

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів та пристроїв реєстрації оптичного  
випромінювання  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МНПм-22-1

Палій. М. В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна  
техніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Мікро- та  
наноелектронні прилади та пристрої

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Стрілкова Т.О.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2023 р

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ Електроніки та біомедичної інженерії \_\_\_\_\_

(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв \_\_\_\_\_

(повна назва)

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 153 Мікро- та наносистемна техніка \_\_\_\_\_

(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програм \_\_\_\_\_ Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої \_\_\_\_\_

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Палію Михайлу Валерійовичу \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів та пристроїв реєстрації оптичного випромінювання

затверджена наказом університету від 20.11.2023 р. № 1368Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 02 січня \_\_\_\_\_ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи SMD 3014 – білий світлодіод: Високий потік, висока ефективність; 120 лм/Вт при 30 мА; кут огляду: 120°; відповідає вимогам ROHS; Розсіювана потужність 0,15 Вт; прямий струм 50 мА; зворотна напруга 5В; робоча температура -40°C ~ +80°C. Фотодіод BPW34 Технічні характеристики: макс. спектральна чутливість, нм: 950; макс. зворотна напруга, В: 60; зворотний темновий струм, нА: 2; тип корпусу: ТО-5; тип фотодіода: PIN; кут напівчутливості: 65; вага, г: 0.1.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1. Аналіз оптичних систем та їх компонентів

2. дослідження джерел і приймачів оптичного випромінювання

3. вибір та аналіз датчиків для системи реєстрації оптичного випромінювання

4. моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання

Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)  
Презентація 12 слайдів \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	15.08.2023 - 27.08.2023	Виконано
2	Аналітичний огляд джерел	27.08.2023 - 25.09.2023	Виконано
3	Постановка задач дослідження	25.09.2023 - 01.10.2023	Виконано
4	Проведення обчислювального експерименту	01.10.2023 - 27.10.2023	Виконано
5	Впровадження результатів наукових досліджень	27.10.2023 - 03.11.2023	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до кваліфікованої роботи	03.11.2023 - 26.12.2023	Виконано
7	Підготовка презентації	26.12.2023 - 02.01.2024	Виконано
8	Рецензування, нормоконтроль	02.01.2024 - 08.01.2024	
9	Захист роботи	08.01.2024 - 10.01.2024	

Дата видачі завдання  8    липня   2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  Михайло ПАЛІЙ   
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  проф. Стрілкова Т.О   
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 69 сторінок, 27 рисунків, 2 додатка, 15 джерел.

### ОПТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ДАТЧИКИ, ПРИЙМАЧ, БАГАТОЕЛЕМЕНТНІ ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ПРИСТРОЇ

Об'єктом дослідження є пристрої та методи реєстрації оптичного випромінювання, вибір та аналіз діода та фоторезистора, розрахунок рівня інтенсивності оптичного сигналу на різноманітні відстані зі заданими показниками якості.

Метою дослідження є аналіз та моделювання приймання та реєстрації оптичного випромінювання

Було показано моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання за допомогою світлодіода SMD3014 та фотодіода BPW 34. Також було показано дослідження ПЗС-лінійки ILX-51

Одним із основних напрямків у цьому напрямку є вивчення та оптимізація методів реєстрації оптичного випромінювання. Зокрема, велику увагу приділяють розвитку фотодетекторів, які можуть забезпечити точне та чутливе вимірювання світлового потоку. Методи реєстрації включають в себе використання різноманітних фоточутливих матеріалів, фотоприймачів, а також сучасних імпульсних та спектральних технік.

## **ABSTRACT**

Explanatory note to the qualification work: 69 pages, 27 pictures, 2 addition, 15 sources.

### **OPTICAL RADIATION, SENSORS, RECEIVER, MULTI-ELEMENT PHOTODETECTION DEVICES**

The object of research is devices and methods for recording optical radiation, selection and analysis of diode and photoresistor, calculation of the intensity level of optical signal at various distances with specified quality indicators.

The aim of the study is to analyse and model the reception and registration of optical radiation

The modelling of the process of optical radiation registration using SMD3014 LED and BPW 34 photodiode was shown. The study of the ILX-51 CCD line was also shown.

One of the main directions in this area is the study and optimisation of optical radiation detection methods. In particular, much attention is paid to the development of photodetectors that can provide accurate and sensitive measurement of light flux. Registration methods include the use of various photosensitive materials, photodetectors, as well as modern pulse and spectral techniques.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>10</b>
1.1	10
1.2	11
1.3	15
<b>2</b>	<b>17</b>
2.1	17
2.2	19
2.3	24
<b>3</b>	<b>29</b>
3.1	30
3.2	35
3.3	39
3.4	40
3.5	42
<b>4</b>	<b>50</b>
4.1	52
4.2	55
4.3	58
<b>5</b>	<b>61</b>
5.1	61

5.2 63

<b>ВИСНОВКИ</b>	67
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ</b>	68
ДОДАТОК А	70
ДОДАТОК Б	71

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

КМОН – Комплементарна структура Метал-Оксид-Напівпровідник

ПЗС – Прилад із Зарядовим Зв'язком

ВАХ – Вольт-Амперна Характеристика

БФПП – Багатоелементні Фотоприймальні Пристрої

ККД – Коефіцієнт корисної дії

ROG – Readout Gate Pulse Generator

## ВСТУП

З кожним роком оптичне випромінювання дедалі ширше використовують для передавання, отримання, оброблення та зберігання інформації. Логічним продовженням розвитку електронної елементної бази стала оптоелектроніка, що забезпечує взаємодію між електричними та оптичними сигналами. У сучасній техніці важливу роль відіграють оптичні вимірювальні прилади.

Така велика увага до оптичного випромінювання пояснюється його унікальними властивостями, такими як наочність, мала довжина хвилі, а також можливість отримання когерентного випромінювання.

У даній роботі розглянуті питання, пов'язані з вимірюванням параметрів оптичного випромінювання, що характеризують його енергетику і спектральний склад. Дано опис основних джерел і приймачів оптичного випромінювання, а також методів і технічних засобів вимірювання їхніх характеристик. Проведено аналіз схемотехнічних рішень фотоприймальних пристроїв, у тому числі з погляду розширення їх динамічного діапазону.

У зв'язку з тим, що багатоелементні фотоприймальні пристрої знайшли в даний час широке застосування в компактних спектральних приладах, даному типу фотоприймачів присвячено окремий розділ роботи.

# 1 ОПТИЧНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

## 1.1 Оптичні системи та їх компоненти

Практично всі оптичні вимірювальні прилади мають у своєму складі оптичні системи, призначені для управління ходом поширення променів. Важливе місце серед них посідають системи, що дають змогу отримати оптичне зображення досліджуваного об'єкта. Формування зображення відбувається за рахунок перерозподілу в просторі світлових променів, що виходять від об'єкта. Для перерозподілу світлових променів використовують такі явища, як заломлення, відбиття і дифракція світла на межах оптичних середовищ, а також обмеження променів діафрагми.

Таким чином, оптичною системою називають сукупність оптичних середовищ, розділених оптичними поверхнями, які обмежуються діафрагмами. У загальному випадку оптична система містить у собі такі функціональні елементи:

- оптичні середовища;
- оптичні поверхні;
- дзеркала;
- діафрагми;
- дифракційні оптичні елементи.

Розглянемо докладніше складові оптичної системи.

Діафрагма – це непрозорий екран із круглим отвором. Діафрагма обмежує промені, що проходять через оптичну систему.

Оптичні середовища – це прозорі для оптичного випромінювання матеріали, для яких точно відомий показник заломлення. В оптичних системах найчастіше застосовують оптичне скло та оптичні кристали. Повітря, а також інший газ, що заповнює оптичну систему або вакуум, також належать до оптичних середовищ.

Оптичне середовище характеризується робочим діапазоном довжин хвиль. За межами цього діапазону показник заломлення або різко збільшується, або різко зменшується. Діапазони довжин хвиль за межами робочого називаються смугами поглинання.

Оптичні поверхні – це гладкі регулярні поверхні з точно відомою формою. В оптичних системах найчастіше застосовують плоскі, сферичні та асферичні поверхні. Для сферичної поверхні задається один параметр – радіус кривизни. Плоскою поверхнею можна вважати сферичну поверхню з нескінченним радіусом кривизни. Асферичні поверхні – поверхні, для яких радіус кривизни різний у різних напрямках.

Форма оптичної поверхні витримується з точністю, меншою за довжину хвилі. У високоякісних оптичних системах відхилення від ідеальної форми не перевищує  $0.1 \lambda$ .

## 1.2 Опис параметрів оптичних систем

Для оптичних систем вводиться поняття предмета і зображення.

Предмет – сукупність точок, з яких виходять промені, що потрапляють в оптичну систему. З кожної точки виходить гомоцентричний пучок променів. Пройшовши оптичну систему, гомоцентричний пучок променів сходиться в точку, де відбувається побудова зображення предмета. Таким чином, можна сказати, що оптична система ділить простір на дві частини - простір предмета і простір зображення.

Зображення предмета – сукупність зображень відповідних точок предмета. При цьому будь-якій точці простору предметом можна поставити у відповідність точку в просторі зображень. Ці точки називаються спряженими. Також можна говорити про спряжені лінії, для яких кожна точка лінії в просторі предметів спряжена з кожною відповідною точкою в просторі зображень.

У реальних оптичних системах через спотворення під час формування зображень це сполучення діє лише наближено (у просторі зображень замість однієї нескінченно малої точки формується деяка скінченна область). Якщо обмежитися параксіальною областю – областю променів, що проходять нескінченно близько до оптичної осі, то будь-яку оптичну систему можна вважати ідеальною.

Під час формування зображень відбувається зміна його розмірів порівняно з розмірами предмета. Для опису цих змін використовують поняття лінійного та кутового збільшення.

Лінійне збільшення оптичної системи – відношення лінійного розміру зображення в напрямку, перпендикулярному до оптичної осі, до відповідного розміру предмета в напрямку, перпендикулярному до оптичної осі.

Кутове збільшення оптичної системи – відношення тангенса кута між променем і оптичною віссю в просторі зображень до тангенса кута між сполученим із ним променем і віссю в просторі предметів. У параксіальній ділянці кути малі і для розрахунку кутового збільшення замість відношення тангенсів кутів можна використовувати відношення самих кутів, виражених у радіанах.

Оптична система може бути повністю описана, використовуючи її характерні (так звані кардинальні) точки і площини, такі, як фокус передній  $F_1$  і задній  $F_2$ , головні точки передня  $A_1$  і задня  $A_2$ , а також головні площини передня  $H_1$  і задня  $H_2$  (рис. 1.1).

Задній фокус – це точка  $F_2$  на оптичній осі у просторі зображень, сполучена з нескінченно віддаленою точкою, розташованою на оптичній осі в просторі предметів. Інакше кажучи це точка, в яку сходяться параксіальні промені від предмета, розташованого в нескінченності.

Передній фокус визначається аналогічно, як точка  $F_1$  на оптичній осі в просторі предметів, сполучена з нескінченно віддаленою точкою, розташованою на оптичній осі в просторі зображень.

Для знаходження положення задньої головної площини потрібно розглянути промінь, що входить в оптичну систему паралельно оптичній осі. Пройшовши через систему, цей промінь перетне оптичну вісь у точці заднього фокуса  $F_2$ . Точка перетину продовжень променів, що падають і пройшли, визначить положення задньої головної площини  $H_2$ . Аналогічно, розглянувши промінь, паралельний оптичній осі, що йде справа наліво, можна знайти положення передньої головної площини  $H_1$ .

Точки перетину передньої і задньої головних площин з оптичною віссю називаються, відповідно, передньою  $A_1$  і задньою  $A_2$  головною точкою.

Під час опису оптичної системи використовують низку чисельних параметрів.

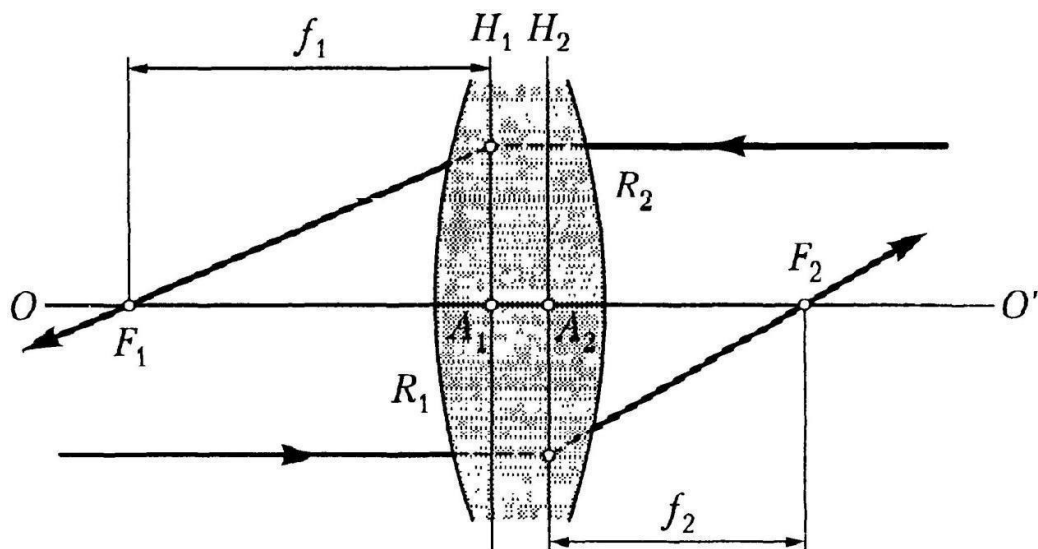


Рисунок 1.1 – Характерні точки і площини оптичної системи

Задня фокусна відстань  $f_2$  - відстань від задньої головної точки до заднього фокуса. Якщо задня фокусна відстань позитивне число, то система називається збираючою. В іншому разі система називається розсіювальною.

Передня фокусна відстань  $f_1$  - відстань від передньої головної точки до переднього фокуса.

Передня і задня фокусні відстані пов'язані між собою через показник заломлення середовища, що розташоване до і після оптичної системи:

$$\frac{f_2}{n_2} = -\frac{f_1}{n_1}; \quad (1.1)$$

де  $\frac{f_2}{n_2}$  приведена, або еквівалентна, фокусна відстань;

$n_2$  – показник заломлення середовища за оптичним елементом;

$n_1$  – показник заломлення перед оптичним елементом.

У тому випадку, коли оптична система перебуває в однорідному середовищі (тобто оптичне середовище до і після елемента одне й те саме), передня і задня фокусні відстані рівні за абсолютною величиною.

Величина, зворотна до приведеної фокусної відстані, називається оптичною силою оптичної системи:

$$D = \frac{n_2}{f_2}. \quad (1.2)$$

Оптична сила вимірюється в діоптріях (позначається дптр).

Оптичну силу зручно використовувати для систем, що складаються з декількох оптичних елементів. У цьому разі результуюча оптична сила системи обчислюється за формулою

$$D = D_1 + D_2 - l \cdot D_1 \cdot D_2, \quad (1.3)$$

де  $l$  - відстань між двома елементами.

