

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку
Кафедра інформаційних технологій у відновлюваній енергетиці

До захисту допущено
Кафедрою інформаційних технологій у відновлюваній енергетиці протокол
№ _____ від _____

в.о. завідувача кафедри _____ Ілля МАРУЩЕНКО
(підпис) (ім'я, прізвище)

« _____ » _____ 2025 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача Антона ЦИСЯ другого (магістерського) рівня вищої освіти

Вимірювання характеристик фотодіодів у приймачах випромінювання
лазерних далекомірів

(назва роботи)

Спеціальність (спеціалізація) 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(код та найменування спеціальності; спеціалізації спеціальності - за наявності)

Освітня програма Інформаційні технології в енергетичних системах
(назва освітньої програми)

Виконавець _____ Антон ЦИСЬ
(підпис) (ім'я, прізвище)

Науковий керівник _____ Микола КОКОДІЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку

Кафедра інформаційних технологій у відновлюваній енергетиці

Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр

Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Ілля МАРУЩЕНКО
(підпис)

“ _____ ” _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Цисю Антону Володимировичу

1. Тема роботи: «Вимірювання характеристик фотодіодів у приймачах випромінювання лазерних далекомірів». Керівник роботи: Кокодій Микола Григорович, професор кафедри. Затверджено наказом по університету від 25 листопада 2025 року № 3401-5/4196.
2. Строк подання студентом роботи 01.12.2025 р.
3. Перелік питань, які потрібно розробити:
 - 1) зробити огляд літератури на тему – світлодіоди, фотодіоди, напівпровідникові лазери, лазерні далекоміри.
 - 2) ознайомитись з методами вимірювання характеристик фотодіодів.
 - 3) провести лабораторні вимірювання необхідних характеристик фотодіодів.

4. План роботи:

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Проведення огляду літератури
2	Ознайомлення з методами вимірювання характеристик фотодіодів.
3	Вимірювання амплітудної характеристики фотодіода
4	Вимірювання кута огляду простору фотодіодом
5	Вимірювання чутливості фотодіода
6	Вимірювання температурної залежності чутливості фотодіода
7	Формулювання висновків.
8	Підготовка презентації та доповіді.

5. Дата видачі завдання: 03 листопада 2025 року.

Студент

підпис

Антон ЦИСЬ

Керівник роботи

підпис

Микола КОКОДІЙ

РЕФЕРАТ

Антон Цись «Вимірювання характеристик фотодіодів у приймачах випромінювання лазерних далекомірів»

Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Х.: Харківській національний університет імені В. Н. Каразіна, 2025. – 51 с.

У сучасних військових технологіях лазерні далекоміри та системи цілевказання широко використовуються для виявлення техніки та наведення високоточної зброї. Більшість таких пристроїв працює в діапазоні близької інфрачервоної області (1–2 мкм). Тому актуальною є задача швидкого виявлення лазерного опромінення об'єкта з метою своєчасного застосування засобів захисту.

Основними приймачами такого випромінювання є напівпровідникові фотодіоди, що забезпечують високу чутливість і малий час відгуку. Для їх ефективного використання в системах попередження необхідно детально дослідити їх електричні й оптичні параметри, стабільність роботи та чутливість у відповідному спектральному діапазоні.

Метою дипломної роботи є експериментальне дослідження одного з типів фотодіодів, призначених для реєстрації лазерного випромінювання у ближньому інфрачервоному діапазоні, та вимірювання їх основних характеристик. У роботі наведено методику проведення вимірювань, проаналізовано отримані результати та визначено параметри, важливі для застосування фотодіодів у системах виявлення лазерного опромінення.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення засобів лазерного попередження та підвищення ефективності захисту об'єктів від високоточного озброєння.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФОТОДІОДИ, СПЕКТРАЛЬНА ЧУТЛИВІСТЬ, ОПТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ, КАЛІБРУВАННЯ СЕНСОРІВ, ШУМОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ABSTRACT

Tsys Anton “Measurement of Photodiode Characteristics in Receivers of Laser Rangefinder Radiation”

Master’s thesis in applied physics. – Kh.: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2025. – 51 p.

In modern military technologies, laser rangefinders and targeting systems are widely used for detecting equipment and guiding precision weapons. Most of these devices operate in the near-infrared spectral range (1–2 μm). Therefore, the rapid detection of laser irradiation on an object is a critical task for timely activation of protective measures.

The main receivers of such radiation are semiconductor photodiodes, which provide high sensitivity and fast response times. For their effective use in warning systems, it is essential to thoroughly study their electrical and optical parameters, operational stability, and sensitivity within the relevant spectral range.

The aim of this thesis is the experimental investigation of a specific type of photodiode designed for detecting laser radiation in the near-infrared range and the measurement of its key characteristics. The methodology for performing the measurements is presented, the obtained results are analyzed, and the parameters critical for the application of photodiodes in laser detection systems are identified.

The obtained results can be used to improve laser warning systems and enhance the effectiveness of protecting objects from precision-guided weapons.

Keywords: PHOTODIODES, SPECTRAL SENSITIVITY, OPTICAL MEASUREMENTS, SENSOR CALIBRATION, NOISE CHARACTERISTICS

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНЕЙ	10
1.1. Вступ до розділу	10
1.2. Вимірювання відстані за часом прольоту	11
1.3 Конструкція	12
1.4. Флуктуації часу перикання, нелінійність та дрейф	13
РОЗДІЛ 2. ФОТОДІОДНІ СИСТЕМИ. БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ	16
2.1. Вступ	16
2.2. Огляд фотодіодів	17
2.3. Принцип роботи	18
2.4. Механізм роботи фотодіода	19
2.5. Фотовольтаїчний режим	21
2.6. Фотопровідний режим	22
2.6. Матеріали для фотодіодів	23
2.7. Основні характеристики фотодіодів	24
2.8. Переваги, недоліки та застосування фотодіодів	27
2.10. Висновки до розділу	29
РОЗДІЛ 3.	31
3.1. Завдання для постановки експерименту	31
3.2. Характеристики фотодіода	32
3.3. Лінійність амплітудної характеристики	35
3.4. Кут огляду	38
3.5. Чутливість фотодіода до випромінювання	39
3.6. Залежність чутливості фотодіода від температури	44
3.7. Висновки до розділу	48
ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

ВСТУП

Актуальність теми.

У сучасних військових та цивільних технологіях лазерні далекоміри, системи цілевказання та засоби дистанційного моніторингу стають все більш поширеними. Висока точність, швидкодія та можливість роботи на великих відстанях роблять їх незамінними у завданнях виявлення об'єктів, навігації, картографування та наведення високоточних засобів ураження. Більшість сучасних лазерних систем функціонує у ближньому інфрачервоному діапазоні (1–2 мкм), що обумовлює необхідність використання високочутливих приймачів випромінювання з малим часом відгуку.

Напівпровідникові фотодіоди є основними елементами таких приймачів завдяки своїй високій чутливості, компактності та швидкій реакції на імпульсне опромінення. Вони забезпечують можливість швидкого виявлення лазерного сигналу та своєчасного застосування заходів протидії або збору даних у різних системах. Для ефективного застосування фотодіодів необхідне детальне дослідження їхніх електричних та оптичних характеристик, включаючи спектральну чутливість, стабільність роботи, рівень шумів та динамічні параметри.

В умовах сучасних високотехнологічних загроз швидкість реагування та надійність систем виявлення стають критичними. Саме тому детальне дослідження фотодіодів та оптимізація їхніх характеристик є актуальними для підвищення ефективності систем лазерного попередження, захисту об'єктів та зниження ризику ушкоджень від високоточного озброєння. Крім того, результати таких досліджень можуть бути корисними для вдосконалення цивільних лазерних сенсорів, систем дистанційного вимірювання та науково-дослідних приладів. Отже, проведене дослідження спрямоване на експериментальне визначення основних параметрів фотодіодів і їх аналіз, що є важливим кроком для підвищення ефективності сучасних лазерних систем.

Основною метою дипломної роботи є дослідження та вимірювання характеристик фотодіодів, які застосовуються в приймачах лазерного випромінювання. Робота спрямована на визначення лінійності приймальної характеристики, кута огляду, чутливості та порогової чутливості фотодіодів. Важливою частиною дослідження є аналіз впливу оптичних елементів, таких як лінзи, на параметри прийому. Також розглядається температурна залежність чутливості фотодіодів. Особлива увага приділяється обробці експериментальних даних та оцінці результатів. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність систем виявлення лазерного випромінювання. Робота сприяє оптимізації параметрів фотодіодів для практичних застосувань у прикладній фізиці та енергетиці.

Об'єкт дослідження – Фотодіоди, що застосовуються в приймачах лазерного випромінювання, та їх електричні й оптичні характеристики в умовах експериментальних вимірювань.

Предмет дослідження: Вимірювання та аналіз лінійності, кута огляду, чутливості, порогової чутливості, температурної залежності та впливу оптичних елементів на роботу фотодіодів у системах виявлення лазерного опромінення.

Методи дослідження – проведення експериментальних вимірювань електричних та оптичних характеристик фотодіодів у лабораторних умовах, визначення лінійності приймальної характеристики, кута огляду, чутливості та порогової чутливості. Використання методів математичної статистики, побудова графіків та порівняння з теоретичними моделями. Крім того, калібрування приладів, оцінка шумових характеристик та визначення порогових параметрів фотодіодів для забезпечення надійності та точності вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів – У роботі вперше проведено комплексне експериментальне дослідження фотодіодів, призначених для приймачів лазерного випромінювання у ближньому інфрачервоному діапазоні. Визначено лінійність приймальної характеристики та кут огляду

фотодіодів з урахуванням впливу оптичних лінз. Проведено оцінку чутливості та порогової чутливості в умовах реального опромінення. Досліджено температурну залежність параметрів фотодіодів, що дозволяє оцінити стабільність роботи при різних умовах експлуатації. Розроблено методику обробки експериментальних даних для точного визначення ключових параметрів фотодіодів. Порівняно результати вимірювань із теоретичними моделями, що дало змогу уточнити характеристики приладів. Запропоновано рекомендації щодо оптимізації роботи фотодіодів у системах раннього виявлення лазерного опромінення.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Підвищення точності та надійності систем раннього виявлення лазерного опромінення.. Це сприяє оперативному застосуванню засобів захисту та підвищує загальну ефективність систем спостереження.
2. Оптимізація конструкції фотодіодних приймачів для підвищення чутливості та швидкодії. Дослідження лінійності та кута огляду фотодіодів допомагає вдосконалювати конструкцію приладів. Це забезпечує кращу продуктивність і точність вимірювань у реальних умовах.
3. Розробка методик калібрування та оцінки порогових параметрів фотодіодів. Запропоновані методики забезпечують точне визначення чутливості та порогових характеристик.
4. Використання отриманих даних для створення сучасних лазерних систем попередження та навігації. Результати досліджень можуть бути застосовані при розробці нових систем виявлення та орієнтації.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 51 сторінок, із них основного тексту 49 сторінок, 18 рисунків за текстом, 1 таблиця , список використаних джерел із 23 найменувань на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНЕЙ

1.1. Вступ до розділу

Абсолютні прилади для вимірювання відстаней знаходяться на важливому еволюційному етапі у промислово розвинених країнах щодо застосувань, таких як неруйнівний контроль, зворотне інжиніринг, прогнозне обслуговування або віртуальна реальність. Вони мають потенціал для підвищення продуктивності підприємств або покращення якості виготовленої продукції. Зокрема, безконтактні вимірювання відстаней до нерівних об'єктів становлять великий інтерес для багатьох промислових застосувань.

