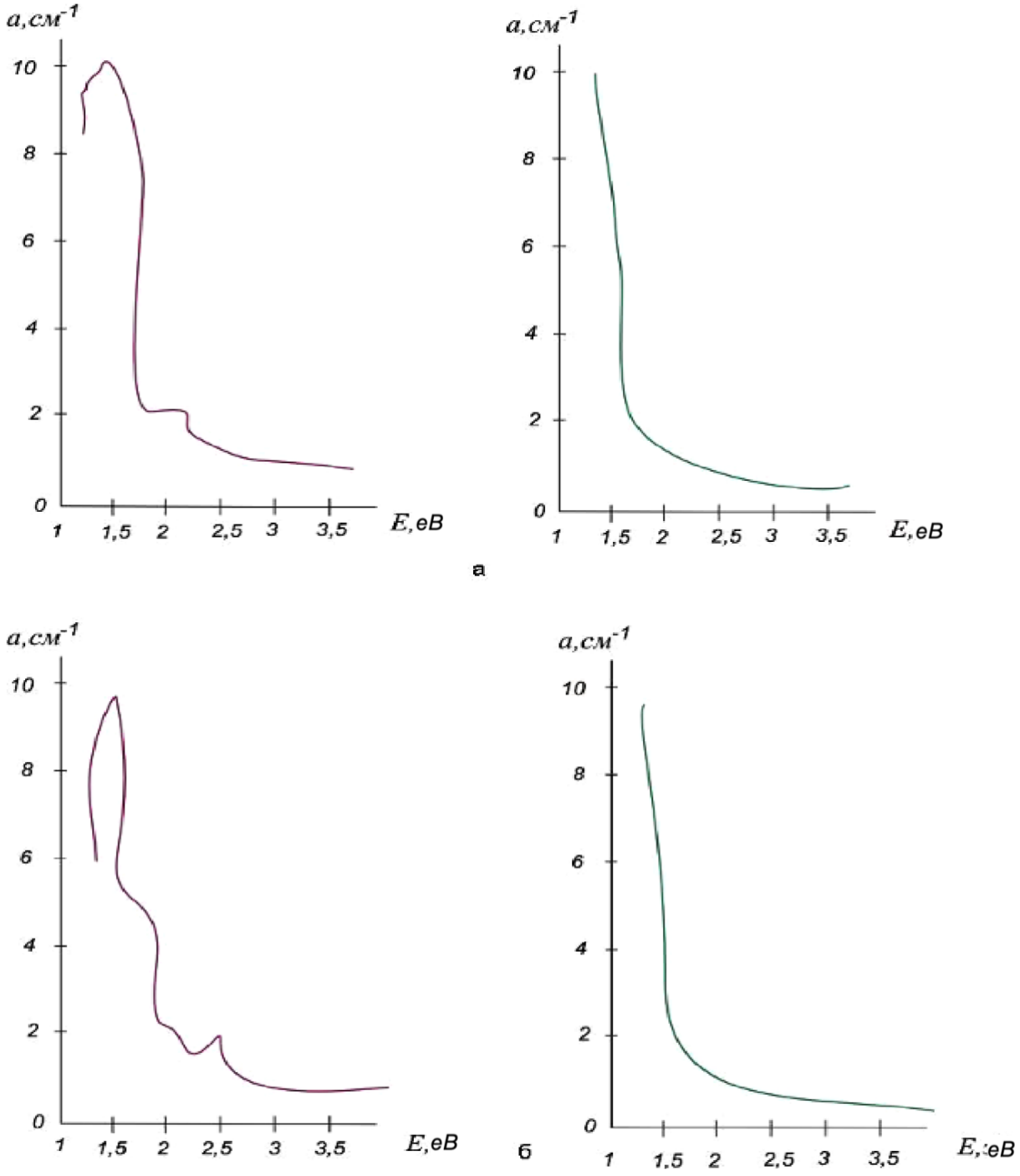
а- Si; б – Ge

Рисунок 2.24 – Залежності поглинання світла вільними носіями заряду: експериментальні – зліва і розрахункові - справ