Чим більша оптична сила, тим сильніше оптична система змінює хід променів.

### 1.3 Принцип побудови зображення в оптичній системі.

Під час аналізу процесу отримання зображення за допомогою оптичної системи зручно використовувати принципи геометричної оптики.

Розглядається хід променів від предмета через оптичну систему і для кожної точки предмета знаходиться сполучена точка в просторі зображень.

Найзручніше при цьому аналізі використовувати промені, хід яких легко визначити:

- промінь, що проходить через передню або задню головні точки, не змінює свого напрямку;
- промінь, що проходить через передній або задній фокус, після оптичної системи поширюється паралельно оптичній осі;
- промінь, що йде паралельно оптичній осі, після оптичної системи проходить через точку фокуса.

Як приклад на рисунку 1.2 показано приклад побудови зображення в оптичній системі (у цьому випадку - у тонкій лінзі).

Предмет у розташовано на відстані мінус  $a_1$  від лінзи (відстань зазначено зі знаком мінус, оскільки відлік іде назустріч ходу променів). На відстані  $a_2$  тонка лінза будує зображення  $y'$  предмета. Видно, що для визначення місця, де буде будуватися зображення предмета, використовуються три промені, що виходять із вершини предмета: промінь, паралельний оптичній осі, промінь, що проходить через передній фокус, і промінь, що проходить через головну точку оптичної системи (через центр лінзи). У тій точці, де ці промені перетинаються, формуватиметься зображення предмета. Очевидно, що з цією метою достатньо використовувати будь-які два з трьох променів.

Для того щоб визначити, на якій відстані від оптичної системи формуватиметься зображення, можна скористатися основною формулою для лінзи:

$$\frac{n_{\text{ср}}}{a_2} - \frac{n_{\text{ср}}}{a_1} = \frac{n_{\text{ср}}}{f_2}, \quad (1.4)$$

де  $n_{\text{ср}}$  – показник заломлення середовища, що оточує лінзу;

$f_2$  – величина задньої фокусної відстані лінзи;

$a_1$  і  $a_2$  - відповідно відстань від предмета до лінзи і від лінзи до зображення.

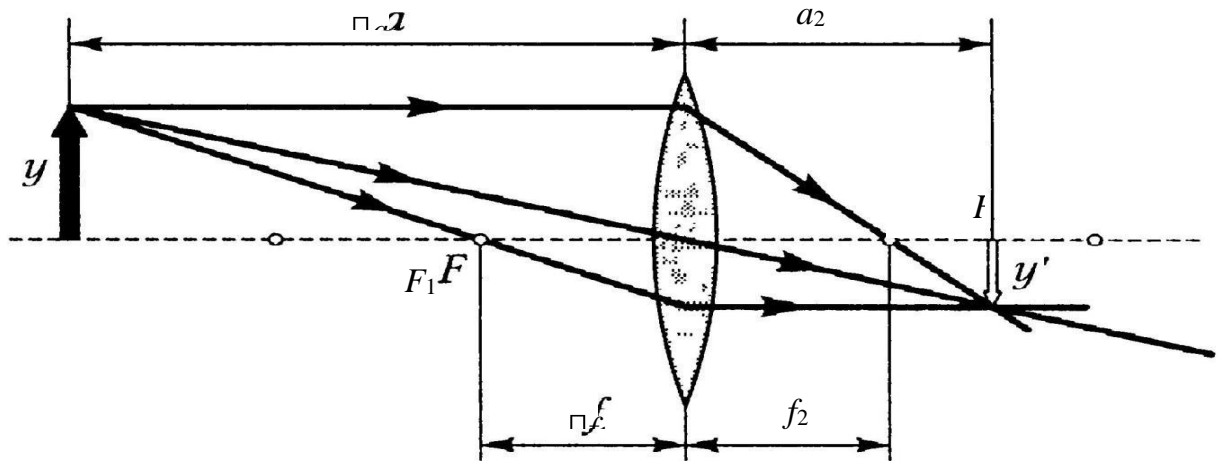


Рисунок 1.2 – Процес побудови зображення в тонкій лінзі

## 2 ДЖЕРЕЛА ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Джерела оптичного випромінювання є основним елементом передавальних оптоелектронних пристроїв, що виконують функцію перетворення електричного сигналу, який несе інформацію, на оптичний сигнал і його випромінювання в заданому напрямку.

Саме від джерела оптичного випромінювання залежать такі параметри передавача, як:

- ефективність перетворення електричної енергії в оптичне випромінювання;
- довжина хвилі і ширина спектра випромінювання;
- спрямованість випромінювання;
- швидкодія (смуга робочих частот модуляції);
- довговічність і стійкість до зовнішніх впливів.

Залежно від способу отримання оптичного випромінювання всі джерела поділяють на дві групи: теплові джерела і джерела на основі люмінесценції.

### 2.1 Теплові джерела оптичного випромінювання

В основі роботи теплових джерел оптичного випромінювання, прикладом яких є лампа розжарювання, лежить явище випускання електромагнітних хвиль тілами, нагрітими вище абсолютного нуля. При цьому випромінювана потужність і максимум довжини хвилі випромінювання залежать від температури нагрітого тіла таким чином:

$$M_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.1)$$

$$\lambda = b/T \quad (2.2)$$

де  $M_e$  – енергетична світність (потужність, Вт, що випромінюється з 1 м<sup>2</sup>);

$\varepsilon$  – ступінь чорноти;

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> • К<sup>4</sup>) – постійна Стефана-Больцмана;

$T$  – температура;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$b = 2898$  мкм/К – коефіцієнт пропорційності.

Ступінь чорноти (коефіцієнт випромінювання)  $\varepsilon$  у виразі (2.1) відображає той факт, що максимальна світність спостерігається в разі нагріву абсолютно чорного тіла, тобто для тіла, яке поглинає всю падаючу на нього енергію. Для такого тіла ступінь чорноти дорівнює одиниці. Усі реальні тіла більшою чи меншою мірою відбивають падаюче на них випромінювання і, відповідно, мають ступінь чорноти в діапазоні від нуля до майже одиниці.

Залежності потужності та довжини хвилі максимуму випромінювання ілюструє рисунок 2.1. Видно, що спектр випромінювання розтягнутий в область довгих хвиль, і в міру зростання температури тіла збільшується інтегральна випромінювана потужність, а максимум спектра випромінювання зміщується в область коротких довжин хвиль.

До переваг теплових джерел випромінювання можна віднести простоту конструкції, низьку вартість, теплову і радіаційну стійкість.

Основним недоліком, що обмежує застосування теплових джерел в оптоелектроніці, є їхня висока інерційність, пов'язана з теплоємністю тіл, що нагріваються.

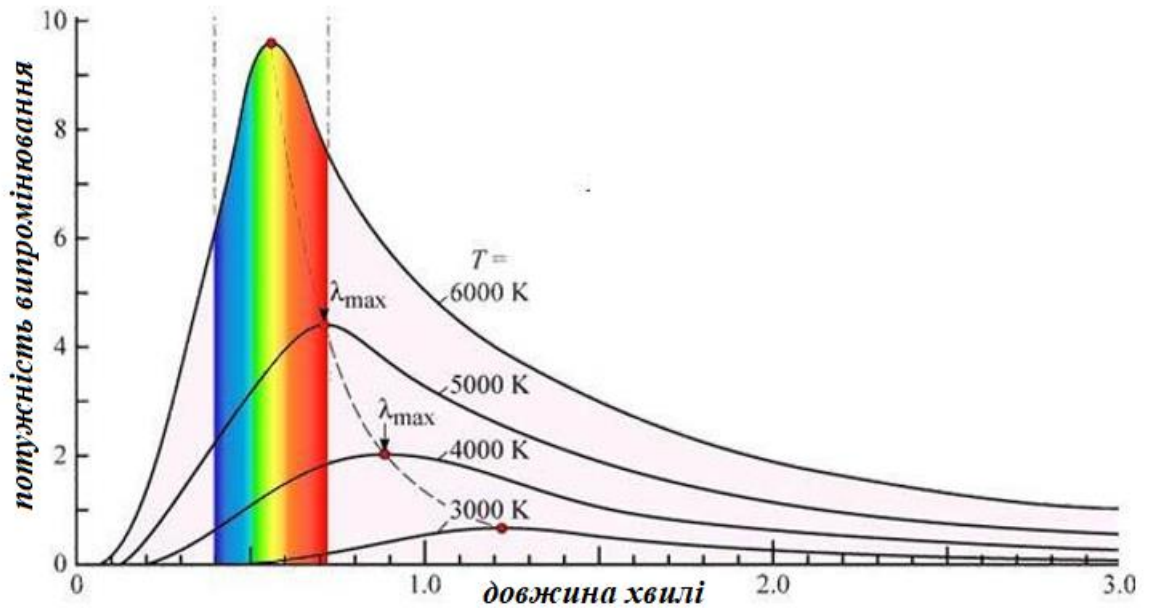


Рисунок 2.1 – Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла за різних температур

## 2.2 Джерела оптичного випромінювання на основі люмінесценції

Відмінною особливістю джерел на основі люмінесценції є те, що потужність випромінювання перевищує рівень, що відповідає потужності теплового випромінювання для даної температури джерела є те, що потужність випромінювання перевищує рівень, що відповідає потужності теплового випромінювання для даної температури джерела (тому люмінесценцію ще називають "холодним випромінюванням").

Люмінесценція можлива в такій речовині, де дозволені рівні енергії розділені забороненими зонами. Енергія, що підводиться ззовні, витрачається на подолання електронами даної забороненої зони, а випромінювання відбувається тоді, коли атоми тіла переходять зі збудженого стану в стан з меншим рівнем енергії. При цьому отриману від зовнішнього джерела енергію атоми віддають у вигляді фотонів. У зв'язку з дискретністю рівнів енергії в атомі спектр люмінесцентного випромінювання завжди дискретний, а

довжина хвилі випромінювання визначається різницею в енергіях рівнів  $\Delta E$ , між якими відбувається перехід.

Довжину хвилі оптичного випромінювання  $\lambda_0$  можна знайти з виразу:

$$\lambda_0 = h \cdot c / \Delta E, \quad (2.3)$$

де  $h = 4.136 \cdot 10^{-15}$  еВ· м – постійна Планка;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла в вакуумі.

Найбільше є вимоги, що висуваються до джерел випромінювання, які входять до складу передавальних пристроїв, відповідають напівпровідникові випромінювачі, такі як світловипромінювальні діоди і напівпровідникові лазери. Саме вони найчастіше використовуються в сучасних оптоелектронних системах як джерела оптичного випромінювання.

В основі роботи названих джерел лежить явище електролюмінесценції, під час якої в активній зоні напівпровідникової структури відбувається рекомбінація електронів і дірок, які подолали за допомогою зовнішнього джерела електричної енергії потенційний бар'єр. Це явище супроводжується випромінюванням фотонів і спостерігається при протіканні струму через структуру. При цьому довжину хвилі випромінювання можна розрахувати за виразом (2.3), де в цьому випадку  $\Delta E$  це ширина забороненої зони напівпровідникового приладу.

Механізм формування оптичного випромінювання у світловипромінювальних діодів і у напівпровідникових лазерів істотно відрізняються.

У світлодіодах процес переходу електрона із зони провідності у валентну зону, що супроводжується випромінюванням фотона, відбувається

випадковим чином, незалежно від переходів інших збуджених електронів. І цей перехід відбувається практично миттєво після подолання електроном потенційного бар'єра.

На відміну від світлодіодів структура енергетичних рівнів напівпровідникового лазера робиться такою, щоб утруднити миттєвий перехід збуджених електронів на низькі рівні. У результаті з'являється можливість управління процесом випромінювання фотонів збудженими електронами. У лазері це управління здійснюється за допомогою введення оптичного зворотного зв'язку. Пояснюється це тим, що фотони можуть передавати свою енергію збудженим електронам і тим самим провокувати їхній перехід на нижчий рівень енергії з випусканням фотонів. Тобто зовнішні фотони виступають у ролі своєрідного спускового механізму, синхронізуючи момент випускання фотонів збудженими електронами.

Для реалізації оптичного зворотного зв'язку кристал напівпровідникового лазера розміщують усередині резонатора Фабрі-Перо, що являє собою два співвісних, паралельно розташованих і повернутих одне до одного дзеркала. Одне з дзеркал має близький до одиниці коефіцієнт відбиття, а друге дзеркало робиться прозорішим і служить для виведення частини випромінювання назовні є вихідним вікном лазера. Як дзеркала можуть використовуватися грані напівпровідникового кристала. Завдяки такому взаємному розташуванню дзеркал оптичне випромінювання, що виникає між ними, зазнає багаторазових відбиттів, поступово згасаючи.

Розглядаючи оптичне випромінювання з точки зору хвильової теорії, можна показати, що в резонаторі спостерігатиметься посилення амплітуди коливань, для яких виконується умова:

$$\frac{\lambda_{\text{рез}}}{2} = \frac{L \cdot n}{N} \quad (2.4)$$

де  $\lambda_{\text{рез}}$  – довжина хвилі випромінювання, для якої виконується умова резонансу;

$L$  - відстань між дзеркалами резонатора;

$n$  - показник заломлення напівпровідникового кристала;

$N$  - ціле число.

Тобто для посилення амплітуди необхідно, щоб між дзеркалами укладалося ціле число напівхвиль випромінювання. У цьому разі відбуватиметься складання відбитих хвиль у фазі і, отже, їх взаємне посилення. Саме фотони з даною довжиною хвилі будуть ефективно взаємодіяти зі збудженими електронами, викликаючи вимушене випромінювання. Результатом такої взаємодії є те, що велика кількість збуджених електронів випускають фотони синхронно. І ці фотони матимуть одну й ту саму фазу коливань (таке випромінювання називається когерентним).

Таким чином, резонатор Фабрі-Перо забезпечує в лазері позитивний оптичний зворотний зв'язок і здійснює селекцію довжин хвиль випромінювання лазера. У зв'язку з тим, що є розкид в енергіях збуджених електронів, умова посилення випромінювання виконуватиметься для деякого діапазону довжин хвиль випромінювання. Використовуючи вираз (2.4), можна обчислити інтервал між сусідніми довжинами хвиль, для яких виконується умова складання у фазі:

$$\Delta\lambda_{\text{рез}} = \frac{\lambda_{\text{ср}}^2}{2 \cdot L \cdot n} \quad (2.5)$$

де  $\lambda_{\text{ср}}$  - середня довжина хвилі, що відповідає ширині забороненої зони.

Приблизний вигляд спектра випромінювання напівпровідникового лазера показано на рисунку 2.2. Довжина резонатора типового напівпровідникового лазера становить близько 300 мкм, показник заломлення близько 4. У цьому випадку для центральної довжини хвилі випромінювання близько 800 нм інтервал між сусідніми резонансними довжинами хвиль

становитиме близько 0.4 нм. Ширина окремих піків у спектрі випромінювання становить близько 0.1 нм.