Основний принцип роботи активних безконтактних дальномірних пристроїв полягає в проєкції сигналу (радіо-, ультразвукового або оптичного) на об'єкт та обробці відбитого або розсіяного сигналу для визначення відстані. Якщо потрібен високоточний дальномір, необхідно обрати оптичне джерело, оскільки радіо- та ультразвукові хвилі не можна адекватно сфокусувати.

Окрім абсолютного вимірювання відстані, лазерні дальноміри традиційно використовуються для тривимірного бачення, контролю розмірів, позиціонування або контролю рівня.

Методи оптичного вимірювання відстаней технічно можна розділити на три категорії: інтерферометрія, метод часу прольоту та триангуляційні методи. Значний прогрес було досягнуто протягом останніх років завдяки розумінню базових фізичних і інформаційно-теоретичних принципів сенсорного визначення відстані. Схоже, що розвиток у проектуванні лазерів, інтегрованих оптичних пристроїв, електроніки випромінювачів і приймачів призведе до подальших цікавих досягнень.

У цій роботі коротко представлені деякі лазерні методики вимірювання відстаней для промислових застосувань: триангуляція, імпульсний метод часу прольоту, вимірювання фазового зсуву та модуляція безперервної хвилі з частотною модуляцією (FMCW). Усі ці підходи продовжують розвиватися,

оскільки вибір конкретної методики здебільшого залежить від вимог конкретного застосування. Крім того, кожен із методів має свої обмеження, які тут обговорюються.

1.2. Вимірювання відстані за часом прольоту

Техніка вимірювання відстані за часом прольоту лазерного імпульсу (Time-of-Flight, TOF) спочатку застосовувалася у військових та геодезичних системах. Вона полягає у визначенні часу, який потрібен імпульсу енергії, щоб пройти від передавача до спостережуваного об'єкта та повернутися до приймача (t_e). Якщо джерелом енергії є світло, ключовим параметром для обчислення відстані є швидкість світла (приблизно $c \approx 30$ см/нс).

Система TOF вимірює час кругового проходження світлового імпульсу від моменту його випромінювання до отримання відбитого сигналу від об'єкта. За допомогою базових фізичних принципів відстань визначається множенням швидкості світла на час, необхідний для проходження цього шляху. У цьому випадку виміряний час відповідає проходженню подвійної відстані, тому його слід поділити навпіл для визначення фактичної відстані до об'єкта. Для досягнення точності 1 мм точність вимірювання інтервалу часу повинна складати 6,7 пс.

Оскільки одного імпульсу достатньо для однозначного визначення відстані з сантиметровою точністю, а точність слабо залежить від самої відстані, цей метод особливо підходить, наприклад, для вимірювань на відстанях понад 1 м, у застосуваннях без використання відбивачів та для швидких вимірювань, таких як сканування. Крім того, усереднення сигналів дозволяє досягти міліметрової або навіть субміліметрової точності.

Перевага системи TOF полягає у прямому характері вимірювання: обидва сигнали — і переданий, і відбитий — слідуєть практично тим самим прямим шляхом до об'єкта і назад до приймача.

Деякі нові застосування, такі як сенсори у робототехніці, автономних транспортних засобах, при стикуванні та зближенні об'єктів, а також сенсори запобігання зіткнень і датчики контролю простору перед машинами, висувають обмеження на розміри приладу, його масу та споживання енергії. Для досягнення цих цілей базові компоненти TOF-дальноміра повинні бути реалізовані у вигляді високопродуктивних інтегральних схем.

У роботі [1] надано сучасний огляд методів абсолютного вимірювання відстаней у одному з томів серії SPIE Milestone.

1.3 Конструкція

Пульсуючий TOF-пристрій для вимірювання відстаней складається з лазерного передавача, що випромінює імпульси тривалістю від 5 до 50 нс, та приймального каналу, який включає р-і-п або лавинний фотодіод, підсилювачі, систему автоматичного регулювання підсилення (AGC) та таймінгові дискримінатори. Випромінений світловий імпульс (стартовий імпульс) запускає блок вимірювання інтервалу часу, а відбитий імпульс (стоп-імпульс) зупиняє його. Відстань до об'єкта пропорційна виміряному інтервалу часу. Блок-схема лазерного далекоміра наведена на Рис. 5.

Вибір типу лазера залежить від необхідного діапазону вимірювань та швидкості роботи. Для великих відстаней (до кількох кілометрів) може використовуватися Nd:YAG лазер з піковою потужністю на рівні мегават. Дешевші пульсуючі лазерні діоди, такі як одно- (SH) або двоheterostrukturnі (DH), здатні видавати пікову потужність у десятки ват і забезпечують вимірювання відстаней до кількох сотень метрів, а при використанні когерентного сумування — ще далі. Частота повторення YAG-лазерів невелика, тоді як лазерні діоди можуть працювати на десятках кілогерц, а DH-типи — навіть на мегагерцевих частотах.

Для 3-D вимірювань лазерний далекомір оснащується кутовими енкодерами для визначення координат точок вимірювання. Сканування

здійснюється механічно — вручну або автоматично. У деяких випадках ручного сканування достатньо, але для критично швидких вимірювань потрібна серво-система для підвищення частоти вимірювань. Основні методи включають сканування як усієї головки, так і лише променя за допомогою дзеркал на гальванометрах.

Замість вузького лазерного променя можна застосовувати сканування фокусної площини, коли лазер освітлює поверхню по точках механічно. Це дозволяє отримати карту відстаней без переміщення променя механічно. Результат — значне підвищення ефективності 3-D картографування, особливо щодо часу вимірювання, при суттєво зменшеній механічній складності, розмірах і енергоспоживанні. Принцип сканування фокусної площини наведений на Рис. 6.

Лазерний промінь освітлює всю область огляду поверхні. Поверхня об'єкта досліджується за допомогою матриць окремих детекторів, кожен з яких покриває свою частину освітленого лазером поля. Сигнали детекторів аналізуються в часовій області, а відстані до конкретних точок обчислюються на основі виміряних інтервалів часу. Система дозволяє одночасно вимірювати відстані в кількох напрямках без будь-яких рухомих частин.

1.4. Флуктуації часу перикання, нелінійність та дрейф

Основними джерелами неточностей у лазерних далекомірах є шум, що викликає флуктуації часу перемикання (timing jitter), ефект «walk», нелінійність та дрейф. Типові джерела шуму включають електронний шум, фотострум, зумовлений фоновим випромінюванням, а також фотострум, що виникає через шум сигналу. Розкидання часу визначає, передусім, точність вимірювання відстані. Амплітуда розкидання часу пропорційна величині шуму (середньоквадратичне значення) і обернено пропорційна нахилу імпульсу у момент визначення часу (du/dt). Одноразова роздільна здатність у 1 см зазвичай досягається при гарному сигнал-шум співвідношенні

($\text{SNR} \approx 100$) і смузі пропускання каналу приймача 100 МГц. Однак точність знижується зі збільшенням відстані, оскільки амплітуда імпульсу зменшується пропорційно квадрату відстані.

Варіації амплітуди та форми імпульсу створюють помилку визначення часу в схемі фіксації часу, яка називається помилкою «walk». Розкидання часу та ефект «walk» на передньому фронті імпульсу наведені на рис. 7. Часовий дискримінатор є критично важливою частиною системи точного вимірювання часу. Його завдання — визначати момент часу на електричному імпульсі підсилювача детектора та формувати імпульс тригера у потрібний момент.

Вибір методу визначення часу залежить від необхідної часової роздільної здатності, частоти підрахунку та динамічного діапазону імпульсу. Поширені принципи конструкції дискримінаторів включають: визначення часу по передньому фронту (constant amplitude), нульовий перетин (derivation), момент першого порядку (integration) та визначення по сталої фракції (constant fraction timing). Дискримінація по сталої фракції (CFD) компенсує ефект «walk», зумовлений амплітудою та часом наростання імпульсу, і широко використовується у TOF-одинацях лазерних далекомірів.

Принцип роботи CFD полягає у пошуку моменту імпульсу, коли його висота зберігає сталий відсоток від амплітуди. Утворення цього моменту породжує тригерний імпульс. Сталий момент можна аналізувати за допомогою високопідсилювального диференційного компаратора на логіці ECL, що підсилює різницю між затухлими та затриманими імпульсами. CFD компенсує ефект «walk», зумовлений амплітудою та часом наростання, але не враховує нелінійні зміни форми імпульсу. Методи нульового перетину та моменту першого порядку компенсують лише амплітудні варіації, тоді як передній фронт не компенсує жодних змін.

Трансмісійний блок, підсилювач та блок вимірювання інтервалу часу також критично важливі для точності системи. Трансмісійний блок повинен забезпечувати стабільну форму лазерного імпульсу, що може вимагати

температурної стабілізації діода. Динамічні явища лазерних діодів, такі як релаксаційні коливання, також слід враховувати при розробці схеми імпульсів, оскільки вони можуть суттєво змінювати форму імпульсу.

Регулювання підсилення необхідне для узгодження динаміки імпульсу з дискримінатором часу. Обсяг регулювання залежить від вимірювальної відстані, конструкції оптики та змін відбивної здатності об'єкта. Для регулювання підсилення можна використовувати оптичний регульований атенюатор на приймальній оптиці. Перевага цього методу перед електронним підсиленням — стабільність затримки у широкому діапазоні регулювання. Нещодавно динамічний діапазон електронних методів регулювання значно зріс.

Інтервал часу між стартовим і стоп-імпульсом вимірюється перетворювачем часу в цифрову форму (TDC), який є швидким, точним та стабільним пристроєм вимірювання часу, що використовує, наприклад, цифровий підрахунок разом з аналоговою або цифровою інтерполяцією. Одноразова роздільна здатність TDC зазвичай перевищує розкидання часу, зумовлене шумом.

Фінальна точність вимірювання відстані значно покращується шляхом усереднення, причому покращення пропорційне квадратному кореню з кількості вимірювань. Таким чином, усереднення 100 послідовних вимірювань дозволяє досягти міліметрової роздільної здатності, при цьому час вимірювання складе, наприклад, 1 мс при частоті імпульсів 100 кГц. Якщо статистична помилка усереднюється до незначного рівня, точність системи визначається систематичними похибками, такими як нелінійність шкали вимірювання інтервалу часу та дрейф. Ретельна конструкція системи дозволяє зменшити ці похибки до міліметрового рівня.

?

РОЗДІЛ 2. ФОТОДІОДНІ СИСТЕМИ. БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ

2.1. Вступ

Напівпровідниковий прилад, відомий як фотодіод або світлочутливий напівпровідник, використовує р–n-перехід для перетворення потоків фотонів у електричний струм.

У р-області міститься велика кількість діркових носіїв заряду (позитивних), тоді як у n-області — надлишок електронів (негативних носіїв).

Фотодіоди можуть виготовлятися з різних матеріалів — кремнію (Si), германію (Ge), арсеніду індію-галію (InGaAs) тощо. Кожен матеріал має свої унікальні властивості, що визначають чутливість, робочий спектральний діапазон, рівень шуму та швидкодію приладу. Саме вибір матеріалу дозволяє оптимізувати фотодіод під конкретне застосування — від економії вартості до підвищення ефективності у вузькому спектральному інтервалі.

У режимі зворотного зміщення фотодіод підключається так, що через нього проходить лише дуже малий зворотний струм. У цьому стані ширина області збіднення (depletion region) є значною. За звичайних умов цей струм зумовлений рухом неосновних носіїв заряду і має дуже мале значення.