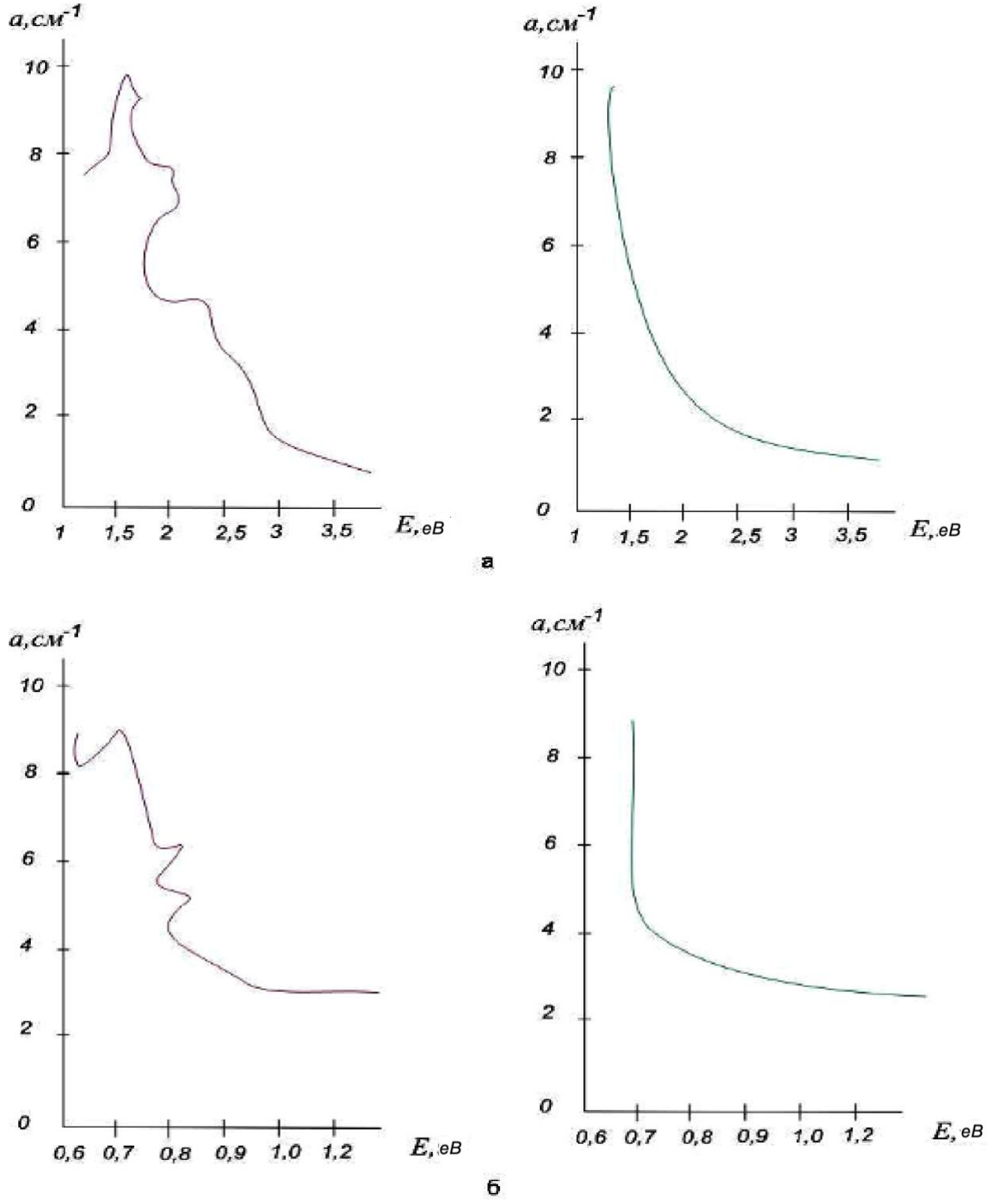
а- Si; б – Ge

Рисунок 2.25 –Залежності домішкового поглинання експериментальні -зліва і розрахункові - справа



а- Si; б – Ge

Рисунок 2.26 – Залежності поглинання світла ексітоном: експериментальні – зліва і розрахункові- справа



а- Si; б – Ge

Рисунок 2.27 – Залежності поглинання світла кристалічною решіткою: експериментальні – зліва і розрахункові- справа

2.8 Розробка фотоприймального пристрою

Запропонова схема фотоприймального пристрою, що здатен реєструвати ультрафіолетове випромінювання, видиме світло та ближній інфрачервоний діапазон (довжина хвилі від 320 до 1100 нм). В основі пристрою кремнієвий PIN -діод від Hamamatsu, який має частоту відгуку, що може досягати 30 МГц.

PIN-діод, скорочено позначення позитивно-внутрішньо-негативний діод, — це напівпровідниковий прилад, що належить до сімейства діодів (рис. 2.28). На відміну від звичайних діодів, PIN-діоди мають три шари:

- p-тип (високоякісний) напівпровідниковий шар
- внутрішній (нелегований або злегка легований) напівпровідниковий шар
- щар напівпровідника n-типу.

Внутрішній шар відіграє вирішальну роль у роботі пристрою, дозволяючи йому реагувати на прикладену напругу як змінний резистор. PIN-діоди можуть служити фотодетекторами, перетворюючи вхідні світлові індикатори на електричні сигнали.

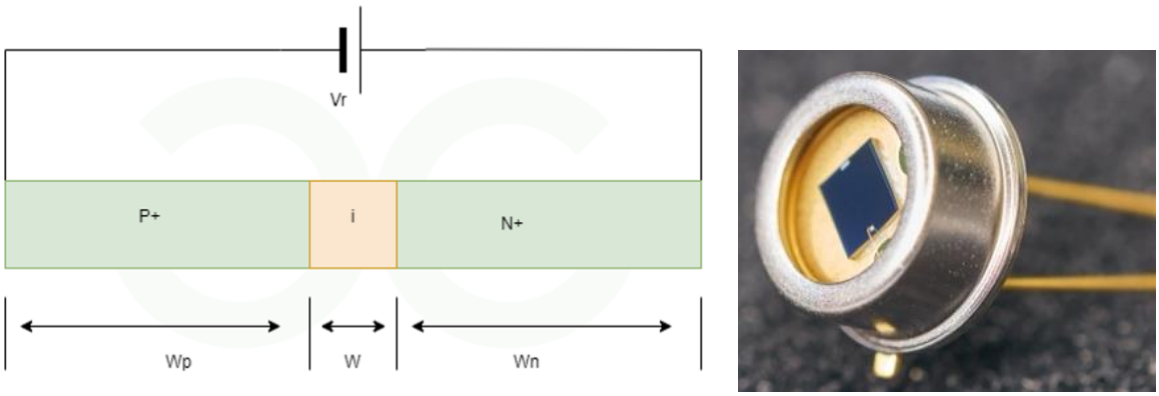


Рисунок 2.28 -Структура та зовнішній вигляд PIN -діоду

Характеристики PIN-діодів для фотодетекторів

- Висока чутливість: PIN-діоди демонструють високу чутливість до падаючого слабкого випромінювання, що робить їх сенсорними фотодетекторами. Чутливість стосується здатності фотодетектора перетворювати світло на електричний сигнал.
- Широкий спектральний діапазон: Товщину внутрішнього шару та розміри тканини можна оптимізувати для отримання широкого спектрального діапазону, що дозволяє PIN-діодам випромінювати світло на різних довжинах хвиль.
- Низький рівень шуму: Низький рівень затемнення сучасних PIN-діодів сприяє низькому рівню шуму, покращуючи продуктивність фотодетектора, особливо в умовах слабкого освітлення.
- Швидкий час відгуку: PIN-діоди мають швидкий час відгуку, що дозволяє їм швидко перетворювати зміни глибини падаючого світла в електричні сповіщення. Ця функція надзвичайно важлива в тих випадках, коли потрібне швидке виявлення.
- Змінне зміщення для оптимізації: Напруга зміщення, що подається на PIN-діод, може бути регульована для оптимізації його загальної продуктивності, головним чином виходячи з конкретних вимог програмного забезпечення для фотодетекторів.

Схема електрична принципова фотоприймального пристрою представлена на рис. 2.29. Пасивні елементи схеми: C1 — це конденсатор C0G розміру 0603 ємністю 10 нФ 50 В; C2 — танталовий конденсатор ємністю 10 мкФ 20 В; R1 — резистор розміру 0603 або 0402 опором 100 Ом; діод D1 — моделі S1223.