Таким чином, спектр випромінювання лазерного діода не є безперервним, як у світловипромінювальному діоді. Він складатиметься з безлічі піків у межах ширини спектра, що визначається розкидом ширини забороненої зони напівпровідника. І що більші розміри резонатора, то більше піків буде всередині спектра випромінювання. У низці випадків такий спектр небажаний.

Для отримання вузького спектра випромінювання використовують спеціальні заходи. Це може бути, наприклад, зменшення розмірів резонатора, або застосування лазерів з дифракційною решіткою. У цьому разі умова відбиття буде виконуватися тільки для тієї довжини хвилі, на яку налаштована решітка. А інші хвилі матимуть великі втрати.

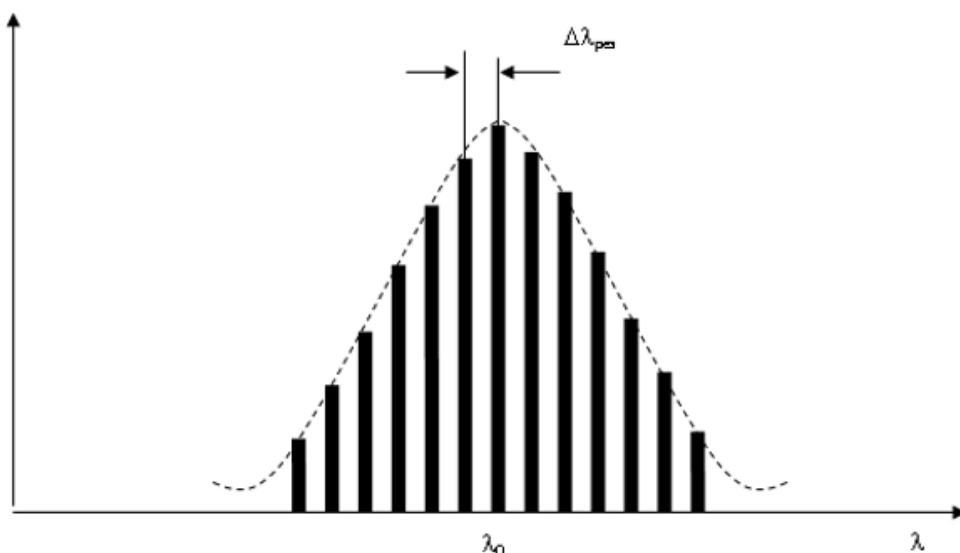


Рисунок 2.2 – Приблизний вигляд спектра випромінювання напівпровідникового лазера

Для того щоб лазер перейшов у режим індукованого випромінювання, необхідно, щоб електрична енергія, яка надходить від зовнішнього джерела,

перевищувала втрати на безвипромінювальну рекомбінацію, а також втрати випромінювання всередині резонатора. У зв'язку з тим, що енергія передається за допомогою вхідного струму, що протікає через структуру лазера, на залежності потужності випромінювання від струму накачування спостерігатиметься збільшення крутизни при струмі, що відповідає переходу випромінювання в лазерний режим.

### 2.3 Параметри та характеристики джерел оптичного випромінювання

Розглянемо найважливіші експлуатаційні характеристики джерел оптичного випромінювання:

а) спектральна характеристика випромінювача – залежність спектральної густини потужності випромінювання від довжини хвилі. Спектральна густина - потужність випромінювання, що припадає на одиничний інтервал довжин хвиль, наприклад, на 1 нм. Спектральну характеристику можна подати детально у вигляді графічної залежності (рисунок. 2.3), або спрощено, через центральну середню довжину хвилі  $\lambda_0$  і ширину спектра.

Ширина і форма спектральної характеристики у світловипромінювальних і лазерних діодів різняться. Світлодіоди мають суцільний спектр випромінювання, його ширина визначається співвідношенням:

$$\Delta\lambda = 2 \cdot k \cdot T \cdot \lambda_0 / \Delta E, \quad (2.6)$$

де  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана.

Наприклад, за кімнатної температури ( $T = 298$  К) для  $\lambda_0 = 1.3$  мкм ширина спектра  $\Delta\lambda$  становить 70 нм. Розширення спектра випромінювання

світлодіода пояснюється розкидом енергій електронів, які долають потенційний бар'єр. Цей розкид пов'язаний, зокрема, з додатковою енергією, яку отримують електрони за рахунок теплових коливань кристалічної решітки (цим пояснюється наявність температури  $T$  у виразі (2.6)).

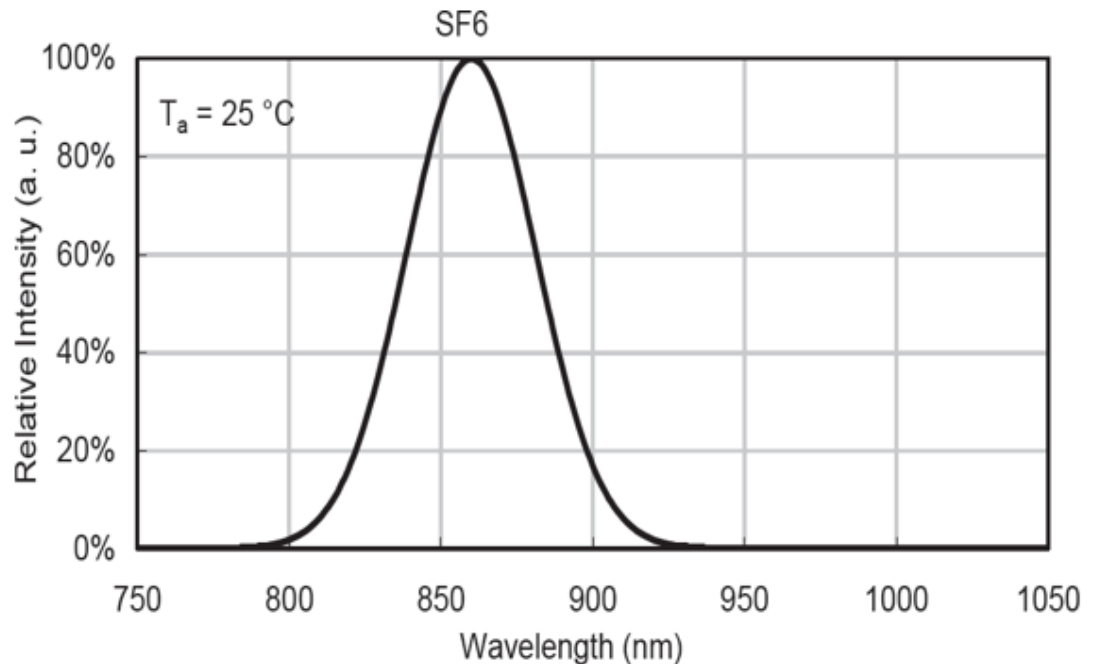


Рисунок 2.3 – спектр випромінювання світлодіода

У лазерних діодів ширина спектра випромінювання менша принаймні на порядок (рис. 2.4), що пояснюється наявністю оптичного резонатора, який здійснює фільтрацію випромінювання за довжинами хвиль. Крім цього, ймовірність викликаних взаємодією з фотонами всередині резонатора переходів електронів зі збуджених рівнів на рівні з меншою енергією максимальна в центрі спектральної лінії, що також призводить до звуження спектра.

б) ват-амперна характеристика – залежність вихідної оптичної потужності від струму, що протікає через напівпровідниковий випромінювач.

Необхідно зазначити, що саме величина струму, а не напруги, прикладеної до напівпровідникового випромінювача, визначає потужність випромінювання. Це стає зрозумілим, якщо згадати, що випромінювання

фотона відбувається під час рекомбінації електронів, які подолали потенційний бар'єр. Таким чином, що більше електронів рекомбінує за одиницю часу, тобто що більший електричний струм, то більша випромінювана оптична потужність. А величина напруги джерела живлення визначає, чи зможуть електрони подолати потенційний бар'єр чи ні. Якщо напруга джерела дорівнює величині потенційного бар'єра, то через р-n перехід почне протікати струм.

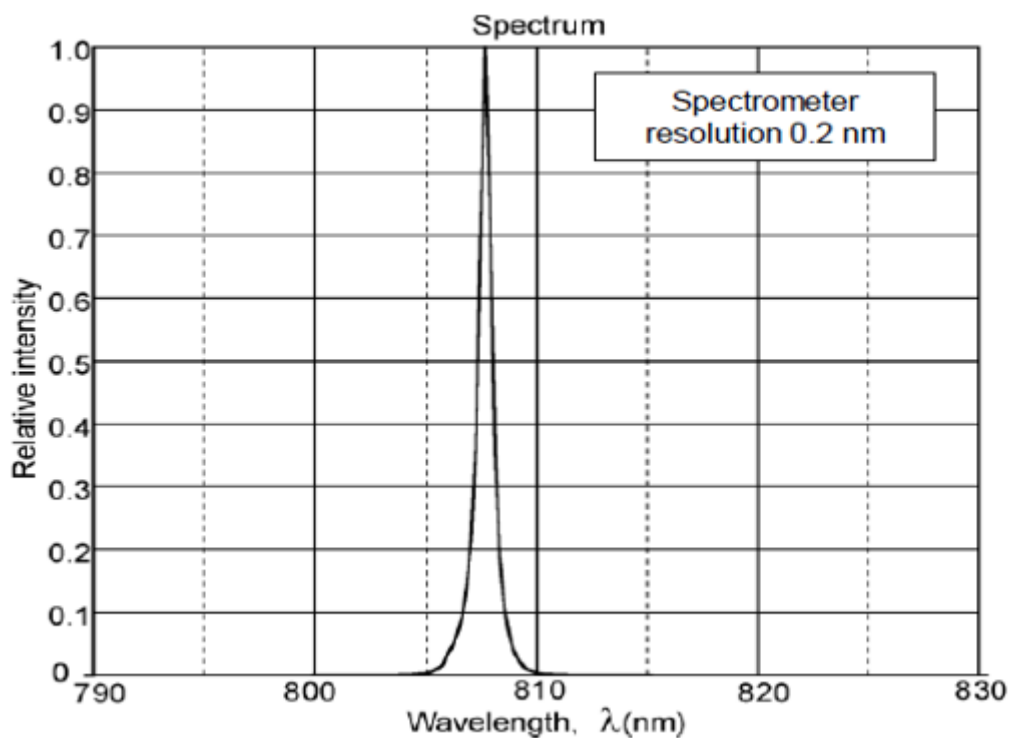


Рисунок 2.4 - Приклад зображення спектра випромінювання лазерного діода

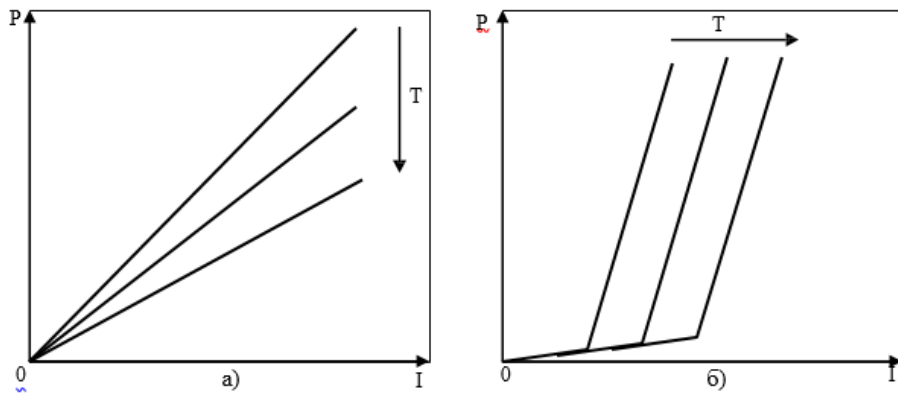
Якщо не вжити спеціальних заходів, наприклад, у вигляді струмообмежувального резистора, увімкненого послідовно з напівпровідниковим випромінювачем, то струм через випромінювач у разі подальшого збільшення напруги джерела наростатиме дуже швидко, що може призвести до виходу випромінювача з ладу. Ось чому джерело живлення

напівпровідникових випромінювачів має працювати в режимі джерела струму, а не джерела напруги.

Форми ват-амперних характеристик у світлодіодів і лазерних діодів різняться. На рис. 2.5 зображено спрощені ват-амперні характеристики цих джерел оптичного випромінювання. Видно, що у світлодіодів залежність оптичної потужності від величини струму практично лінійна.

Для лазерних діодів за величин струму, менших від деякого порогового значення  $I_{пор}$ , оптичне випромінювання визначається спонтанними переходами, і вид спектра лазера в цьому режимі подібний до спектра світлодіода. Це пояснюється тим, що втрати всередині резонатора лазера перевищують приплив енергії за рахунок спонтанного випромінювання. Поблизу порогового значення струму зростає частка індукованого випромінювання. За струмів, вищих за поріг, у випромінюванні переважає індуковане випромінювання, що призводить за невеликого збільшення струму накачування до різкого збільшення вихідної потужності. Крутизна характеристики в лазерному режимі називається диференціальною квантовою ефективністю  $S_{диф} = dP / dI$ .

Температура чинить негативну дію на потужність випромінювання. Це пов'язано з тим, що зі зростанням температури зростає ймовірність зіткнення електронів з атомами кристалічної решітки напівпровідника, внаслідок чого електрон віддає свою енергію не у вигляді випромінювання фотона, а у вигляді теплової енергії. Це явище називається безвипромінювальною рекомбінацією. У результаті за тієї ж самої величини струму через випромінювач вихідна оптична потужність буде падати. Цей ефект по-різному проявляється у світлодіоді та в лазері. У світлодіоді ми спостерігаємо зменшення крутизни ват-амперної характеристики. У лазерному діоді зі зростанням температури збільшується значення порогового струму.



а) світлодіода; б) лазерного діода за різних температур

Рисунок 2.5 - Приблизний вигляд ват-амперних характеристик

в) діаграма спрямованості випромінювання – розподіл оптичної потужності випромінювача в просторі. Може характеризуватися тілесним кутом, у якому зосереджена половина потужності, а також залежністю випромінювання від кута між цим напрямком і нормою до поверхні випромінювача.

Діаграма спрямованості залежить від розмірів освітлюваної області, а також додаткової оптики, застосовуваної спільно з випромінювачем. Приклад діаграми спрямованості світлодіода показано на рис. 2.6.