Коли ж світло потрапляє на р–n-перехід через прозоре віконце корпусу, фотони випромінювання передають свою енергію валентним електронам у напівпровіднику. Унаслідок цього електрони звільняються від ковалентних зв'язків і стають вільними носіями заряду. Таким чином утворюється більша кількість пар електрон–дірка.

Збільшення числа таких пар приводить до росту кількості неосновних носіїв заряду, а отже — до зростання зворотного фотоструму. Саме на цьому фізичному принципі ґрунтується робота фотодіода.

Без освітлення зворотний струм у фотодіоді перебуває в діапазоні мікроамперів. Зміна цього струму, викликана дією світла, також має порядок мікроамперів, проте її легко спостерігати, оскільки вона помітно впливає на величину зворотного струму.

Якщо ж фотодіод увімкнено в режим прямого зміщення, струм через нього має значно більші значення — порядку міліамперів (мА). У цьому випадку струм визначається не дією світла, а прикладеною напругою прямого зміщення. Зміна прямого струму під дією світла дуже мала і практично непомітна.

Таким чином, світло майже не впливає на опір фотодіода при прямому зміщенні. Тому, щоб фотодіод міг працювати як світлозалежний елемент, у якому інтенсивність світла істотно впливає на струм, його завжди підключають у режимі зворотного зміщення.

Фотодіод — це напівпровідниковий прилад, призначений для перетворення світла в електричний струм. Коли фотони поглинаються матеріалом фотодіода, в ньому виникає електричний струм.

Фотодіоди можуть мати велику або малу площу поверхні, а також можуть бути оснащені вбудованими лінзами чи оптичними фільтрами. Зазвичай, із збільшенням площі фоточутливої поверхні зменшується швидкість відгуку пристрою. Типовим прикладом фотодіода є сонячна батарея, яка генерує електричну енергію під дією світла.

Подібно до звичайних сонячних елементів, фотодіоди є напівпровідниковими структурами з великою площею поверхні, які можуть мати захисне віконце або оптичне волокно для пропускання світла до чутливого шару, або бути відкритими (для реєстрації ультрафіолетового чи рентгенівського випромінювання у вакуумі).

Фотодіоди зазвичай працюють у режимі зворотного зміщення, що забезпечує їхню стабільну та чутливу роботу [1].

2.2. Огляд фотодіодів

Фотодіоди — це різновид напівпровідникових діодів, здатних перетворювати енергію світла в електричну. Вони діють протилежно світлодіодам (LED), які, навпаки, перетворюють електричну енергію на

світлову. Крім того, фотодіоди часто застосовують для вимірювання інтенсивності освітлення.

Фотодіод — це діод із р–n переходом, який генерує електричний струм під дією світлового випромінювання. Такі прилади також відомі під назвами світлові детектори, фотосенсиори або фотодетектори.

Фотодіоди сконструйовані для роботи в умовах зворотного зміщення, що дозволяє ефективно виявляти навіть слабкі потоки фотонів. Найпоширенішими матеріалами для їх виготовлення є кремній (Si), германій (Ge) та індій-галій-арсенід (InGaAs).

Фотодіод — це напівпровідниковий пристрій, у якому р-шар містить надлишок дірок (позитивних носіїв заряду), а n-шар — надлишок електронів (негативних носіїв). Вибір матеріалу для виготовлення фотодіода визначається необхідними параметрами — чутливістю, спектральним діапазоном, рівнем шумів, швидкодією та вартістю.

Завдяки цьому підбору властивостей фотодіоди успішно застосовуються у системах приймання лазерного випромінювання, оптичних сенсорах, медичних приладах, системах зв'язку та сонячних елементах.

2.3. Принцип роботи

Фотодіод — це напівпровідниковий прилад, що зазвичай має структуру р–n переходу або PIN-структуру (р–і–n), у якій між р- та n-областями розташовується слаболегований або власний напівпровідниковий шар. Саме ця область формує зону збіднення із вбудованим електричним полем.

Коли на фотодіод потрапляє квант світла (фотон) з енергією, більшою або рівною ширині забороненої зони напівпровідника, він поглинається матеріалом діода, внаслідок чого утворюється пара електрон–дірка. Цей процес називається внутрішнім фотоефектом.

Якщо поглинання фотона відбувається безпосередньо в області збіднення або на відстані, що не перевищує довжину дифузії носіїв заряду, то

створені електрони й дірки миттєво розділяються під дією внутрішнього електричного поля переходу. Електрони спрямовуються до катода, а дірки — до анода, утворюючи фотострум.

Загальний струм, що протікає через фотодіод, складається з двох складових:

Фотоструму, який виникає внаслідок освітлення;

Темнового струму, який існує навіть за відсутності світла через теплову генерацію носіїв.

Для підвищення чутливості фотодіода темновий струм необхідно зменшити настільки, наскільки це можливо, оскільки саме він обмежує мінімальний рівень світлового сигналу, який може бути надійно зареєстрований. У практичних пристроях використовують спеціальні матеріали, технології легування та охолодження, що дозволяють мінімізувати темнові втрати та підвищити співвідношення сигнал/шум.

2.4. Механізм роботи фотодіода

Фотодіод — це напівпровідниковий прилад, який перетворює потік світлових фотонів на електричний струм. Його дія ґрунтується на тому, що фотони, падаючи на поверхню діода, взаємодіють із атомами напівпровідникового матеріалу, збуджуючи електрони із валентної зони до зони провідності. Унаслідок цього утворюються пари електрон–дірка.

Якщо енергія падаючого фотона ($h\nu$) перевищує ширину забороненої зони матеріалу (E_g), відбувається ефективне поглинання світла. Найчастіше такі процеси мають місце поблизу зони збіднення p–n переходу, де існує вбудоване електричне поле. Саме воно розділяє щойно створені електрони й дірки, не дозволяючи їм рекомбінувати.

Під дією цього електричного поля електрони спрямовуються до n-області, а дірки — до p-області. Таким чином, у зовнішньому колі виникає електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна кількості утворених носіїв заряду.

Якщо до фотодіода під'єднати зовнішнє навантаження, через нього починає протікати фотострум, який прямо залежить від інтенсивності падаючого світла.

Чим вища інтенсивність освітлення, тим більше фотонів поглинається в активній області діода і тим сильніше зростає створювана електрорушійна сила. Іншими словами, фотострум прямо пропорційний потоку світлової енергії, що падає на поверхню приладу. Завдяки цьому фотодіоди широко використовуються як фотодетектори для вимірювання рівня освітлення, реєстрації оптичних сигналів і контролю інтенсивності випромінювання в різних діапазонах — від ультрафіолетового до інфрачервоного.

Для підвищення точності вимірювань фотодіоди зазвичай працюють у режимі зворотного зміщення (reverse bias). У цьому випадку внутрішнє поле зони збіднення посилюється зовнішнім полем, що пришвидшує розділення носіїв заряду і зменшує ймовірність їхньої рекомбінації. Крім того, зворотне зміщення забезпечує лінійність залежності між фотостромом і інтенсивністю світла, що спрощує калібрування приладу та підвищує його стабільність.

Сучасні фотодіоди можуть бути оснащені вбудованими лінзами, фільтрами чи оптичними волокнами, які фокусують або відсіюють випромінювання потрібного спектрального діапазону. Завдяки цьому можна збільшити ефективність збору світла, покращити селективність за довжиною хвилі й досягти високої чутливості навіть при слабкому освітленні.

Отже, основний принцип роботи фотодіода полягає у перетворенні світлової енергії на електричну за допомогою процесів поглинання, генерації та розділення носіїв заряду в р–п переході. Ця властивість робить фотодіоди незамінними елементами у фотометрії, телекомунікаціях, системах автоматичного керування та вимірювальних комплексах, де потрібна швидка й точна реакція на зміни освітленості.

Якщо фотон має достатню енергію, він може вдарятися об атом усередині пристрою та вивільняти електрон. У результаті утворюється електронно-діркова пара (e^- та h^+), де «дірка» – це просто «порожнє місце»,

яке залишив електрон. Ці електронно-діркові пари в матеріалі можуть рекомбінувати, перетворюючи свою енергію на тепло, якщо фотони поглинуті в шарах Р або N і знаходяться на відстані принаймні однієї дифузійної довжини від області виснаження. Це означає, що в тих ділянках, де електричне поле ще не ефективне, вивільнені електрони та дірки швидко відновлюють свій баланс, виділяючи енергію у вигляді тепла, замість того щоб створювати електричний струм.

Електронно-діркові пари, утворені фотонами, що поглинаються безпосередньо в області виснаження або поблизу неї, починають мігрувати до протилежних кінців під дією електричного поля. Дірки на аноді рухаються до негативного потенціалу, тоді як електрони спрямовуються до позитивного потенціалу на катоді. Такий рух заряджених частинок створює струм фотодіода, який називають фотострумом. Фотодіод у вигляді Р-N переходу з кількома контактами вгорі та внизу показаний на рисунку 1.

Межі області виснаження функціонують подібно до пластин плоского конденсатора, внаслідок чого в фотодіоді виникає ємність. Ширина області виснаження обернено пропорційна величині цієї ємності – тобто, чим ширша область, тим менша ємність, і навпаки. Крім того, ємність області виснаження залежить від напруги зворотного зміщення: при збільшенні зворотної напруги область виснаження розширюється, що зменшує ємність, а при зменшенні напруги – скорочується, що збільшує ємність. Такий взаємозв'язок дозволяє використовувати фотодіоди не лише для перетворення світла в електричний сигнал, а й у схемах, де важлива керована ємність.

2.5. Фотовольтаїчний режим

Коли пристрій працює в режимі нульової напруги або у фотовольтаїчному режимі, його здатність генерувати фотострум обмежена. Через це накопичується напруга на контактах пристрою. Основою роботи

сонячних елементів є фотовольтаїчний ефект, який використовується саме в цьому режимі. Власне, звичайна сонячна батарея – це великий фотодіод із великою площею поверхні, здатний ефективно поглинати світло і перетворювати його енергію у електричний потенціал. У цьому режимі фотони створюють електронно-діркові пари, які частково розділяються електричним полем, що і призводить до появи напруги на виході без зовнішнього живлення. Напруга, яка накопичується, є прямим наслідком дії фотовольтаїчного ефекту і залежить від інтенсивності освітлення, спектрального складу світла та характеристик матеріалу фотодіода.

2.6. Фотопровідний режим

У цьому режимі діод часто працює під зворотним зміщенням, тобто катод підключається до більш позитивного потенціалу відносно анода. Додаткова зворотна напруга розширює область виснаження та зменшує ємність переходу, що дозволяє значно скоротити час відгуку пристрою на зміну освітлення. Завдяки цьому фотодіод може швидше реагувати на імпульси світла. При цьому зворотна напруга незначно змінює величину фотоструму, але підвищує так званий темновий струм. Важливо зазначити, що фотострум у фотопровідному режимі лінійно пропорційний освітленню (і, відповідно, потужності опромінення) для заданого спектрального складу світла, що робить цей режим зручним для точних вимірювань інтенсивності світла.

Однак, хоча фотопровідний режим і є швидшим, він має схильність до більшого електронного шуму. У типовій схемі цей шум зазвичай зумовлений шумом Джонсона–Найквіста опору навантаження, оскільки витік струму якісного PIN-діода надзвичайно малий (менше 1 нА). Це означає, що електронні коливання навколо навантаження часто домінують у спектрі шуму, а сам фотодіод практично не додає власного шуму через витікання струму.

Таким чином, вибір режиму роботи фотодіода залежить від конкретного застосування: фотовольтаїчний режим добре підходить для генерації напруги та сонячної енергії, а фотопровідний – для високошвидкісних вимірювальних приладів, де важливий час відгуку.