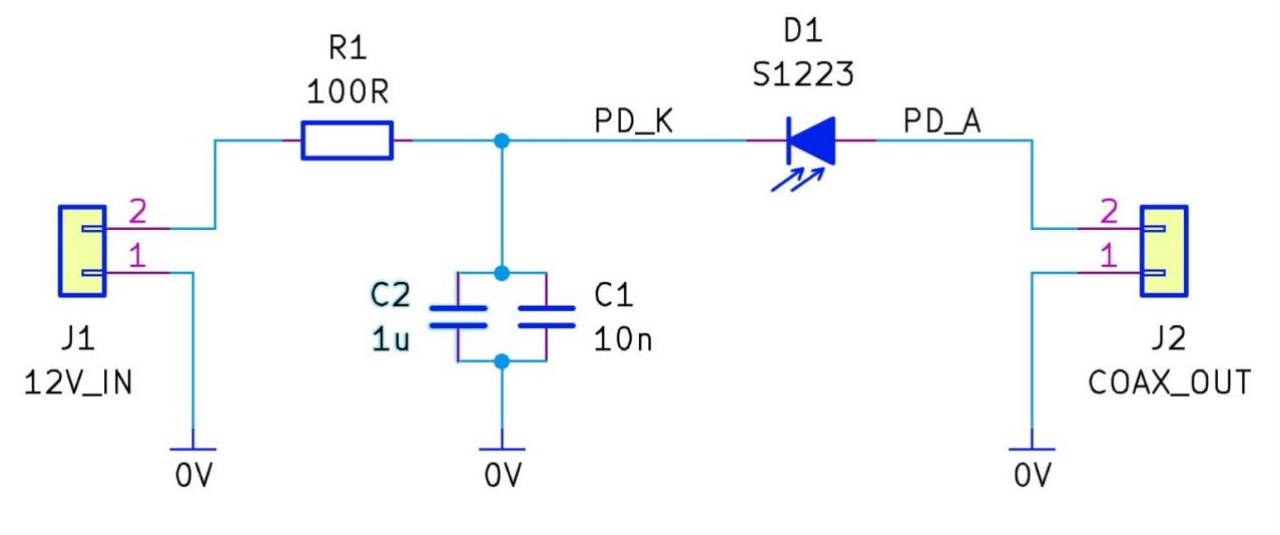


Рисунок 2.29 – Схема електрична принципова фотоприймального пристрою

До фотодіода подається зворотна напруга зміщення (12 В), завдяки чому ємність фотодіода значно зменшується (становить 16 пФ), що дозволяє використовувати його на високих частотах. Фотодіод генеруватиме струм, який залежить від кількості світлової енергії, що падає на діод. Цей струм перетворюється на напругу для вимірювання шляхом пропускання його через опір. Окрім цього, існує невелика фільтрація напруги зміщення та деякі заходи щодо екранування всього, оскільки струм (і напруга) будуть дуже низькими. Максимальний струм через діод становить 10 мА. Діаграма чутливості приладу наведена на рис. 2.30.

На основі схеми електричної принципової у середовищі Sprint Layout побудована топологія друкованої плати, габаритні розміри 20 х 20 мм (рис. 2.31).

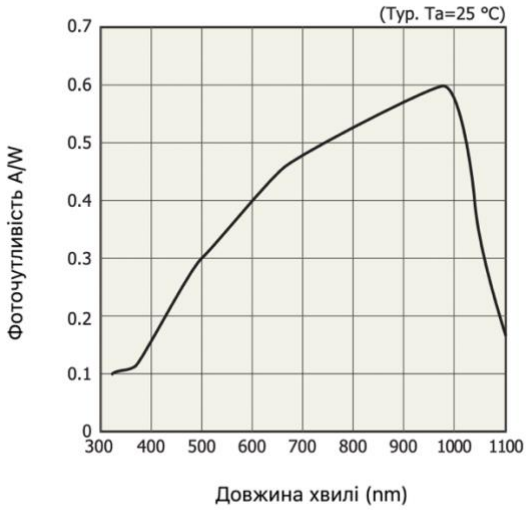


Рисунок 2.30 -Спектральна чутливість пристрою

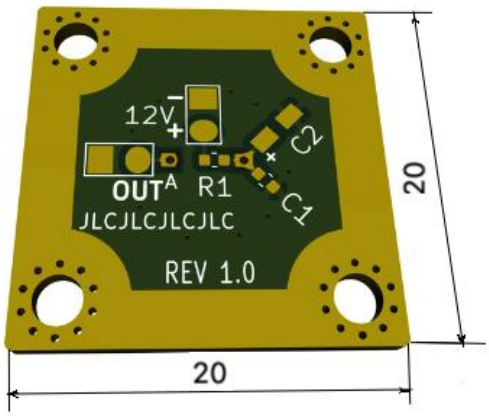
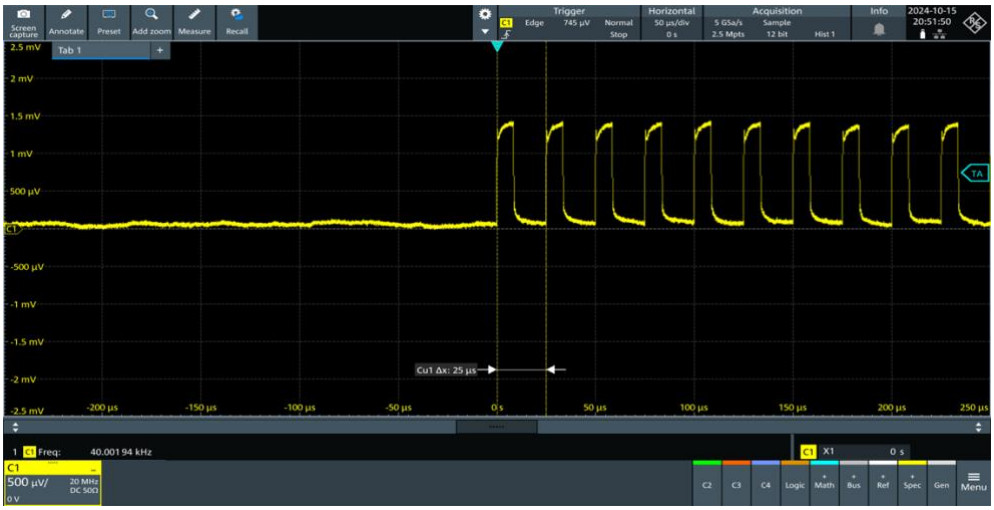


Рисунок 2.31 -Топологія друкованої плати

2.9 Моделювання роботи фотоприймального пристрою

Для спостереження за швидкозмінними рівнями освітлення вихід фотоприймального приладу підключили до осцилографа.

Результати моделювання представлені на рис. 2.32 а,б,в. В якості джерела світла використано пульт від телевізору (рис.2.32 а). Частота імпульсів 40 000 разів на секунду. Якщо в якості джерела світла використати ліхтарик (рис. 2.32 б), то робоча частота була набагато вища — 324 кГц. Частота імпульсів становила 17,8 мільйона разів на секунду при опроміненні лазерними променями (рис.2. 32 в).