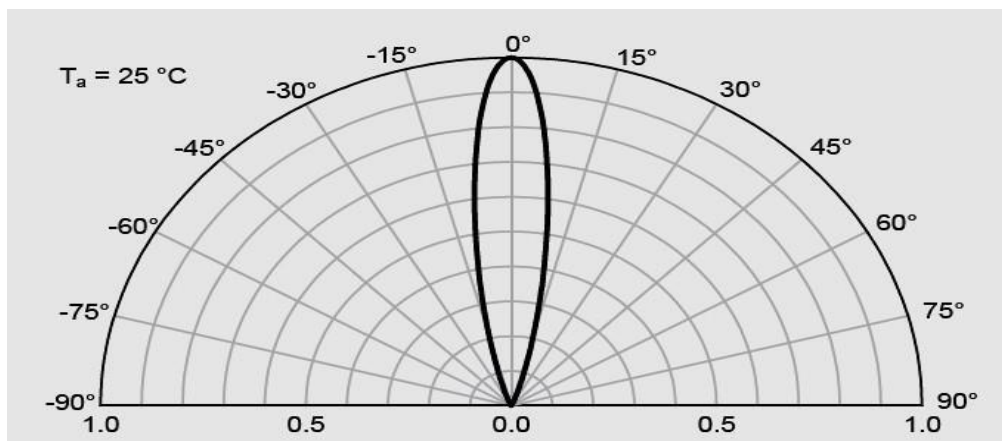


Рисунок 2.6 - Діаграма спрямованості світлодіода

### 3 ПРИЙМАЧІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Приймачі оптичного випромінювання призначені для виявлення випромінювання і формування вихідного сигналу (вимірюваної величини), пропорційного потоку оптичного випромінювання, що надходить на його вхід. Приймачі, які використовують насамперед для виявлення оптичного випромінювання, іноді називають детекторами. У тому випадку, коли приймач є частиною деякого вимірювального пристрою, його можна назвати первинним вимірювальним перетворювачем.

Робота будь-якого фотоприймача заснована на поглинанні оптичної потужності та її перетворенні на інші види енергії, зручніші для подальшого опрацювання та формування вихідного сигналу. У кожному приймачі існує спеціальна фоточутлива область, у якій відбувається поглинання оптичної потужності.

У зв'язку з дуже високою частотою електромагнітних коливань оптичного діапазону будь-які приймачі оптичного випромінювання з огляду на інерційність процесів перетворення енергії не мають змоги реагувати на миттєве значення напруженості електричного або магнітного поля оптичного випромінювання. У результаті у всіх приймачів вихідний сигнал пропорційний саме енергії оптичного випромінювання. Цю особливість необхідно враховувати під час вимірювання за допомогою приймачів різних енергетичних параметрів оптичного випромінювання. Так, під час вимірювання електричних сигналів за рівень сигналу, що відповідає зміні енергії вдвічі, приймається рівень 3 дБ відносно вихідного значення. У разі ж вимірювання оптичного сигналу такій самій зміні оптичної енергії відповідатиме зміна рівня вихідного сигналу приймача на 6 дБ.

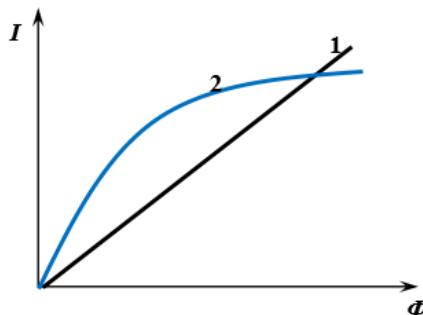
### 3.1 Параметри приймачів оптичного випромінювання

Основною характеристикою приймача є характеристика перетворення. Ця характеристика описує, як змінюється вихідний сигнал приймача в разі зміни енергії оптичного випромінювання, що надходить на вхід фотоприймача. Приклади світлових характеристик наведено на рис. 3.1. Для вимірjuвальних цілей намагаються підібрати приймач із лінійною характеристикою перетворення, що спрощує перерахунок вихідного сигналу у вимірjовану величину і підвищує точність.

Чисельним параметром світлової характеристики приймача є його чутливість  $S$  - це відношення зміни вихідного сигналу приймача  $\delta i$  до величини потужності оптичного випромінювання  $\delta \Phi$ , що викликала цю зміну:

$$S(\Phi) = \frac{\partial i}{\partial \Phi} \quad (3.1)$$

Цю величину також називають коефіцієнтом перетворення, маючи на увазі перетворення енергії оптичного випромінювання у вихідний сигнал. У разі лінійної світлової характеристики чутливість приймача є величиною постійною. За нелінійної світлової характеристики чутливість є функцією абсолютного значення оптичної потужності, що надходить на вхід приймача. У цьому разі найчастіше говорять про диференціальну чутливість.



а) лінійна; б) нелінійна

Рисунок 3.1 – Світлові характеристики приймачів

На практиці для вимірювання величини чутливості приймача чинять так: на вхід приймача подають змінний потік оптичного випромінювання малої амплітуди на тлі постійного потоку, що відповідає заданій точці світлової характеристики.

Приймачі можна класифікувати за тим, чи залежить їхня чутливість від довжини хвилі випромінювання. У разі, коли чутливість приймача не залежить від довжини хвилі падаючого на нього оптичного випромінювання, приймач називається неселективним. При цьому завжди мається на увазі деякий досить широкий, але обмежений діапазон довжин хвиль, і сталість чутливості також вважається з відомим ступенем точності. Для селективних приймачів вводиться такий параметр, як спектральна чутливість  $S(\lambda)$ , тобто чутливість приймача до монохроматичного випромінювання певної довжини хвилі.

Вимірюється ця величина подібно до вимірювання чутливості, але замість оптичного потоку довільного спектрального складу на вхід приймача подається монохроматичне випромінювання відомої довжини хвилі.

Послідовно подаючи на вхід приймача оптичне випромінювання різних довжин хвиль і постійної потужності та вимірюючи спектральну чутливість, отримують залежність чутливості від довжини хвилі, яка називається спектральною характеристикою.

Поняття спектральної чутливості просте і наочне. Але при порівнянні між собою різних приймачів зручніше користуватися відносною спектральною чутливістю  $S_{\text{отн}}(\lambda)$ , яка визначається за формулою

$$S_{\text{отн}}(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S(\lambda)_{\text{max}}} \quad (3.1)$$

де  $S(\lambda)_{\text{max}}$  – максимальне значення спектральної чутливості в межах робочого діапазону довжин хвиль приймача.

Приклад спектральної характеристики приймача у відносних одиницях показано на рисунку 3.2.

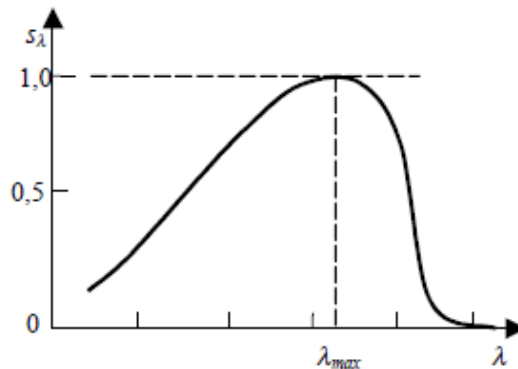


Рисунок 3.2 – спектральна характеристика приймача оптичного випромінювання

У тих випадках, коли необхідно вимірювати оптичні сигнали, що змінюються в часі, важливо знати постійну часу приймача - час, що характеризує швидкість реакції вихідного сигналу на ступінчасту зміну оптичного сигналу. Одиницею постійної часу заведено вважати часовий інтервал, за який вихідний сигнал досягає  $(1 - 1/e) \approx 0.632$  від свого сталого значення. На практиці для характеристики швидкодії приймачів також використовуються такі параметри, як час наростання, час спаду, а також смуга пропускання приймача.

Час наростання і спаду вимірюється як час, за який вихідний сигнал змінюється від 0.1 до 0.9 від свого усталеного значення.

Смугу пропускання приймача вимірюють за допомогою амплітудної модуляції оптичного сигналу за гармонійним законом і в процесі перебудови частоти знімають залежність амплітуди змінної складової вихідного сигналу приймача від частоти модуляції. У зв'язку з тим, що вихідний сигнал пропорційний оптичній потужності, за смугу пропускання приймача беруть діапазон частот модуляції, на межах якого амплітуда вихідного сигналу зменшується два рази відносно встановленого значення.

Чутливість приймача може бути різною для різних ділянок поверхні їхньої фоточутливої області. Враховувати це необхідно в тому разі, якщо переріз оптичного випромінювання, що надходить до приймача, менший, ніж розміри фоточутливої області. Для опису просторової нерівномірності чутливості використовують зонну характеристику, яка графічно зображує залежність чутливості від координат на поверхні фоточутливої ділянки.

До просторових характеристик також належить діаграма спрямованості приймача. Діаграма спрямованості описує у вигляді формул або у вигляді графіків залежність чутливості приймача від кута падіння випромінювання на фоточутливу область. Діаграма спрямованості формується взаємним розташуванням фоточутливої області та оптичних елементів, що встановлюються перед нею, такі як лінзи та діафрагми.

Незважаючи на те, що саме чутливість визначає величину реакції приймача на оптичне випромінювання заданої потужності, не вона зумовлює гранично мале значення вимірюваної величини, яке можна виявити даним приймачем. Межу на виявні можливості приймача накладають шуми – випадкові складові, які завжди присутні у вихідному сигналі будь-якого пристрою і не пов'язані з вимірюваною величиною. Рівень шумів характеризується середньоквадратичним значенням шумової складової сигналу на виході приймача в певній смузі частот.

Розглянемо, як впливають на рівень шуму такі параметри, як робоча смуга частот приймача і площа його фоточутливої області.

Шуми, найчастіше, являють собою безперервну послідовність частот, тобто мають суцільний спектр. Для більшості джерел шуму рівноймовірна генерація будь-яких спектральних складових. Це означає, що спектр шуму є рівномірним, або білим. У приймачі окремі спектральні складові шуму складаються. У результаті потужність шумового сигналу зростає прямо пропорційно до смуги частот, у якій відбувається вимірювання, а

середньоквадратичне значення шумового сигналу зростає пропорційно до кореня квадратного зі смуги пропускання.

Якщо ми знаємо рівень шуму для якогось приймача з деякою площею фоточутливої області, то як зміниться потужність шуму при збільшенні площі вдвічі? Очевидно, що в цьому випадку приймач із більшою площею можна представити у вигляді двох вихідних приймачів, вихідні сигнали яких складаються. Під час складання відбудеться подвоєння і потужності шуму.

Таким чином, потужність шуму на виході приймача зростає прямо пропорційно зі збільшенням площі фоточутливої області, а середньоквадратичне значення шумового сигналу зростає пропорційно кореню квадратному з площі.

Для кількісного опису здібностей приймача виявляти слабкі оптичні сигнали вводять такий параметр, як поріг чутливості. За величину порога приймається потужність оптичного сигналу, за якої середньоквадратичне значення корисного сигналу на виході приймача дорівнює середньоквадратичному значенню сигналу шумів за даних умов вимірювання.

Щоб мати можливість порівнювати приймачі, що мають різні смуги пропускання і різні площі фоточутливої ділянки, отримані середньоквадратичні значення шуму нормують шляхом ділення отриманого значення на корінь квадратний зі смуги пропускання і корінь квадратний із площі приймача. Цей параметр називають питомим порогом чутливості. З урахуванням того, що площу фоточутливої області заведено вимірювати в квадратних сантиметрах ( $\text{см}^2$ ), питомий поріг чутливості має розмірність  $\text{Вт/Гц}^{0.5}\text{см}$ .

Іноді на практиці зручніше використовувати величину, обернену питомому порого чутливості, яка називається питомою виявною здатністю.

Вимірювання порога чутливості приймача на практиці здійснюють таким чином. Спочатку вимірюють значення чутливості приймача і його смуги пропускання. Потім в умовах повної відсутності освітленості вимірюють

середньоквадратичне значення шумового сигналу на виході приймача. Розділивши отримане значення на корінь квадратний зі смуги пропускання приймача, отримують спектральну щільність амплітуди шуму. Поріг чутливості обчислюється шляхом ділення спектральної щільності амплітуди шуму на чутливість приймача.

Діапазон значень оптичного сигналу, в межах якого може працювати даний приймач, називається його динамічним діапазоном. Зрозуміло, що нижня межа цього діапазону задається порогом чутливості. Верхня межа робочого діапазону обмежується або фізичним руйнуванням приймача під дією оптичного випромінювання, або зменшенням його чутливості, коли вихідний сигнал приймача перестає реагувати на подальше збільшення оптичної потужності (цей ефект називається насиченням). Для лінійних приймачів за верхню межу приймають таке значення вимірюваної величини, за якого відхилення від лінійності світлової характеристики перевищує допустиме значення.

### 3.2 Джерела шумів приймачів оптичного випромінювання

Розглянемо основні джерела шумів, тією чи іншою мірою властиві всім приймачам оптичного випромінювання.

Теплові шуми. Цей вид шуму пов'язаний з хаотичним тепловим рухом вільних електронів провідного матеріалу приймача. Випадковий характер такого руху призводить до того, що в кожен момент часу кількість електронів, що переміщаються в одному напрямку, не дорівнює числу електронів, що рухаються в протилежному напрямку. У результаті такого руху в навантаженні виникає випадкова складова струму або напруги. Зауважимо, що тепловий шум притаманний тільки провідникам, і його середньоквадратичне відхилення від нульового значення визначається формулою Найквіста:

$$\sqrt{i_{ш}^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_n}} \quad (3.2)$$

де  $i_{ш}$  – шумова складова струму на виході приймача;

$k$  – постійна Больцмана, що дорівнює  $1.38 \times 10^{-23}$  Дж×градус<sup>-1</sup>;

$T$  – температура фоточутливої ділянки приймача вК;

$\Delta f$  – смуга частот, у якій вимірюється шум;

$R_n$  – величина опору в ланцюзі навантаження, через яку протікає вихідний струм приймача.

Дробовий шум. Природа дробового шуму - в дискретності носіїв заряду. Сигнал, що виникає на виході приймача під дією оптичного випромінювання, формується окремими електронами. Під час додавання або зменшення кожного носія заряду у вихідному сигналі спостерігатиметься сплеск, пропорційний заряду. Середньоквадратичне значення дробової шумової складової струму визначається формулою

$$\sqrt{i_{ш}^2} = \sqrt{2 \cdot e \cdot i_{cp} \cdot \Delta f} \quad (3.3)$$

де  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Кл – заряд електрона;

$i_{cp}$  – середнє значення вихідного струму приймача;

$\Delta f$  – смуга частот, у якій вимірюється шум.

Таким чином, дробовий шум не залежить від температури приймача, але залежить від величини корисної складової вихідного струму. Може здатися, що раз дробовий шум зростає зі зростанням вихідного струму, то немає сенсу

збільшувати середній струм. Однак шумова складова зростає пропорційно квадратному кореню від середнього струму, тож відношення сигналу до шуму зі зростанням струму все одно збільшується.

Тепловий і дробовий шуми, розглянуті вище, відносять до фундаментальних типів флуктуацій. Механізм їх виникнення добре вивчений. У більшості вимірювальних систем саме ці види шумів визначають гранично досяжний поріг чутливості. Однак реальні системи часто генерують шум, потужність якого перевищує величину, очікувану для теплового і дробового шуму. Ці додаткові шуми називають надлишковими.

Фліккер-шум належить до надлишкових шумів. На відміну від рівномірного спектра, притаманного теплового і дробовому шумам, спектральна щільність потужності  $S(f)$  фліккер-шуму змінюється обернено пропорційно частоті  $f$ :

$$S(f) = \frac{K}{f^\gamma} \quad (3.4)$$

де  $K$  – розмірна константа;

$\gamma$  – безрозмірна константа, близька до одиниці.

