

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Дмитро ТАТАРЧУК
«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
на тему: «Мультиспектральне джерело оптичних імпульсів»

Виконала:
студентка IV курсу, групи ДП-21
Годун Тетяна Олександрівна

Керівник: ст.викл.каф.МЕ, к.т.н.,
Воронько Андрій Олександрович

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.,
Свечніков Георгій Сергійович

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,
Діденко Юрій Вікторович

Рецензент:

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.
Студентка Годун Т. О. _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студентці

Годун Тетяни Олександрівни

1. Тема роботи «Мультиспектральне джерело оптичних імпульсів», керівник роботи ст.викл.каф.МЕ, к.т.н., Воронько Андрій Олександрович, затверджені наказом по університету від
«___» _____ 20__ р. №

2. Термін подання студентом роботи: 28.05.2026р.

3. Вихідні дані до роботи : Науково-технічна література, фіксований сигнал на п'ять обраних довжинах хвиль (470 нм, 540 нм, 627 нм та 940 нм), спектральні характеристики кремнієвих фотодіодів, інтерференційний фільтр з FWHM 15 нм, напівпрозорі дзеркала, наявність стабілізації оптичного сигналу.

4. Зміст роботи: Проведено аналіз існуючих джерел оптичного випромінювання та методів визначення спектральної чутливості фотоприймачів. Обґрунтовано вибір спектральних діапазонів, ширини спектральних каналів та основних параметрів мультиспектрального джерела. Розроблено концепцію мультиспектрального джерела оптичних імпульсів на основі світлодіодів, оптичну схему з використанням дихроїчних дзеркал та інтерференційного фільтру.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) : презентація до захисту роботи.

6. Дата видачі завдання: 02.02.2026р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання та ознайомлення з відповідною науковою літературою.	Лютий 2026	
2	Обґрунтування принципу побудови мультиспектрального джерела оптичних імпульсів, вибір спектральних діапазонів та джерел випромінювання.	Березень 2026	
3	Розроблення оптичної та структурної схеми, інтерференційного фільтру.	Квітень 2026	
4	Вимірювання характеристик світлодіодів.	Квітень 2026	
5	Оформлення дипломної роботи	Травень 2026	

Студентка

Керівник

Тетяна ГОДУН

Андрій ВОРОНЬКО

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 66 сторінках, вона містить 4 розділи, 30 ілюстрацій, 6 таблиць та 21 джерело у переліку посилань.

Об'єктом дослідження є мультиспектральні оптоелектронні системи для формування та керування оптичним випромінюванням з дискретними спектральними каналами, призначені для експрес-дослідження спектральних характеристик фотодетекторів.

Предмет роботи – спектральні, енергетичні та конструктивні параметри мультиспектрального джерела оптичних імпульсів на основі світлодіодних випромінювачів, інтерференційних фільтрів, дихроїчних дзеркал та системи стабілізації оптичної потужності.

Мета роботи – розробка принципів побудови мультиспектрального джерела оптичних імпульсів для експрес-визначення спектральної чутливості фотодетекторів шляхом формування набору вузькосмугових спектральних каналів у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах.

У першому розділі проведено аналіз основних типів напівпровідникових джерел оптичного випромінювання, зокрема світлодіодів (LED), суперлюмінесцентних діодів (SLD) та лазерних діодів (LD). Розглянуто їх принцип роботи, конструктивні особливості, переваги та недоліки. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність використання світлодіодів як джерела оптичного випромінювання для мультиспектральної системи.

У другому розділі виконано вибір робочих довжин хвиль мультиспектрального джерела та проведено підбір світлодіодів для кожного спектрального каналу. Обґрунтовано вибір конструктивних та оптоелектронних параметрів системи, а також застосування інтерференційного фільтра з FWHM 15 нм для підвищення спектральної селективності та зменшення перекривання сусідніх каналів.

У третьому розділі розроблено функціональну та оптичну схеми мультиспектрального джерела оптичних імпульсів. Для об'єднання

випромінювання каналів в одну оптичну вісь використано напівпрозорі дзеркала. Проведено моделювання багатошарової структури інтерференційного фільтра на основі шарів TiO_2 та SiO_2 , а також розглянуто модуль стабілізації оптичної потужності із використанням фотодіода та системи зворотного зв'язку.

У четвертому розділі запропоновано методику вимірювання спектральної чутливості фотоприймачів за допомогою розробленого мультиспектрального джерела. Розглянуто принцип формування вимірювальних сигналів та особливості експрес-аналізу спектральних характеристик.

Ключові слова: Мультиспектральне джерело оптичних імпульсів, світлодіод, фотодіод, інтерференційний фільтр, дихроїчне дзеркало, спектральна чутливість.

ABSTRACT

The thesis consists of 66 pages and includes 4 chapters, 30 figures, 6 tables, and 21 references.

The object of research is multispectral optoelectronic systems for generating and controlling optical radiation with discrete spectral channels intended for rapid investigation of photodetector spectral characteristics.

The subject of research is the spectral, energy, and structural parameters of a multispectral optical pulse source based on light-emitting diodes, interference filters, dichroic mirrors, and an optical power stabilization system.

The aim of the work is to investigate the design principles and develop the concept of a multispectral optical pulse source for rapid determination of photodetector spectral sensitivity by generating a set of narrow-band spectral channels in the visible and near-infrared wavelength ranges.

The first chapter presents an analysis of the main types of semiconductor optical radiation sources, including light-emitting diodes (LEDs), superluminescent diodes (SLDs), and laser diodes (LDs). Their operating principles, design features, advantages, and disadvantages are considered. Based on the performed analysis, the feasibility of using LEDs as radiation sources for the multispectral system is substantiated.

The second chapter describes the selection of operating wavelengths for the multispectral source and the choice of LEDs for each spectral channel. The selection of structural and optoelectronic parameters of the system is justified, as well as the application of an interference filter with a FWHM of 15 nm to improve spectral selectivity and reduce the overlap of adjacent channels.

The third chapter presents the development of functional and optical schemes of the multispectral optical pulse source. Dichroic mirrors are used to combine the radiation of individual channels into a single optical axis. The multilayer structure of an interference filter based on TiO_2 and SiO_2 layers is modeled, and an optical

power stabilization module using a photodiode and a feedback system is considered.

The fourth chapter proposes a method for measuring the spectral responsivity of photodetectors using the developed multispectral source. The principles of measurement signal generation and the features of rapid spectral characteristic analysis are discussed.

Keywords: multispectral optical pulse source, light-emitting diode, photodiode, interference filter, dichroic mirror, spectral responsivity.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ	11
1.1 Огляд існуючих джерел випромінювання.....	11
Висновки до розділу 1	19
РОЗДІЛ 2 ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА	20
2.1 Вибір робочих довжин хвиль мультиспектрального джерела....	20
2.2 Обґрунтування спектральних та енергетичних параметрів джерела	27
Висновки до розділу 2	31
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ОПТИЧНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ	32
3.1 Створення структурної схеми	32
3.2 Оптична схема системи	34
3.3 Інтерференційний фільтр та моделювання багат шарових структур	37
3.4 Модуль стабілізації оптичної потужності	44
Висновки до розділу 3	50
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ	51
4.1 Методика вимірювання спектральної чутливості фотоприймачів	51
Висновки до розділу 4	61
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

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

LED – Light Emitting Diode;

LD – Laser Diode;

SLD – Superluminescent Diode;

FWHM – Full Width at Half Maximum;

ФД – фотодіод;

ВАХ – вольт-амперна характеристика.

ВСТУП

У сучасній оптоелектроніці дослідження спектральних характеристик джерел випромінювання є важливим етапом для розробки та оптимізації електронних і оптичних систем. Зазвичай такі вимірювання виконуються за допомогою спеціальних приладів, спектрометрів, які забезпечують високу точність аналізу. Проте подібні методи є досить трудомісткими та вимагають багато часу.

У зв'язку з цим актуальним є пошук альтернативних підходів до швидкого визначення спектральних характеристик фотодетекторів. Для експрес-аналізу з одночасним вимірюванням динамічного діапазону, фоточутливості та підвищенням ефективності досліджень, доцільно використовувати спрощені методи.

Основна ідея полягає у формуванні випромінювання з декількома фіксованими довжинами хвиль та подальшому відтворенні спектральної характеристики досліджуваного об'єкта за обмеженою кількістю вимірювальних точок.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Огляд існуючих джерел випромінювання

Світло є лише частиною широкого спектра електромагнітного випромінювання, яке охоплює надзвичайно широкий діапазон довжин хвиль — від радіохвиль із довжиною хвилі понад один метр до рентгенівського випромінювання з довжиною хвилі меншою за один нанометр. [1]

Оптичне випромінювання займає проміжне положення між радіохвилями та рентгенівським випромінюванням .

Енергія, що випромінюється, складається з безперервного, неоднорідного розподілу монохроматичних компонентів. Величина випромінювання та спектральний розподіл залежать від природи та температури поверхні, що випромінює [20].

У діапазоні коротких довжин хвиль, зокрема для рентгенівського випромінювання, переважають корпускулярні властивості електромагнітного випромінювання. Натомість зі збільшенням довжини хвилі дедалі більшого значення набувають хвильові властивості. Видиме світло займає проміжне положення між цими крайніми випадками, тому його поведінка описується як хвильовими, так і квантовими законами.[2]

Подібно до інших електромагнітних хвиль, світло здатне інтерферувати, поляризуватися та дифрагувати. Завдяки цим властивостям можливе фільтрування випромінювання за довжиною хвилі, а також підсилення випромінювання в лазерних системах. У більшості практичних оптичних систем поширення світла розглядають у межах геометричної оптики, де світлове випромінювання описується як сукупність променів, що поширюються прямолінійно. Лінзи, дзеркала та інші оптичні елементи дозволяють керувати напрямком поширення цих променів і формувати необхідні характеристики оптичної системи.

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання характеризується більш вираженими квантовими властивостями порівняно з видимим та інфрачервоним випромінюванням. Ультрафіолетовий діапазон умовно поділяють на три області: UV-A, UV-B та UV-C.

Випромінювання UV-A має найбільшу довжину хвилі та найменшу енергію серед ультрафіолетових діапазонів. Завдяки цьому воно вважається відносно безпечним та широко використовується в освітлювальних системах, фототерапії, а також для збудження люмінесцентних матеріалів. Під дією UV-A багато речовин випромінюють видиме світло, що створює ефект світіння в темряві.

У сучасних оптоелектронних системах як джерела випромінювання найбільш широко застосовуються світлодіоди (LED — Light Emitting Diode), суперлюмінесцентні діоди (SLD — Superluminescent Diode) та лазерні діоди (LD — Laser Diode).

Світлодіоди та лазерні діоди належать до люмінесцентних напівпровідникових приладів, принцип роботи яких базується на електролюмінесценції — генерації світла під дією електричного струму через р–n перехід.

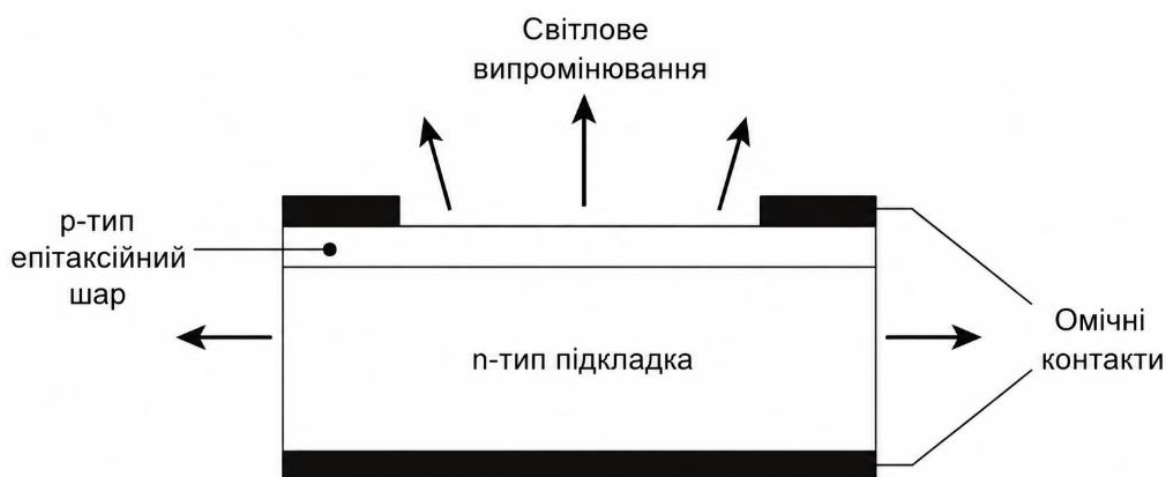


Рисунок 1.1 — Структура планарного світлодіода з випромінюванням світла

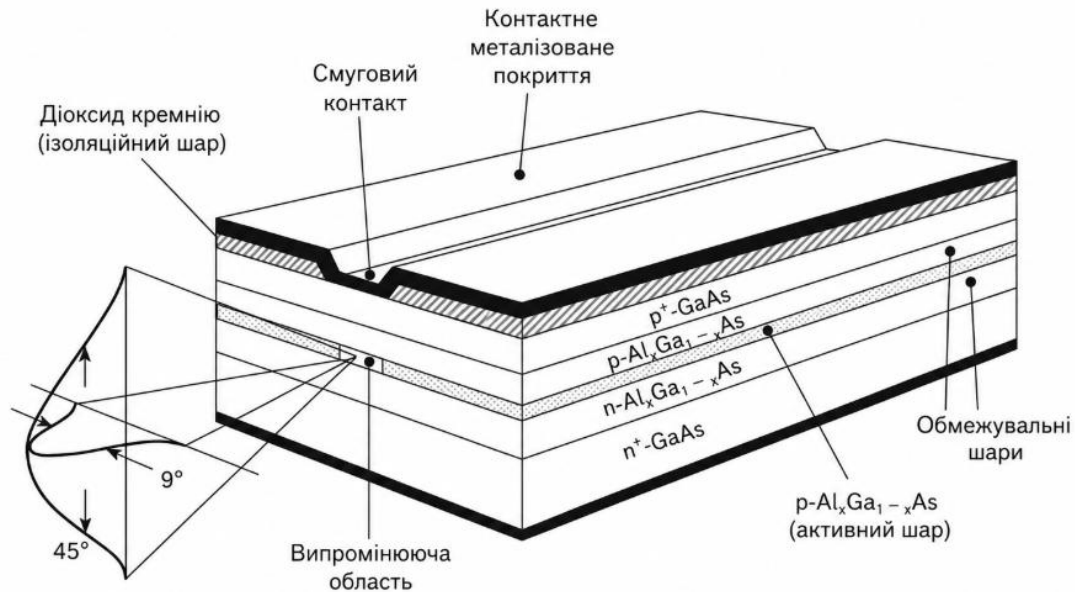


Рисунок 1.2 — Схематичне зображення оксидно-ізольованого інжекційного лазера з подвійною гетероструктурою AlGaAs.[4]

Суперлюмінесценція — це явище випромінювання активного шару електролюмінесцентного напівпровідника, в якому сильною зустрічною інжекцією створено виродження за електронами та дірками, внаслідок чого для рекомбінаційних фотонів з енергіями, трохи більшими за ширину забороненої зони, поглинальне середовище активного шару перетворюється в підсилювальне.[5]

Суперлюмінесцентний діод є напівпровідниковим джерелом випромінювання, у якому світло генерується внаслідок рекомбінації електронів і дірок та додатково підсилюється в активній області кристала. Завдяки цьому SLD поєднує високу оптичну потужність лазерних діодів із широким спектром випромінювання світлодіодів.

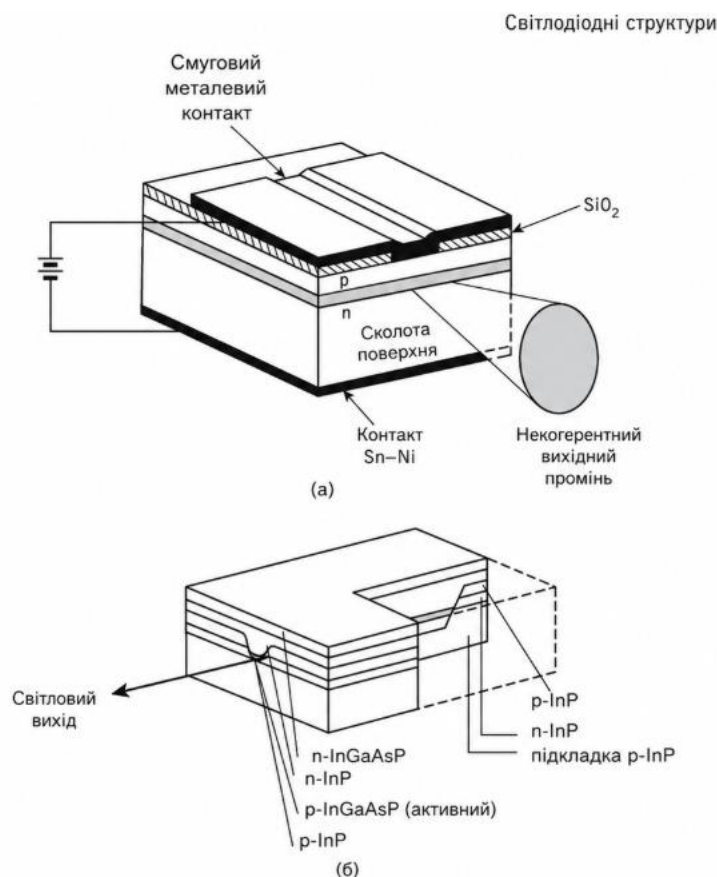


Рисунок 1.3 — Конструкції суперлюмінесцентних світлодіодів: а) структура AlGaAs SLD зі смуговим контактом та бічним виходом випромінювання; б) багатшарова структура InGaAsP SLD з активною областю та підвищеною вихідною потужністю.[4]

Для джерел освітлення використовуються потужні кольорові люмінесцентні діоди. Для покриття заданих діапазонів довжин хвиль також можуть використовуватися люмінесцентні діоди з нанесеними люмінесцентними речовинами для перетворення кольору.