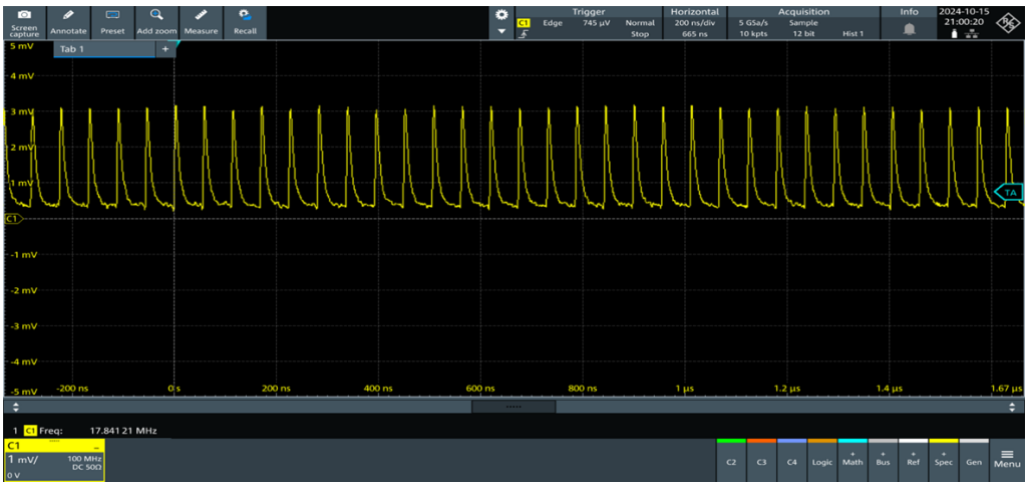


а)



а

б)



в)

Рисунок 2.32 -Результати моделювання

Таким чином проведено розрахунок параметрів поглинання світла напівпровідниковими структурами та досліджено їх механізми. Встановлено, що що найбільший коефіцієнт поглинання світла напівпровідниками спостерігається при домішковому поглинанні. Розроблена модель фізичного процесу взаємодії світла з напівпровідниками та програма на С++ моделювання процесів його поглинання, що дає можливість значно спростити технологічний процес виробництва приладових напівпровідникових структур. Розроблено фотоприймальний пристрій на основі PIN-діоду, що здатен реєструвати електромагнітне випромінювання ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазону (довжина хвилі від 320 до 1100 нм).

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

3.1 Порівняльний аналіз приладових структур за критеріями

Приладові структури, що засновані на різних фізичних процесах: власне поглинання, домішкове поглинання, ексітонне поглинання, поглинання граткою, кожен має свої позитивні та негативні якості.

Для вибору кращого з цих методів проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1) враховуючи шкалу відносної важливості (табл.3.2) [19]

Таблиця 3.1 – Варіанти типів транзисторів

Технологія	Короткий опис (види транзисторів)
A	КТ315Б
B	КТ315Б-1
C	1Т313А
D	1Т313Б1

Таблиця 3.2 – Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага

9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3, встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв.

Таблиця 3.3 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^{6}\omega_i}$	X_i
1. Концентрація домішок	1	1	1/4	1/6	6	4	1,004	0,123
2. Дозування	1	1	5	6	5	7	3,251	0,410
3. Відстань від поверхні	3	1/4	1	1/4	3	1/4	0,649	0,088
4. Площа	9	1/8	5	1	5	1	1,702	0,212
5. Конструкція	1/7	1/5	1/3	1/5	1	1/4	0,269	0,034
6. Вартість	1/3	1/7	5	1	5	1	1,027	0,129
∑							7,907	1,00

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (таблиці 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію , то i = 1, 2, 3, 4;

$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}{\sum_{i=1}^{4}\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}$; $\sum$ - сума по стовпці $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$.

Таблиця 3.4 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «концентрація домішок»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	7	5	3,64	0,47
B	1/5	1	1/3	1	1,26	0,16
C	1/7	3	1	3	1,63	0,21
D	1/5	1	1/3	1	1,26	0,16
∑					7,79	1,00

Таблиця 3.5 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «дозування»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	7	5	7	2,11	0,34
B	1/7	1	1	3	1,50	0,23
C	1/5	1	1	3	1,51	0,24
D	1/7	1/3	1/3	1	1,16	0,19
∑					6,28	1,00

Таблиця 3.6 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «відстань від поверхні»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	7	5	5	2,06	0,33
B	1/7	1	1	3	1,50	0,25
C	1/5	1	1	1	1,34	0,22
D	1/5	1/3	1	1	1,26	0,20
∑					6,16	1,00

Таблиця 3.7 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «площа»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	5	7	2,00	0,31
B	1/3	1	3	5	1,75	0,27
C	1/5	1/3	1	5	1,59	0,25
D	1/7	1/5	1/5	1	1,11	0,17
∑					6,45	1,00

Таблиця 3.8 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «конструкція»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	7	3	1,93	0,30
B	1/3	1	5	1	1,65	0,26
C	1/7	1/5	1	5	1,59	0,25
D	1/3	1	1/5	1	1,26	0,19
∑					6,43	1,00

Таблиця 3.9 – Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	1/3	1/3	1/5	1,17	0,19
B	3	1	3	3	1,78	0,29
C	3	1/3	1	1	1,51	0,25
D	5	1/3	1	1	1,65	0,27
∑					6,11	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт.

Таблиця 3.10 – Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріорите ти	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глоба льний
Вага	0,127	0,412	0,082	0,216	0,034	0,129	
КТ315Б	0,47	0,34	0,33	0,31	0,30	0,19	0,328
1КТ315Б	0,16	0,23	0,25	0,27	0,26	0,29	0,240
1Т313А	0,21	0,24	0,22	0,25	0,25	0,25	0,238
1Т313Б	0,16	0,19	0,20	0,17	0,19	0,27	0,193

З порівняння глобальних пріоритетів транзисторів з різними видами поглинання світла (табл.10) видно, що найбільшим є пріоритет у транзистора КТ315Б з найбільшим коефіцієнтом поглинання.

За допомогою методу аналізу ієрархій проведено порівняння чотирьох видів транзисторів з різним типом поглинання світла: 1) концентрація домішок ; 2) дозування; 3) відстань від поверхні; 4) площа; 5) конструкція; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «дозування».. За даними таблиць глобальний пріоритет за багатьма критеріями є найвищим для транзистора КТ315Б з найвищим коефіцієнтом поглинання, тому перевага надається саме йому.

3.2 Розрахунок витрат на виконання досліджень

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості покупних виробів

Найменування матеріалів	Одиниця вимірювання	Вартість за одиницю, грн.	Кількість	Усього, грн.
Кремній	кг	800	0,15	120
Германій	кг	1800	0,52	936
Бор	кг	150	0,3	45
Фосфор	кг	140	0,2	28
Транзистор КТ315А	шт	10	1	10
Транзистор КТ315Б	шт	20	1	20
Транзистор 1Т313А	шт	65	1	65
Транзистор 1Т313Б	шт	60	1	65
Всього				1289

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Техніка безпеки при виробництві фотометричних приладів

Виробничий процес - складна соціально-технічна система. Загальні вимоги до виробничих процесів визначені в ГОСТ 12.3.002-75 «ССБТ. Процеси виробничі. Загальні вимоги безпеки» [20].

Відповідно до ГОСТ 12.3.002-75 безпека виробничих процесів забезпечується вибором технологічного процесу, режимів роботи і порядку обслуговування виробничого устаткування, виробничих приміщень і майданчиків; вихідного матеріалу заготовок і напівфабрикатів, їх способів зберігання і транспортування, а також готової продукції та відходів виробництва; виробничого обладнання та його розташування; засобів захисту працюючих.

Виробничий процес має бути пожежо-та вибухобезпечний, не повинен забруднювати навколишнє середовище.