Відповідно до формули цей вид шуму іноді називають шумом  $1/f$ . Особливість цього виду шуму полягає в тому, що він проявляється головним чином на низьких частотах і наближається до нуля зі зростанням частоти.

У результаті взаємної дії теплового, дробового та фліккер-шумів спектр потужності виглядатиме так, як показано на рисунку. 3.3. Спектр шуму умовно можна розділити на три області. На низьких частотах, нижчих за деяке значення  $f_1$ , переважає фліккер-шум. На частотах, вищих за деяке значення  $f_2$ , внесок фліккер-шуму прагне до нуля. У цій ділянці частот спектральна щільність потужності шуму постійна і визначається тепловим і дробовим шумом. Між частотами  $f_1$ , і  $f_2$  знаходиться перехідна область, для якої

спектральні густини потужності фліккер-шуму, теплового і дробового порівнянні між собою.

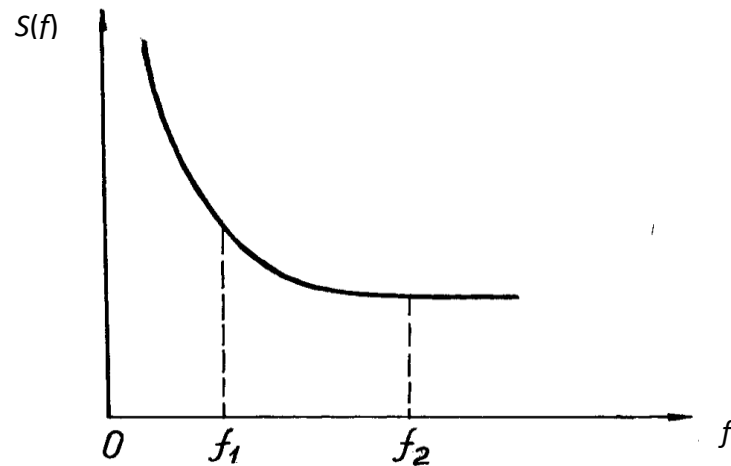


Рисунок 3.3 – Спектр потужності шуму на виході приймача за взаємної дії теплового, дробового і фліккер-шуму

Наявність фліккер-шуму – це одна з причин, чому під час вимірювання малих рівнів оптичних сигналів намагаються відмовитися від роботи на постійному струмі. З цією метою використовують амплітудну періодичну модуляцію вимірюваного оптичного випромінювання на частоті, близькій до  $f_2$ . Роблять це, наприклад, за допомогою обтюратора – спеціального пристрою, що періодично перериває оптичний потік на вході приймача за допомогою непрозорої шторки.

Радіаційний шум. Цей вид шуму є зовнішнім по відношенню до приймача. Джерелом цього шуму є фон, що оточує приймач, а також нагріті елементи самого приймача, які є джерелами теплового оптичного випромінювання. Потрапляючи на фоточутливу область приймача, додаткові фотони викликають флуктуації корисного оптичного сигналу. Потужність

радіаційного шуму зростає пропорційно п'ятому ступеню температури навколишнього фону та елементів приймача.

Практично радіаційний шум визначає граничне мінімальне значення шумів криогенно охолоджуваних приймачів. Тому часто за ідеальний приймач приймають той, у якого всі шуми незначні порівняно з радіаційним.

Генераційно-рекомбінаційний шум характерний для напівпровідникових приймачів оптичного випромінювання. Причина його появи – флуктуації швидкостей теплової генерації та рекомбінації вільних носіїв заряду в напівпровіднику, внаслідок чого концентрація носіїв струму флюктує відносно свого середнього значення, відповідного до корисного сигналу, викликаного вимірюваним оптичним випромінюванням.

Залежно від властивостей напівпровідника можливі різні аналітичні вирази для генераційно-рекомбінаційного шуму.

### 3.3 Типи приймачів оптичного випромінювання

Серед великої кількості приймачів оптичного випромінювання у вимірювальній практиці найбільшого поширення набули приймачі, у яких вихідним параметром є електричний сигнал. Усе різноманіття приймачів можна розділити на два великі класи - теплові та фотонні.

Теплові приймачі. Їхній принцип дії ґрунтується на тому, що теплове оптичне випромінювання, яке падає на них, поглинається в матеріалі приймача. У результаті відбувається нагрівання матеріалу і зміна його робочого параметра. Таким параметром може бути провідність матеріалу, термо-ЕДС, зміна форми. Для того щоб падаюче випромінювання поглиналося повністю, поверхню теплового приймача покривають будь-яким невідбивним покриттям. Основною вимогою до покриття є мінімальне відбиття в якомога ширшій спектральній області. Теплові приймачі є неселективними, тобто їхня чутливість не залежить від довжини хвилі випромінювання, що падає на них.

Фотонні приймачі. У них відбувається пряма взаємодія між фотонами оптичного випромінювання та електронами матеріалу приймача. Робота фотоприймачів ґрунтується на використанні внутрішнього фотоефекту в твердих тілах, коли кванти оптичного випромінювання, які поглинаються, звільняють носії заряду. Для відриву електрона від атома кристалічної решітки необхідна деяка мінімальна енергія  $\Delta E$ , характерна для даного матеріалу. У зв'язку з тим, що енергія фотона пов'язана з довжиною хвилі оптичного випромінювання, для кожного матеріалу існує так звана червона межа фотоефекту - та максимальна довжина хвилі випромінювання  $\lambda_{\text{гр}}$ , за якою енергія фотонів буде недостатньою для генерації носіїв заряду:

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{h \cdot c}{\Delta E} \quad (3.5)$$

де  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Дж·с  $c = 4.14 \times 10^{-15}$  эВ·с – постійна Планка;

$c = 3 \times 10^8$  м/с – швидкість світла в вакуумі.

Фотоприймачі виготовляються на основі різних напівпровідникових матеріалів і являють собою або однорідний фоторезистор, або структуру на основі р-п переходу, що працює в режимі фотодіода.

Перевагою фотонних приймачів є їхня механічна міцність, а також можливість виготовлення не тільки поодиноких, а й багатоелементних приймачів із використанням технологій мікроелектроніки.

### 3.4 Основні види теплових приймачів

Термоелементи належать до найпоширенішого виду теплових приймачів. У термоелементах використовується ефект виникнення термо-ЕДС при

різниці температур між двома спаями різнорідних металів. При цьому вимірювальний спай перебуває в тепловому контакті з майданчиком, на який надходить вимірюване випромінювання, а другий спай зазвичай перебуває в умовах стабільної температури. Під час поглинання оптичного випромінювання різниця температур між спаями змінюється, і величина нагріву вимірювального спая може бути визначена за зміною величини термо-ЕДС.

Недоліком термоелектричних приймачів є дуже низьке значення термоелектричної ЕДС, через що доводиться вживати спеціальних заходів щодо захисту вимірювальних ланцюгів від зовнішніх електричних перешкод. Інший недолік термоелементів це їх висока інерційність.

Болометри – другий вид широко поширених теплових приймачів. Являє собою терморезистор, розміщений у герметичному об'ємі. Під час поглинання вимірюваного випромінювання температура терморезистора підвищується. Величина зміни температури фіксується за величиною зміни електричного опору. Найчастіше використовують мостовий метод вимірювання опору, за якого в обидва плеча моста вмикають ідентичні болометри, але випромінювання надходить лише на один із них. Подібне включення дає змогу компенсувати вплив зміни температури навколишнього середовища на результати вимірювання.

Швидкодія болометрів зазвичай вища, ніж термоелементів, проте обмежена величиною теплової постійної часу порядку одиниць мілісекунд.

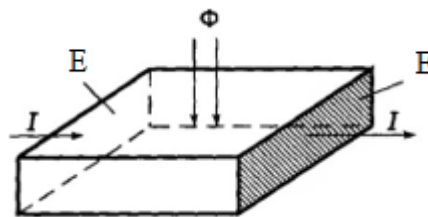
Піроелектричні приймачі використовують ефект генерації електричних зарядів на гранях сегнетоелектриків під час їхньої деформації, викликаній зміною температури. Так само, як і в болометрах і термопарних приймачах, зміна температури відбувається за рахунок поглинання оптичного випромінювання, що падає на сегнетоелектрик. Особливістю піроелектричних приймачів є необхідність модуляції падаючого на них оптичного випромінювання. Тільки в цьому разі, за періодичного нагрівання й

охолодження поверхні сегнетоелектрика, відбуватиметься постійна генерація нових зарядів і формування змінного вихідного сигналу, який може бути вимірний за допомогою підсилювача з високим вхідним опором.

У зв'язку з тим, що сегнетоелектрики мають також і п'єзоефект, цей тип приймачів має високу чутливість до зовнішніх механічних впливів, що необхідно враховувати під час їх застосування. Швидкодія піроелектричних приймачів може досягати одиниць мегагерц.

### 3.5 Основні види фотонних приймачів

Фоторезистори являють собою плівки або пластинки фоточутливого однорідного напівпровідникового матеріалу, забезпечені двома контактами для включення їх в електричний ланцюг (рис. 3.4). Принцип дії фоторезисторів ґрунтується на явищі фотопровідності, коли під дією оптичного випромінювання збільшується кількість вільних носіїв у напівпровіднику, внаслідок чого зменшується його омичний опір.



$E$  – електроди,  $I$  – струм, що протікає через резистор,  
 $\Phi$  – потік оптичного випромінювання

Рисунок 3.4 – Спрощена конструкція фоторезистора

Завдяки однорідності матеріалу фоторезистори є неполярними елементами, тобто проводять струм однаково в обох напрямках.

Отже, їх можна вмикати в ланцюги не тільки постійного, а й змінного струму.

Основні параметри фоторезисторів:

- темновий опір – опір фоторезистора за відсутності зовнішнього освітлення;
- кратність зміни опору – відношення темного опору до опору за заданої величини освітленості поверхні фоторезистора. Є одним із найважливіших параметрів, що характеризують чутливість фоторезистора до оптичного випромінювання;
- робоча напруга – постійна напруга, прикладена до фоторезистора, за якої гарантується його тривала робота;
- температурний коефіцієнт фотоструму – відносна зміна величини фотоструму при зміні температури фоторезистора на 1 градус. Має від'ємний знак, оскільки фотострум зменшується зі зростанням температури у зв'язку зі зменшенням часу життя вільних носіїв;
- порогова чутливість визначається через величину темного опору як мінімальна потужність оптичного випромінювання, що спричиняє зміну опору фоторезистора в 2 рази порівняно з його темновим опором.

Під час вимірювання параметрів фоторезисторів найчастіше досліджують залежність струму через фоторезистор від прикладеної до нього напруги – це вольт-амперна характеристика (ВАХ) (рис. 3.5(а)), а також залежність струму через фоторезистор від величини світлового потоку – це світлова характеристика (рис. 3.5(б)). Вольт-амперну характеристику вимірюють за певної постійної величини світлового потоку, що надходить на фоторезистор. Як видно з рисунка, при збільшенні світлового потоку  $\Phi$  крутизна ВАХ збільшується за рахунок зменшення опору. Під час вимірювання світлової характеристики фіксують напругу, прикладену до фоторезистора, яка зазвичай дорівнює 1 В.

На практиці, для отримання вихідного сигналу з фоторезистора, пропорційного зміні потужності оптичного випромінювання, його найчастіше включають або в схему дільника напруги (рис. 3.6), або в мостову схему (рис. 3.7).

У схемі дільника напруги вихідним сигналом є напруга з постійного резистора  $R_1$ :

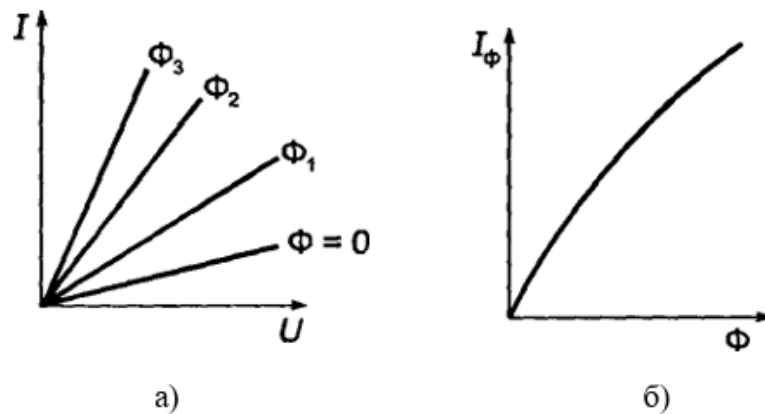
$$U_{\text{вих}} = \left( \frac{U_{\text{пит}}}{R_1 + R_{\Phi}} \right) \cdot R_1 \quad (3.6)$$

де  $U_{\text{вих}}$  – вихідна напруга дільника;

$U_{\text{пит}}$  – постійна напруга, що подається на дільник від зовнішнього джерела живлення;

$R_{\Phi}$  – вихідний опір фоторезистора за постійного світлового потоку.

Для того щоб унеможливити вплив наступних каскадів на роботу дільника, напругу з резистора  $R_1$  бажано подавати на вхід повторювача  $DA_1$  з високим вхідним опором.



а) вольт-амперна; б) світлова

Рисунок 3.5 – Приклад характеристик фоторезистора

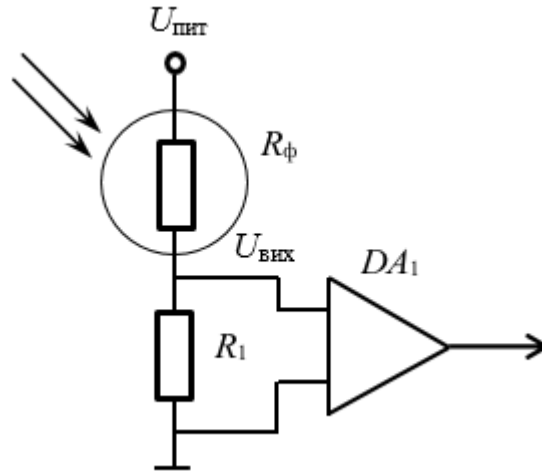


Рисунок 3.6 – Підключення фоторезистора за схемою дільника напруги

Під час зміни оптичної потужності змінюватиметься опір фоторезистора  $R_{\phi}$ , що, відповідно до (3.6), призведе до зміни вихідної напруги дільника. У тому разі, коли необхідно отримати максимальну чутливість розглянутої схеми до невеликих змін оптичної потужності відносно середнього значення, бажано обирати опір резистора  $R_1$ , що дорівнює опору фоторезистора за даного середнього рівня оптичної потужності. Вихідна напруга дільника при цьому, відповідно до (3.6), дорівнюватиме половині напруги живлення. Для подібного випадку за малих відносних змін опору фоторезистора (за  $\Delta R_{\phi} \ll R_{\phi}$ ) зміна вихідної напруги  $\Delta U_{\text{вих}}$  може бути обчислена з виразу (3.6) і становить:

$$\Delta U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{пит}}}{4 \cdot R_{\phi}} \cdot \Delta R_{\phi} \quad (3.7)$$

Мостова схема підключення дуже схожа на попередню. У ній також присутній дільник напруги з фоторезистором, але додається другий дільник на елементах  $R_2$  і  $R_3$ , який отримує живлення від того ж самого джерела  $U_{\text{пит}}$ . Наявність другого дільника дає змогу сформуванню опорної напруги, відносно якої вимірюватиметься зміна напруги на першому дільнику. Також як і в попередньому випадку, напруга з першого і з другого дільників подається на входи повторювача або підсилювача. У результаті за рівності напруг з

першого і другого дільників вихідна напруга повторювача дорівнюватиме нулю. Це дає змогу замість повторювача використовувати підсилювач. При цьому будь-які невеликі зміни в напрузі на першому дільнику призводитимуть до зміни вихідної напруги підсилювача.