Перші світлодіоди промислового призначення були створені на початку 1960-х років і випромінювали світло переважно в червоній області спектра. На той час основними джерелами освітлення залишалися лампи розжарювання, люмінесцентні та газорозрядні лампи, а світлодіоди використовувалися лише як малопотужні індикатори. [1]

Подальший розвиток напівпровідникових матеріалів та технологій виготовлення дозволив значно розширити спектральний діапазон випромінювання світлодіодів і підвищити їх ефективність. Згодом були розроблені жовті, зелені та сині світлодіоди, що стало важливим етапом розвитку сучасної оптоелектроніки. Особливо значущою подією стало створення високоефективних синіх світлодіодів, які відкрили можливість отримання білого світла та створення світлодіодних систем освітлення.

Для світлодіодів характерне некогерентне випромінювання, типова ширина спектральної лінії LED становить приблизно 5–20 нм. Така ширина спектра дозволяє формувати окремі спектральні області без використання складних оптичних систем. У видимому діапазоні ширина спектра випромінювання світлодіодів становить близько 10 нм. [6]

Лазерні діоди, навпаки, формують когерентне монохроматичне випромінювання з дуже вузькою спектральною лінією, ширина якої може становити 0,01–0,1 нм. [6] Це забезпечує високу монохроматичність та спрямованість випромінювання, проте значно ускладнює використання LD у мультиспектральних системах. Також перевагою лазерних діодів, порівняно з іншими джерелами, є їх вища оптична потужність.

Світлодіоди мають ряд важливих переваг. LED не потребують складних системи охолодження або стабілізації параметрів. Крім того, мають меншу температурну залежність випромінюваної потужності та простішу систему керування. LED дозволяють реалізувати мультиспектральну систему з декількома довжинами хвиль у широкому діапазоні спектра - від фіолетового до ближнього інфрачервоного випромінювання.

Недоліками світлодіодів є нижча оптична потужність та менша яскравість порівняно з лазерними діодами. Крім того, широка спектральна характеристика LED не дозволяє отримати вузькосмугове монохроматичне випромінювання, необхідне для високоточних спектральних вимірювань та мають нижчу швидкодію у порівнянні з LD.

Лазерні діоди мають високу потужність випромінювання, вузьку спектральну лінію та високу швидкодію, що робить їх ефективними для систем оптичного зв'язку та високоточних вимірювальних систем. Проте через високу когерентність лазерного випромінювання у системі можуть виникати інтерференційні ефекти та спекл-шуми. Спекл-шум лазерного випромінювання не змінює власну спектральну характеристику лазера, однак суттєво впливає на результати вимірювання спектральної чутливості. Через високу когерентність лазерного випромінювання після відбиття або розсіювання на елементах оптичної системи виникає інтерференційна картина у вигляді випадкових світлих і темних ділянок. Унаслідок цього фотоприймач реєструє нерівномірний розподіл інтенсивності, що може призводити до появи хибних максимумів і мінімумів на вимірній спектральній характеристиці.[7]

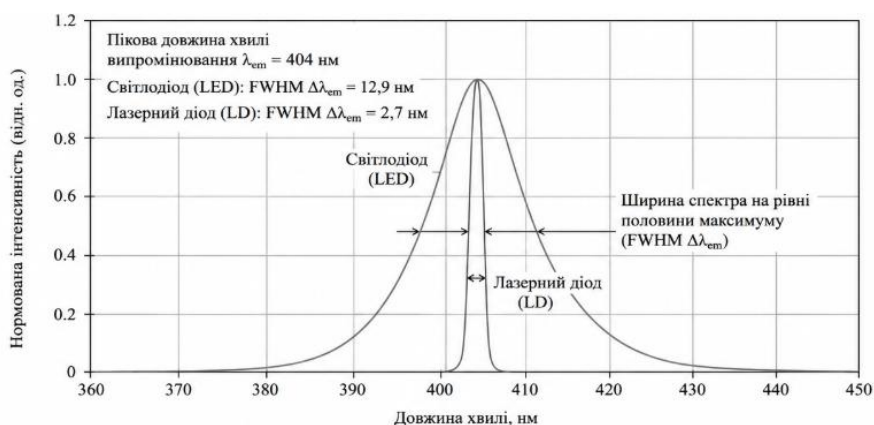


Рисунок 1.4 — Порівняльна спектральна характеристика LED та LD[8]

Як видно з рисунка 1.4, лазерний діод характеризується значно вузьким спектром випромінювання порівняно зі світлодіодом. На перший погляд це може свідчити про перевагу лазерних джерел для формування вузьких спектральних каналів. Однак реальний спектр лазерного діода є складнішим, ніж показано на спрощеній спектральній характеристиці.

Випромінювання лазерного діода формується в оптичному резонаторі та складається з набору дозволених мод. Кожна мода відповідає певній довжині хвилі, що задовольняє умови резонансу в лазерній порожнині.

Залежно від конструкції лазера та режиму його роботи можуть виникати як поздовжні, так і поперечні моди. У результаті спектр лазерного випромінювання може містити декілька спектральних піків замість однієї ідеально вузької лінії.

Наявність модової структури призводить до нерівномірного розподілу оптичної потужності між окремими спектральними складовими та ускладнює формування стабільних спектральних каналів. Крім того, положення та інтенсивність окремих мод можуть змінюватися під впливом температури, струму накачування та інших зовнішніх факторів.

Для наочності на рисунку 1.5 наведено приклади спектрів багатомодових інжекційних лазерів, які демонструють вплив поздовжніх і поперечних мод на форму спектральної характеристики.

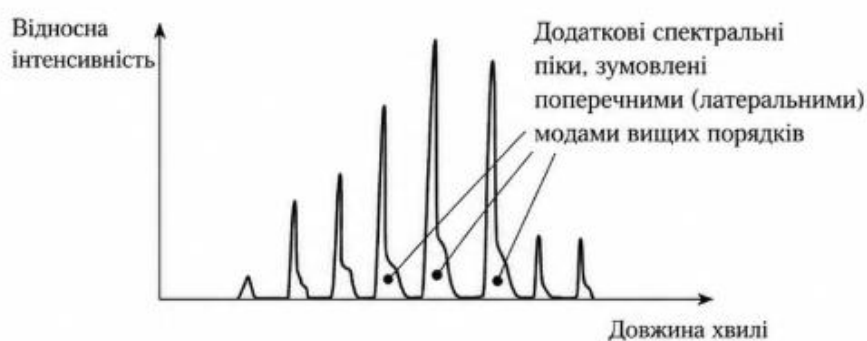


Рисунок — 1.5 Спектральна характеристики багатомодового інжекційного лазера[4]

Проте для реалізації мультиспектрального джерела оптичних імпульсів використання саме світлодіодів є більш доцільним. На відміну від лазерних діодів, LED не створюють виражених інтерференційних ефектів та спекл-шумів, які можуть спотворювати результати спектральних вимірювань і широка спектральна характеристика LED є перевагою, оскільки дозволяє реалізувати швидкий експрес-аналіз спектральної чутливості за декількома контрольними точками спектра без використання складних систем. Суперлюмінесцентні діоди також характеризуються низьким рівнем когерентності та практично не створюють спекл-шумів,

проте їх використання пов'язане з меншою доступністю широкого набору довжин хвиль.

Таблиця 1.1 — Порівняння характеристик джерел випромінювання.

Параметр	LED	SLD	LD
Ширина спектра	10–50 нм	10–100 нм	<1 нм
Оптична потужність	Достатня	Висока	Дуже висока
Когерентність	Відсутня	Низька	Висока
Складність конструкції	Низька	Середня	Висока
Чутливість до температури	Низька	Середня	Висока
Необхідність стабілізації	Мінімальна	Потрібна	Обов'язкова
Спекл-шуми	Відсутні	Помірні	Високі

Висновки до розділу 1

У даному розділі проведено аналіз основних типів напівпровідникових джерел оптичного випромінювання, а саме світлодіодів, суперлюмінесцентних та лазерних діодів. Розглянуто їх конструктивні особливості, принцип роботи та основні експлуатаційні характеристики, які впливають на можливість їх використання .

За результатами проведеного аналізу встановлено, що світлодіоди є найбільш доцільними джерелами випромінювання для реалізації мультиспектральної системи. Їх використання забезпечує широкий вибір довжин хвиль у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, простоту керування, низьку вартість реалізації та відсутність негативного впливу когерентних ефектів на роботу системи.

На основі проведеного аналізу сформовано концепцію, розглянуто порівняння, та обрано як основу джерел випромінювання світлодіоди із різними довжинами хвиль.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ

2.1 Вибір робочих довжин хвиль мультиспектрального джерела

Вибір довжин хвиль обумовлений спектральною чутливістю кремнієвих фотодетекторів.

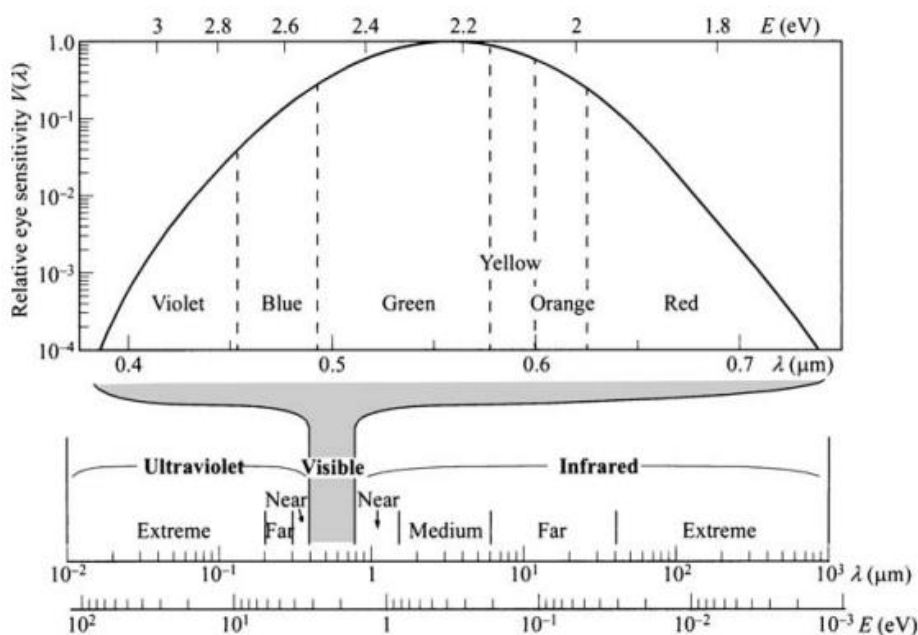


Рисунок 2.1 — Видимий спектральний діапазон електромагнітного випромінювання. [5]

Для коректної роботи мультиспектрального джерела важливо, щоб спектральні канали не перекривалися між собою. Перекривання сусідніх спектральних смуг може призвести до появи додаткового фотосигналу на виході фотоприймача та спотворити результат визначення спектральної чутливості. Тому для кожного каналу використовується вузькосмуговий інтерференційний фільтр, який пропускає випромінювання лише в околі заданої довжини хвилі та пригнічує сусідні спектральні складові.

Ідея даного мультиспектрального джерела полягає у вирізанні вузьких спектральних ділянок світла для подальшого вимірювання спектральної характеристики фотодетекторів. З цією метою використано інтерференційні фільтри з FWHM 15 нм. Таке значення дозволяє

формувати чітко розділені спектральні канали та отримувати правильні результати вимірювань.

На рисунку 2.2 наведено спектральні характеристики світлодіодів та відносну спектральну чутливість кремнієвого фотодіода S1336-BQ. Аналіз наведених характеристик дозволив обґрунтувати вибір довжин хвиль, які використовуються в розроблюваному мультиспектральному джерелі оптичних імпульсів.

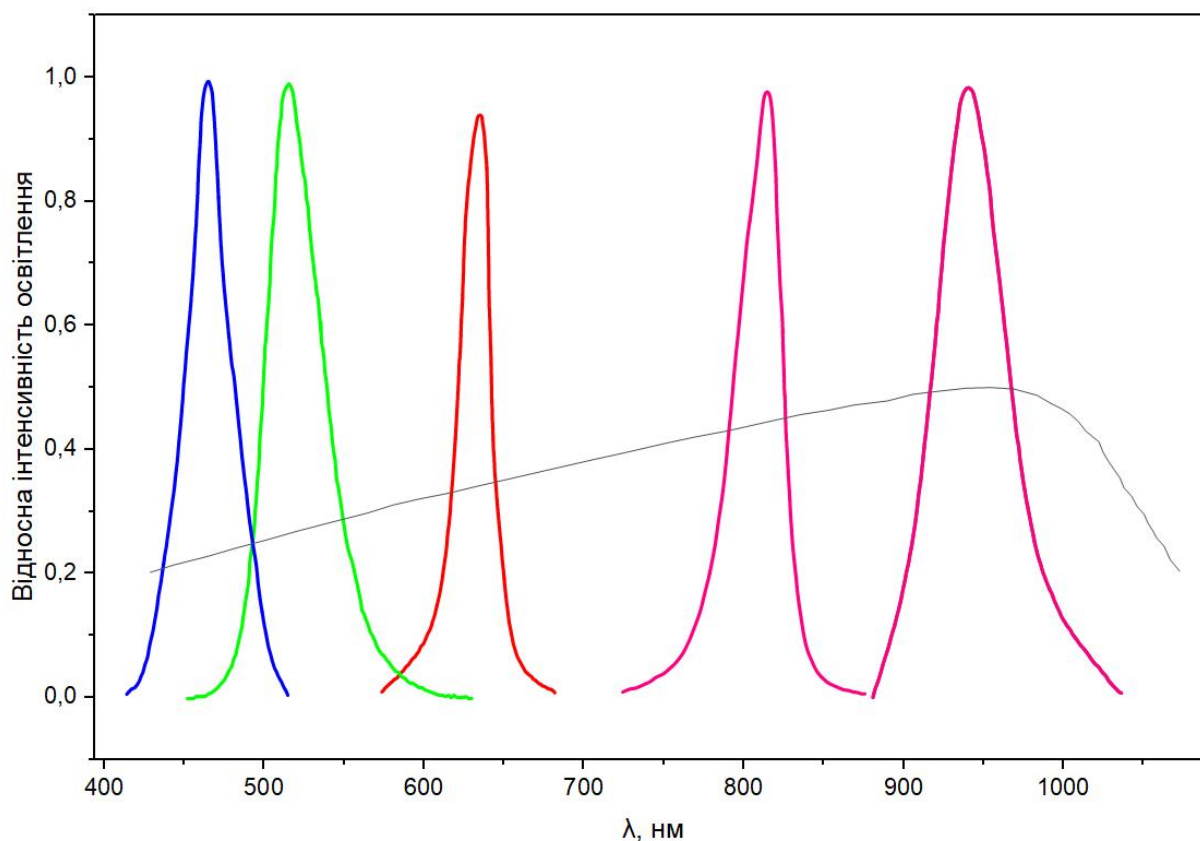


Рисунок 2.2 — Розташування спектральних каналів (400 нм, 470 нм, 580 нм, 670 нм, 940 нм) відносно спектральної характеристики чутливості фотодіода S1336-BQ

У даній роботі для спектральних каналів обрано довжини хвиль 470 нм, 540 нм, 627 нм, 810 нм та 940 нм, вони перекривають весь діапазон спектральної чутливості кремнієвого фотодіода S1336-BQ та зручні для апроксимації.

Підібравши довжини хвиль для мультиспектрального джерела, по цим довжинам хвиль було проведено аналіз і знайдено світлодіоди з потрібними характеристиками для кожної довжини хвилі.

Для кожного спектрального каналу було проведено експериментальне вимірювання їх спектральних характеристик за допомогою волоконно-оптичного спектрометра. Отримані спектральні залежності дозволили визначити фактичне положення максимуму випромінювання та FWHM.