Основні вимоги техніки безпеки до технологічних процесів:

• заміна технологічного процесу і операцій, пов'язаних з виникненням небезпечних і шкідливих факторів, процесами при яких небезпечні і шкідливі фактори відсутні;

• застосування комплексної механізації , автоматизації та дистанційного керування, за наявності небезпечних і шкідливих виробничих факторів;

• надійна герметизація устаткування;

• застосування засобів комплексного захисту;

• своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, що є джерелами небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Виробництво фотоприладів супроводжується рядом шкідливих і небезпечних факторів (табл. 4.1) [21]. Отже, заходи техніки безпеки повинні бути на високому рівні.

Перш за все, пред'являються вимоги до спецодягу і до засобів особистого захисту. На працівнику мають бути надіті бавовняний костюм, головний убір. У разі якщо працівник працює в печному залі або в приміщенні, де знаходяться печі, костюм повинен бути з повстяної вовни. До засобів особистого захисту відносяться: прогумований фартух, гумові чоботи і рукавиці, нарукавники, захисні окуляри та протигаз.

Робота з такими отруйними речовинами слід проводити у витяжних шафах. У витяжних шафах обладнують верхні і нижні відсмоктувачі. Якщо швидкість висмоктування повітря при звичайних умовах складає 0,5 - 0,7 м / с, то при роботі з токсичними речовинами 1,2-1,5 м/с. Тверді отруйні речовини необхідно подрібнювати в закритих ступах і зважувати в судинах під тягою. Застосовувані отруйні та токсичні речовини необхідно зберігати в опечатаному сейфі в добре закупореній посуді з етикеткою «Отрута» і назвою речовини.

Таблиця 4.1. Узагальнені операції при виробництві фотоприймачів і шкідливі та небезпечні фактори при їх виконанні

Операція	Шкідливі та небезпечні фактори
Дифузія	Температура 1000-1200^{0}С; кисень, сурьма, миш'як

Травлення	Плавикова кислота
Епітаксія	Температура 800-1100^{0}С; Si
Вирощування окислу	Температура 1000-1200^{0}С
Металізація	Температура 450-500^{0}С
Нанесення піролетичного шару	Температура 300-450^{0}С
Дротяні методи	Зварювання, паяння, припої

Устаткування, дотичні з киснем, мають бути забезпечені пристроями, що забезпечують можливість знежирення водневопровідної арматури наступними речовинами чотирьоххлористим вуглецем технічним ГОСТ 5827-73, ділорітаном технічним першого сорту ГОСТ 1942 - 78, етиловим спиртом-ректифікатом ГОСТ 5962 - 73.

Дифузія, епітаксія, сушка в печах повинна проводитися при виконанні наступних вимог: пічні камери повинні мати щільно прикриті двері і скібери на відвідних і підвідних каналах, повітряновід, що завершує подачу нагрітого повітря. Приміщення пічного залу обладнується припливно-витяжною вентиляцією. Нагріте повітря повинно видалятися з верхньої зони приміщення, а припливне повинне подаватися розсіяно.

4.2 Електробезпека

Персональні комп’ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), що використовуються під час проведення досліджень ,мають відповідати класу

зони, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію. Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв виконується як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів. Не допускається використовувати нульовий робочий провідник як нульовий захисний провідник. Нульовий захисний провідник прокладається від стійки групового розподільного щита, розподільного пункту до розеток електроживлення. Не допускається підключати на щиті до одного контактного затискача нульовий робочий та нульовий захисний провідники. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі має бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники мають відповідати номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

У приміщенні, де одночасно експлуатуються понад п'ять персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв, на помітному та доступному місці встановлюється аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, крім освітлення.

Персональні комп'ютери і периферійні пристрої повинні підключатися до електромережі тільки за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. У штепсельних з'єднаннях та електророзетках, крім контактів фазового та нульового робочого провідників, мають бути спеціальні контакти для підключення нульового захисного

провідника. Їхня конструкція має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше, ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Не допускається підключати персональні комп'ютери та периферійні пристрої до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі з використанням перехідних пристроїв.

Електромережі штепсельних з'єднань та електророзеток для живлення персональних комп'ютерів та периферійних пристроїв потрібно виконувати за магістральною схемою, по 3-6 з'єднань або електророзеток в одному колі. Штепсельні з'єднання та електророзетки для напруги 12В та 42В за своєю конструкцією мають відрізнятися від штепсельних з'єднань для напруги 127В та 220В. Штепсельні з'єднання та електророзетки, розраховані на напругу 12В та 42В, мають візуально (за кольором) відрізнятися від кольору штепсельних з'єднань, розрахованих на напругу 127В та 220В. Індивідуальні та групові штепсельні з'єднання та електророзетки необхідно монтувати на негорючих або важкогорючих пластинах. Електромережу штепсельних розеток для живлення персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв при розташуванні їх уздовж стін приміщення прокладають по підлозі поруч зі стінами приміщення, як правило, в металевих трубах і гнучких металевих рукавах, а також у пластикових коробах і пластмасових рукавах з відводами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання. При розміщенні в приміщенні до п'яти персональних комп'ютерів і периферійних пристроїв допускається прокладання трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого чи важкогорючого матеріалу по периметру приміщення без металевих труб та гнучких металевих рукавів. Не допускається в одній трубі прокладати ланцюги до 42В та вище 42В [24].

При організації робочих місць електромережу штепсельних розеток для живлення персональних комп'ютерів, периферійних пристроїв і у центрі

приміщення прокладають у каналах або під знімною підлогою в металевих трубах або гнучких металевих рукавах. При цьому не допускається застосовувати провід і кабель в ізоляції з вулканізованої гуми та інші матеріали, які містять сірку.

4.3 Пожежна та техногенна безпека

Категорія приміщення по пожежній вибухонебезпечності згідно СНиП 2.01.02 - 85 має I ступінь вогнестійкості, а по пожежовибухонебезпеки відноситься до категорії В, тобто в приміщенні зберігаються тверді горючі речовини. Клас приміщення лабораторії з пожежної небезпеки відповідно до ПУЕ-85-П-110 (використовуються горючі матеріали, магнітні носії інформації).

У лабораторії можливі наступні причини виникнення пожежі: несправність електропроводки, порушення протипожежних правил і правил експлуатації приладів. Тому, відповідно до ГОСТ 12.4.009-83 в приміщенні слід встановити первинні засоби пожежогасіння. Виходячи із загальної площі приміщення і категорії приміщення з вибухопожежної та пожежної небезпеки, потрібно поставити два вогнегасника з вуглекислотою типу ОУ-5. Вогнегасники повинні розміщуватися на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника. Їх розміщують таким чином, щоб інструктивні написи на корпусі були видні [24].