2.6. Матеріали для фотодіодів

Матеріал, з якого виготовлений фотодіод, відіграє ключову роль у визначенні його характеристик. Це пояснюється тим, що фотони повинні мати достатню енергію, щоб активувати електрони та перевести їх через енергетичну заборонену зону матеріалу. Якщо енергія фотонів менша за ширину забороненої зони (bandgap), електрони не будуть збуджуватися, і фотострум буде незначним або взагалі відсутнім.

Завдяки цій властивості, матеріал фотодіода визначає такі параметри, як:

- чутливість до різних довжин хвиль світла,
- рівень шуму,
- ефективність перетворення світлової енергії у електричний сигнал.

Наприклад, фотодіоди на основі кремнію (Si) мають широку заборонену зону, що забезпечує нижчий рівень електронного шуму порівняно з германієвими фотодіодами. Це робить кремнієві фотодіоди більш стабільними та точними в роботі, особливо в оптичних системах, де важлива низька величина шуму.

Таблиця 1. Найпоширеніші матеріали для виготовлення фотодіодів та їх спектральна чутливість наведені нижче:

Матеріал	Діапазон довжин хвиль електромагнітного спектра (нм)
Кремній (Si)	190–1100
Германій (Ge)	400–1700
Індій-Галій-Арсенід (InGaAs)	800–2600

Матеріал	Діапазон довжин хвиль електромагнітного спектра (нм)
Сульфід свинцю (PbS)	<1000–3500
Телурид ртуті-кадмію (HgCdTe)	400–14000

Кожен з цих матеріалів підходить для певного спектрального діапазону та конкретних застосувань. Наприклад, кремній добре підходить для видимого та ближнього інфрачервоного світла, германій – для ближнього та середнього інфрачервоного діапазону, а HgCdTe дозволяє працювати у далекому інфрачервоному діапазоні.

Вибір матеріалу визначає, як фотодіод реагуватиме на світло, його ефективність, рівень шуму і спектральну чутливість, що є критично важливим для точних оптичних вимірювань, сонячних елементів та високотехнологічних датчиків.

2.7. Основні характеристики фотодіодів

При виборі фотодіода та визначенні режиму його роботи (наприклад, чи застосовувати зворотне зміщення) слід враховувати чотири ключові фактори, що безпосередньо впливають на ефективність пристрою:

1. Час відгуку (швидкість) фотодіода Час відгуку визначається ємністю P-N переходу. Це кількість часу, необхідна для проходження заряджених частинок через перехід. Чим більша ємність переходу, тим повільніше реагує фотодіод на зміну освітлення. Область виснаження відіграє тут ключову роль: ширша область виснаження зменшує ємність переходу, прискорюючи рух електронів і дірок, а відповідно – покращує швидкодію фотодіода.
2. Ширина області виснаження Вона безпосередньо впливає на час відгуку: чим ширша область, тим швидше фотодіод реагує на світлові імпульси. Це пояснюється тим, що електрони та дірки проходять через більшу частину області під впливом електричного поля, зменшуючи час, необхідний для перенесення заряду.

3. Чутливість або відгук на світло Відношення фотоструму, створеного падаючим світлом, до потужності цього світла називається чутливістю фотодіода. Зазвичай її вимірюють у одиницях A/W (ампер на ват), що показує, скільки струму генерується на одиницю потужності падаючого світла. Характеристики чутливості зазвичай зображуються у вигляді кривої, де A/W відкладається по осі Y , а довжина хвилі – по осі X . Цей параметр часто називають квантовою ефективністю (quantum efficiency), оскільки він відображає ефективність перетворення фотонів у рух заряджених частинок.

4. Темновий струм Коли на фотодіод не падає світло, через нього все одно протікає невеликий струм – темновий струм. Він може бути одним із головних джерел шуму системи фотодіода. Вимірювання темного струму зазвичай проводять у спеціальному блоці, який блокує потрапляння світла на фотодіод. Темновий струм може враховувати навіть фотострум від фонового випромінювання.

Важливо зазначити, що на низьких рівнях освітлення темновий струм може “маскувати” фотострум, оскільки при слабкому світлі фотодіод генерує дуже малий струм. Темновий струм збільшується з підвищенням температури, а його зменшення можливо при відсутності зворотного зміщення. Ідеальний фотодіод – це такий, який не має темного струму взагалі.

2.7.1. Типи фотодіодів

1. Планарний дифузійний тип

На поверхню P-N переходу наноситься покриття з SiO_2 , що дозволяє отримати фотодіод з низьким темновим струмом. Це забезпечує високу стабільність роботи при слабкому освітленні, зменшуючи шум, який може маскувати фотострум.

2. Планарний дифузійний тип з низькою ємністю

Це високошвидкісна версія планарного дифузійного фотодіода. Для її виготовлення використовують надчистий матеріал типу N з високим електричним опором, що дозволяє збільшити ширину області виснаження та

зменшити ємність переходу. Завдяки цьому час відгуку фотодіода скорочується до $1/10$ від нормального значення. Р-шар роблять дуже тонким, що забезпечує високу чутливість до ультрафіолетового випромінювання.

3. Тип PNN+

У цьому типі низькоомний матеріал N+ роблять товстим, щоб межа N-N+ знаходилась ближче до області виснаження. Це дещо знижує чутливість до інфрачервоного випромінювання, тому такі фотодіоди корисні для вимірювань у діапазоні коротких хвиль.

4. PIN-тип

Поліпшена версія фотодіода з низькою ємністю. Між шарами P і N додають шар з дуже високим опором, що дозволяє ще більше покращити час відгуку. У поєднанні із зворотним зміщенням цей тип фотодіода демонструє ще швидший відгук і має високий опір до пробію та низький витік струму, що робить його ідеальним для високошвидкісних вимірювань.

5. Шотткі-тип

На N-шар наноситься тонке золоте покриття, утворюючи p-n перехід за ефектом Шотткі. Оскільки відстань від поверхні до переходу невелика, чутливість до ультрафіолетового світла висока.

6. Авальанчний тип

Якщо на p-n перехід подати зворотне зміщення і сформувати сильне електричне поле у області виснаження, носії фотоструму прискорюються цим полем. Вони стикаються з атомами кристалічної решітки, створюючи вторинні носії заряду. Цей процес повторюється багаторазово і називається **авальанчним ефектом**. Оскільки він призводить до підсилення сигналу, такі фотодіоди ідеальні для виявлення надзвичайно слабкого світла.

2.7.2. Електричні характеристики фотодіода

Для імітації реального фотодіода з кремнієвим P-N переходом часто використовують модель, що складається з **ідеального діода**, паралельно

якому підключене джерело струму, що символізує фотострум від падаючого випромінювання (рисунок 3).

Крім того, до схеми додають:

Шунт-опір (R_{SH}) – паралельно діоду та джерелу струму;

Ємність переходу (C_j) – також підключена паралельно;

Серійний опір (R_S) – з'єднує всі елементи послідовно.

Шунт-опір

Нахил кривої «струм-напруга» фотодіода при $V=0$ визначає шунт-опір. У ідеального фотодіода він має бути нескінченним, але реальні значення коливаються від десятків до тисяч мегомів.

Шунт-опір визначають експериментально: вимірюють струм при ± 10 мВ і обчислюють R_{SH} . Темновий струм у фотодіоді без зміщення (фотовольтаїчний режим) оцінюють також через шунт-опір. Максимальний шунт-опір бажаний для оптимальної роботи фотодіода, оскільки зменшує шум і підвищує точність вимірювань, особливо при низькому рівні освітлення.

2.8. Переваги, недоліки та застосування фотодіодів

Переваги

Можливість роботи як змінного резистора Фотодіоди можна використовувати у схемах, де необхідно регулювати опір залежно від освітлення. Це робить їх універсальними компонентами для електронних пристроїв.

Висока чутливість до світла Фотодіоди дуже чутливі навіть до слабкого світла, що дозволяє застосовувати їх у точних вимірювальних системах, оптичних сенсорах і приладах контролю освітленості.

Висока швидкість роботи Фотодіоди реагують на зміну освітлення практично миттєво. Струм швидко змінюється, що дозволяє швидко

змінювати опір від високого до низького або навпаки, роблячи їх ідеальними для високошвидкісних сигналів та цифрових пристроїв.

Недоліки

Температурна залежність темнового струму Температура сильно впливає на темновий струм, що може призводити до збільшення шуму та зниження точності вимірювань при високих температурах.

Нестабільність загальних характеристик Через залежність характеристик фотодіодів від температури вони мають слабку температурну стабільність, що потребує додаткової компенсації у критичних застосуваннях.

Обмежений рівень струму Струм фотодіода та його зміни знаходяться в межах мікро- або міліамперів. Це може бути недостатньо для живлення інших електронних схем, тому для використання у більш складних системах часто потрібні додаткові підсилювачі або адаптери.

2.9. Застосування фотодіодів

У вимірювальних та обробних пристроях P-N фотодіоди широко використовуються у **charge-coupled devices (CCD)**, фотопомножувачах та фотопровідниках. Вони дозволяють змінювати стан електронних схем (цифрові сигнали для керування або обробки) або формувати вихідний сигнал, який залежить від рівня освітлення (аналогові сигнали для точних вимірювань).

Побутові та промислові прилади Фотодіоди застосовуються в компакт-дискових плеєрах, димових детекторах та приймачах інфрачервоного пульта дистанційного керування, що дозволяє управляти кондиціонерами, телевізорами та іншою технікою. У багатьох випадках можна використовувати як фотодіоди, так і фотопровідники для виявлення світла та керування пристроями: наприклад, вуличним освітленням або експозицією камери.

Точні вимірювання освітленості У наукових дослідженнях і промисловості фотодіоди часто використовуються для **точного вимірювання інтенсивності світла**. На відміну від фотопровідників, їхня реакція на світло зазвичай більш лінійна, що робить їх придатними для аналітичних і лабораторних систем.

Медичні застосування Фотодіоди активно використовуються в різноманітних медичних приладах, включаючи:

пульсоксиметри,

обладнання для імуноаналізу,

детектори для комп'ютерної томографії, які працюють разом зі сцинтиляторами.

Сигналізаційні та лічильні системи Дві найпоширеніші системи, засновані на фотодіодах, – це **системи сигналізації та системи підрахунку об'єктів**, де фотодіоди виконують функцію високочутливих сенсорів, здатних швидко реагувати на зміну освітлення.

2.10. Висновки до розділу

Фотодіоди є **ключовими компонентами** у багатьох галузях сучасної технології, включаючи **оптичні комунікаційні системи, дистанційне зондування, медичну візуалізацію та телекомунікації**. Їхня здатність швидко реагувати на світло, перетворювати фотони у електричний сигнал та забезпечувати точні вимірювання робить фотодіоди незамінними в численних пристроях та системах.

Для максимізації продуктивності фотодіодів та створення нових застосувань необхідно **глибоке розуміння їхніх фізичних принципів, електричних характеристик і матеріалів**. Вивчення фотодіодів дозволяє оптимізувати їхню чутливість, зменшити рівень шуму, підвищити швидкість відгуку та адаптувати їх під конкретні вимоги сучасних технологічних систем.

У майбутньому дослідження повинні зосередитися на **подальшому підвищенні квантової ефективності та покращенні шумових характеристик фотодіодів**, а також на створенні нових матеріалів із заданими властивостями. Важливим напрямом є розробка **інноваційних архітектур пристроїв**, які дозволять підвищити продуктивність та розширити спектр застосування.