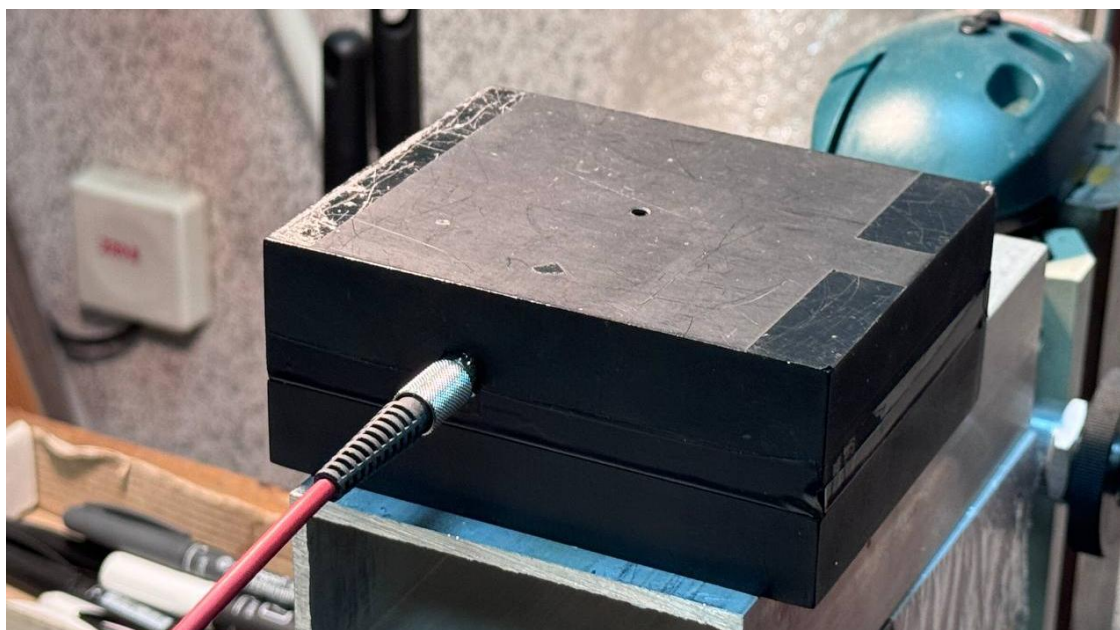


Рисунок 2.3 — Волоконно-оптичний спектрометр

Для формування спектрального каналу 470 нм обрано світлодіод S170BC-B4-1A виробництва Lucky Light. Світлодіод виготовлений на основі напівпровідникового матеріалу InGaN (індій-галій-нітрид), який забезпечує випромінювання в синій області спектра. Домінуюча довжина хвилі становить 470 нм, FWHM — 30 нм . [10]

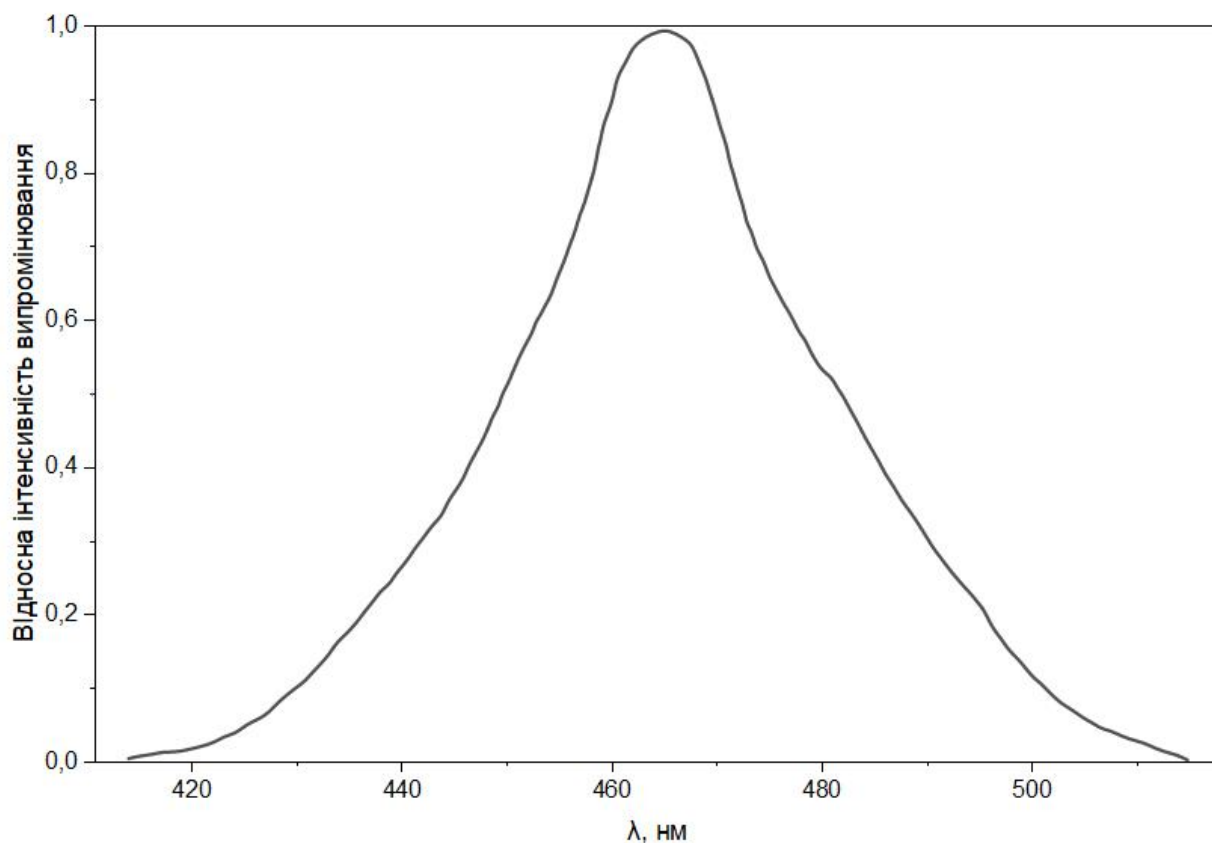


Рисунок 2.4 — Спектральна характеристика синього світлодіода з максимумом випромінювання 470 нм[10]

Для спектрального каналу 540 нм обрано потужний зелений світлодіод LZ1-00G105 компанії LedEngin. Випромінювання формується напівпровідниковою структурою на основі InGaN (індій-галій-нітрид). Довжина хвилі світлодіода знаходиться в діапазоні близько 523-540 нм, FWHM — 40 нм.[11]

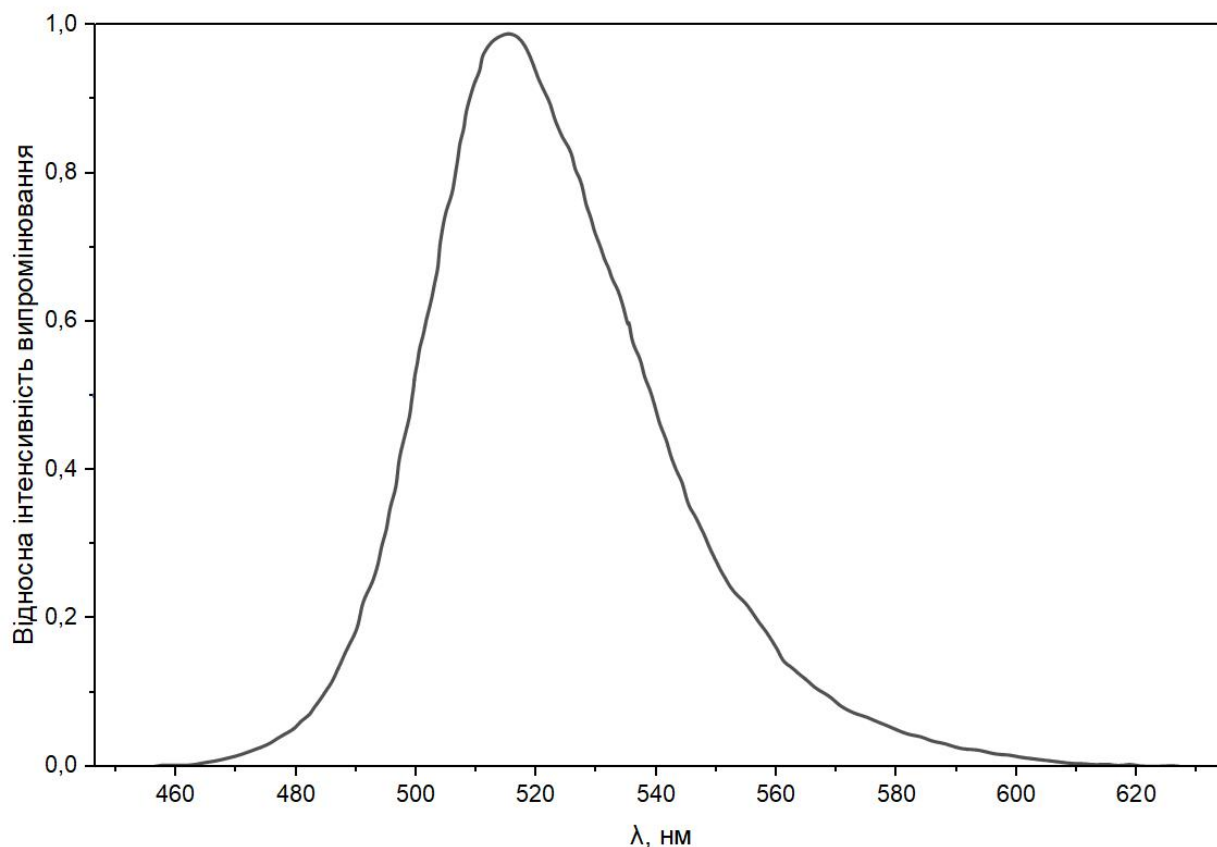


Рисунок 2.5 — Спектральна характеристика зеленого світлодіода з максимумом випромінювання 540 нм[11]

Для червоного спектрального каналу використано світлодіод OF-SMD3216R. Кристал світлодіода виготовлений з матеріалу AlGaInP (алюміній-галій-індій-фосфід), який широко застосовується для створення високоефективних червоних та помаранчевих світлодіодів. Домінуюча довжина хвилі випромінювання знаходиться в межах 620 — 630 нм, що відповідає обраному спектральному каналу 627 нм, FWHM — 20 нм.[12]

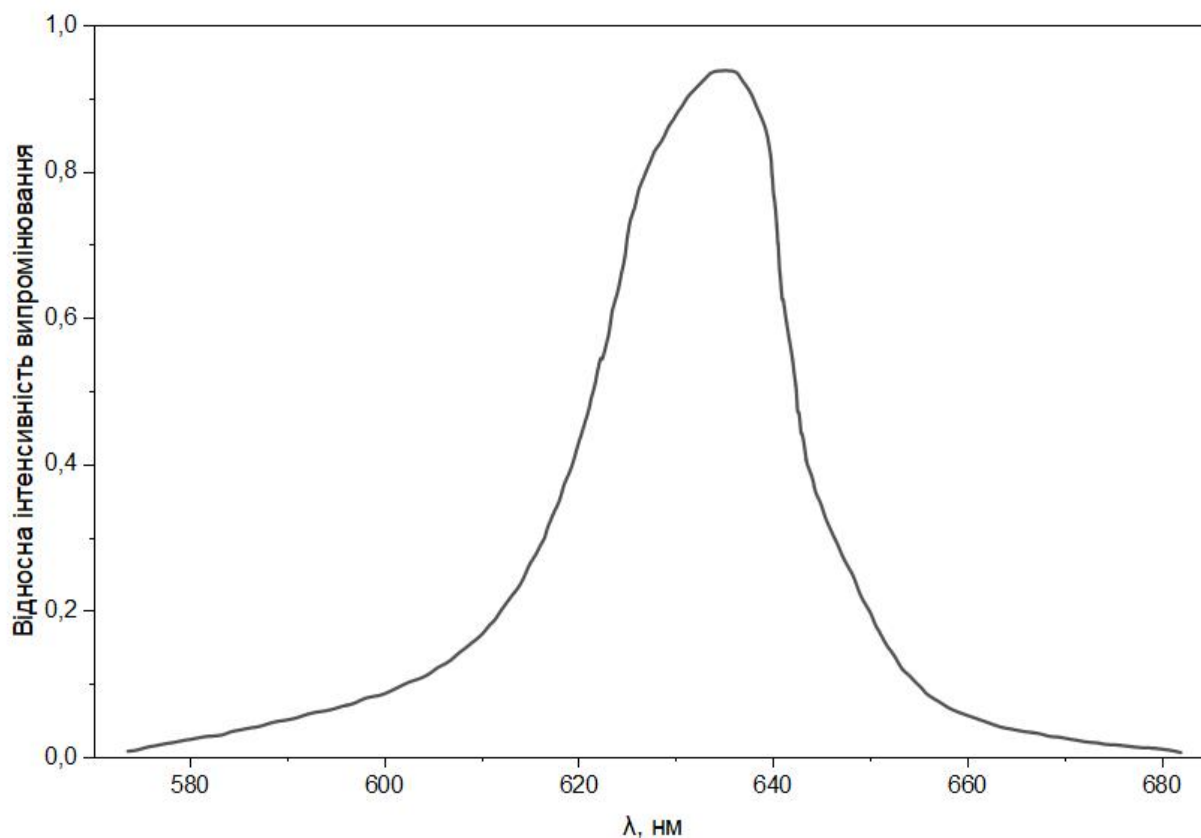


Рисунок 2.6 — Спектральна характеристика червоного світлодіода з максимумом випромінювання 627 нм[12]

Для ближнього інфрачервоного каналу використано світлодіод VSMY98145DS компанії Vishay Semiconductors. Світлодіод виготовлений за технологією поверхневого випромінювання (Surface Emitter Technology) та має максимум спектральної характеристики на довжині хвилі 810 нм. Прилад призначений для високошвидкісних оптоелектронних систем і забезпечує значну випромінювану потужність, FWHM — 30 нм.[13]

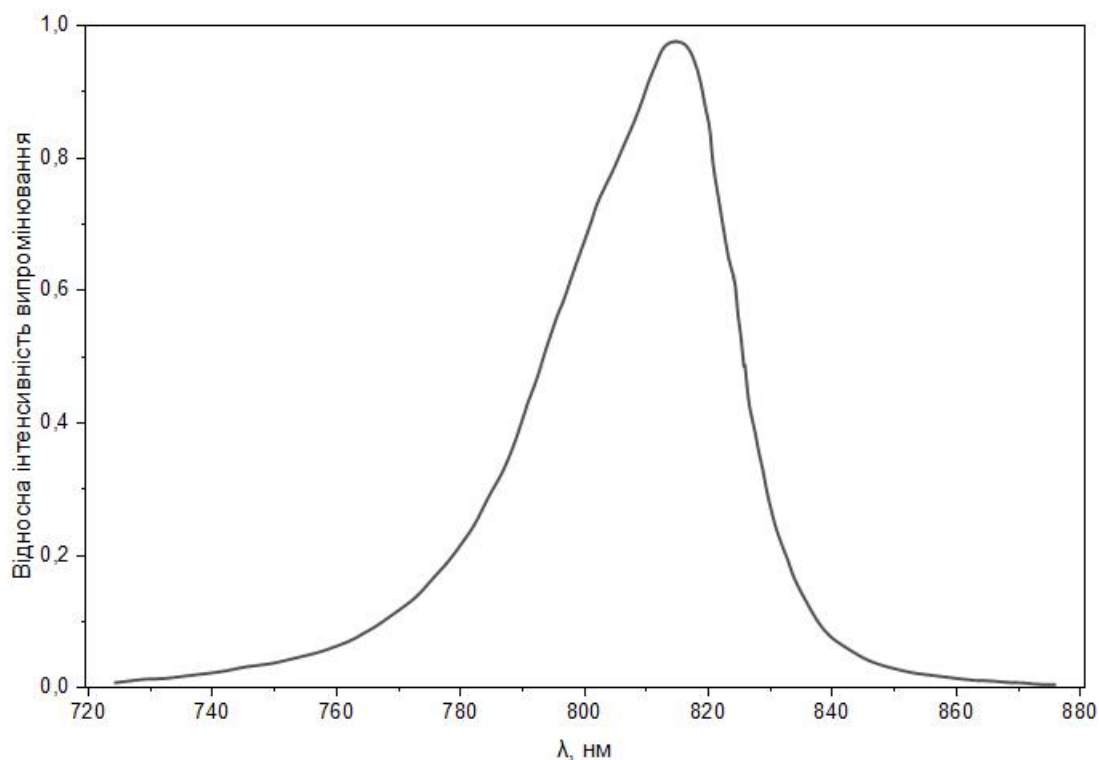


Рисунок 2.7 — Спектральна характеристика інфрачервоного світлодіода з максимумом випромінювання 810 нм[13]