Також пропонується застосування сигналізації про виникнення пожежі шляхом установки датчиків КН-1, налаштованих на температуру спрацювання 70°С.Оскільки один датчик типу КН-1 здатен контролювати площу 3 м^2 розрахуємо кількість датчиків (Кд) необхідних для приміщення лабораторії

$$K_Д = \frac{S}{3} = \frac{20}{3} \approx 7шт \qquad (4.1)$$

Для більш надійного контролю приміщення лабораторії прийнято кількість датчиків типу КН-1 яка дорівнює 8. Різні рідини використовувані при монтажно-складальних роботах (спирт, розчинники, скипидар і ін.), повинні зберігатися в закритому небиткому посуді. Посуд повинен мати написи про її вміст.

Організаційно-технічними заходами щодо забезпечення пожежної безпеки є: організація навчання персоналу правилам пожежної безпеки; розробка заходів щодо дій робітників на випадок виникнення пожежі. Важливою мірою щодо забезпечення пожежної безпеки є організація пожежної охорони приміщення, яка передбачає профілактичний і оперативне обслуговування. Оскільки в лабораторії працює 4 людини, тому в разі виникнення пожежі при евакуації робочого персоналу використовується вхідні двері, згідно плану евакуації (рис. 4.1)

Оскільки в розробленому приладі не використовуються високі напруги, прилад не має в своєму складі генераторів надвисокої частоти, ультразвукових випромінювачів, джерел радіаційного випромінювання міри захисту від вищевказаних впливів не потрібні.

.

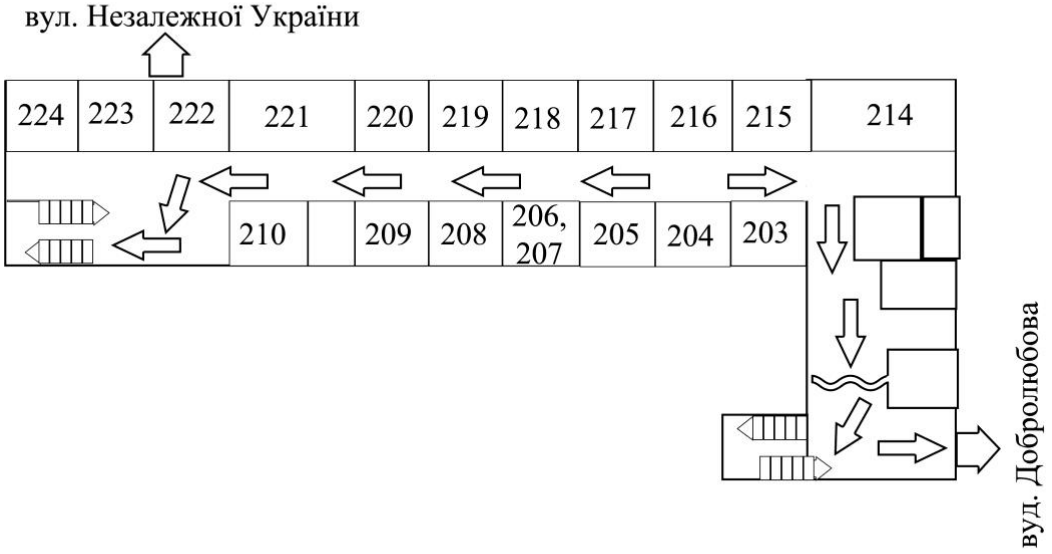


Рисунок 4.1 – План евакуації на випадок пожежі

4.4 Розрахунок параметрів мікроклімату в приміщенні при роботі з комп'ютерною технікою

Для оцінки стану виробничого середовища приміщень з ЕОМ проводилось дослідження основних параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, у різних за призначенням приміщенні комп'ютерного класу з використанням стандартної вимірювальної апаратури. Характеристика приміщення: загальна площа – 71,9 м^2; загальний об'єм – 194,1 м^2; кількість комп'ютерів – 12 шт.; кількість принтерів – 6 шт.; кількість робітників – 24 особи; площа на робітника – 5,99 м^2; об'єм на робітника – 16,18 м^2. Згідно загальних санітарних норм (НПАОП 0.00-1.28-10) в приміщеннях не повністю забезпечена необхідна площа на одне робоче місце (не менше 6 м^2): в комп'ютерному залі 5,99 м^2 , відповідно менше на 0,16%, а необхідний об'єм (не

менше 20 $м^3$) не виконується на 19% (16,18$м^3$). В цілому ускладнюється можливість підтримки необхідного мікроклімату. Результати виміру параметрів мікроклімату наведено у табл. 4.3

Аналіз одержаних даних свідчить про необхідність підвищення загальних санітарно-технічних вимог до повітря робочої зони. Для легкої категорії важкості праці і теплого періоду року оптимальні параметри мікроклімату складають: температура 22-24 °С [16] , відносна вологість – 40-60 % [22]. Визначено перевищення температури на 5,4-6,4 °С, а відносній вологості на 8,0-12,4% [23]. Що стосується швидкості руху повітря, то за нормативної величині 0,2-0,5 м/с [24] суттєво пониження її значень було зафіксовано в комп'ютерному класі в 2 рази.

Таблиця 4.2 – Параметри мікроклімату приміщення

Точки замірів	Час замірів	Температура за Цельсієм	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
1	Ранок	29,8	49	0,1
	День	28	66	0,1
	Вечір	30,8	48	0,1
2	Ранок	28,6	49	0,1
	День	27,4	64	0,1
	Вечір	31	46	0,1
3	Ранок	29,8	50	0,1
	День	29,2	60	0,1
	Вечір	31	46	0,1

Для нормалізації мікроклімату виконувались розрахунки системи кондиціонування повітря для видалення надлишкової теплоти та вологи. Величину сумарного виділення теплоти визначали за формулою:

$$Q\Sigma = Qз.о. + Qв.о. + Qс.\ р. + Qін + Qобл + Qш.о. + Qл + Qн.п.\ , \qquad (4.2)$$

де Qз о Qв о - теплота, що надходить через зовнішні непрозорі та внутрішні огородження відповідно, кВт/год.; Qс. р. - теплота сонячної радіації, кВт/год.; Qін Qобл Qш о - теплота, яка надходить від інфільтрації, виробничого обладнання та штучного освітлення відповідно, кВт/год.; Qр Qнп - теплота, яку виділяють робітники та нагрівальні прилади відповідно, кВт/год. Значення загального виділення вологи обчислювали з використанням рівняння:

$$W = Wт.о. + Wз.п + Wш.\ р + Wін\ , \qquad (4.3)$$

де Wт.о. - волога, яку виділяє обладнання під час виконання технологічних процесів, кг/год.; Wз.п - волога від змочених поверхонь, кг/год.; Wш р Wін - волога, яку виділяє шкіра робітників, та надходить із зовнішнім повітрям за інфільтрації відповідно, кг/год.