Крім того, інтеграція фотодіодів у **системи з елементами штучного інтелекту та алгоритмами машинного навчання** відкриває нові можливості для **інтелектуальної візуалізації, автономного сенсингу та розумних приладів**, здатних адаптуватися до умов середовища та приймати рішення на основі аналізу сигналів у реальному часі.

Таким чином, фотодіоди залишаються **неоцінним елементом у численних технологічних застосуваннях**, а сучасні дослідницькі зусилля створюють підґрунтя для **революційних проривів** у різних сферах науки та техніки. Відкриття нових матеріалів, вдосконалення конструкцій і впровадження інтелектуальних систем на основі фотодіодів мають потенціал значно підвищити ефективність та функціональність майбутніх технологій.

РОЗДІЛ 3.

3.1. Завдання для постановки експерименту

Першим завданням експериментальної частини роботи є вимірювання амплітудної характеристики фотодіода. Це дослідження дозволяє визначити, як змінюється вихідний сигнал фотодіода при зміні інтенсивності падаючого світла. Аналіз амплітудної характеристики дає змогу встановити оптимальні режими роботи фотодіода та оцінити його динамічний діапазон, що є критично важливим для подальших експериментів із вимірюванням слабких оптичних сигналів.

Другим завданням є вимірювання кута огляду фотодіода. Це дослідження необхідне для визначення просторових характеристик фотодіода, тобто того, під якими кутами він здатен ефективно сприймати світловий сигнал. Вимірювання кута огляду дозволяє визначити область простору, де фотодіод показує максимальну чутливість, а також оцінити втрати сигналу при відхиленні від оптичної осі. Отримані дані важливі для правильного розташування фотодіода в експериментальній установці та для забезпечення точності подальших вимірювань.

Наступним важливим завданням є визначення чутливості фотодіода. Чутливість характеризує здатність пристрою реєструвати навіть незначні зміни світлового потоку. Вимірювання цієї характеристики дозволяє оцінити ефективність фотодіода в умовах низької інтенсивності сигналу та сприяє вибору оптимальних параметрів експериментальної установки. Крім того, знання чутливості необхідне для проведення кількісного аналізу отриманих результатів та порівняння їх із теоретичними моделями.

Нарешті, одним із ключових завдань є визначення температурної залежності чутливості фотодіода. Вплив температури на роботу фотодіода може бути суттєвим, особливо при дослідженнях у низькотемпературних умовах або при зміні робочого середовища. Вимірювання температурної залежності дозволяє оцінити стабільність роботи фотодіода, визначити

можливі похибки, що виникають через нагрів або охолодження, і врахувати ці фактори при проведенні подальших експериментів.

Узагальнюючи, постановка експерименту включає комплексну оцінку основних характеристик фотодіода: амплітудної відповіді, просторового кута огляду, чутливості та її залежності від температури. Виконання цих завдань забезпечує повне розуміння роботи фотодіода в реальних умовах і створює надійну основу для подальших досліджень та вимірювань. Кожне з цих завдань тісно пов'язане з іншими: наприклад, правильне визначення кута огляду впливає на точність вимірювання амплітудної характеристики, а врахування температурної залежності є необхідним для коректної оцінки чутливості. Таким чином, системний підхід до постановки експерименту дозволяє мінімізувати похибки та підвищити надійність отриманих результатів.

3.2. Характеристики фотодіода

Для проведення експериментальних досліджень був обраний фотодіод **IPD1450-200-SMB**. Це високочутливий **InGaAs PIN фотодіод**, який відзначається стабільною роботою у ближньому інфрачервоному діапазоні та широким спектральним покриттям. Активна приймальна поверхня фотодіода має розміри **2 × 2 мм**, що забезпечує достатню площу для ефективного збору світлового сигналу навіть при невеликих інтенсивностях. Загальні габарити фотодіода складають **5.0 × 5.2 × 1.0 мм**, що робить його компактним і зручним для інтеграції в експериментальні установки (рис. 1).

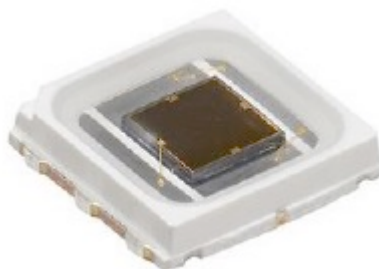


Рис. 3.1. Фотодіод IPD1450-200-SMB

Фотодіод **IPD1450-200-SMB** володіє високою чутливістю у спектральному діапазоні від **900 нм** до **1700 нм**, що охоплює більшість ближньоінфрачервоних джерел світла, які часто використовуються в наукових дослідженнях оптичних та низькотемпературних систем. Максимальна чутливість спостерігається при **1580 нм**, що забезпечує оптимальну ефективність фотодіода при роботі з лазерами та іншими інфрачервоними джерелами у цьому діапазоні (рис. 2). Такий спектральний профіль дозволяє проводити вимірювання з високою точністю та мінімізувати вплив поза-спектральних сигналів на результати експерименту.

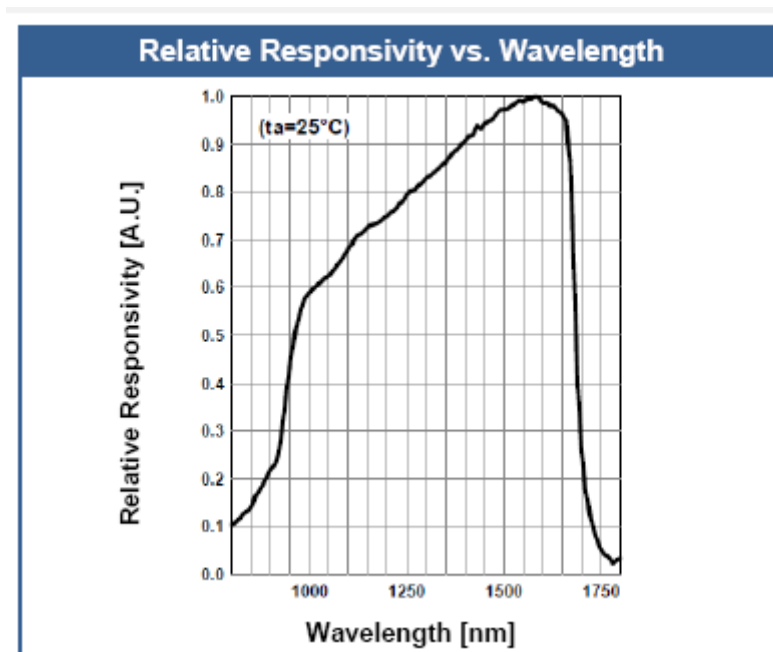


Рис. 3.2. Спектральний діапазон фотодіода

Крім спектральних характеристик, важливою є оцінка геометричних параметрів фотодіода. Компактні розміри корпусу дозволяють легко встановлювати фотодіод у оптичні схеми, забезпечуючи стабільне положення та мінімізацію механічних коливань, які можуть впливати на результати вимірювань. Активна площа 2×2 мм є оптимальною для забезпечення достатньої інтеграції світлового потоку та зменшення ефектів дифракції на краях приймальної поверхні.

Фотодіод характеризується також високою швидкістю відгуку та низьким рівнем шуму, що робить його придатним для вимірювання як постійного, так і пульсуючого світлового сигналу. Для багатьох експериментів у фізиці квантових рідин та оптичних дослідженнях саме такі параметри є критично важливими, оскільки дозволяють реєструвати швидкі зміни інтенсивності світла без втрати точності.

Важливою характеристикою є спектральна чутливість фотодіода. Вона визначає, наскільки ефективно фотодіод перетворює падаючий світловий потік у електричний сигнал залежно від довжини хвилі світла. На рисунку 2 показано типову залежність спектральної чутливості для даного фотодіода. Максимум чутливості при 1580 нм забезпечує найвищий сигнал для джерел у цьому діапазоні та мінімальні втрати при обробці даних. Крім того, знання спектральної характеристики є необхідним для коректного калібрування експериментальної установки та забезпечення сумісності фотодіода з іншими оптичними компонентами.

Таким чином, фотодіод **IPD1450-200-SMB** поєднує у собі компактні розміри, високу чутливість у широкому спектральному діапазоні, швидку реакцію та низький рівень шуму. Ці властивості роблять його ідеальним вибором для проведення систематичних експериментальних досліджень, що включають вимірювання інтенсивності світлових потоків, аналіз просторових та температурних залежностей сигналу, а також дослідження взаємодії фотонів з різними середовищами.

Вивчення характеристик фотодіода на цьому етапі створює надійну основу для подальших експериментів, оскільки дозволяє заздалегідь оцінити можливості та обмеження при вимірюванні слабких оптичних сигналів, визначити оптимальні умови роботи фотодіода та забезпечити високу точність і повторюваність результатів.

?

3.3. Лінійність амплітудної характеристики

Для оцінки лінійності амплітудної характеристики фотодіода була проведена серія експериментів із використанням лазерного випромінювання. Схема експериментальної установки представлена на **рисунку 3**. Лазерне випромінювання спочатку проходить через поляризатор, після чого падає на фотодіод. Випромінювання лазера є лінійно поляризованим, причому напрям поляризації встановлений вертикально. Вісь поляризатора також розташована вертикально, що забезпечує максимальне пропускання світла через нього у початковому положенні.

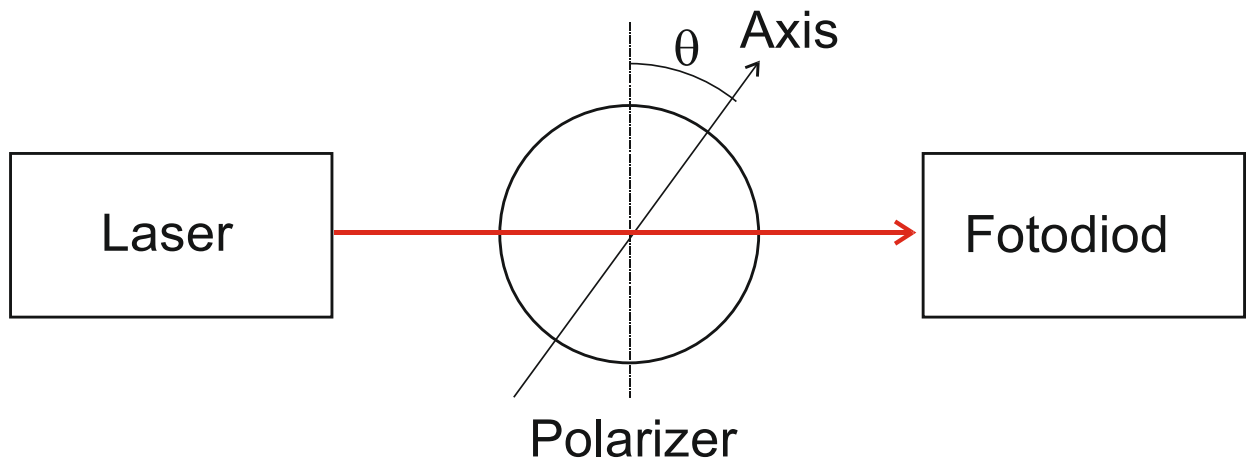


Рис. 3. Блок-схема вимірювань лінійності амплітудної характеристики фотодіода

При повороті поляризатора на кут θ інтенсивність випромінювання I , що пройшла крізь поляризатор, змінюється за законом $I = I_0 \cos^2\theta$, де I_0 — інтенсивність падаючого світла. Це класичне співвідношення Мальюса дозволяє передбачати зміну сигналу в залежності від кута повороту поляризатора. Використання поляризатора в експерименті дає змогу точно контролювати інтенсивність світла, що падає на фотодіод, і тим самим оцінювати його амплітудні характеристики у широкому діапазоні освітленості.