Для інфрачервоного каналу 940 нм використано світлодіод IR15-21C/TR8 виробництва Everlight. Кристал світлодіода виготовлений з матеріалу GaAlAs (галій-алюміній-арсенід), який є одним із найбільш поширених матеріалів для інфрачервоних світлодіодів. Максимум спектральної характеристики знаходиться на довжині хвилі 940 нм, FWHM — 50 нм. [14]

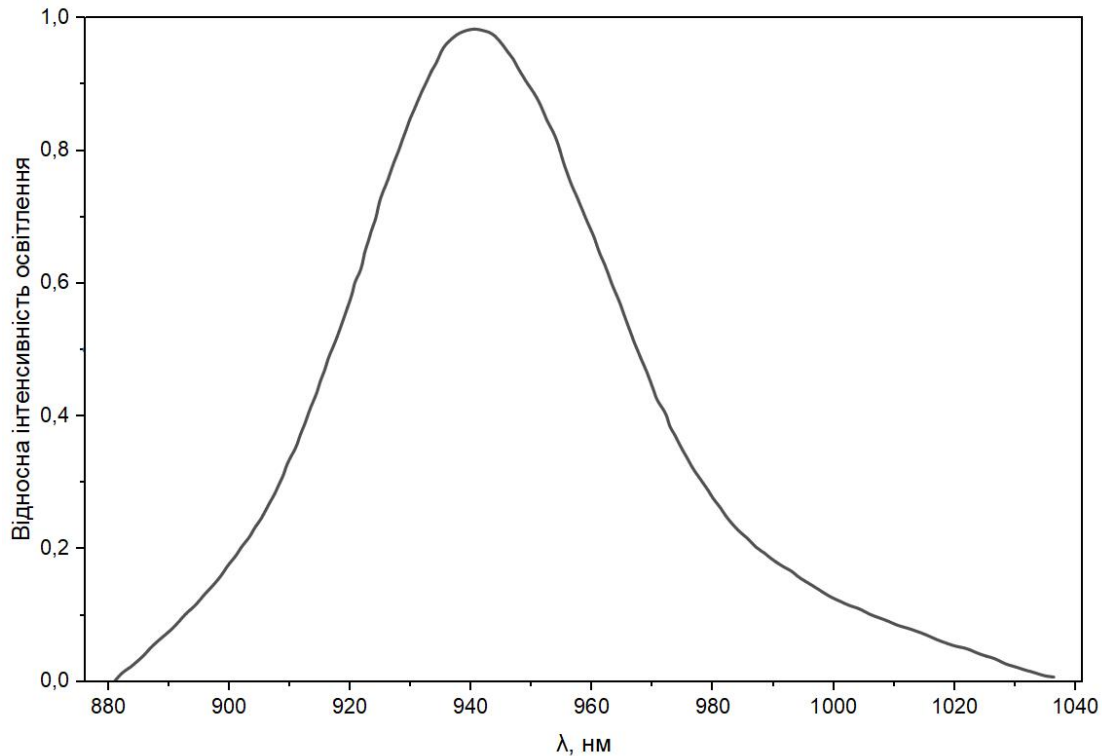


Рисунок 2.8 — Спектральна характеристика інфрачервоного світлодіода з максимумом випромінювання 940 нм[14]

2.2 Обґрунтування спектральних та енергетичних параметрів джерела

Для характеристики оптичного випромінювання вводяться дві системи фотометричних параметрів — енергетичні та світлові.

Спектральні параметри джерела визначаються центральною довжиною хвилі кожного каналу та шириною спектральної смуги випромінювання. Центральна довжина хвилі λ_{max} відповідає максимуму випромінювання світлодіода.

Важливим параметром є ширина спектральної смуги випромінювання на рівні половини максимальної інтенсивності — FWHM. Вона показує, у якому інтервалі довжин хвиль зосереджена основна частина випромінювання світлодіода. Для кожного спектрального каналу ширину смуги можна визначити за спектральною характеристикою світлодіода:

$$\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (2.1)$$

де λ_2, λ_1 — довжини хвиль, на яких інтенсивність випромінювання дорівнює половині максимального значення.

Для даної роботи доцільно прийняти ширину спектрального каналу близько 15 нм. Додаткове звуження спектральної області забезпечується інтерференційним фільтром, який пропускає лише потрібну ділянку спектра та відсікає зайве випромінювання.

Значення ширини спектрального каналу 15 нм було обрано за результатами аналізу технічної документації на світлодіоди різних виробників. Проведений аналіз показав, що типова ширина спектра випромінювання світлодіодів у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах становить від 20 до 50 нм. Використання інтерференційного фільтра з FWHM 15 нм дозволяє виділити центральну частину спектра випромінювання світлодіода, у якій зосереджена основна частина оптичної потужності, одночасно забезпечуючи достатню спектральну селективність. Таким чином, значення 15 нм є компромісом між спектральною роздільною здатністю системи та рівнем оптичної потужності на виході джерела.

Теоретично можливо використовувати фільтри з меншою шириною смуги пропускання, наприклад 5–10 нм, що дозволило б підвищити спектральну роздільну здатність системи. Проте при цьому суттєво зменшується оптична потужність, а також зростають вимоги до стабільності джерел випромінювання та точності оптичного налаштування, такі рішення характерні для високоточних спектральних вимірювальних систем і спектрометрів.

Енергетичним параметром джерела є оптична потужність випромінювання. Для світлодіода вона залежить від струму живлення, типу напівпровідникового матеріалу, ефективності випромінювання, температури та втрат в оптичній системі. Оптичну потужність можна визначити експериментально за допомогою фотодіода чи вимірювача оптичної потужності.

Якщо використовується фотодіод, то оптична потужність визначається через фотострум

$$P_{\text{опт}} = \frac{I_{\Phi}}{R_{\lambda}} \quad (2.2)$$

де $P_{\text{опт}}$ — оптична потужність, I_{Φ} — фотострум фотодіода, R_{λ} — спектральна чутливість фотодіода на відповідній довжині хвилі.

Фотострум визначається як різниця між струмом фотодіода при освітленні та темновим струмом

$$I_T = I_s (e^{\frac{qV_D}{nk_B T}} - 1) \quad (2.3)$$

де $I_{\text{фд}}$ — оптична потужність, I_{Φ} — фотострум фотодіода, I_T — темновий струм.

Темновий струм фотодіода визначається наступним чином

$$I_T = I_s (e^{\frac{qV_D}{nk_B T}} - 1) \quad (2.4)$$

де I_s — зворотній струм насичення фотодіода; q — елементарний заряд електрона; V_D — напруга фотодіода; n — фактор ідеальності; k_B — константа Больцмана; T — температура навколишнього середовища.

Це важливо, оскільки темновий струм існує навіть без освітлення і може вносити похибку у вимірювання, особливо при малих рівнях оптичної потужності.

Динамічний діапазон визначає, у яких межах система може реєструвати зміну оптичного сигналу без втрати точності. Він залежить від максимальної потужності, яку може прийняти фотоприймач без насичення, та мінімальної

потужності, яку ще можна відрізнити від шуму. У логарифмічній формі динамічний діапазон визначається

$$D = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) \quad (2.5)$$

де $P_{\max}$ — максимальна допустима оптична потужність, $P_{\min}$ — мінімальна реєстрована оптична потужність.

Швидкодія джерела визначається здатністю світлодіода формувати короткі оптичні імпульси. Вона залежить від часу наростання та спаду імпульсу, ємності р–п переходу, схеми керування та часу рекомбінації носіїв заряду. Для оцінки швидкодії можна використовувати час наростання імпульсу t_r або граничну частоту модуляції

$$f = \frac{0.35}{t_r} \quad (2.6)$$

де t_r — час наростання імпульсу.

Чим менший час наростання, тим вища швидкодія джерела. Для даної роботи надвисока швидкодія не є основною вимогою, оскільки джерело призначене не для передавання інформації, а для послідовного формування оптичних імпульсів на різних довжинах хвиль. Тому достатньо забезпечити стабільне перемикання каналів та відтворюваність амплітуди імпульсів.

Висновки до розділу 2

Обґрунтовано вибір основних спектральних та енергетичних параметрів мультиспектрального джерела оптичних імпульсів. На основі аналізу спектральної чутливості кремнієвих фотодіодів та характеристик доступних світлодіодів обрано робочі довжини хвиль 470 нм, 540 нм, 627 нм, 810 нм та 940 нм.

Для кожного спектрального каналу підібрано світлодіоди з відповідними характеристиками випромінювання та проведено аналіз їх спектральних параметрів. Встановлено, що ширина спектральних смуг обраних світлодіодів знаходиться в межах від 20 до 50 нм, що може призводити до часткового перекривання спектральних каналів.

Для підвищення спектральної селективності системи обрано використання інтерференційного фільтра з FWHM 15 нм. Показано, що дане значення є оптимальним компромісом між спектральною роздільною здатністю, рівнем оптичної потужності та складністю реалізації системи. На відміну від спектрометричних систем, де використовуються значно вужчі спектральні смуги, запропоноване рішення орієнтоване на швидке визначення спектральних характеристик за обмеженою кількістю контрольних точок. Отримані результати визначають параметри, необхідні для подальшої розробки структурної та оптичної схем мультиспектрального джерела.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ОПТИЧНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ДЖЕРЕЛА

3.1 Створення структурної схеми мультиспектрального джерела оптичних імпульсів

Основною ідеєю розроблюваного мультиспектрального джерела оптичних імпульсів є формування випромінювання на декількох фіксованих довжинах хвиль та об'єднання в єдину оптичну вісь. Для цього в структурі системи використовуються світлодіоди з довжинами хвиль 470 нм, 540 нм, 627 нм, 810 нм та 940 нм, які по чергово активуються блоком керування залежно від необхідного спектрального каналу.

На етапі розробки було розглянуто два способи об'єднання оптичних каналів: використання волоконно-оптичного розгалужувача та використання дихроїчних дзеркал.

Волоконно-оптичні розгалужувачі дозволяють поєднувати випромінювання від декількох джерел у спільний канал. Згідно з [4], для волоконно-оптичних розгалужувачів розрізняють декілька видів втрат: втрати поділу потужності, надлишкові втрати та внесені втрати. У розгалужувачі втрати складаються не тільки з технічних втрат, а ще й з обов'язкового поділу потужності між вихідними портами. Тобто навіть ідеальний розгалужувач уже зменшує потужність на кожному виході.

Основною складовою втрат у волоконно-оптичних розгалужувачах є втрати поділу потужності, які визначаються виразом

$$L_{\text{под}} = 10 \log_{10} (N) \quad (3.1)$$

де $L_{\text{под}}$ — втрати поділу потужності, дБ; N — кількість вихідних портів розгалужувача.

З виразу було проведено розрахунок втрат потужності для 5 світлодіодів із різними довжинами хвиль, оскільки для їх об'єднання необхідний розгалужувач щонайменше з 5 портами

$$L_{\text{под}} = 10 \log_{10}(5) = 6,9897 \text{ дБ} \quad (3.2)$$

Отримане значення свідчить про те що, навіть в ідеальному випадку втрати потужності сягатимуть майже 7дБ. Крім того, реальні розгалуджувачі мають додаткові втрати, зумовлені поглинанням, розсіюванням випромінювання, тому для розробки джерела даний метод недоцільний.

З урахуванням вимог до максимально ефективного використання оптичної потужності було обрано метод об'єднання каналів за допомогою дихроїчних дзеркал. Такі дзеркала характеризуються високою спектральною селективністю та забезпечують відбиття одних довжин хвиль при одночасному пропусканні інших.

Структурна схема розробленого мультиспектрального джерела наведена на рисунку 3.1. вона включає блок керування, набір світлодіодних джерел випромінювання, систему об'єднання спектральних каналів, систему колімації, інтерференційний фільтр, канал освітлення досліджуваного зразка та модуль стабілізації оптичної потужності, який забезпечує реалізацію оптичного зворотного зв'язку.

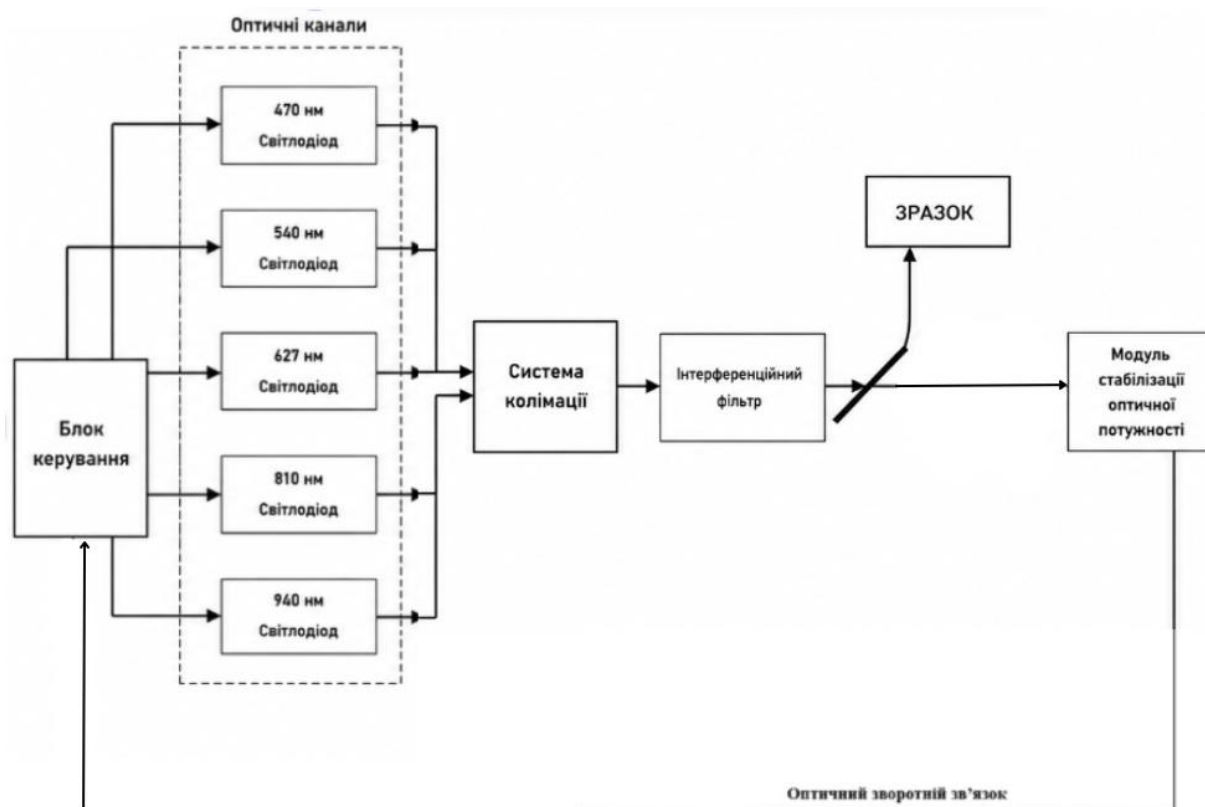


Рисунок 3.1 — Структурна схема мультиспектрального джерела

3.2 Оптична схема системи

Оптична схема наглядно показує рух оптичного випромінювання від джерела до досліджуваного зразку. В її структурі показано розташування оптичних елементів, вона дозволяє мінімізувати втрати оптичної потужності, підвищити точність та функціонування системи.

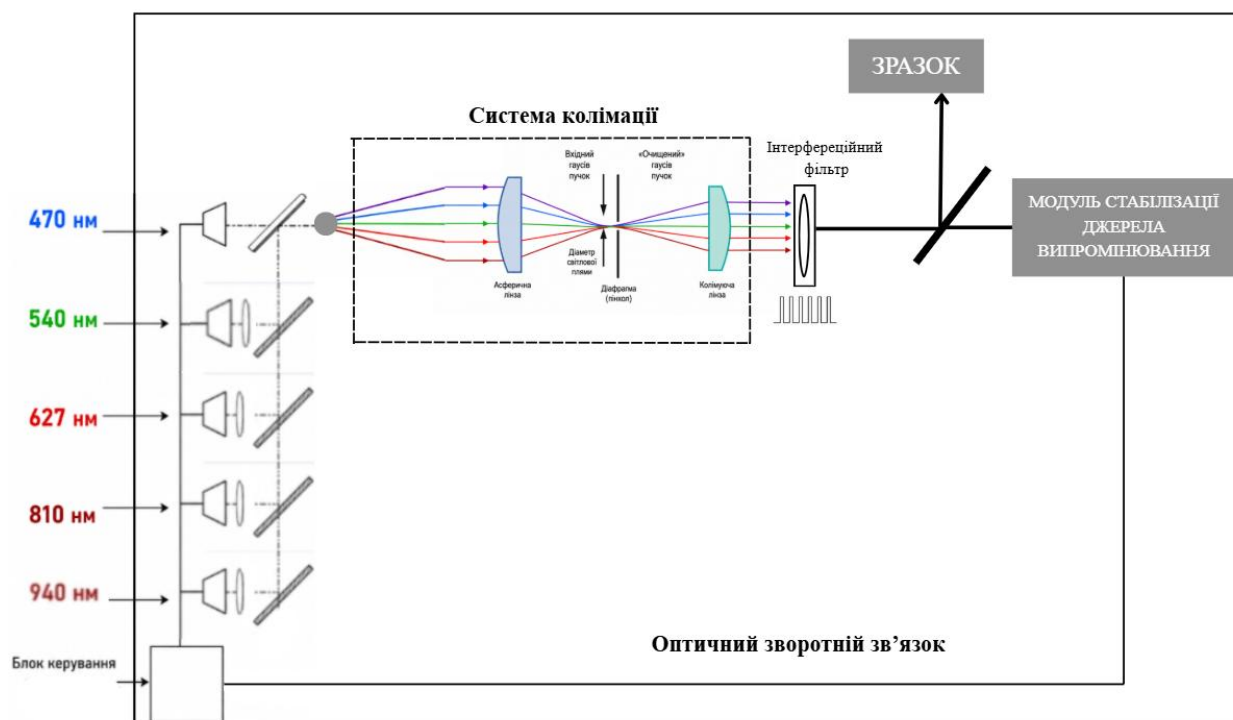


Рисунок 3.2 — Оптична схема мультиспектрального джерела оптичних імпульсів

В результаті проведеного аналізу була розроблена концепція створення мультиспектрального джерела оптичних імпульсів, було обрано оптимальні довжини хвиль, після чого постало питання як їх з'єднати в одну оптичну вісь, оскільки нам не потрібно одночасно використовувати одразу декілька довжин хвиль.