Для асиміляції шкідливих виділень в приміщеннях необхідно забезпечити подавання певної кількості повітря, в тому числі: - для нейтралізації надлишку теплоти G_Q :

$$G_Q = \frac{Q_к}{0{,}24 \cdot \Delta t_р}, км/год \qquad (4.4)$$

де Δt - нормоване підвищення внутрішньої температури над її зовнішнім рівнем, °С;

- для нейтралізації виділень вологи G_W :

$$G_W = \frac{W}{d_d - d_n} \qquad (4.5)$$

де d_d,d_n - вміст вологи внутрішнього та припливного повітря відповідно, кг/год.

Вибір кондиціонера здійснено за найбільшою розрахунковою величиною G_Q и G_W . Виконані розрахунки дозволили встановити, що необхідно додатково обладнати аудиторію двома автономними кондиціонерами типу «Mitsubishi Heavy SRK40HG-S».

Отже, результати досліджень мікроклімату робочої зони показали необхідність оснащення приміщень сучасними кондиціонерами з визначеними параметрами.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

- Проведено дослідження процесів поглинання світла в напівпровідниках та встановлено, що найбільший коефіцієнт поглинання світла напівпровідниками спостерігається при домішковому поглинанні.

- Розроблена модель фізичного процесу взаємодії світла з напівпровідниками та програмне забезпечення для розрахунку параметрів поглинання заданого профілю і швидкості генерації носіїв заряду в напівпровідникових структурах, що дає можливість значно спростити технологічний процес виробництва приладових напівпровідникових структур.

- Запропоновано фотоприймальний пристрій на основі PIN-діоду, що здатен реєструвати електромагнітне випромінювання ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного діапазону (довжина хвилі від 320 до 1100 нм). Результати моделювання в Every Circuit підтвердили правильність розрахунків та коректність його роботи. В середовищі Sprint Layout побудована топологія друкованої плати, габаритні розміри пристрою 20 х 20 мм.

Результати роботи обговорювались на XVIII університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «МОЛОДА НАУКА-2025»

Результати моделювання роботи можуть бути використанні при виробництві напівпровідникових структур, а запропонований пристрій в системах оптичного голосового обміну, виявлення та аналізу світлових сигналів на різних довжинах хвиль, тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Головинський С. Nanomaterials for optoelectronics: an overview. *Ukrainian Journal of Physical Optics.* Vol. 25, Issue 1 (2024). С. 01045-01053.

2. Levytskyi S., Koba O., Koba M. Change of the optoelectronic properties of semiconductor compounds induced by nanosecond laser irradiation pulses. *Physics and Chemistry of Solid State.* 25 (4) (2024). С. 892-902.

3. Заболотний М. А., Асламова Л. І., Бобошко Є. М. та ін. Особливості процесу фотоґенерації носіїв заряду в аморфних молекулярних напівпровідниках. *Наносистеми: фізика, механіка, оптоелектроніка*. 2023. Т. 21, № 2. С. 261-271.

4. Заяц Н. В. Електричні властивості плівкових матеріалів на основі нітриду для фотоелектричних перетворювачів : магістерська дис. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.

5. Новосад О., Кевшин А. Фотоелектричні властивості діодних структур In/$CuInS_2$-$ZnIn_2S_4$ та In–Ga/$CuInS_2$-$ZnIn_2S_4$. *Фізика та освітні технології*. 2025. № 1. С. 69-75.

6. Фотоприймальні елементи та пристрої. Навчальний посібник URL: https://surl.li/admpvq (дата звернення 05.06.2025)

7. Волоконно-оптичні лінії зв’язку. Оптіма. URL: https://surl.li/iycdtu (дата звернення 15.05.2025)

8. Особливості та принцип роботи оптичного кабелю. URL: https://surl.li/hkwdvl (дата звернення 15.05.2025)

9. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. / В. О. Чадюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. Кн. 1. 376 с.

10. Electro-optics handbook / Editors: R. W. Waynant, M.N. Ediger. New York.: McGraw-Hill Inc., 2000. 911 p.

11. Kolobrodov V.G Calculation model for optoelectronic remote sensing system's radiometric resolution at arbitrary viewing angles / V. G. Kolobrodov, M. I. Lykholit, V. I. Mykytenko, V. M. Tiagur, K. V. Dobrovolska *// Visnyk NTUU "KPI". Seria Radiotekhnika. Radioapparatobuduvannia.* 2017. №69. p. 30-34.

12. Сокуренко В. М. Фотоприймальні елементи та пристрої: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 157 с.

13. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. 336 с.

14. Колобродов В. Г., Микитенко В. І. Тепловізійні оптико-електронні прилади: підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 202 с.

15. Оленич І. Б. Нерівноважні електронні процеси у наносистемах на основі кремнію : дис. на здобуття наук. ступеня доктора фізико-математичних наук. Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка. Львів, 2020.

16. Карташов В. М., Тимошенко Л. П. Аналогова схемотехніка : підручник для студентів ЗВО. Харків : ХНУРЕ, 2020. 352 с.

17. Першин М. О., Мовчанюк А. В., Лащевська Н. О. Схемотехніка 2.Аналогова схемотехніка: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 27 с.

18. Медяний Л. П. Аналогова схемотехніка : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017

19. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум із охорони праці: Навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 345 с.

20. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Чинний від 1999-12-01. Вид. офіц. Київ: Державні санітарні норми, 2011. 105 с.

21. ДСТУ 7238:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби колективного захисту працюючих. Загальні вимоги та класифікація. Чинний від 2011-12-01. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2011. 135 с.

22.ДСТУ 7238:2011 Система стандартів безпеки праці. Засоби колективного захисту працюючих. Чинний від 14.03.2011. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2011. 78 с.

23. ДСТУ 12.1.018-93 Система стандартів безпеки праці. Пожежовибухобезпека статичної електрики. Загальні вимоги. Чинний від 01.01.1998. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2001. 97 с.

24.ДСТУ 7237:2011 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. Чинний від 01.08.2011. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2011. 201 с.

«ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Науково-дослідна частина

Наукове товариство студентів, аспірантів і докторантів

Рада молодих вчених

РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ЗНУ НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО ЗНУ

ЗБІРНИК

наукових праць студентів,

здобувачів PhD, докторантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2025»

Том V

«Секції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету»