Для проведення експерименту була знята залежність інтенсивності світла I після поляризатора від кута його повороту θ у межах від -45° до $+45^\circ$

відносно вертикалі (рис. 4). На графіку представлені дві криві: **крива 1** – це сигнал з фотодіода в мілівольтах, а **крива 2** – функція $\cos^2\theta$, помножена на коефіцієнт, який дозволяє її порівняти з кривою 1. Порівняння цих кривих показує, що експериментальні дані загалом відповідають теоретичній залежності Мальюса, хоча спостерігається невеликий розкид точок на кривій 1. Цей розкид пояснюється впливом засвітки, яка частково діяла на фотодіод під час експерименту, а також невеликими похибками в точності встановлення кута поляризатора.

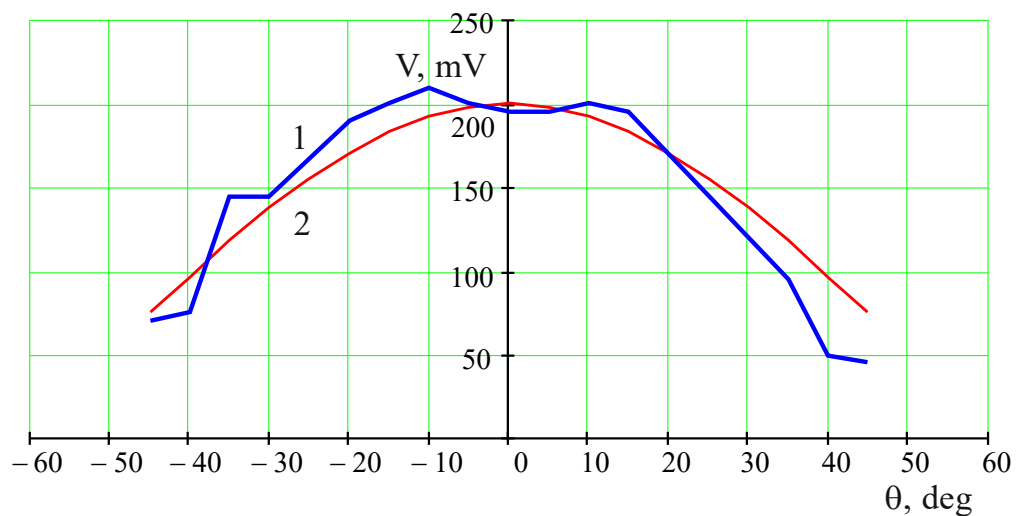


Рис. 4. Залежність сигналу з фотодіода від кута повороту поляризатора

1 – сигнал з фотодіода, 2 – залежність $\cos^2\theta$

Отримані дані дозволяють побудувати амплітудну характеристику фотодіода, що відображає залежність вихідного сигналу фотодіода від величини падаючого світлового потоку. На **рисунку 5** показана побудована амплітудна характеристика. По осі ординат відкладено значення сигналу з фотодіода в мілівольтах, а по осі абсцис – інтенсивність світла, що падає на фотодіод, у відносних одиницях. Такий графік дозволяє наочно оцінити ділянки лінійності та будь-які відхилення від лінійного закону.

Аналіз отриманих результатів показує, що незважаючи на розкид експериментальних точок, лінійність амплітудної характеристики

зберігається до значення електрорушійної сили $E = 200$ мВ на виході фотодіода. Це означає, що в межах цього діапазону фотодіод реагує на зміну інтенсивності світла пропорційно, що є важливою властивістю для точних оптичних вимірювань. Лінійність забезпечує коректне визначення інтенсивності падаючого світла на основі виміряного вихідного сигналу та дозволяє уникати спотворень, що виникають при насиченні фотодіода.

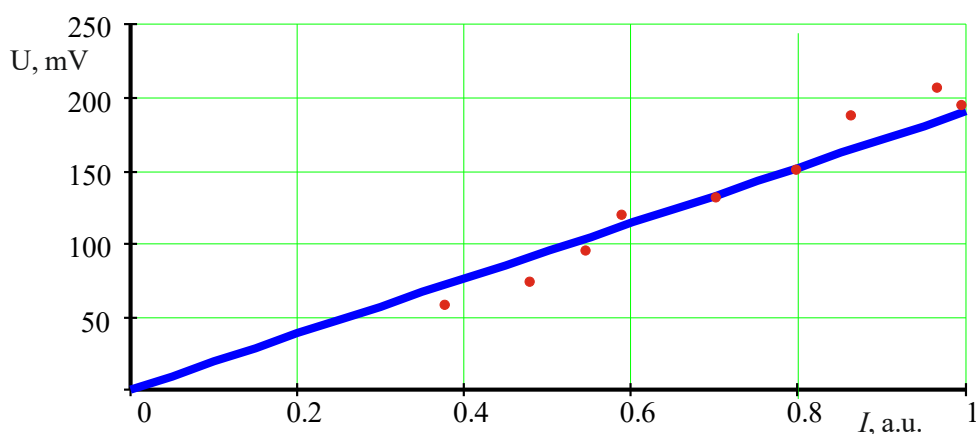


Рис. 5. Амплітудна характеристика фотодіода

Варто зазначити, що лінійність амплітудної характеристики є критичною для будь-яких експериментів, де необхідно кількісно оцінювати світловий потік. У випадку з фотодіодом **IPD1450-200-SMB**, отримані результати підтверджують можливість його використання для точних вимірювань у низькоінтенсивних режимах та в умовах варіацій освітленості. Лінійний діапазон до 200 мВ дозволяє використовувати фотодіод для широкого спектра досліджень, включаючи визначення кута падіння світла, впливу поляризації, спектральний аналіз та оцінку фазових характеристик сигналу.

Додатково, проведене дослідження амплітудної характеристики дає змогу передбачити роботу фотодіода при зміні зовнішніх умов, таких як температура та рівень фонові засвітки. Аналіз графіка дозволяє також оцінити допустимі похибки та підготувати експериментальну установку таким чином, щоб мінімізувати вплив зовнішніх факторів на точність вимірювань.

Таким чином, побудова амплітудної характеристики фотодіода і перевірка її лінійності є важливим етапом експериментальної роботи, що забезпечує надійність і точність усіх подальших досліджень із фотодіодом. Цей етап створює міцну основу для оцінки чутливості, спектральної залежності та температурної стабільності фотодіода, а також для оптимізації експериментальної схеми для максимальної точності вимірювань.

3.4. Кут огляду

Процес вимірювань базується на визначенні залежності сигналу з фотодіода від кута падіння випромінювання на нього. Блок-схема експериментальної установки показана на рис. 6.

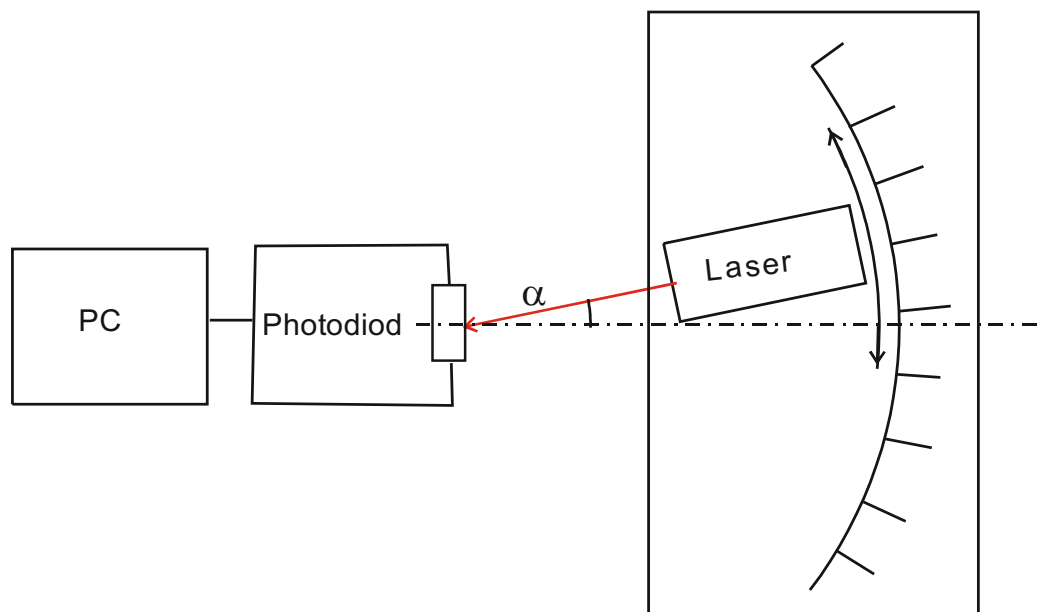


Рис. 6. Блок-схема установки для вимірювань кута огляду фотодіода

Промінь випромінювання інфрачервоного лазера падає на фотодіод під деяким кутом α відносно нормалі. Сигнал з фотодіода вводиться в персональний комп'ютер PC впродовж деякого часу (близько 1 хв) і там усереднюється за цей час для зменшення впливу випадкових зовнішніх факторів.

Вимірювання проводились через 10° в межах від -85° до $+85^\circ$ відносно нормалі до поверхні фотодіода. Результати вимірювань показані на рис. 7. Видно, що простір огляду фотодіода досягає $\pm 85^\circ$ при майже рівномірній характеристиці в цьому діапазоні.

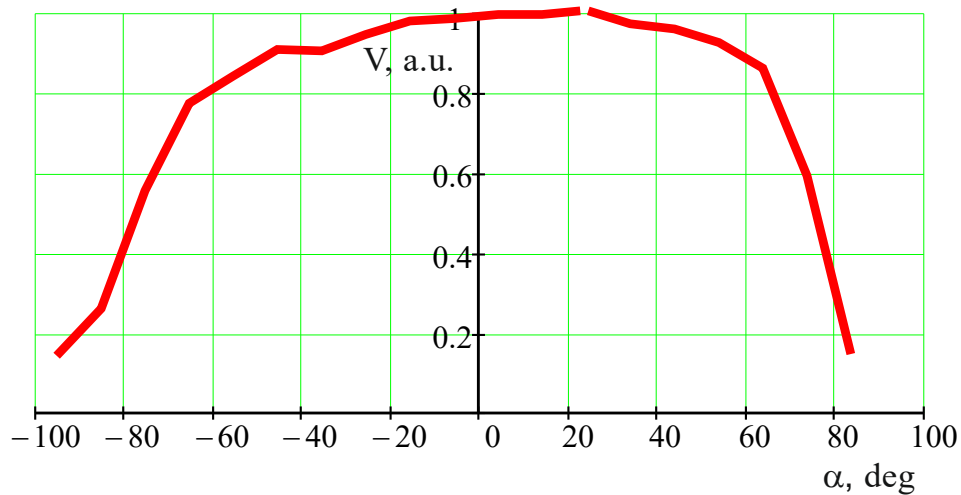


Рис. 7. Кут огляду фотодіода

3.5. Чутливість фотодіода до випромінювання

Чутливість фотодіода до випромінювання – важлива характеристика, яка визначає, на якій відстані від джерела випромінювання фотодіод виявить його наявність. Згідно з нормативними документами Європи вважається, що чутливість приймача випромінювання для виявлення наявності інфрачервоних далекомірів повинна бути не менше, ніж 1000 мкВт/см^2 .

Очевидним є метод вимірювання, коли на місцевості фотодіод переміщується в напрямі від джерела випромінювання, і в кожній точці вимірюється сигнал з фотодіода і щільність випромінювання. Недолік такого методу – необхідність проведення полігонних вимірювань.