Під час аналізу технічних рішень було розглянуто підходи до побудови мультиспектральних джерел випромінювання, засновані на використанні декількох світлодіодних джерел, спектральні канали яких об'єднуються в єдиний оптичний тракт за допомогою дихроїчних дзеркал та колімуючих елементів. Проведений аналіз показав перспективність такого підходу для створення мультиспектрального джерела оптичних імпульсів. Основними перевагами запропонованого рішення є відсутність механічно рухомих елементів, спрощення конструкції, підвищення надійності системи та зменшення часу перемикавання між спектральними каналами. Саме тому

даний принцип було обрано як основу для розробки мультиспектрального джерела оптичних імпульсів.

Щодо структури оптичної схеми, блок керування (мікроконтролер) має окремий вихід для кожного світлодіода. Коли необхідно сформувати випромінювання певної довжини хвилі, блок керування подає керуючий сигнал лише на драйвер відповідного світлодіода. У цей момент інші світлодіоди залишаються вимкненими та не випромінюють світло. Це дозволяє швидко перемикатися між різними спектральними діапазонами без використання механічних елементів.

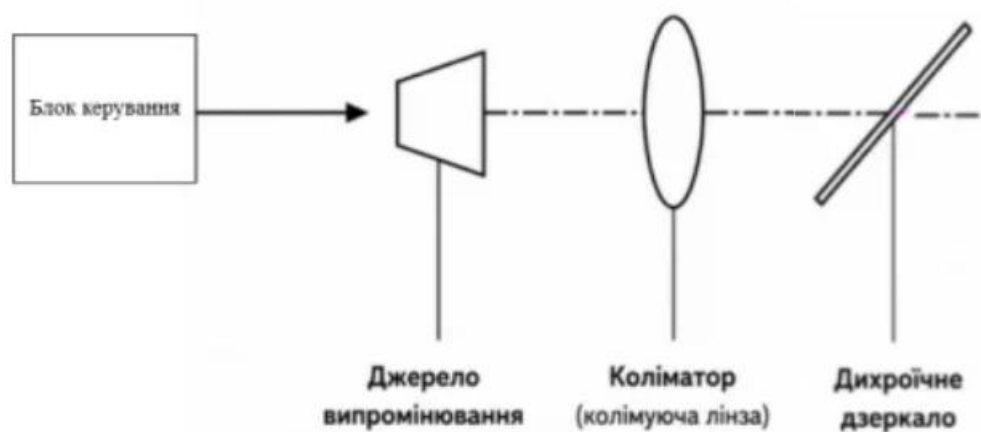


Рисунок 3.3 — Монохроматичний елемент мультиспектрального джерела оптичних імпульсів

Завдання коліматора полягає у зменшенні кутової розбіжності світлового потоку та формуванні квазіпаралельного пучка для кожного спектрального каналу. Це необхідно для ефективної роботи дихроїчних дзеркал, оскільки їхні спектральні характеристики залежать від кута падіння світла. Далі світлові потоки від усіх світлодіодів об'єднуються за допомогою дихроїчних дзеркал. Кожне дзеркало відбиває певний спектральний діапазон та пропускає інші довжини хвиль, внаслідок чого формується спільна оптична вісь.

Потім для забезпечення однакових умов проходження випромінювання використовується система колімації, що містить асферичні лінзи та польову діафрагму. Асферична лінза виконує збір та початкове формування світлового потоку. Для зменшення спотворень та обмеження розмірів пучка використовується діафрагма. Після цього колімуюча лінза забезпечує формування вихідного квазіпаралельного світлового пучка.

Інтерференційний фільтр після системи калімації використовується для додаткового очищення саме сформованого світлового пучка перед освітленням зразка, що підвищує точність спектральних вимірювань.

Після інтерференційного фільтра світловий потік надходить на дихроїчне дзеркало, яке виконує функцію оптичного подільника. Більша частина випромінювання проходить через дзеркало та спрямовується на досліджуваний зразок. Невелика частина випромінювання відбивається та прямує в модуль стабілізації оптичної потужності. Принцип роботи модуля стабілізації полягає в тому що, частина світлового потоку надходить на модуль для підтримання потужності та формування оптичного зворотного зв'язку. Після цього в модулі стабілізації формується електричний сигнал, який передається до блоку керування, який коригує режими роботи фотодіодів та слідкує за рівнем оптичної потужності, створюючи цим зворотній оптичний зв'язок.

3.3 Інтерференційний фільтр , моделювання багат шарових структур для інтерференційних фільтрів

Інтерференційний фільтр працює таким чином, він обирає певну довжину хвилі приладу із вхідних довжин хвиль, виключаючи інші, тобто обирає одну із декількох довжин. У випадку для мультиспектрального джерела це є перевагою, але якщо експеримент потребує задіяти одразу декілька довжин хвиль, інтерференційний фільтр не підійде.

Інтерференційні фільтри формуються багат шаровими тонкоплівковими структурами, оптичні властивості яких визначаються показниками заломлення та товщинами окремих шарів. Зміна цих параметрів дозволяє керувати спектральною характеристикою фільтра та формувати необхідну смугу пропускання.[15]

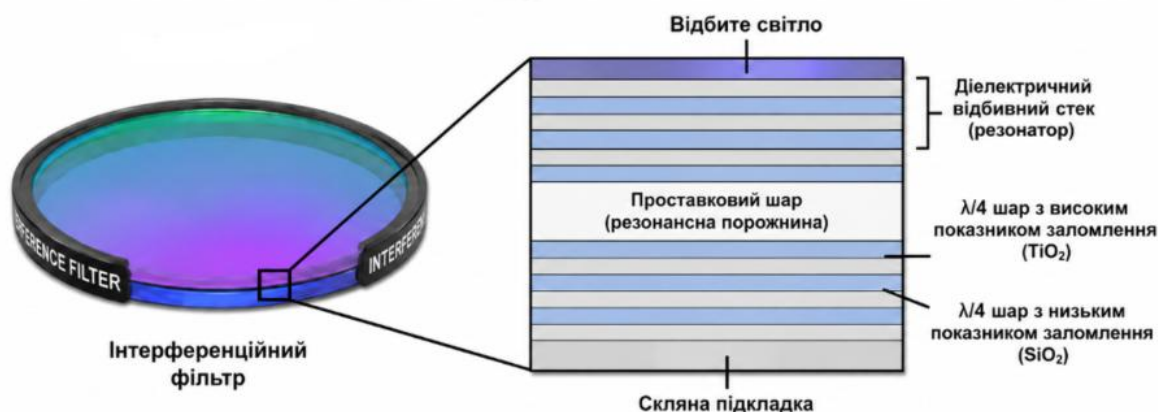


Рисунок 3.4 — Будова багат шарової структури інтерференційного фільтра

Для реалізації інтерференційного фільтра використовуються шари діоксиду титану (TiO_2) та діоксиду кремнію (SiO_2). Матеріал TiO_2 характеризується високим показником заломлення близько 2,5, тоді як SiO_2 має низький показник заломлення близько 1,45. Значна різниця показників заломлення забезпечує високу ефективність інтерференційної структури та формування вузької смуги пропускання. Спектральні параметри фільтра визначаються кількістю шарів, їх товщиною та показниками заломлення матеріалів.

Часто важко, або навіть неможливо, вручну спроектувати фільтр, дотримуючись усіх вимог для даного застосування. Однак можливо оптимізувати фільтр, використовуючи методи синтезу. Найбільш поширеним методом синтезу є метод голки. Метод голки вперше був описаний Тихонравовим у 1982 році. Суть техніки голки полягає в тому,

що за допомогою алгоритму визначають зручні місця для вставки нових шарів, які покращать розбіжність між ціллю та рішенням, що добре відоме як функція заслуги. Технічно кажучи, оптимальне положення голки, що додається, — це те, де похідна функції заслуги є від'ємною. Як правило, додається кілька одиничних шарів голки, і розраховується спектр пропускання/відбиття. Додавання шарів голки зупиняється в точці, де немає покращення в цільовому спектрі пропускання/відбиття.[16]

Для аналізованої структури референсною довжиною хвилі було обрано $\lambda_{\text{ref}} = 880$ нм. Саме для цієї довжини хвилі виконано розрахунок профілю показника заломлення та товщин шарів, що дозволяє оцінити особливості побудови багат шарової структури та її вплив на спектральні характеристики інтерференційного фільтра, профіль індексу заломлення і товщин шарів представлений на рисунку 3.5, результати вимірювання таблиця 3.1.

Таблиця 3.1 — Значення показника заломлення шарів інтерференційного фільтра залежно від глибини структури при $\lambda = 880$ нм

Глибина, нм	n на 880 нм	Глибина, нм	n на 880 нм	Глибина, нм	n на 880 нм
0	2,238955	2687,808	2,238955	4988,141	1,469516
73,864	2,238955	2687,808	1,469516	5205,661	1,469516
73,864	1,469516	2782,669	1,469516	5205,661	2,238955
222,326	1,469516	2782,669	2,238955	5280,749	2,238955
222,326	2,238955	2888,515	2,238955	5280,749	1,452059
549,769	2,238955	2888,515	1,452059	5388,836	1,452059
549,769	1,469516	2961,199	1,452059	5388,836	2,238955
617,184	1,469516	2961,199	2,238955	5451,427	2,238955
617,184	2,238955	3041,878	2,238955	5451,427	1,469516
669,974	2,238955	3041,878	1,469516	5576,423	1,469516
669,974	1,469516	3163,065	1,469516	5576,423	2,238955
845,733	1,469516	3163,065	2,238955	5761,425	2,238955
845,733	2,238955	3231,659	2,238955	5761,425	1,469516
928,606	2,238955	3231,659	1,469516	5881,304	1,469516
928,606	1,469516	3560,184	1,469516	5881,304	2,238955
1091,205	1,469516	3560,184	2,238955	6016,974	2,238955

Продовження таблиця 3.1

1091,205	2,238955	3619,025	2,238955	6016,974	1,469516
1192,092	2,238955	3619,025	1,469516	6312,362	1,469516
1192,092	1,469516	3795,58	1,469516	6312,362	2,238955
1528,702	1,469516	3795,58	2,238955	6437,357	2,238955
1528,702	2,238955	3903,819	2,238955	6437,357	1,469516
1562,898	2,238955	3903,819	1,452059	6497,166	1,469516
1562,898	1,469516	4021,544	1,452059	6497,166	2,238955
1670,513	1,469516	4021,544	2,238955	6543,648	2,238955
1670,513	2,238955	4079,842	2,238955	6543,648	1,469516
1768,576	2,238955	4079,842	1,469516	6865,814	1,469516
1768,576	1,469516	4153,141	1,469516	6865,814	2,238955
1885,351	1,469516	4153,141	2,238955	6912,803	2,238955
1885,351	2,238955	4206,996	2,238955	6912,803	1,469516
2009,521	2,238955	4206,996	1,469516	7059,187	1,469516
2009,521	1,469516	4298,685	1,469516		
2126,805	1,469516	4298,685	2,238955		
2126,805	2,238955	4488,061	2,238955		
2225,055	2,238955	4488,061	1,469516		
2225,055	1,469516	4527,299	1,469516		
2334,89	1,469516	4527,299	2,238955		
2334,89	2,238955	4664,665	2,238955		
2475,033	2,238955	4664,665	1,469516		
2475,033	1,469516	4939,442	1,469516		
2587,997	1,469516	4939,442	2,238955		
2587,997	2,238955	4988,141	2,238955		

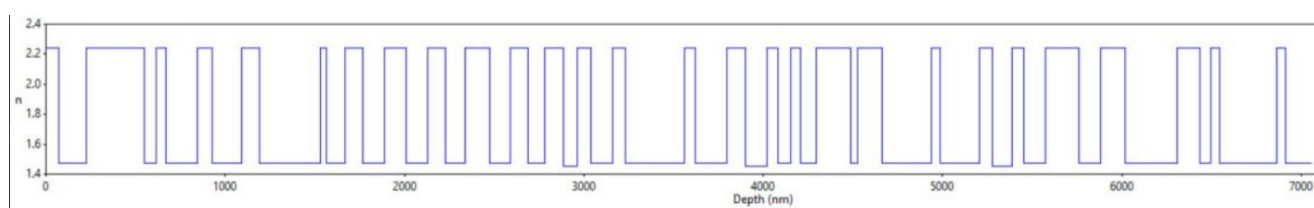


Рисунок 3.5 — Профіль індексу заломлення аналізованого фільтра на референсній довжині хвилі.

Для формування необхідної спектральної характеристики була використана багатошарова інтерференційна структура зі стеком

$$((H L)^{12}) ((1.35H 1.35L)^{12}) H \quad (3.3)$$

де (H) — шар з високим показником заломлення, виконаний з діоксиду титану (TiO_2), а (L) — шар з низьким показником заломлення, виконаний з діоксиду кремнію (SiO_2). Верхній індекс 12 означає дванадцятикратне повторення відповідної послідовності шарів. Центральна частина структури містить модифіковані шари товщиною $1.35H$ та $1.35L$, які формують резонансну область та забезпечують необхідні спектральні характеристики фільтра. Чергування шарів з високим і низьким показниками заломлення дозволяє створити багат шарову інтерференційну систему з високою спектральною селективністю та вузькою смугою пропускання на заданих довжинах хвиль.