Іншою перевагою мостової схеми є те, що під час балансування плечей моста значно послаблюється вплив напруги живлення на вихідний сигнал.

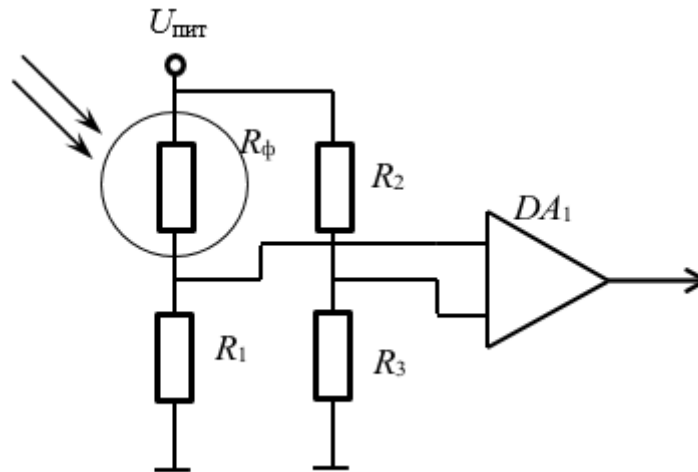


Рисунок 3.7 – Підключення фоторезистора за мостовою схемою

Фотодіоди. На відміну від фоторезисторів, що мають однорідну структуру, фотодіоди являють собою з'єднання двох ділянок напівпровідника, до яких додано домішки, що легують. Одна ділянка легована донорною домішкою, атоми якої легко віддають електрон. Ця область називається *n*-областю, оскільки концентрація негативних носіїв зарядів у ній набагато перевищує концентрацію позитивних носіїв. Друга область легована акцепторною домішкою, атоми якої легко приймають електрон від сусідніх атомів. Результат відриву електрона від атома з виникненням невідновленого позитивного заряду можна уявити як переміщення віртуальної позитивно зарядженої частинки, яка називається "дірка". Область напівпровідника, легована акцепторною домішкою, називається *p*-областю,

тому що концентрація позитивних носіїв зарядів у ній набагато перевищує концентрацію негативних носіїв.

Якщо між  $n$  і  $p$  областями встановити фізичний контакт, то почнеться вирівнювання концентрацій вільних носіїв шляхом дифузії (переміщення) електронів у  $p$ -область, а дірок у  $n$ -область. У результаті такого переміщення на межі кожної з областей залишаються нерухомі іони з некомпенсованими зарядами. Електричне поле, породжене цими просторовими зарядами, буде викликати дрейф носіїв у напрямку, зворотному дифузії. У міру дифузії поле просторового заряду зростає. Зрештою, між дифузійним і дрейфовим струмами встановлюється динамічна рівновага, і зміна просторових зарядів припиняється. Збіднену ділянку з нерухомими просторовими зарядами називають  $p$ - $n$ -переходом. Різниця потенціалів між  $p$  і  $n$  областями є потенційним бар'єром, який не дає змоги вільним носіям проходити через  $p$ - $n$ -перехід.

Роботу фотодіода як приймача оптичного випромінювання пояснює рис. 3.8

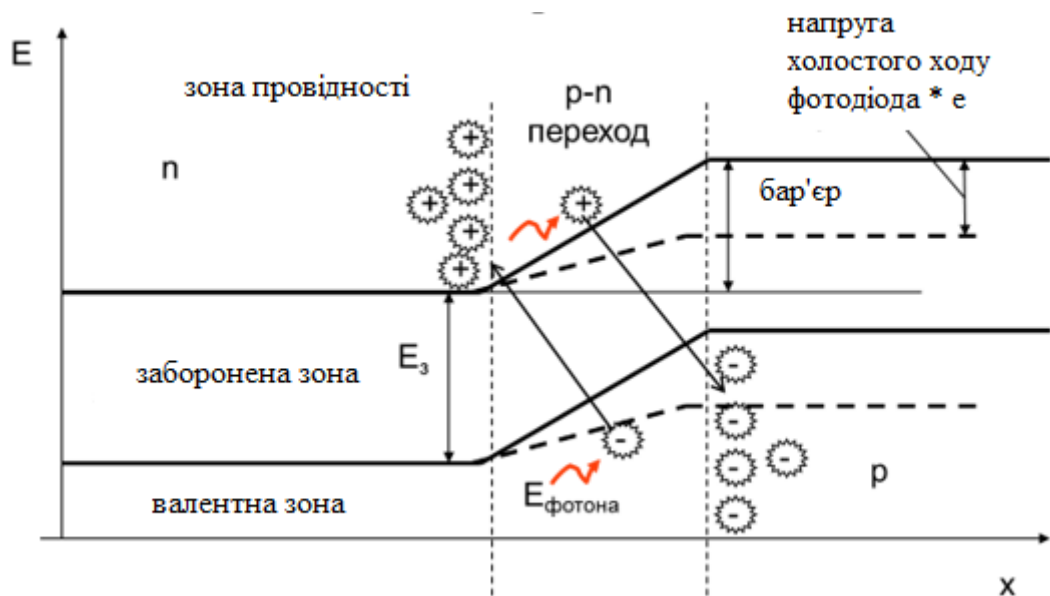


Рисунок 3.8 – Поділ неосновних носіїв полем  $p$ - $n$ -переходу

Фотони оптичного випромінювання передають свою енергію атомам напівпровідника, які перебувають у ділянці  $p$ - $n$ -переходу. Якщо енергія

фотона  $E_{\text{фотона}}$  перевищує ширину забороненої зони  $E_z$  для даного напівпровідникового матеріалу, то електрон відривається від атома кристалічної решітки. У результаті в області р-п-переходу з'являються два неосновні носії електрон і дірка. Під дією поля просторового заряду носії розділяються: електрон переміщується в n-область, а дірка - в р-область. У результаті між зовнішніми виводами фотодіода з'явиться різниця потенціалів, що збільшується в міру збільшення кількості електронів, породжених оптичним випромінюванням. Якщо замкнути зовнішній ланцюг фотодіода, то в ньому буде протікати електричний струм з неосновних носіїв, породжених оптичним випромінюванням. Таким чином, як вихідний сигнал фотоприймача на основі фотодіода можна використовувати або різницю потенціалів між його виводами, або струм, що протікає між ними. Відповідно до обраного вихідного сигналу розрізняють два режими роботи фотодіода: фотогальванічний і фотодіодний.

У фотогальванічному режимі фотодіод працює в режимі генератора електричної енергії (гальванічного елемента), до виводів якого під'єднується корисне навантаження.

На практиці струм фотодіода вимірюють за падінням напруги на резистивному навантаженні, підключеному між його виводами. При протіканні через навантаження фотоструму на ньому виникатиме різниця потенціалів. І чим більша величина опору, тим ближчим буде режим роботи фотодіода до режиму холостого ходу.

Основним недоліком фотоприймача на основі фотодіода, що працює у фотогальванічному режимі, є нелінійність залежності вихідного струму від оптичної потужності, що проявляється за високих рівнів потужності оптичного випромінювання.

У фотодіодному режимі фотодіод працює спільно із зовнішнім джерелом напруги. Але на відміну від напівпровідникових випромінювачів, зовнішнє джерело підключається таким чином, щоб збільшувати висоту потенційного

бар'єру. Тобто напруга зовнішнього джерела є замикаючою. При цьому навіть за великих значень оптичної потужності потенційний бар'єр зберігається, і ефективність поділу зарядів у збідненій зоні напівпровідника залишається практично постійною. Таким чином, напруга на резистивному навантаженні, пропорційна струму через фотодіод, буде лінійно залежати від величини оптичної потужності в дуже широкому діапазоні потужностей. Крім того, зовнішня замикаюча напруга збільшує ширину збідненої зони р-n-переходу. У результаті зменшується його електрична ємність і, одночасно, створюється прискорювальне поле для заряджених частинок, що утворюються під дією оптичного випромінювання. За рахунок цього досягається підвищення швидкодії фотоприймача.

Саме фотодіодний режим є основним під час використання фотодіода як фотоприймача оптичних сигналів. Вихідним сигналом фотоприймача на основі фотодіода є його вихідний струм.

## 4 БАГАТОЕЛЕМЕНТНІ ФОТОПРИЙМАЛЬНІ ПРИСТРОЇ

Оптичні методи обробки інформації, спектральні вимірювальні прилади припускають наявність фотоприймальних пристроїв, що дають змогу перетворювати на електричний сигнал просторовий розподіл оптичної потужності. Це завдання виконують багатоелементні фотоприймальні пристрої (БФПП).

Відмінною конструктивною особливістю цих пристроїв є те, що їхня фоточутлива ділянка складається не з одного майданчика, як у звичайного фотодіода, а з декількох близько розташованих майданчиків, які в цьому разі називаються пікселями. У фотоприймальних лінійках пікселі розташовані вздовж однієї координати, а у фотоприймальних матрицях пікселі рівномірно заповнюють прямокутне поле. Число пікселів у фотоприймальних лінійках зазвичай становить від 100 до 104. У фотоприймальних матрицях число пікселів досягає 107 і більше.

Для отримання інформації про розподіл оптичної потужності по поверхні БФПП необхідно виміряти вихідні сигнали з усіх пікселів. Якщо ми захочемо провести дані вимірювання одночасно для всіх пікселів, то для цього потрібно зробити окремий вивід (контакт) для кожного пікселя. Очевидно, що велика кількість пікселів не дає змоги це реалізувати на практиці. Та й паралельне опрацювання сигналів від пікселів потребує величезних апаратних витрат. У зв'язку з цим у БФПП використовується принцип послідовного опитування пікселів, за якого в кожен момент часу на вихідний контакт БФПП надходить сигнал з окремого пікселя. У результаті процес опитування всіх пікселів займає певний інтервал часу. Для того щоб не втрачати цей час даремно, у БФПП використовується принцип інтегрування ефекту від впливу оптичної

потужності на піксель. Тобто на відміну від дискретного фотоприймача, де вихідний сигнал (струм) у кожний момент часу пропорційний до оптичної потужності, вихідний сигнал пікселя БФПП пропорційний експозиції - добутку оптичної потужності на час, протягом якого ця потужність впливала на піксель:

$$U_{\text{вих}} = \int_0^T P(t) dt \quad (4.1)$$

де  $U_{\text{вих}}$  - вихідний сигнал з пікселя в кінці інтервалу  $T$  інтегрування оптичної потужності  $P(t)$ .

Таким чином, загальний принцип роботи багатоеlementних фотоприймальних пристроїв можна описати так:

- робота пристрою складається з двох циклів - циклу накопичення (інтегрування) на пікселях ефекту від впливу оптичної потужності та циклу послідовного опитування пікселів і передача напруги з пікселів на вихід фотоприймального пристрою;

- кожен піксель являє собою комірку з фотодіодом і вимірювальним конденсатором;

- під час потрапляння на фотодіод оптичної потужності формується фотострум, ефект від якого накопичується (інтегрується) у вимірювальному конденсаторі за час циклу накопичення. Що більшою буде оптична потужність, що потрапляє на піксель, то більшим буде струм фотодіода, і то швидше змінюватиметься напруга на конденсаторі;

- наприкінці циклу накопичення відбувається зчитування напруги на конденсаторі, після чого заряд конденсатора повертається у вихідний стан, що відповідає відсутності на пікселі оптичної потужності;

- опитування пікселів проводиться в певній послідовності, що задається алгоритмом роботи внутрішнього генератора пристрою. Під час послідовного

опитування пікселів на виході пристрою формуватиметься електричний сигнал, у якого зміна амплітуди (напруги) в часі відобразатиме розподіл оптичної потужності в просторі (за пікселями) фотоприймального пристрою.

#### 4.1 Основні параметри та характеристики БФПП

До основних характеристик БФПП належать:

- число пікселів, їх розмір і величина зазору між ними;
- початковий рівень (напруга зміщення);
- рівень "чорного";
- напруга насичення;
- динамічний діапазон;
- чутливість;
- відносна нерівномірність чутливості;
- експозиція, що відповідає насиченню;
- спектральна характеристика;
- ефективність перетворення.

Число пікселів спільно з їхніми розмірами характеризує просторову роздільну здатність фотоприймача, а величина зазору між пікселями - втрати оптичної потужності.

Початковий рівень (напруга зміщення) - напруга на виході БФПП, що відповідає вихідному заряду на конденсаторах пікселів.

Рівень чорного - різниця напруг між початковою напругою і напругою на виході БФПП за відсутності оптичного випромінювання на його вході.

Напруга насичення - максимальна зміна напруги на виході БФПП (відносно початкової напруги) у разі збільшення оптичної енергії, що надійшла на вхід БФПП. При цьому подальше збільшення оптичної енергії не призводить до зміни вихідної напруги.

Поняття "рівень чорного", "напруга насичення" та "початкова напруга" пояснює рис. 4.1.

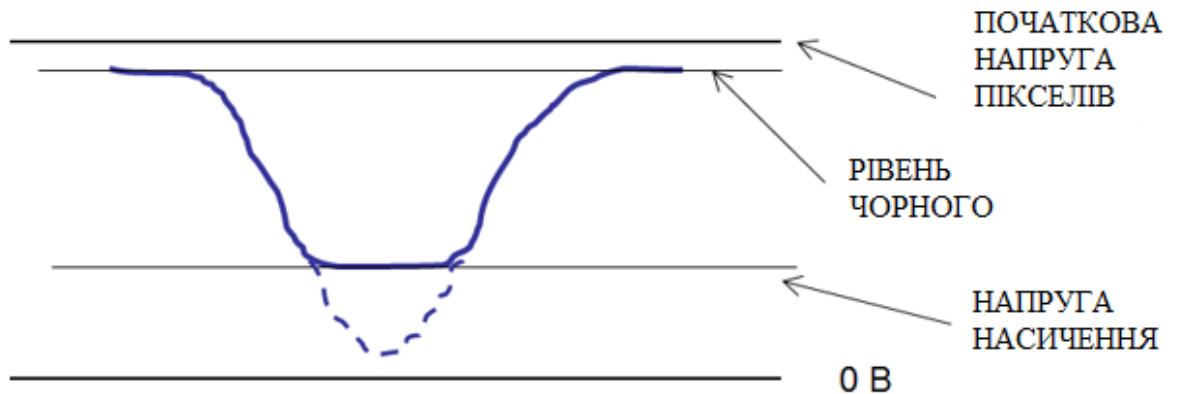


Рисунок 4.1 – Вихідний сигнал БФПП і пов'язані з цим терміни

Динамічний діапазон визначається виходячи з максимального і мінімального рівнів оптичної потужності, які можуть бути одночасно перетворені фотоприймачем. Обчислюється як відношення вихідної напруги, що відповідає насиченню, до вихідної напруги, що відповідає рівню чорного.