Нижче буде описано метод вимірювань чутливості фотодіода, який можна застосувати в лабораторії. Метод заснований на вимірюванні сигналу з фотодіода в полі випромінювання світлодіода з відомою потужністю і відомою розбіжністю пучка.

Блок-схема вимірювань показана на рис. 8. Джерелом живлення світлодіода LED є генератор звукових частот. Частота вихідної напруги генератора 1000 Гц, амплітуда 8 В.

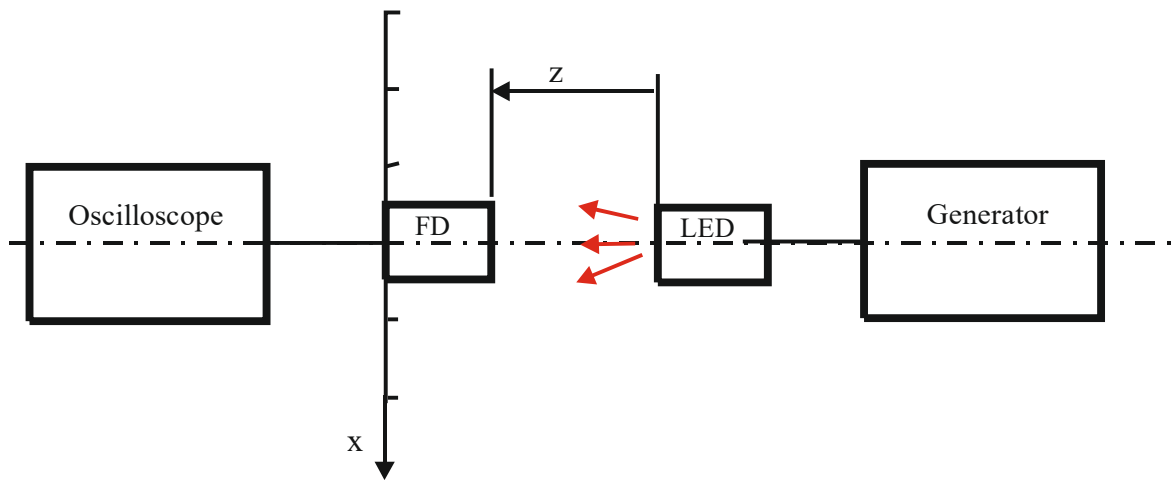


Рис.

8. Блок-схема вимірювань чутливості фотодіода

При імпульсному режимі живлення світлодіода зменшується вплив неперервної зовнішньої засвітки на фотодіод. Сигнал з фотодіода показаний на рис. 9. Це імпульси, які йдуть з частотою 1000 Гц. Форма їх відрізняється від форми напівхвилі синусоїди. Вона більш вузька, тому що запалювання світлодіода відбувається при деякій кінечній напрузі, і при такій же напрузі при її зменшенні він гасне.

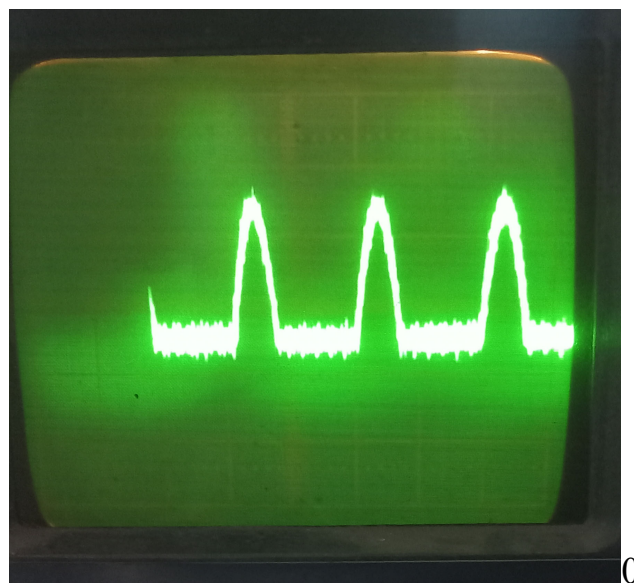


Рис. 9. Сигнал з фотодіода

Для індикації сигналу з фотодіода FD застосовувався осцилограф.

Потужність P випромінювання світлодіода дорівнювала 1.67 мВт. Вона вимірювалась ватметром інфрачервоного і видимого випромінювання типу 50(150) А-ВВ-26-PPS з похибкою 2 %.

Розбіжність випромінювання світлодіода

Вимірювався профіль пучка випромінювання світлодіода на різних відстанях z від нього. Результати вимірювань для $z = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ мм показані на рис. 10.

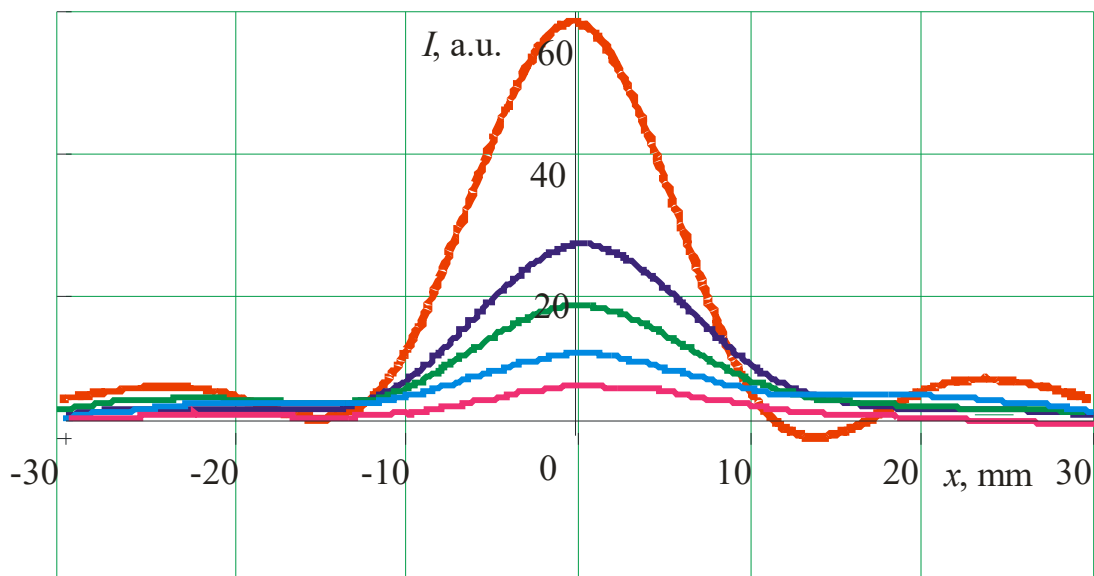


Рис. 10. Профіль пучка випромінювання світлодіода

За допомогою цих даних знайдено діаметр пучка випромінювання по рівню 0,5 від максимуму в кожній точці спостереження. На рис. 11 показана залежність діаметра пучка від координати z . Пряма через експериментальні точки проведена методом найменших квадратів. Значення кутового коефіцієнта прямої – це кут розбіжності випромінювання. Значення кутарозбіжності і його похибки, визначеної за правилами метода найменших квадратів, такі:

$$\alpha = 10^{\circ} \pm 2^{\circ}.$$

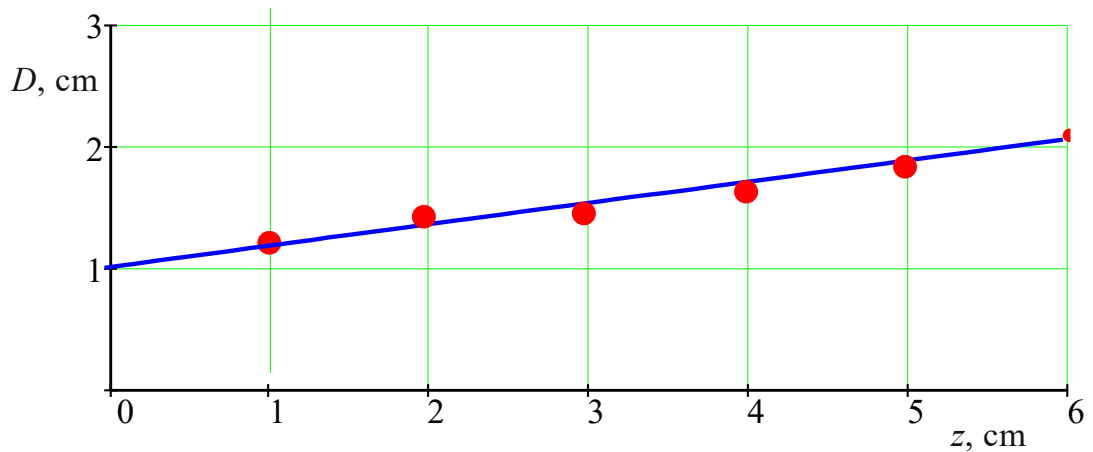


Рис. 11. Розбіжність пучка випромінювання світлодіода

Чутливість фотодіода

Інтенсивність випромінювання I у розбіжному пучку зменшується в міру віддалення від джерела за законом:

$$I(z) = \frac{P}{S(z)},$$

де P – потужність випромінювання, $S(z)$ – поверхня, яка освітлюється пучком

на відстані z від джерела випромінювання. Освітлена поверхня $S(z) = \frac{\pi D(z)^2}{4}$

де $D(z)$ – діаметр пучка в цьому місці. Його можна знайти за формулою

$$D(z) = D_0 + 2z \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

де D_0 – діаметр вихідного вікна світлодіода, z – відстань до фотодіода, α – кут розбіжності пучка випромінювання (рис. 12).

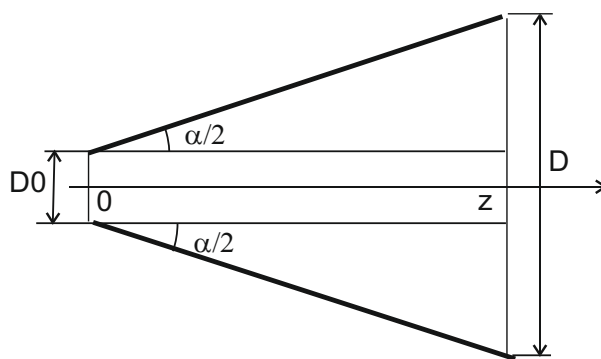


Рис. 12. До розрахунку діаметра пучка випромінювання

Інтенсивність пучка на відстані z від світлодіода при потужності його випромінювання P та куті розбіжності α :

$$I(z) = \frac{4P}{\pi \left(D_0 + 2z \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^2}.$$

На рис. 13 показана залежність інтенсивності випромінювання I від відстані z до світлодіода при розбіжності пучка 10° . По горизонтальній осі відкладена відстань в сантиметрах, по вертикальній осі – інтенсивність випромінювання в мкВт/см². Інтенсивність випромінювання 1000 мкВт/см² знаходиться на відстані приблизно 6 см від світлодіода, тобто в межах можливості експерименту.