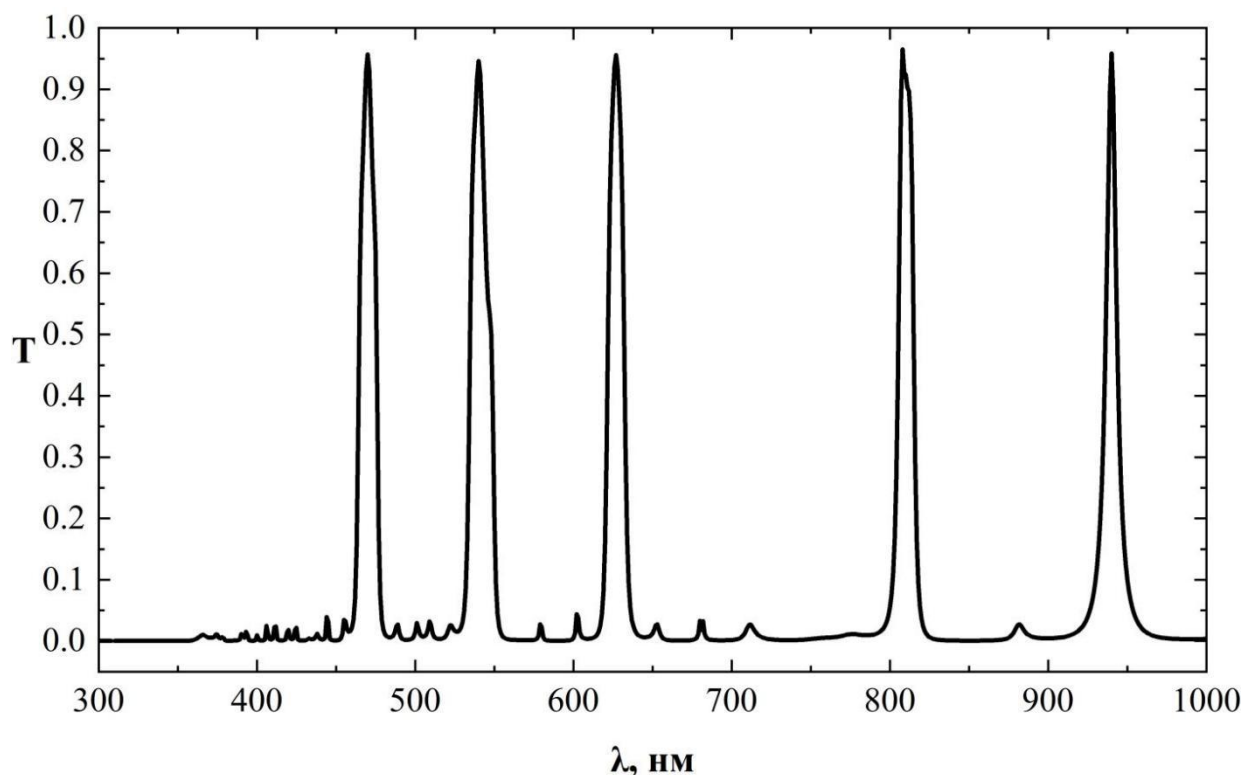


Рисунок 3.6 — Розрахована спектральна характеристика багат шарового інтерференційного фільтра

Таблиця 3.2 — Параметри шарів багат шарової структури інтерференційного фільтра

№	Матеріал	Товщина, нм	Показник заломлення	Оптична товщина
1	TiO ₂	73,864	2,239	0,18793
2	SiO ₂	148,463	1,4695	0,247918
3	TiO ₂	327,443	2,239	0,833102
4	SiO ₂	67,415	1,4695	0,112577
5	TiO ₂	52,79	2,239	0,134311
6	SiO ₂	175,759	1,4695	0,293501
7	TiO ₂	82,872	2,239	0,21085
8	SiO ₂	162,6	1,4695	0,271526
9	TiO ₂	100,887	2,239	0,256683
10	SiO ₂	336,61	1,4695	0,562106
11	TiO ₂	34,196	2,239	0,087004
12	SiO ₂	107,615	1,4695	0,179707
13	TiO ₂	98,063	2,239	0,249498
14	SiO ₂	116,775	1,4695	0,195003
15	TiO ₂	124,17	2,239	0,315922
16	SiO ₂	117,284	1,4695	0,195853
17	TiO ₂	98,25	2,239	0,249975
18	SiO ₂	109,835	1,4695	0,183413
19	TiO ₂	140,143	2,239	0,35656
20	SiO ₂	112,964	1,4695	0,188639
21	TiO ₂	99,812	2,239	0,253947
22	SiO ₂	94,861	1,4695	0,158409
23	TiO ₂	105,846	2,239	0,269299
24	SiO ₂	72,685	1,4521	0,119935
25	TiO ₂	80,679	2,239	0,205269
26	SiO ₂	121,187	1,4695	0,202371
27	TiO ₂	68,594	2,239	0,174521
28	SiO ₂	328,524	1,4695	0,548604

Продовження таблиці 3.2

№	Матеріал	Товщина, нм	Показник заломлення	Оптична товщина
29	TiO2	58,841	2,239	0,149708
30	SiO2	176,555	1,4695	0,29483
31	TiO2	108,239	2,239	0,275389
32	SiO2	117,725	1,4521	0,194255
33	TiO2	58,298	2,239	0,148326
34	SiO2	73,299	1,4695	0,122402
35	TiO2	53,855	2,239	0,137021
36	SiO2	91,689	1,4695	0,153111
37	TiO2	189,376	2,239	0,481824
38	SiO2	39,238	1,4695	0,065524
39	TiO2	137,366	2,239	0,349496
40	SiO2	274,777	1,4695	0,458851
41	TiO2	48,699	2,239	0,123902
42	SiO2	217,52	1,4695	0,363238
43	TiO2	75,088	2,239	0,191045
44	SiO2	108,087	1,4521	0,17835
45	TiO2	62,591	2,239	0,159248
46	SiO2	124,996	1,4695	0,208732
47	TiO2	185,001	2,239	0,470693
48	SiO2	119,88	1,4695	0,200188
49	TiO2	135,669	2,239	0,345179
50	SiO2	295,389	1,4695	0,493271
51	TiO2	124,994	2,239	0,318019
52	SiO2	59,809	1,4695	0,099876
53	TiO2	46,482	2,239	0,118263
54	SiO2	322,165	1,4695	0,537985
55	TiO2	46,99	2,239	0,119554
56	SiO2	146,384	1,4695	0,244447

3.4 Модуль стабілізації оптичної потужності

Модуль був розроблений на основі кремнієвого р-n фотодіоду, розглянемо основні параметри фотодіоду та роботу модуля. Фотодіод р-n типу — це напівпровідниковий прилад, який перетворює оптичне випромінювання в електричний сигнал завдяки внутрішньому фотоефекту р-n переходу.



Рисунок 3.7 — Позначення фотодіода в електричних схемах



Рисунок 3.8 — Вигляд кристала кремнієвого фотодіода

Для розуміння та детального огляду будови фотодіода розглянемо схему поперечного перерізу кремнієвого фотодіода на рисунку 3.9.

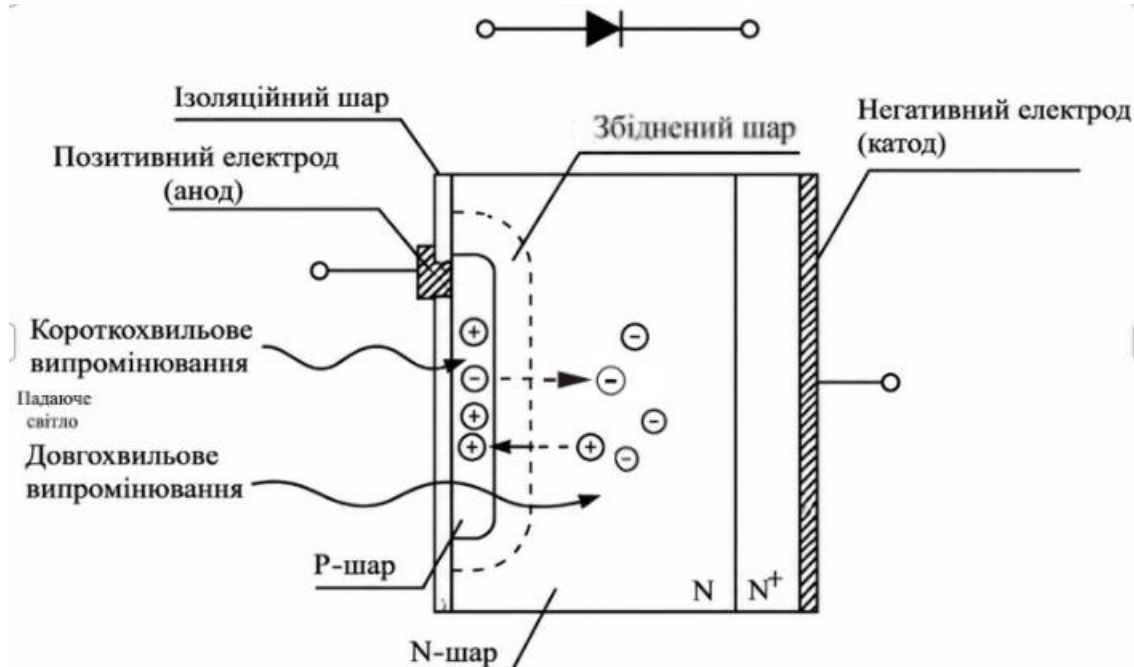


Рисунок 3.9 — Схема поперечного перерізу(поперечного) кремнієвого фотодіода[17]

P-область кремнієвого фотодіода часто формується шляхом селективної дифузії атомів бору на глибину близько 1 мкм, можливо і менше. На межі між p- та n-областями утворюється з'єднена область.

Фотодіод під дією світла, за допомогою енергії фотонів яка вища за ширину забороненої зони кремнію, формує електронно-діркові пари. Електрони переходять із валентної зони до зони провідності, залишаючи у валентній зоні дірки. Електричне поле p-n переходу розділяє фотоносії, перекидає електрони в n-область, дірки — в p-область і утворює таким чином додатковий зворотний струм діода, який називають фотострумом I_f . В утворенні фотоструму беруть участь як дірки та електрони, генерація яких відбувається безпосередньо в p-n переході, так і неосновні носії

областей р та n. Розділення фотоносіїв у р-n переході генеруються від переходу не далі, дифузійної довжини. [5]

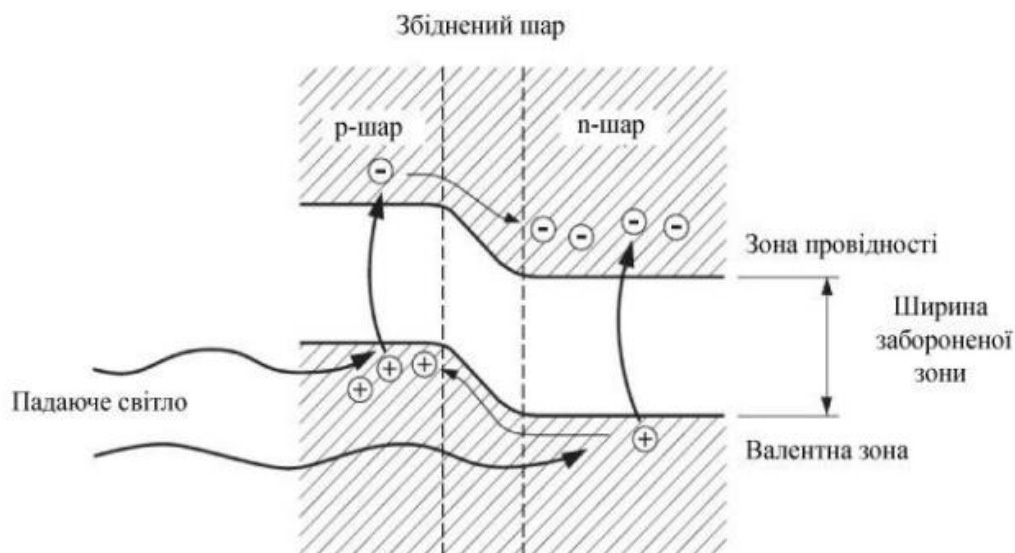


Рисунок 3.10 — Зонна діаграма р-n переходу[17]

На рисунку 3.11 наведено вольт-амперні характеристики фотодіода при різних рівнях освітленості.

Коли крива ($U = 0$) відповідає роботі фотодіода в темряві, тоді протікає лише темновий струм. При освітленні фотодіода світловим потоком виникає фотострум I_f , зумовлений генерацією неосновних носіїв заряду. У режимі зворотного зміщення ($U < 0$) струм фотодіода практично не залежить від прикладеної напруги, переважає дрейфовий струм. Саме цей режим найчастіше використовується для вимірювання оптичного випромінювання, бо в цілому забезпечує високу швидкодію та лінійність фотоструму від потужності.

У режимі прямого зміщення ($U > 0$) характеристики фотодіода схожі на характеристику звичайного напівпровідникового діода. Точки перетину характеристики з віссю напруг відповідають напрузі

холостого ходу $U_{х.х.}$, а точки перетину з віссю струму – струму короткого замикання $I_{к.з.}$, переважає дифузійний струм.

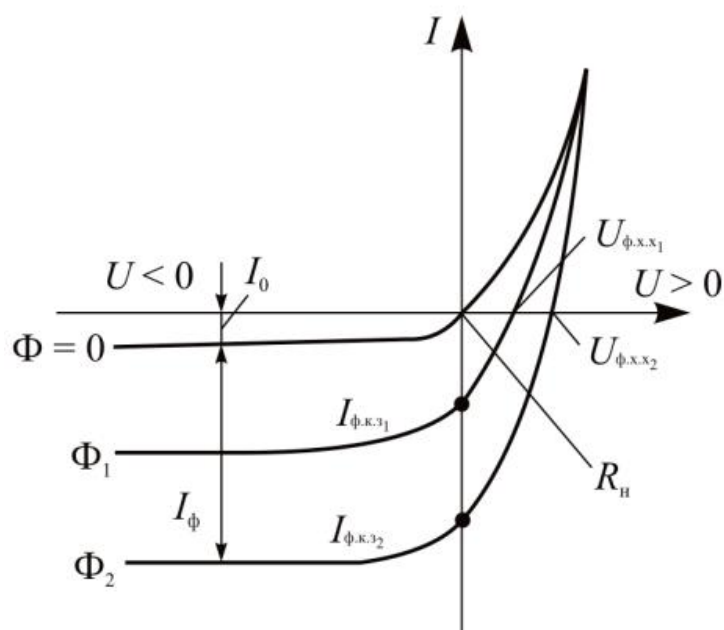
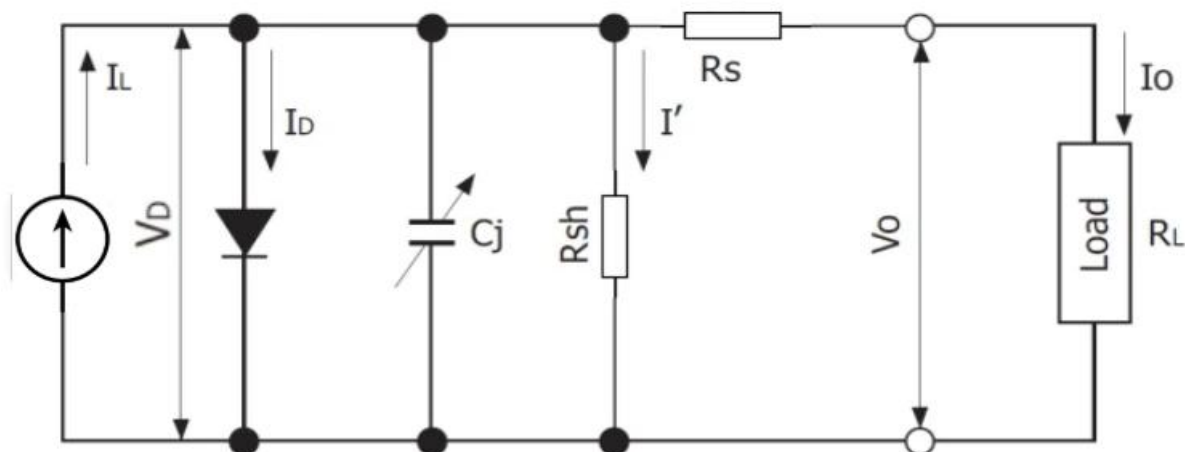


Рисунок 3.11 — ВАХ фотодіода[5]

Еквівалентна схема р-п фотодіода представлена у вигляді схемної моделі



I_L – фотострум, що генерується падаючим світлом, V_D – напруга діода, I_D – струм діода, C_j – ємність р-п переходу, R_{sh} – опір

шунта, I' – струм шунтуючого опору, R_s – послідовний опір діода, V_O – вихідна напруга, I_O – вихідний струм, R_L – опір навантаження.

Рисунок 3.12 — Еквівалентна схема кремнієвого фотодіода [17]

Методика розрахунку основних параметрів еквівалентної схеми фотодіода

Вихідний струм системи знаходиться за формулою

$$I_O = I_L - I_D - I' = I_L - I_S \times e^{\frac{qV_D}{kT}} \quad (3.4)$$

де I_O – вихідний струм; I_L – фотострум, що генерується падаючим світлом; I_D – струм діода; I' – струм опору шунта; I_S – зворотний струм насичення фотодіода; q – заряд електрона; V_D – напруга діода; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура фотодіода.

Послідовний опір фотодіода виникає внаслідок опору контактів та опору незбідненої області кремнію.[18]

$$R_s = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_c \quad (3.5)$$

де W_s – товщина підкладки; W_d – ширина збідненої області; A – дифузійна площа переходу; ρ – питомий опір підкладки; R_c – опір контакту.

Шунтуючий опір визначає нахил ВАХ фотодіода в області малих напруг. Він характеризує струми витоку через р-п перехід та впливає на темновий струм фотодіода. Чим більший шунтуючий опір, тим менший нахил ВАХ поблизу початку координат. Для забезпечення найкращих характеристик фотодіода бажаним є якомога більший шунтуючий опір. [18]

$$R_{sh} = \frac{10[MB]}{I_T} \quad (3.6)$$

де R_{sh} – шунтуючий опір; I_Φ – фотострум.

Межі збідненої області утворюють обкладинки плоского конденсатора. Ємність переходу обернено пропорційна ширині збідненої області та

прямо пропорційна площі переходу. Крім того, підкладки з вищим питомим опором мають меншу ємність переходу.[18]

$$C_j = \frac{\epsilon_{SI} \epsilon_0 A}{W_d} \quad (3.7)$$

де ϵ_{SI} — діелектрична проникність кремнію; ϵ_0 — діелектрична проникність вільного простору; W_d — ширина збідненої області; A — поперечного перерізу p-n переходу.

Модуль стабілізації оптичної потужності забезпечує підтримання заданого рівня оптичної потужності в імпульсі. Основою його роботи є принцип автоматичного регулювання за замкненим контуром зворотного зв'язку.

У процесі роботи частина оптичного потоку контролюється фотоприймачем, який формує електричний сигнал, пропорційний потужності випромінювання. Отриманий сигнал порівнюється з опорним значенням, що відповідає необхідному рівню оптичної потужності. Різниця між вимірним та заданим значеннями використовується як сигнал керування для корекції струму живлення випромінювача.