Чутливість БФПП характеризує здатність вихідного електричного сигналу реагувати на зміну оптичного сигналу. У зв'язку з тим, що вихідний сигнал пропорційний оптичній енергії, то чутливість знаходиться як відношення зміни вихідної напруги пікселя фотоприймача до величини оптичної енергії, яка надійшла на нього.

Відносна нерівномірність чутливості характеризує ідентичність окремих пікселів з точки зору їхньої чутливості до оптичного сигналу. Знаходиться вона за формулою:

$$\delta S = \frac{(U_{\text{макс}} - U_{\text{мін}})/2}{U_{\text{сер}}} \quad (4.2)$$

де  $U_{\text{макс}}$ ,  $U_{\text{мін}}$  - відповідно, максимальний і мінімальний рівні вихідних сигналів пікселів за однакового рівня освітленості всіх пікселів;

$U_{\text{сер}}$  - середнє (за всіма пікселями) значення рівня вихідного сигналу (рис. 4.2).

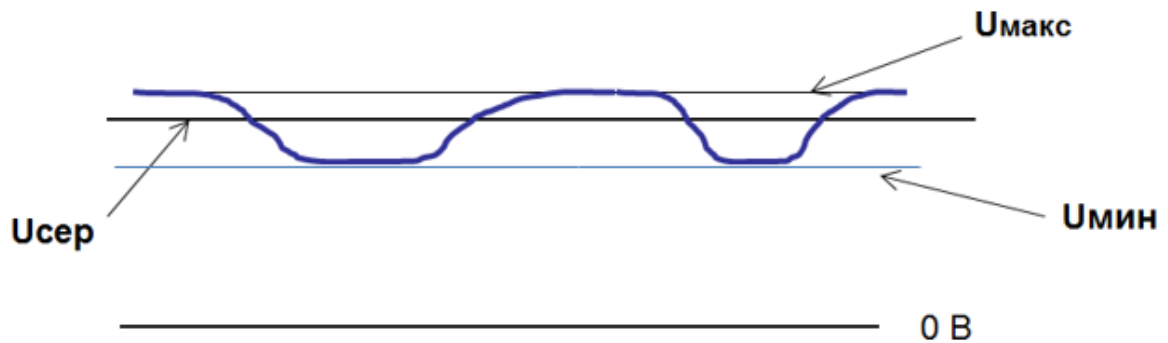


Рисунок 4.2 – Пояснення до визначення відносної нерівномірності чутливості

Експозиція, що відповідає насиченню, може бути визначена шляхом ділення рівня вихідної напруги, що відповідає насиченню, на величину чутливості.

Спектральна характеристика відображає залежність рівня електричного сигналу на виході фотоприймача від довжини хвилі оптичного випромінювання, що падає на нього.

Ефективність перетворення характеризує ККД перетворювача під час перенесення енергії від пікселів на вихід пристрою.

Залежно від технології, застосовуваної під час виготовлення БФПП, пристрої поділяють на дві групи:

- БФПП на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗС);
- БФПП на основі КМОН-структур.

## 4.2 Основні відомості про БФПП на основі ПЗС

Піксель БФПП на основі ПЗС являє собою фотодіод, підключений паралельно вимірювальному конденсатору. Перед початком циклу накопичення всі конденсатори пікселів заряджаються до опорної напруги. Під час потрапляння на фотодіод оптичної потужності формується фотострум, який призводить до розряду вимірювального конденсатора. При цьому що більша оптична потужність і що довший цикл накопичення, то сильнішим буде розряд конденсатора. У результаті наприкінці циклу накопичення оптичної потужності напруга на конденсаторі кожного з пікселів буде тим меншою, чим більшою є оптична енергія, що надійшла на цей піксель. Принцип роботи пікселя БФПП на основі ПЗС структури пояснює рис. 4.3.

ПЗС у БФПП виконує функцію аналогового зсувного регістра. У цей регістр за сигналом синхронізації переносяться заряди одночасно з усіх пікселів. Ці заряди зберігаються в окремих комірках ПЗС структури. Подача на структуру ПЗС керуючих тактових імпульсів дає змогу здійснити послідовне зчитування комірок, унаслідок чого формується вихідний електричний сигнал БФПП.

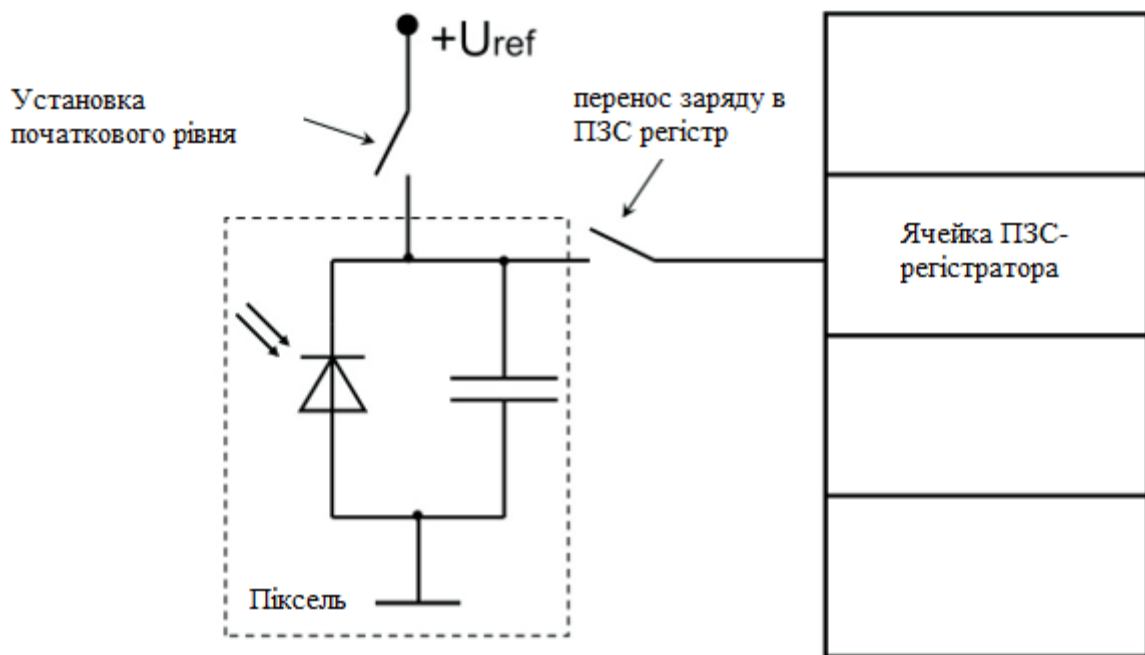


Рисунок 4.3 – Функціональна схема, що пояснює роботу пікселя в ПЗС-лінійці

Як приклад на рис. 4.4 наведено структурну схему БФПП ILX511. Це фотоприймальна лінійка, що складається з 2048 пікселів (S1...S2048). Крім фоточутливих пікселів присутні кілька технологічних пікселів, які не беруть участі у формуванні зображення (на малюнку позначені як D13...D38).

За переднім фронтом імпульсу ROG від зовнішнього генератора внутрішній генератор зчитування (Readout Gate Pulse Generator) формує імпульс, який відмикає ключі зчитування (Readout Gate). У результаті відбувається одночасне перенесення зарядів з усіх пікселів всередину аналогового зсувного реєстра на основі ПЗС (CCD charge-coupled device).

По задньому фронту імпульсу ROG ключі зчитування замикаються, а конденсатори пікселів заряджаються до величини, що відповідає рівню чорного. Після цього починається новий цикл перетворення (накопичення оптичної енергії пікселями). У той час, поки триває новий цикл накопичення, електричні заряди з комірок аналогового зсувного реєстра послідовно (за



Видно, що кожному імпульсу CLK відповідає поява на вихід ILX511 сигналу з одного пікселя. Таким чином, отримуємо, що для опитування всіх пікселів лінійки необхідно, щоб між двома імпульсами ROG було не менше 2048 імпульсів CLK. Насправді кількість імпульсів має бути не менше 2087. Це викликано тим, що крім робочих (ефективних пікселів) усередині лінійки є технологічні пікселі на початку і наприкінці ПЗС-реєстру. І їх теж необхідно опитати.

Слід звернути увагу, що вихідний сигнал ПЗС-лінійки є інверсним щодо оптичної потужності. Тобто пікселям з більшою освітленістю відповідає нижчий рівень вихідної напруги. Крім цього, необхідно пам'ятати, що під час обробки сигналу з ПЗС-лінійки за нульовий рівень вихідної напруги приймається рівень, що відповідає початковій напрузі на конденсаторах пікселів (у даному випадку  $U_{ref} = 2,8 \text{ В}$ ). Саме від цього рівня слід вимірювати рівень чорного, рівень насичення, а також корисний сигнал.

Очевидно, що швидкодія вимірювальної системи, яка використовує ПЗС-лінійку, визначається частотою проходження імпульсів ROG. Саме такою буде частота оновлення інформації на її виході.

Часовий інтервал між заднім фронтом одного імпульсу ROG і переднім фронтом наступного імпульсу ROG - це період накопичення (або, по-іншому, час інтегрування) оптичної потужності для ПЗС-лінійки.

#### 4.3 Основні відомості про БФПП на основі КМОН-структур

Відмінною особливістю БФПП на основі КМОН-структур є те, що ця технологія дає змогу забезпечити кожен піксель власним підсилювачем-інтегратором. Піксель у цьому разі являє собою фотодіод, під'єднаний до входу трансимпедансного підсилювача-інтегратора. Роботу КМОН БФПП пояснює рис. 4.6.

Перед початком циклу вимірювання всі конденсатори інтеграторів розряджаються до нуля. У разі потрапляння на фотодіод оптичної потужності формується фотострум, що призводить до заряду вимірювального конденсатора інтегратора. Що більша оптична потужність і що довший цикл накопичення оптичної потужності, то більша вихідна напруга інтегратора. У результаті наприкінці циклу напруга на виході кожного з інтеграторів пікселів буде прямо пропорційною до оптичної енергії, що надійшла на цей піксель.

Завдяки низькому вихідному опору підсилювачів-інтеграторів з'являється можливість за допомогою аналогових ключів під'єднувати виходи пікселів безпосередньо до вихідного підсилювача БФПП (на малюнку позначений як "VIDEO"). Це дає змогу, на відміну від ПЗС-реєстру, реалізувати опитування пікселів у довільній послідовності та незалежно від опитування інших пікселів. Наприклад, можна вибрати певну область пікселів у межах лінійки або матриці, і сформувати вихідний сигнал БФПП, опитуючи тільки ці пікселі.

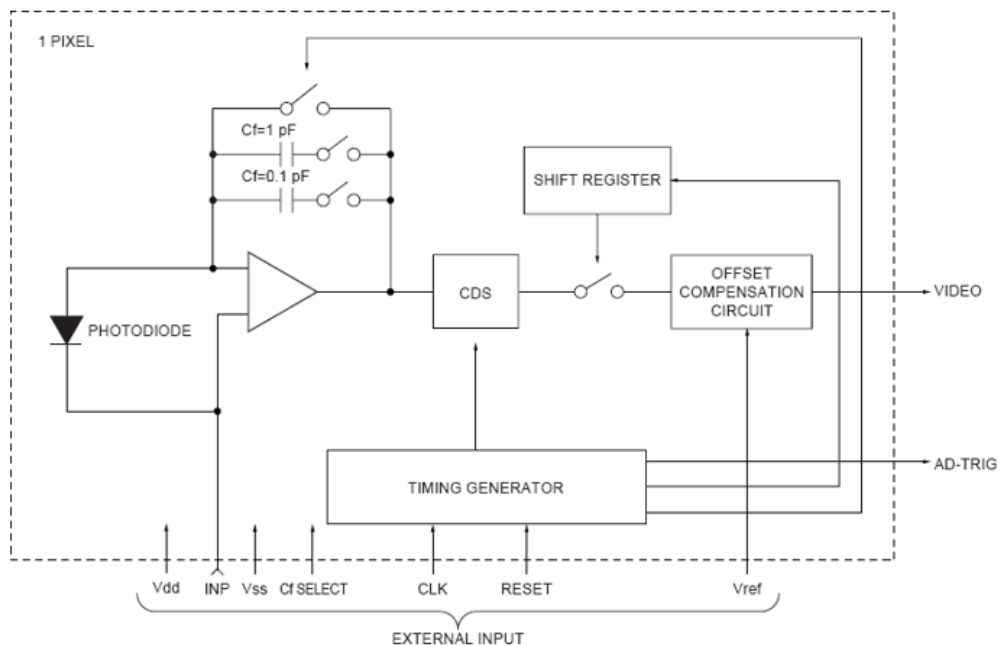


Рисунок 4.6 – Спрощена структурна схема пікселя КМОП-лінійки

Зворотним боком цієї технології опитування є неможливість забезпечити вимірювання всіма пікселями оптичної потужності, яка відповідає одному й тому самому моменту часу. Це пов'язано з тим, що якщо ми одночасно обнуliamo інтегратори всіх пікселів, то піксель, який буде опитано пізніше, встигне накопичити більшу оптичну потужність, ніж опитані раніше. Щоб забезпечити однаковий час інтегрування оптичної потужності для всіх пікселів, обнулення інтегратора роблять одразу після виведення інформації з нього на вихід БФПП. Тобто моменти початку інтегрування оптичної потужності в усіх пікселів БФПП будуть різні. Але в цьому разі може виникнути похибка вимірювання під час роботи з імпульсними оптичними сигналами. З огляду на це, у більшості КМОН БФПП передбачають два режими обнулення інтеграторів - або одночасний, або послідовний, які обирають з урахуванням особливостей використовуваного джерела оптичного випромінювання.

## 5 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РЕЄСТРАЦІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У даному розділі проведемо розрахунок рівня інтенсивності оптичного сигналу на різноманітні відстані зі заданими показниками якості за допомогою світлодіода та фотодіода.

### 5.1 Розрахунок рівня інтенсивності оптичного сигналу

Розрахуємо параметри випромінювача:

- вимір та розрахунок потужності випромінювання (Вт);
- вимір та розрахунок інтенсивності випромінювання (лк);
- розрахунок кількості фотонів, які випромінюються (з урахування спектральних характеристик випромінювача);
- вимір та розрахунок діаграми спрямованості випромінювача.