Запоріжжя
2025

2025=УДК: 001 (06)
М 754

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Бондар О.Г. – голова оргкомітету, в.о. ректора;
Васильчук Г.М. – заступник голови оргкомітету, проректор з наукової роботи;.
Амінов Р.Ф. – завідувач навчально-науково-дослідної лабораторії клітинної та організменної біотехнології науково-дослідної частини, голова Ради молодих вчених ЗНУ;
Арабаджиєв Д.Ю. – начальник науково-дослідної частини;
Бєлоконь К.В. – заступник директора з наукової роботи Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
Будько Д.З. – голова НТСАД ЗНУ;
Вербицька Т.А. – голова НТСАД біологічного факультету;
Гора С.М. – голова НТСАД факультету іноземної філології;
Євтушенко Д.С. – старший викладач кафедри конституційного та адміністративного права;
Єгорова В.С. – голова НТСАД математичного факультету;
Залужна М.В. – доцент кафедри англійської філології та лінгводидактики;
Зубцова Ю.Є. – доцент кафедри дошкільної та початкової освіти;
Казакова О.М. – доцент кафедри всесвітньої історії та міжнародних відносин;
Кайшева Д.О. – голова НТСАД факультету менеджменту;
Каплун К.Р. – г олова НТСАД факультету історії та міжнародних відносин;
Караулова С.І. – професор кафедри фізичної кульї ури і спорту;
Ковпак В.А. – професор кафедри соціальних комз иікацій та інформаційної діяльності;
Козуб Д.К. – голова НТСАД факультету соціальіної педагогіки та психології;
Копійка В.В. – доцент кафедри фізіології, імунології і біохімії з курсом цивільного захисту та медицини;
Леонгьєва В.В. – доцент кафедри фундаментальної та прикладної математики;
Лепська Н.В. – доцент кафедри політології;
Линенко А.В. – доцент кафедри управління персоналом і маркетингом;
Ляхов Г.І. – голова НТСАД юридичного факультету;
Меркулова О.В. – старший викладач кафедри української мови;
Олійник О.М. – доцент кафедри бізнес-адміністрування і менеджменту зовнішньо-економічної діяльності;
Проскура О.Д. – голова НТСАД економічного факультету;
Рибка Д.О. – голова НТСАД факультету журналістики;
Саражина Є.В. – голова НТСАД факультету фізичного виховання, здоров'я та туризму;
Тарабан Є.В. – голова НТСАД Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
Трипольська О.О. – провідний фахівець Центру наукової роботи студентів НДЧ;

Ничик Олександр
магістрант 2 курсу ІННІ ім. Ю. М. Потебні ЗНУ
Наук. кер.: к.т.н., доц. Небеснюк О.Ю.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ. РОЗРОБКА ФОТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

У другій половині XIX століття було винайдено фотографічний метод, у зв'язку з чим почався розвиток засобів реєстрації і вимірювання оптичних сигналів і зображень. Цей розвиток додав декілька класів приймачів (детекторів), заснованих на низці фізичних принципів. Найважливішими стимулами до їх розробки були бажання освоїти невидимі області спектру, підвищити швидкість отримання оптичної інформації і автоматизувати дію апаратури. Деякі типи приймачів випромінювання були створені ще в кінці XIX - на початку XX століття, але найбільш швидкі темпи розвитку фундаментальних досліджень, розробок і випуску приймачів випромінювання відносяться до останніх чотирьох десятиліть.

Про масштаби робіт в даний час можна судити за кількістю фірм, що займаються приймачами випромінювання, — їх налічується більше 400 і в їх числі гіганти аерокосмічної промисловості. Об'єм ринку приймачів випромінювання усіх класів наближається до 10 мільярдів доларів на рік [1]. Споживачами приймачів випромінювання є численні галузі наукового, цивільного та оборонного приладобудування. Найбільші засоби вкладаються в розробки приймачів сигналів і зображень ІЧ-діапазону, які використовуються в апаратурі і системах спостереження, нічного бачення, самонаведення і інші. В останнє десятиліття значний імпульс в розробці приймачів з наносекундною та субнаносекундною швидкодією дав розвиток волоконно-оптичних ліній зв'язку. Винахід лазерів і створення лазерних оптоелектронних систем також став могутнім стимулом до розробки приймачів випромінювання.

Класифікація фотоприймачів заснована на механізмі відповіді (реакції) фотоприймача на сигнал випромінювання, тобто перетворення оптичного сигналу в електричний сигнал [2]. Якщо вихідний електричний сигнал виникає при прямому перетворенні енергії фотона в первинну реакцію фотоприймача, то він відноситься до класу фотонних або квантових фотоприймачів. Якщо ж енергія фотона перетвориться в теплоту і реакція фотоприймача створюється в результаті підвищення температури чутливого елементу фотоприймача, то його відносять до класу теплових фотоприймачів.

Фотонні фотоприймачі підрозділяються на фотодіоди з p-n-переходом або складнішою структурою (фотодіоди, фототранзистори), фоторезистори і фотоемісійні приймачі - фотоелектронні помножувачі і електронно-оптичні перетворювачі і підсилювачі зображення. До фотонних приймачів відносяться також сучасні напівпровідникові матричні перетворювачі зображення. Їх чутливі елементи є мікроконденсаторами із структурою метал – діелектрик - напівпровідник (МДН).

Фотоприймальні пристрої (ФПП) універсальні у своєму застосуванні.

Вони можуть бути використані у волоконно-оптичних системах і відкритих атмосферних системах.

Волоконно-оптичні лінії мають ряд переваг перед дротяними (мідними) і радіорелейними системами зв'язку, а саме :

- Мале згасання сигналу (0,15 дБ/км в третьому вікні прозорості) дозволяє передавати інформацію на значно більшу відстань без використання підсилювачів. Підсилювачі у ВОЛІП можуть ставитися через 40, 80 і 120 кілометрів, залежно від класу крайового устаткування.
- Висока пропускна спроможність оптичного волокна дозволяє передавати інформацію на високій швидкості, недосяжній для інших систем зв'язку.
- Висока надійність оптичного середовища: оптичні волокна не окислюються, не намокають, не схильні до слабкої електромагнітної дії.
- Інформаційна безпека - інформація по оптичному волокну передається "з точки в точку" і підслуховувати або змінити її можна тільки шляхом фізичного втручання в лінію передачі.
- Висока захищеність від міжволоконних впливів - рівень екранування випромінювання більше 100 дБ. Випромінювання в одному волокні абсолютно не впливає на сигнал в сусідньому волокні.
- Пожеже- і вибухобезпечність при зміні фізичних і хімічних параметрів.
- Малі габарити і маса.

Для використання ФПП у волоконно-оптичних лініях вони повинні задовольняти ряду вимог:

- забезпечити необхідну якість прийому сигналу при зміні потужності сигналу у великому динамічному діапазоні (до 60 - 70 дБ) і необхідній смузі частот;
- працювати тривалий час в різних умовах (температурні перепади, зміни тиску, вологості і т.і.);
- забезпечити стикування з мультиплексорами і оптичними лініями;
- споживати малу потужність;
- легко інтегруватися в схеми приймальних модулів з однохвильовою і багатохвильовою передачею [3].

Виконання цих вимог повною мірою не завжди можливо. При проходженні сигналу через ФПП до нього додаються шуми, виникають лінійні і нелінійні спотворення. Спотворення сигналу призводить до ухвалення помилкових рішень і вступу до приймача деякого числа помилкових сигналів в двійковій формі. Для вирішення цієї проблеми авторами було запропоновано фотоприймальний пристрій, що дозволяє передавати сигнал на швидкості 0,8Гбіт/с.

Запропонований пристрій можна використовувати в мережах кабельного телебачення, телефонії, мережах інтернет, а також у галузі ядерної фізики і фізики високих енергій.