Запропонований підхід дозволяє компенсувати вплив температурної залежності параметрів світлодіодів, нестабільності джерела живлення та деградації випромінювачів у процесі експлуатації. У результаті забезпечується стабільність енергетичних параметрів оптичного сигналу, що є необхідною умовою для підвищення точності вимірювання спектральної чутливості фотоприймачів.

Висновки до розділу 3

У даному розділі розроблено структурну та оптичну схеми мультиспектрального джерела оптичних імпульсів, принцип формування випромінювання на п'яти фіксованих довжинах хвиль з подальшим об'єднанням спектральних каналів в єдину оптичну вісь.

Проведено аналіз двох можливих способів об'єднання випромінювання від декількох джерел: за допомогою волоконно-оптичного розгалужувача та системи дихроїчних дзеркал. На основі розрахунку втрат потужності обрано метод спектрального об'єднання за допомогою дихроїчних дзеркал, який забезпечує суттєво менші втрати оптичної потужності.

Обґрунтовано використання інтерференційного фільтра для звуження спектральних смуг випромінювання та підвищення селективності вимірювань. Проведено моделювання багат шарової структури інтерференційного фільтра на основі чергування шарів TiO_2 та SiO_2 . За результатами моделювання отримано спектральну характеристику фільтра з центральною довжиною хвилі пропускання та шириною смуги на рівні FWHM 15 нм. Передбачено застосування модуля стабілізації оптичної потужності на основі фотоприймального елемента, що дозволяє компенсувати можливі зміни параметрів світлодіодів та забезпечити стабільність роботи системи.

У результаті сформовано концепцію мультиспектрального джерела оптичних імпульсів, яка забезпечує мінімальні втрати потужності, високу спектральну селективність та можливість подальшої реалізації системи для експрес-визначення спектральних характеристик фотоприймальних пристроїв.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ

4.1 Методика вимірювання А/Вт спектральної чутливості

Чутливість — це міра ефективності перетворення світлової енергії в електричний струм. Вона змінюється залежно від довжини хвилі падаючого світла.

$$R_{\lambda} = \frac{I_{\phi}}{P} \quad (4.1)$$

де R_{λ} — чутливість фотодіода; I_{ϕ} — фотострум; P — потужність падаючого світла.

Спектральна характеристика — це залежність фотоструму від довжини хвилі падаючого випромінювання.

Спектральна чутливість характеризується відношенням зміни сигналу фотодіода до вхідного потоку монохроматичного випромінювання і визначається як відношення фотоструму, що генерується, до потужності падаючого випромінювання

$$S_{\lambda} = \frac{DI_{\phi}}{D\Phi_{\lambda}} \quad (4.2)$$

де S_{λ} — спектральна чутливість ; I_{ϕ} — фотострум; Φ_{λ} — потужність падаючого світла.

На відміну від класичних методів, що використовують монохроматор та механічні системи, запропонований підхід дозволяє проводити експрес-вимірювання спектральної характеристики без сканування всього спектрального діапазону. Вимірювання виконуються лише в декількох контрольних точках спектра, що відповідають центральним довжинам хвиль світлодіодів.

Відмінності в оптичній потужності окремих світлодіодів компенсуються шляхом регулювання струму живлення та обробки результатів вимірювань.

Оскільки спектральна чутливість фотоприймача $S(\lambda)$ має селективний характер і залежить від довжини хвилі випромінювання, інтегральна чутливість (S) визначається не лише параметрами фотоприймача, а й спектральним складом джерела випромінювання. Знаючи базові параметри, спектральний розподіл потужності світлодіода, оптичну потужність, величину сформованого фотосигналу, встановимо взаємозв'язок між спектральною та інтегральною чутливістю.[2]

Інтегральна чутливість фотоприймального елемента визначається за виразом 4.3

$$S = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (4.3)$$

де $\Phi(\lambda)$ - спектральний потік випромінювання; λ_1 і λ_2 - граничні довжини хвиль світлодіода.

При використанні мультиспектрального джерела з 5 світлодіодів значення спектральної чутливості фотоприймача визначаються в 5 контрольних точках, що відповідають центральним довжинам хвиль випромінювання світлодіодів. Подальше відновлення спектральної характеристики на проміжних довжинах хвиль може виконуватися методом інтерполяції отриманих результатів.

Оскільки під час розрахунків використовуються дискретні експериментальні дані, інтегральний вираз для визначення чутливості замінюється сумуванням за окремими спектральними точками:

$$S_{\text{спектр.чутл.}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i S_i \Delta \lambda}{\sum_{i=1}^N \Phi_i \Delta \lambda} \quad (4.4)$$

де Φ_i - спектральний потік випромінювання; S_i - спектральна чутливість фотодіода на певній довжині хвилі, $\Delta\lambda$ - крок дискретизації спектра; N - кількість спектральних точок, використаних під час розрахунку.

Для кожного світлодіода визначається енергетичний центр спектра λ_c . Значення спектральної чутливості фотодіода визначається у точці енергетичного центру

$$\lambda_c = \frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^N \Phi_i} \quad (4.5)$$

де λ_c - енергетичний центр спектра випромінювання світлодіода, нм; Φ_i - спектральний потік випромінювання; λ_i - довжина хвилі i -тої спектральної точки, нм; N - кількість спектральних точок, використаних під час розрахунку.

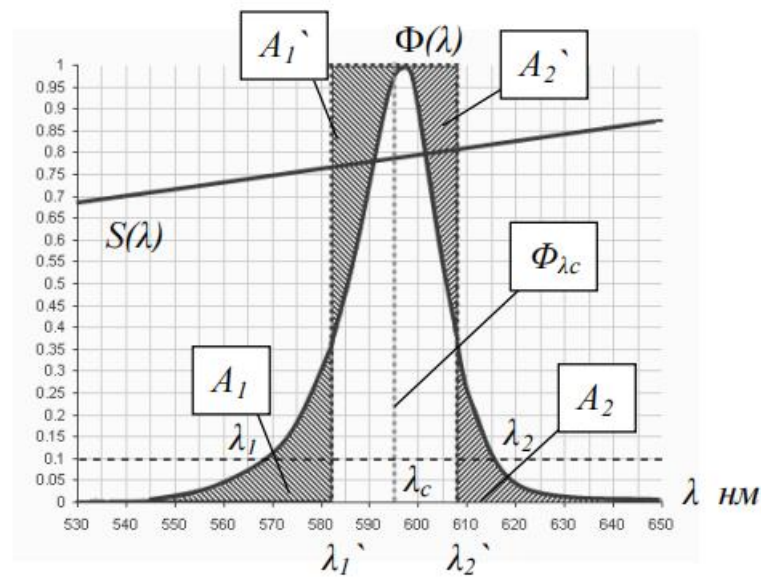


Рисунок 4.1 — Визначення енергетичного центра кривої світлодіода[9]

Оскільки світлодіоди були підібрані таким чином, що енергетичний центр спектра збігається з максимумом спектральної характеристики. Тому для подальших розрахунків приймається $\lambda_c = \lambda_{\max}$.

Для перевірки працездатності запропонованої методики визначення спектральної чутливості було розглянуто фотодіод, спектральна характеристика якого відома заздалегідь. У роботі як еталонний фотоприймальний елемент може використовуватися кремнієвий фотодіод S1336 - BQ, параметри та спектральна характеристика якого наведені в технічній документації виробника.

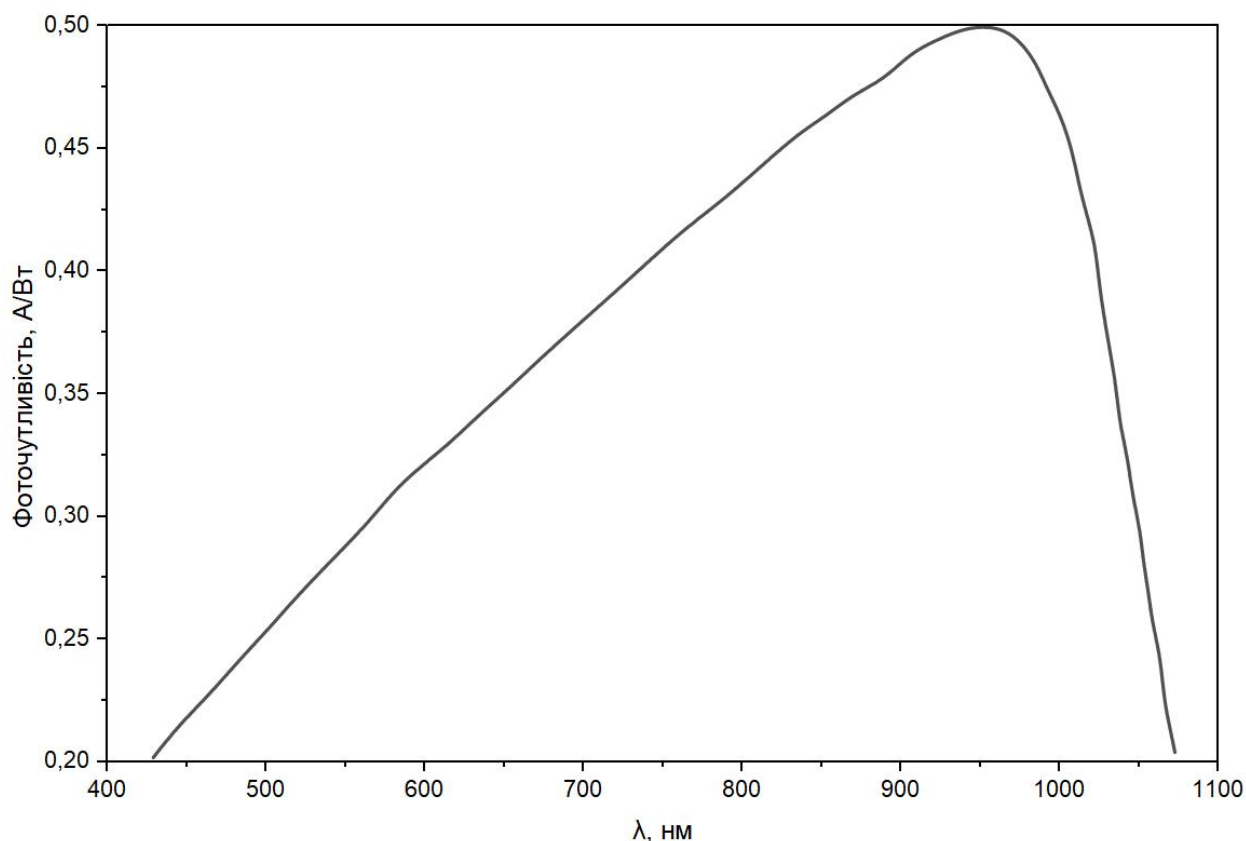


Рисунок 4.2 — Спектральна чутливість кремнієвого фотодіода S1336 - BQ[19]

Було виконано накладання спектральних характеристик обраних світлодіодів на еталонну спектральну характеристику фотодіода S1336 - BQ, результат зображено на рисунку 4.3.

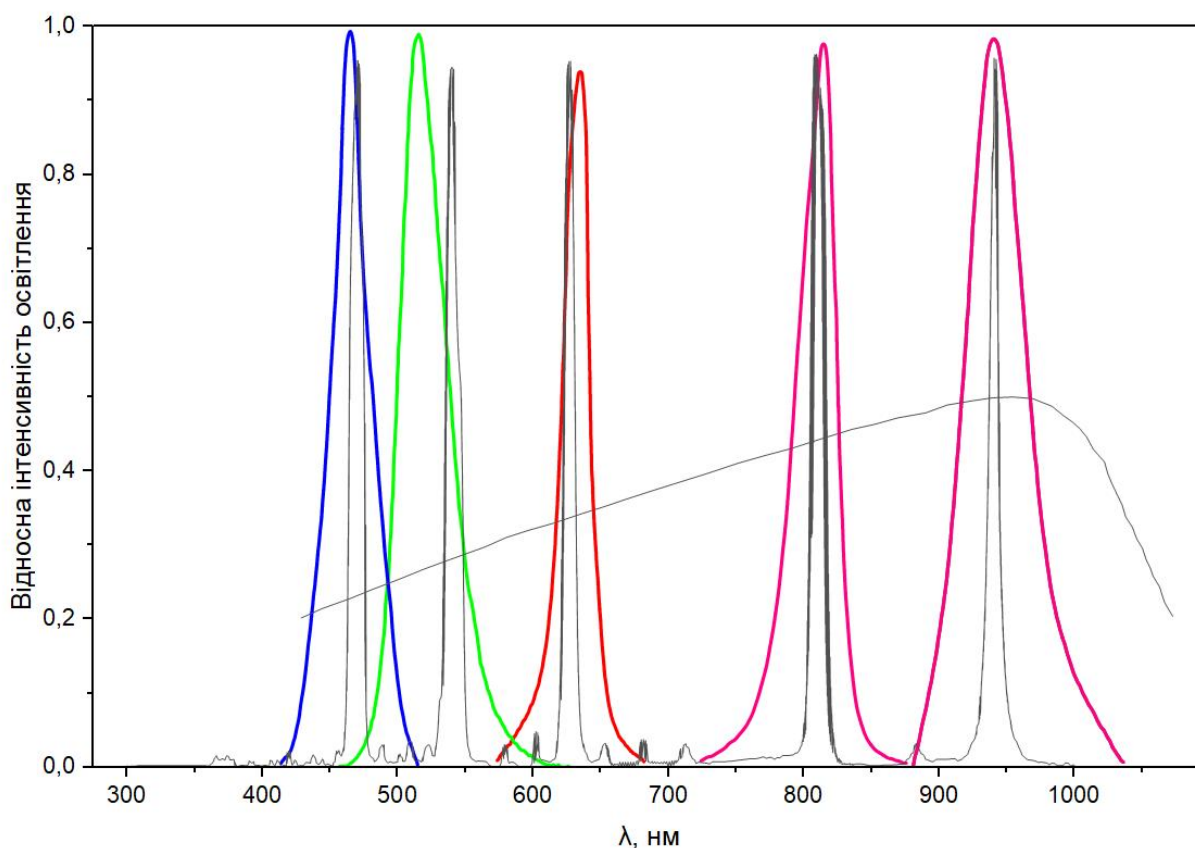


Рисунок 4.3 — Визначення спектральної чутливості фотодіода S1336 - BQ за допомогою мультиспектрального джерела випромінювання

Рисунок 4.3 наглядно показує точки перетину еталонного кремнієвого фотодіода, зі спектральними каналами мультиспектрального джерела випромінювання. Завдяки використанню інтерференційних фільтрів із шириною смуги пропускання 15 нм вдалося сформувати вузькі спектральні канали, які відповідають окремим контрольним точкам спектральної характеристики фотодіода. За отриманими точками було визначено значення відносної спектральної чутливості фотодіода на довжинах хвиль 470 нм, 540 нм, 627 нм, 810 нм та 940 нм. Отримані значення формують дискретну спектральну характеристику фотодіода S1336 — BQ, яка в подальшому використовується для відновлення неперервної спектральної залежності методом квадратичної сплайн-інтерполяції.

Таблиця 4.1 — Визначення спектральної чутливості фотодіода S1336 - BQ за енергетичними центрами спектральних каналів та методом квадратичної сплайн-інтерполяції

Світлодіод	Енергетичний центр λ_c , нм	Відносна спектральна чутливість $S(\lambda_c)$	Інтерпольована спектральна чутливість
Синій світлодіод (470 нм)	470	0,2317	0,23
Зелений світлодіод (540 нм)	540	0,2813	0,28
Червоний світлодіод (627 нм)	627	0,3468	0,34
Інфрачервоний світлодіод (810 нм)	810	0,4420	0,44
Інфрачервоний світлодіод (940 нм)	940	0,5	0,5

Оскільки вимірювання проводяться не в усьому безперервному спектральному діапазоні, а лише в окремих спектральних точках, необхідно відновити проміжні значення характеристики між заданими довжинами хвиль.

Для цього використано метод квадратичної сплайн-інтерполяції, за якої спектральна чутливість на кожному інтервалі між сусідніми енергетичними центрами світлодіодів описується поліномом другого степеня. Такий підхід дозволяє перейти від набору окремих значень спектральної чутливості до неперервної наближеної характеристики фотодіода. Отримана інтерпольована крива використовується для порівняння з еталонною спектральною характеристикою та оцінки точності запропонованого методу вимірювання.[21]

$$S(\lambda) = a_i \lambda^2 + b_i \lambda + c_i, \lambda \in (\lambda_{ci-1}, \lambda_{ci}), i = 0 \dots n \quad (4.6)$$

де a_i , b_i , c_i — коефіцієнти квадратичного полінома для відповідного спектрального інтервалу; λ — довжина хвилі; i — номер інтервалу між сусідніми спектральними точками.