У роботі був використан діод SMD3014

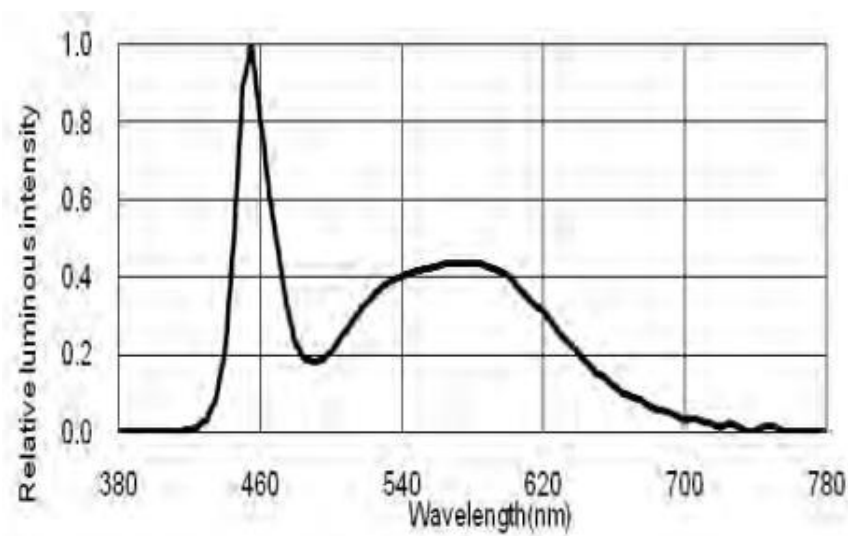


Рисунок 5.1 – Спектральна характеристика діода SMD3014

Розрахунок потужності випромінювання (Вт):

$$\begin{aligned} I &:= 120 \cdot 10^{-3} \text{ A} \\ U &:= 5 \text{ V} \\ P &:= I \cdot U = 0.6 \end{aligned}$$

Припустимо, що площа на яку потрапляє світло знаходиться на відстані 1 м, тоді, якщо кут дорівнює  $30^\circ$ , радіус площі на яку потрапляє світло дорівнює  $\text{tg } 15^\circ$ .

Розрахуємо площу поверхні за формулою:

$$\begin{aligned} r &:= 0.375 \\ s &:= \pi \cdot r^2 = 0.442 \text{ m}^2 \end{aligned} \tag{5.1}$$

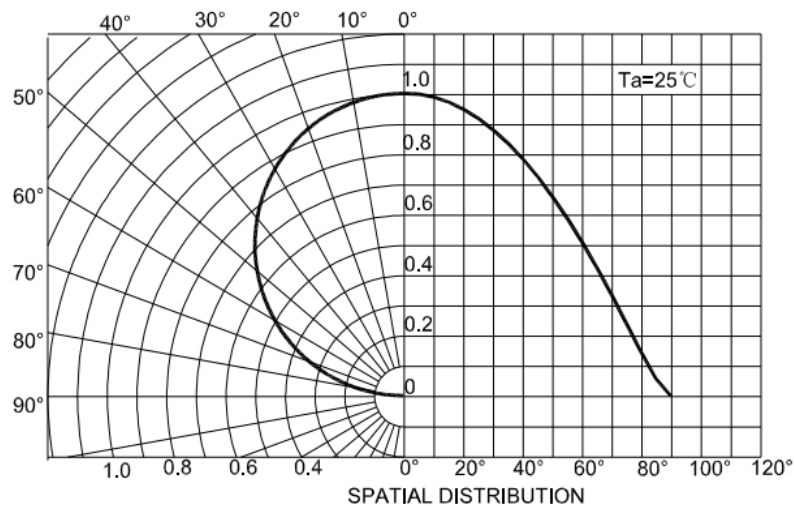


Рисунок 5.2 – Діаграма спрямованості діода SMD3014

Враховуючи, що обраний нами кут  $40^\circ$  це 60% від всього. Тоді кількість люменів що потрапляє на площу на площу дорівнює:

$$\frac{30}{s} = 67.906 \text{ Lk} \tag{5.2}$$

Розрахуємо частоту виромінювання за формулою:

$$\nu := \frac{2.8 \cdot 10^8}{480 \cdot 10^{-9}} = 5.833 \times 10^{14} \text{ Gz} \quad (5.3)$$

Розрахуємо енергію фотонів:

$$E := 5.883 \cdot 6.63 = 39.004 \quad (5.4)$$

Розрахуємо кількість фотонів:

$$N := \frac{1.22}{E} = 3.128 \times 10^{18} \quad (5.5)$$

Розрахуємо на відстані 10м дальності дії випромінювача

$$\frac{1}{100} \cdot N = 3.128 \times 10^{16} \quad (5.6)$$

5.2 Узгодження випромінювача та фотоприймача при реєстрації оптичного випромінювання

Був вибран фотодіод BPW 34 у якості приймача випромінювання.

Розрахуємо параметри фотодіода:

- Узгодження спектральних характеристик оптичного випромінювання з спектральними характеристиками приймача випромінювання;
- Узгодження динамічного діапазону приймача випромінювання зі випромінювання, що приймається;
- Вимір та розрахунок рівня та впливу внутрішніх шумів приймача випромінювання на оптичний сигнал, що приймається;
- Розрахунок імовірнісних характеристик сигналу, що приймається на тлі внутрішніх шумів приймача випромінювання.

Довжина хвилі, нм	Видність К, лм/Вт	Відносна відність	Довжина хвилі, нм	Видність К, лм/Вт	Відносна відність
380	0,03	0,00004	580	594	0,870
400	0,27	0,0004	600	431	0,631
420	0,73	0,004	620	260	0,381
440	15,7	0,023	640	120	0,175
460	41,0	0,060	660	41,7	0,161
480	90,2	0,139	680	11,6	0,017
500	221	0,323	700	2,8	0,004 1
520	485	0,710	720	0,72	0001 05
540	652	0,954	740	0,17	0,000 25
560	680	0,995	760	0,04	0,000 06

Рисунок 5.3 – Абсолютна відність для різної довжини хвилі

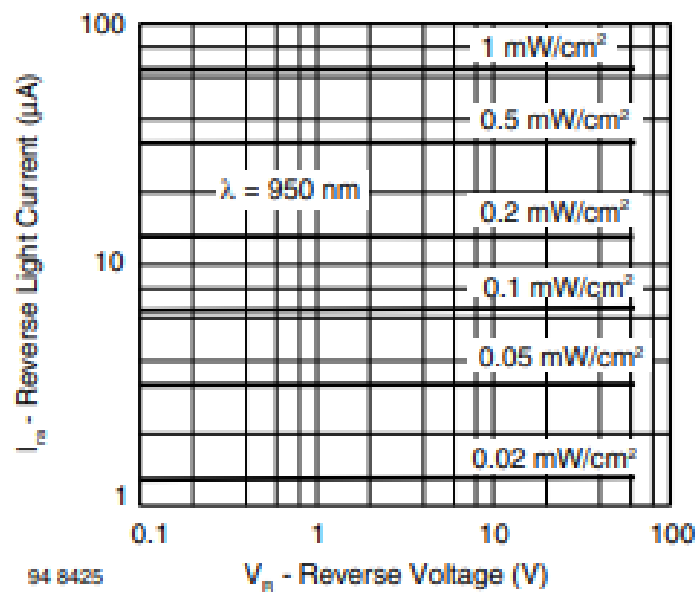


Рисунок 5.4 – Вольт-амперна характеристика для фотодіода BPW 34

Розрахуємо кількість люменів, що потрапляють на площу фотоприймача  $75 \text{ мм}^2$  для SMD3014:

$$\begin{aligned}
 S_m &:= 7.5 \cdot 10^{-6} \\
 L_m &:= 20 \\
 L_m &:= S \cdot L = 1.5 \times 10^{-4}
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

Скориставшись таблицею 1, ми визначимо що при довжині хвилі 460нм видність 41. Тоді:

$$P := \frac{L_m}{41} = 3.659 \times 10^{-6}
 \tag{5.8}$$

Отже дана потужність входять у заданий діапазон потужностей.

Розрахуємо кількість люменів, що потрапляють на площу фотоприймача 75 мм<sup>2</sup> для LED-508H184WC-HD:

$$\begin{aligned} S &:= 7.5 \cdot 10^{-6} \\ L &:= 40 \\ L_m &:= S \cdot L = 3 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Скориставшись таблицею 1, ми визначимо що при довжині хвилі 460нм видність 41. Тоді:

$$P := \frac{L_m}{41} = 7.317 \times 10^{-6} \quad (5.10)$$

Отже дана потужність входять у заданий діапазон потужностей.

Розрахуємо характеристики оптичного випромінювання на тлі внутрішніх завад.

$$\zeta_{\text{signal}} := 105.53$$

$$\zeta_{\text{fon}} := 40.48$$

$$q_{\text{signal}} := 307.23$$

$$q_{\text{fon}} := 62.32$$

$$p1(n) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot q_{\text{signal}}}} \cdot e^{\left[ -\frac{(n - \zeta_{\text{signal}})^2}{2q_{\text{signal}}} \right]}$$

$$p2(n) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot q_{\text{fon}}}} \cdot e^{\left[ -\frac{(n - \zeta_{\text{fon}})^2}{2q_{\text{fon}}} \right]}$$

$$n := 1..200$$

(5.11)

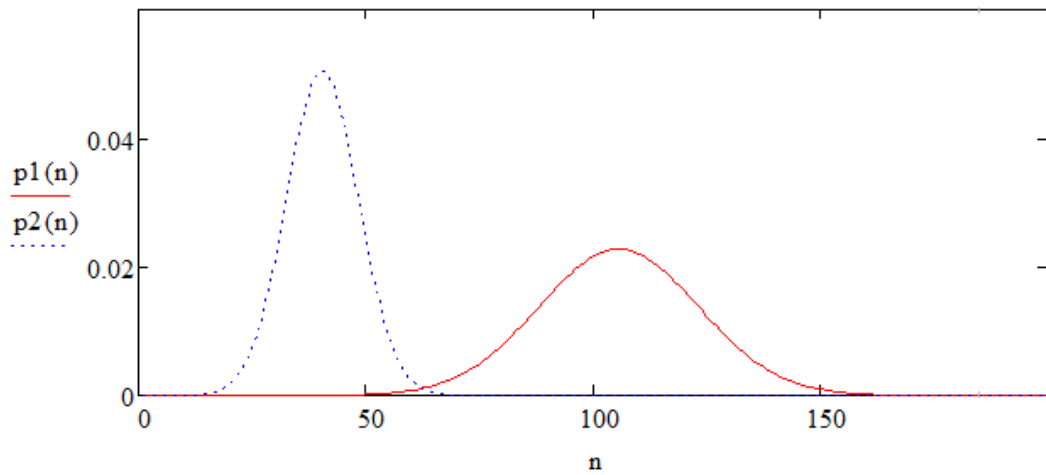


Рисунок 5.5 – Графік умовної імовірності появи помилкової відмітки й правильного виявлення сигналу для SMD3014

Таким чином, ми промодельовали та зробили реєстрацію оптичного сигналу, за допомогою діода та фотодіода.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи вдалося здійснити глибокий аналіз і вивчення сучасних методів і пристроїв, призначених для реєстрації оптичного випромінювання. Дослідження містило в собі ретельний огляд фізичних принципів взаємодії світла з різноманітними детекторами, розгляд сучасних технологій та їх застосування в різних галузях науки і техніки.

Було розглянуто теоретичні аспекти оптичної реєстрації, включно з фізичними явищами, які відбуваються під час взаємодії світла з різними матеріалами. Детальний аналіз методів реєстрації, таких як фотодетектори на основі ПЗС і КМОП, а також різноманітні прилади для вимірювань фотометричних величин, дав змогу визначити їхні переваги та обмеження.

Робота включала в себе і моделювання процесу реєстрації оптичного випромінювання за допомогою діода SMD3014 та фотодіода BPW 34, що дало змогу глибше розуміти взаємодію світла з фотодетекторами та покращити їх ефективність.

Загалом, отримані результати дають змогу зробити висновок, що дослідження методів і пристроїв реєстрації оптичного випромінювання є актуальним і важливим напрямом у сучасній науці та техніці. Розгляд сучасних досягнень у цій галузі та вдосконалення методів реєстрації мають велике значення для розвитку різних галузей науки і технологій.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Smith, John. "Principles of Optics. Cambridge University Press, 2017.
2. Saleh, Bahaa E. A., and Teich, Malvin C. Fundamentals of Photonics. Wiley, 2019.
3. Jaschke, Markus and Reisinger, Andreas. "Photodetectors: Devices, Circuits, and Applications. CRC Press, 2017.
4. Lakovich, Joseph R. Principles of Fluorescence Spectroscopy. Springer, 2006.
5. Johnson, Stephen G. and Blakemore, John S. Solid State Physics. Cambridge University Press, 2010.
6. Hecht, Eugene. "Optics. Addison-Wesley, 2017.
7. Sele, Mark. "Infrared and Millimetre Waves. CRC Press, 2016.
8. Green, Michael A. Photovoltaics: Devices, Systems and Applications. CRC Press, 2017.
9. Sakurai, T., Wakamori, K., Iida, S., Kagami, T., & Fujii, T. "A beam profile monitor based on a linear CCD sensor for high-intensity X-ray beams". Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Related Equipment, 593(1-2), 259-262. 2008.
10. <https://datasheetspdf.com/pdf/1112414/APTElectronics/LL-LG000N-000A6-T/1>
11. <https://datasheetspdf.com/pdf/124802/VishayTelefunken/BPW34/1>
12. Chen, C. H. "Analogue and digital signal processing. John Wiley & Sons, 2012.
13. Floyd, T. L. "Electronic devices: The traditional current version". Pearson, (2017).
14. Rashid, M. H. "Microelectronic Circuits: Analysis and Design". Cengage Learning, (2019).

15. Donald A. Niemen. "Microelectronic Circuits Analysis and Design. McGraw-Hill Education, (2017).
16. T. Strelkova, A. Strelkov, V. Kartashov, A. Lytyuga, A. Kalmykov. Methods of Reception and Signal Processing in Machine Vision Systems // Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0., 2021, Pages: 71-102. DOI: 10.4018/978-1-7998-6522-3.ch003. Монографія. Chapter 3 in book. IGI Global. USA.
17. Стрілкова Т.О., Литюга О.П. Формування вихідного сигналу оптико-електронних систем з обмеженим динамічним діапазоном // IX International Conference on Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2020" Ukraine, Vinnytsia, VNTU October 5-7, 2020, pp. 13.
18. Стрілкова Т. О., Калмиков О. С., Литюга О. П. Визначення ефективності оптико-електронних систем на основі статистичних моделей сигналів. XX Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», 18-19 травня 2021 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна, с. 19.
19. Стрілкова Т.О., Калмиков О.С., Бендебєря Г.М., Пятайкина М.І., Поліщук О.В. Стохастичні моделі вихідних сигналів в оптико-електронних системах. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології в науці та освіті», Сєверодонецьк. 22 - 23 квітня 2021. С. 256-259.
20. Калмиков О. С., Стрілкова Т. О. Моделювання процесу поширення оптичного випромінювання в анізотропному середовищі // XXII Міжнародна науково-технічна конференція "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи". Секція 2. Оптичні та оптико-електронні прилади системи. Фотоніка. 16-17 травня 2023 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна., С. 48-50.