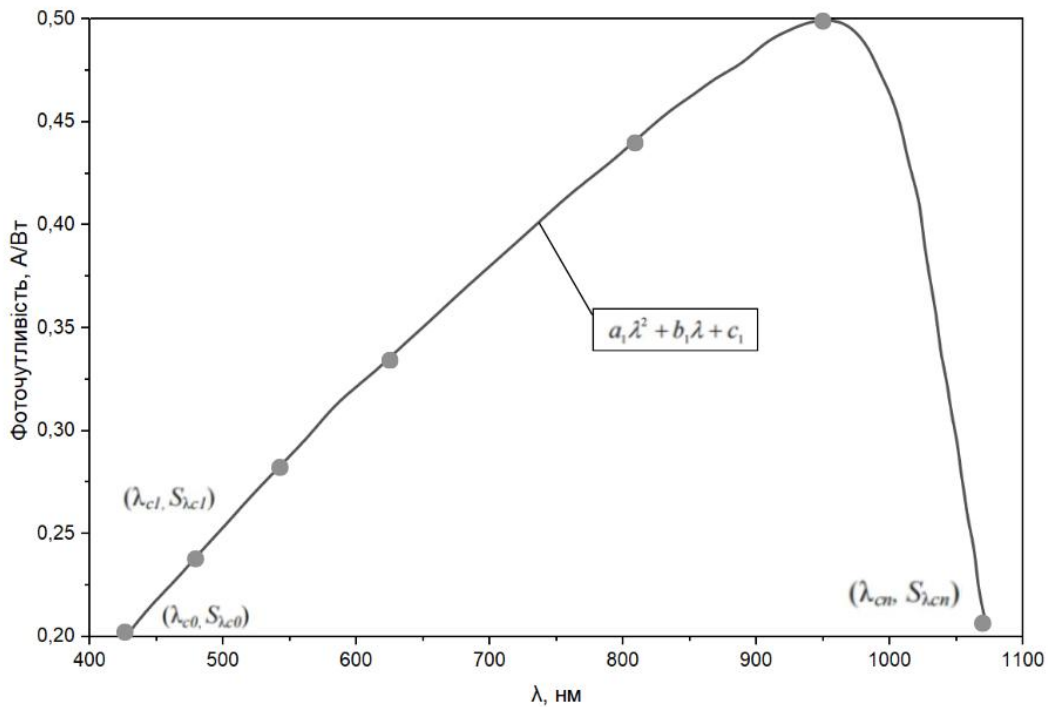


Рисунок 4.4 — Інтерполяція результатів вимірювання квадратичним сплайном[9]

2n рівнянь	n-1 рівнянь	1 рівняння
$\left. \begin{aligned} a_1 \lambda_{c0}^2 + b_1 \lambda_{c0} + c_1 &= 0 \\ a_1 \lambda_{c1}^2 + b_1 \lambda_{c1} + c_1 &= 0 \\ a_2 \lambda_{c1}^2 + b_2 \lambda_{c1} + c_2 &= 0 \\ a_2 \lambda_{c2}^2 + b_2 \lambda_{c2} + c_2 &= 0 \\ \dots \\ a_n \lambda_{cn}^2 + b_n \lambda_{cn} + c_n &= 0 \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} 2a_1 \lambda_{c1} + b_1 - 2a_2 \lambda_{c2} - b_2 &= 0 \\ 2a_2 \lambda_{c2} + b_2 - 2a_3 \lambda_{c3} - b_3 &= 0 \\ 2a_3 \lambda_{c3} + b_3 - 2a_4 \lambda_{c4} - b_4 &= 0 \\ \dots \\ 2a_{n-1} \lambda_{cn-1} + b_{n-1} - 2a_n \lambda_{cn} - b_n &= 0 \end{aligned} \right\}$	$a_1 = 0$

Рисунок 4.5 – Система рівнянь квадратичної сплайн-інтерполяції для визначення коефіцієнтів поліномів a_i , b_i та c_i

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку коефіцієнтів квадратичних поліномів.

i	a_i	b_i	c_i
1	0	0,000714	-0,1057
2	-2,8E-07	0,00102	-0,188
3	-6,48E-07	0,00147	-0,33
4	2,69E-07	0,000008	0,263

На основі отриманих коефіцієнтів побудовано відновлену спектральну характеристику фотодіода, яка наведена на рисунку 4.6.

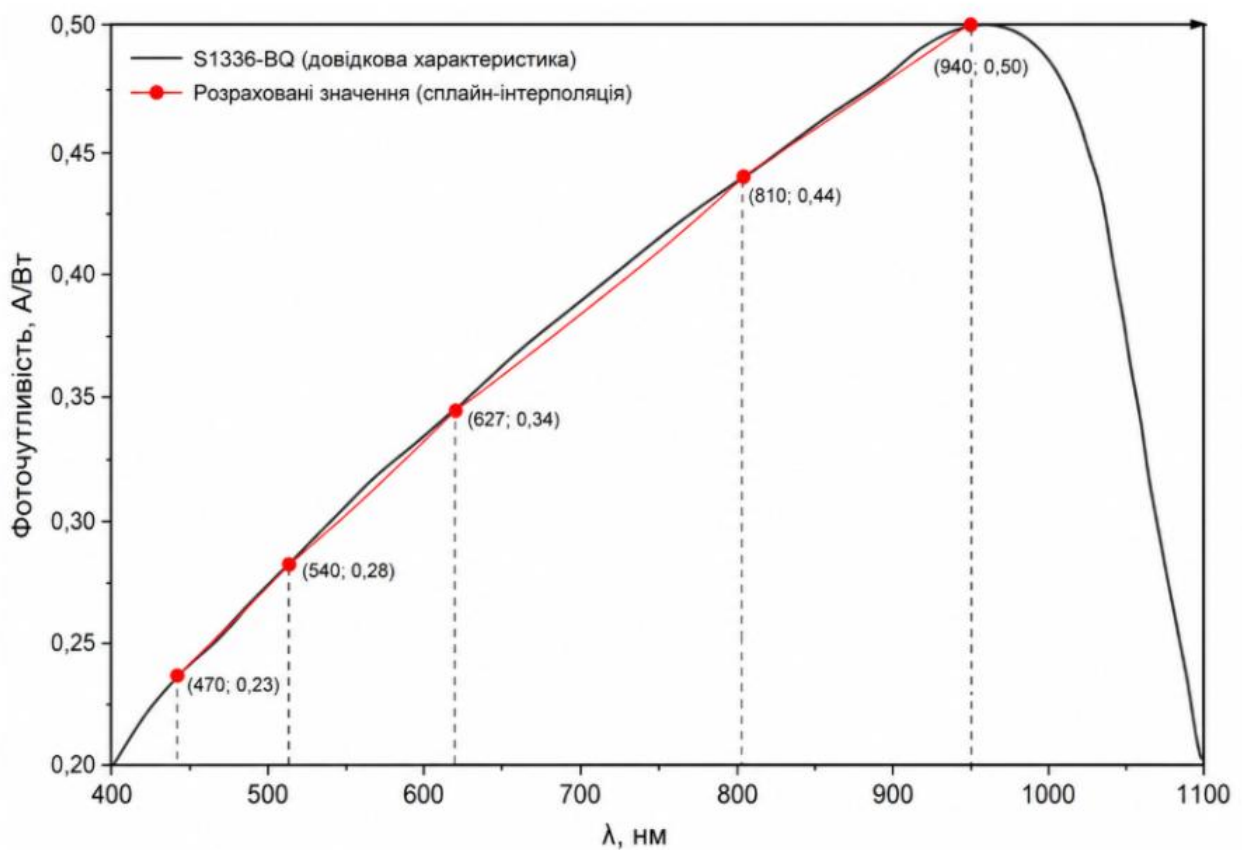


Рисунок 4.6 — Інтерпольована спектральна характеристика фотодіода S1336 - BQ методом квадратичної сплайн-інтерполяції

Використання квадратичної сплайн-інтерполяції забезпечує відсутність різких стрибків між сусідніми ділянками та дозволяє отримати фізично обґрунтовану форму спектральної характеристики.

Визначення відносної похибки необхідне для оцінювання точності, порівняння значень спектральної чутливості, отриманих методом інтерполяції, з еталонними даними дозволяє оцінити ступінь наближення відновленої характеристики до реальної.

$$\Delta S_i = \frac{\sqrt{(S(\lambda_i) - S_{ET_i})^2}}{S_{ET_i}} \quad (4.7)$$

де $S(\lambda_i)$ — значення спектральної чутливості, отримане методом інтерполяції на довжині хвилі λ_i ; S_{ET_i} — еталонне значення спектральної чутливості фотодіода на відповідній довжині хвилі.

Таблиця 4.3 — Результати оцінки відносної похибки

λ , нм	ΔS , %
470	0,73
540	0,46
627	1,96
810	0,45
940	0

Розрахуємо середнє значення відносної похибки, щоб провести аналіз методу розрахунку спектральної чутливості мультиспектральним джерелом оптичних імпульсів.

$$\Delta S_{\text{сер}} = \frac{0,73 + 0,46 + 1,96 + 0,45 + 0}{5} = 0,72\% \quad (4.8)$$

Аналіз показав, що середня відносна похибка відновлення спектральної характеристики становить 0,73 %. Оскільки, отримане значення середньої відносної похибки 0,73%, це свідчить про точність запропонованого

методу відновлення спектральної характеристики фотодіода, оскільки це значення не перевищує 1%. Найбільші відхилення спостерігаються на ділянках із найбільшою кривизною спектральної характеристики, що пов'язано з обмеженою кількістю контрольних спектральних точок. Незважаючи на це, відновлена характеристика добре узгоджується з еталонною залежністю та коректно відтворює її загальну форму. Це підтверджує можливість використання мультиспектрального джерела оптичних імпульсів для швидкого визначення спектральної чутливості фотоприймачів без застосування класичних спектрометричних систем.

Висновки до розділу 4

Проведений аналіз показав відновлення спектральної характеристики фотодіода за обмеженою кількістю контрольних точок, сформованих світлодіодними джерелами випромінювання з довжинами хвиль 470 нм, 540 нм, 627 нм, 810 нм та 940 нм.

Важливим є те що, метод використання інтерференційного фільтра допоміг звужити спектр випромінювання та зменшив область перетину спектральних характеристик світлодіодів і фотодіода, завдяки чому кожен спектральний канал відповідає більш вузькому діапазону довжин хвиль. Це дало змогу точніше визначити значення спектральної чутливості в контрольних точках та покращити якість подальшого відновлення спектральної характеристики

Для відновлення неперервної спектральної характеристики використано метод квадратичної сплайн-інтерполяції. Отримана залежність добре узгоджується з еталонною спектральною характеристикою фотодіода S1336 - BQ. Проведена оцінка точності показала, що середня відносна похибка відновлення характеристики становить 0,73 %. Оскільки відносна середня похибка є незначною, підтверджує можливість використання мультиспектрального джерела оптичних імпульсів для швидкого визначення спектральної чутливості фотоприймачів без застосування класичних спектрометричних систем.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено дослідження можливості створення мультиспектрального джерела оптичних імпульсів для експрес-аналізу спектральних характеристик. Виконано аналіз існуючих методів спектральних вимірювань та встановлено, що використання багатоканального світлодіодного джерела дозволяє суттєво спростити процес визначення спектральних характеристик без застосування складних спектрометричних систем.

У процесі роботи проведено порівняльний аналіз світлодіодів (LED), суперлюмінесцентних діодів (SLD) та лазерних діодів (LD). Встановлено, що для реалізації мультиспектрального джерела найбільш доцільним є використання світлодіодів завдяки широкому спектру доступних довжин хвиль, відсутності когерентних ефектів, простоті керування та нижчій вартості реалізації системи.

На основі аналізу спектральної характеристики кремнієвих фотодіодів та доступної елементної бази обрано робочі довжини хвиль 470 нм, 540 нм, 627 нм, 810 нм та 940 нм, які забезпечують охоплення видимої та ближньої інфрачервоної областей спектра. Для реалізації зазначених каналів виконано підбір світлодіодів S170BC-B4-1A, LZ1-00G105, OF-SMD3216R, VSMY98145DS та IR15-21C/TR8 відповідно. Проведено аналіз їх спектральних характеристик, максимумів випромінювання та ширини спектральної смуги на рівні половини максимуму (FWHM).

Обґрунтовано використання інтерференційного фільтра із FWHM 15 нм, що забезпечує зменшення перекривання сусідніх спектральних каналів та підвищення спектральної селективності системи. Проведено моделювання багат шарової структури фільтра на основі діелектричних шарів TiO_2 та SiO_2 , що дозволило сформувати вузькі спектральні канали для кожної обраної довжини хвилі.

Розроблено структурну та оптичну схеми мультиспектрального джерела оптичних імпульсів. Для об'єднання випромінювання окремих світлодіодних каналів в одну оптичну вісь обрано систему дихроїчних дзеркал, яка забезпечує менші втрати потужності порівняно з волоконно-оптичними розгалужувачами. Додатково розглянуто модуль стабілізації оптичної потужності із застосуванням фотодіода та системи зворотного зв'язку, що дозволяє компенсувати нестабільність випромінювання світлодіодів.

Методику вимірювання спектральної чутливості фотоприймачів за допомогою розробленого мультиспектрального джерела, показала можливість відтворення спектральної характеристики фотоприймача за обмеженою кількістю контрольних точок спектра, що значно скорочує тривалість вимірювань та спрощує вимірювальну систему. Дане джерело може використовуватись, як для окремо взятих фотодетекторів на кристалі, так уже і для готових фотоприймальних модулів.

Таким чином, у роботі сформовано та обґрунтовано розробку мультиспектрального джерела оптичних імпульсів, визначено його основні спектральні, енергетичні та конструктивні параметри, а також створено основу для подальшого виготовлення та експериментального дослідження реального пристрою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kitai A. Principles of Solar Cells, LEDs and Diodes: The Role of the PN Junction. Chichester : Wiley, 2018. 424 с.
2. Winder S. Power Supplies for LED Driving. 2nd ed. Oxford : Newnes, 2011. 272 с.
3. Ryer A. D. Light Measurement Handbook. Newburyport : International Light Inc., 1998. 248 с.
4. Senior J. M. Optical Fiber Communications: Principles and Practice. 3rd ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2009. 1104 с.
5. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання : навчальний посібник. Книга 1. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 399 с.
6. Борисов О. В., Якименко Ю. І. Твердотільна електроніка : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 248 с.
7. Evered C., Li K., Fan Y., Zhang B., Roula A. A review of light sources used for laser speckle reduction in display and imaging applications // Optics & Laser Technology. - 2025. - Vol. 183. - Article 112407. - DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.112407.
8. Feng Z. C., ed. Handbook of Solid-State Lighting and LEDs. Boca Raton : CRC Press, 2017. 779 с.
9. Didukh N. I., Mikheenko L. A., Sveshnikov V. S. Radiometry and metrology LEDs // Методи і системи оптико-електронної та цифрової обробки сигналів : зб. наук. праць. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. С. 528-529.
10. Lucky Light Electronics Co., Ltd. S170BC-B4-1A. 0805 Package Blue Chip LED. Technical Data Sheet [Електронний ресурс]. - 2005. - 9 с.
11. LedEngin Inc. LZ1-00G105 High Luminous Efficacy Green LED Emitter. Datasheet [Електронний ресурс]. - 2010. - 14 с.

12. Guangzhou Hongli Opto-Electronic Co., Ltd. HL-PC-3216U38FC Red LED. Specification [Електронний ресурс]. - 2012. - 7 с.
13. Vishay Semiconductors. VSMY98145DS High Power Infrared Emitting Diode, 810 nm, Surface Emitter Technology [Електронний ресурс]. - 2022. - 6 с.
14. Everlight Electronics Co., Ltd. IR15-21C/TR8. 1206 Package Chip Infrared LED. Datasheet [Електронний ресурс]. – 2015. – 9 с.
15. Воронько А., Новіков Д., Вербіцький Д., Волошин О. Аналіз структури інтерференційних покриттів для оптимізації параметрів вузькосмугових оптичних фільтрів // Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, Україна [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://visnykpb.kpi.ua/article/view/318177>
16. Mai H. H. Designing multilayer dielectric filter based on $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ for fluorescence microscopy applications // Computer Optics. 2020. Vol. 44, No. 2. P. 209–213. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-618.
17. Hamamatsu Photonics K.K. Si Photodiodes [Електронний ресурс] – Режим доступу:
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsuphotonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_kspd9001e.pdf
18. Характеристики та застосування фотодіодів [Електронний ресурс] / OSI Optoelectronics. - Режим доступу: <https://www.osioptoelectronics.com/media/pages/knowledgebase/b954012b64-1675100541/an-photodiode-parameters-and-characteristics.pdf>
19. Hamamatsu Photonics. Si photodiodes S1336 series : datasheet. Hamamatsu Photonics K.K., 2022. 4 p. URL: [Hamamatsu S1336 series datasheet](#)
20. Albert Parr, Raju Datla, James Gardner. Optical Radiometry, Volume 41 1st Edition. Academic Press 2005 — 586 с.

21. de Boor C. A Practical Guide to Splines. Revised Edition. New York : Springer-Verlag, 2001. 346 c.