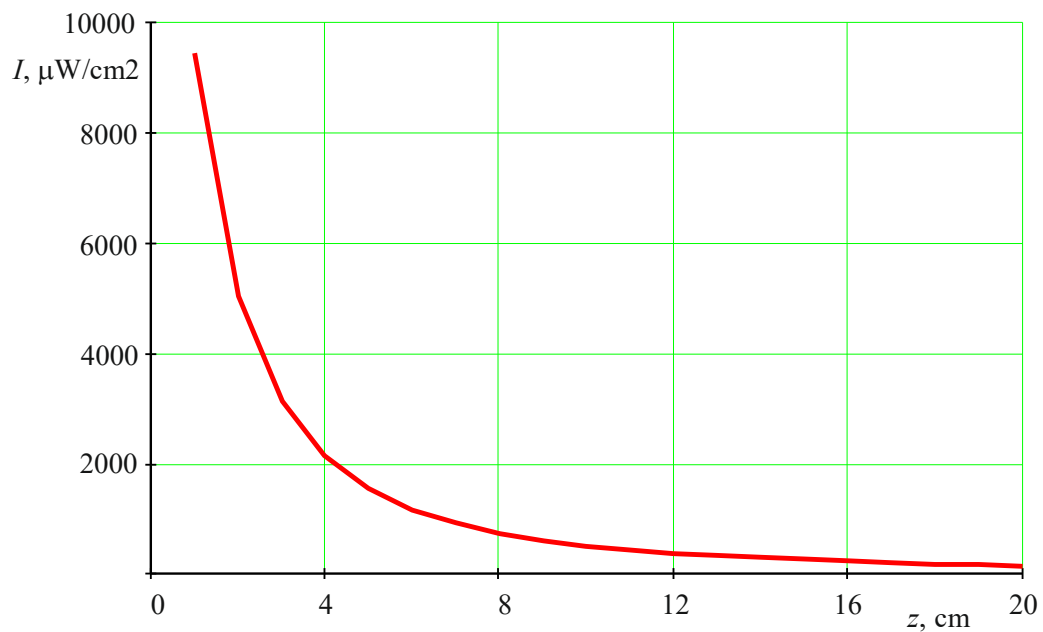


Рис. 13. Залежність інтенсивності пучка випромінювання світлодіода від відстані до нього

На основі цих даних було знято залежність сигналу з фотодіода від інтенсивності випромінювання (рис. 14).

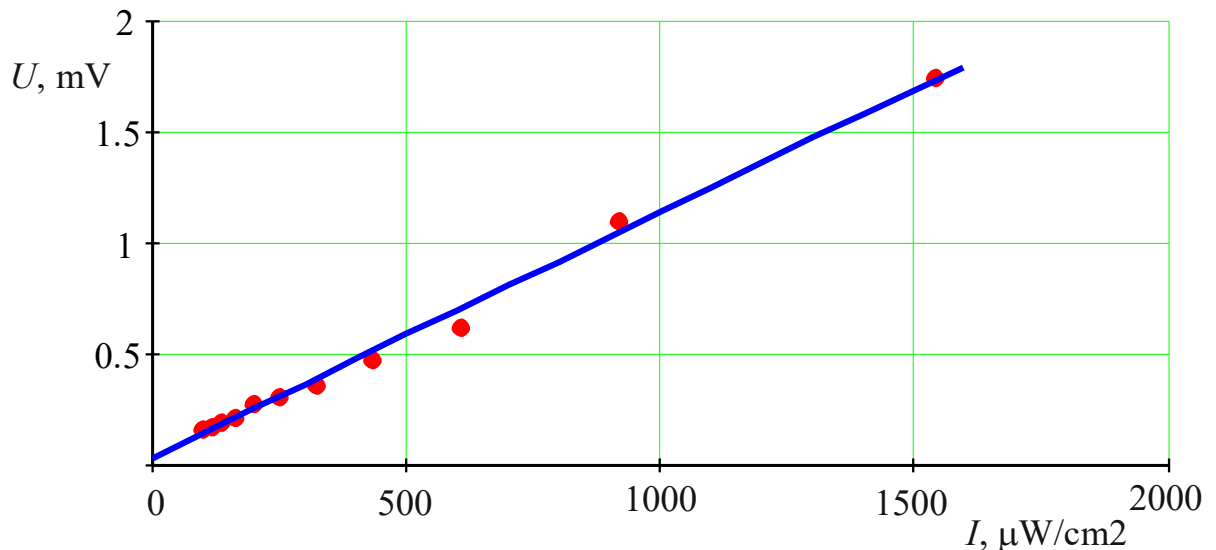


Рис. 14. Сигнал з фотодіоду

Видно, що при інтенсивності випромінювання $1000 \text{ мкВт}/\text{см}^2$, яка вважається необхідною для успішної роботи приймача випромінювання, сигнал з фотодіода становить близько 1 мВ , тобто цілком достатній для обробки, а рівень шумів приймача значно менший 100 мкВ .

3.6. Залежність чутливості фотодіода від температури

Для зміни температури фотодіода використовувався напівпровідниковий елемент Пельтьє. Він показаний на рис. 15 праворуч. Це керамічна пластина розмірами $40 \times 40 \times 3 \text{ мм}$ з двома виводами. В пластині розташована батарея напівпровідникових термоелементів з гарячими контактами на одній площині і з холодними на другій. Через неї може бути пропущений струм до 2.7 А .

Зліва на рисунку показана термопара мідь-константан. Вона призначена для вимірювання температури поверхні елемента Пельтьє. Її гарячий спай розташований на робочій площині елемента Пельтьє. Другі кінці термопари розташовані на поверхні з температурою навколишнього середовища.

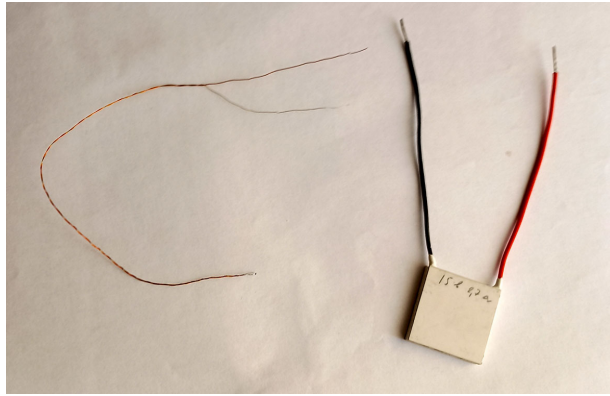


Рис.15. Термопара і елемент Пельтьє

На робочій поверхні елемента Пельтьє за допомогою теплопровідної пасти прикріплювалися фотодіод IPD1450-200. Елемент Пельтьє за допомогою теплопровідної пасти кріпився до радіатора. Радіатор обдувався вентилятором.

Через елемент Пельтьє пропускався електричний струм до 2.7 А. Залежно від напрямку струму робоча поверхня термоелемента нагрівалася або охолоджувалася.

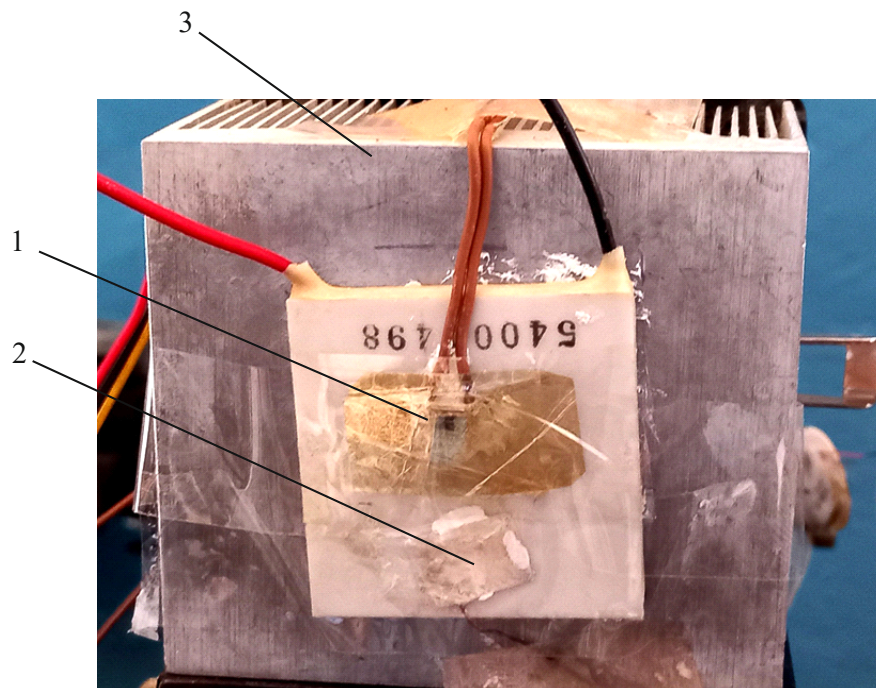


Рис. 16. Елемент Пельтьє з фотодіодом і термопарою
для контролю температури

Сигнали з термопари і фотодіода подавалися на вхід двох каналів аналого-цифрового перетворювача Е14-140. Вони вводилися на комп'ютер і оброблялися програмою PowerGraph.

Вигляд сигналів при напрузі на елементі Пельтьє 14 В в режимі охолодження показано на рис. 17. Червона лінія – сигнал з термопари. Початкова ділянка – струм через елемент Пельтьє відсутній. Потім струм включається, і починається охолодження елемента. Максимальний сигнал відповідає температурі -40° по відношенню до кімнатної, тобто температурі поверхні елемента -19° .

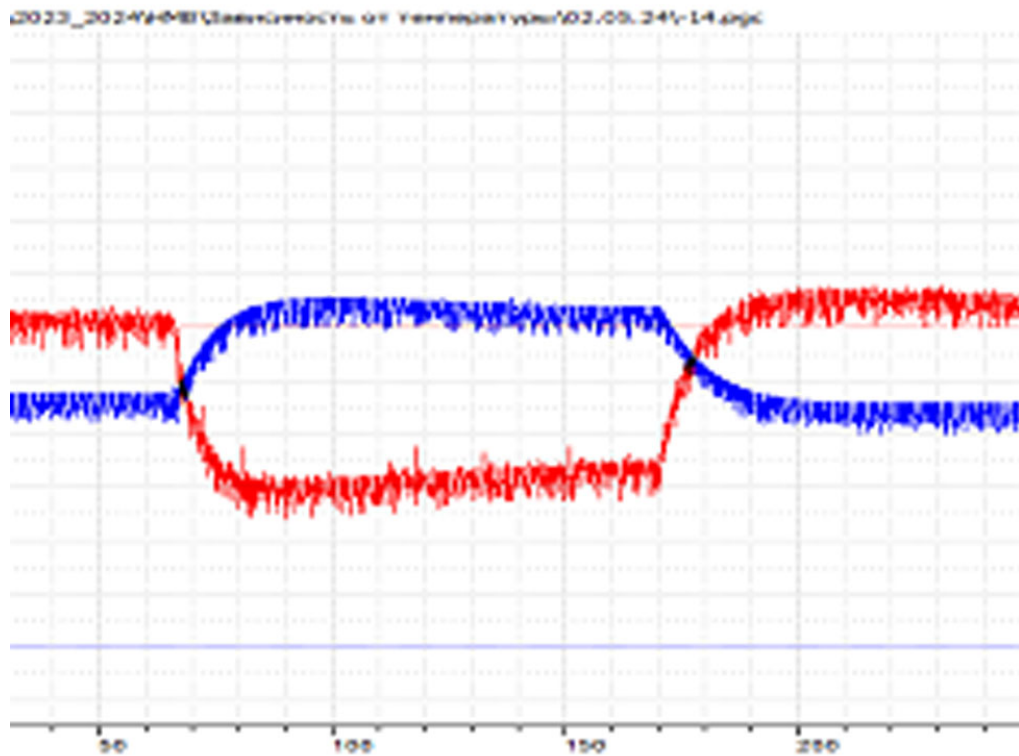


Рис. 17. Сигнали з термопари і фотодіода

Синя лінія – сигнал з фотодіода. Початковий участок - без його освітлення. При включенні світла з'являється сигнал який поступово збільшується при включенні струму через термоелемент, коли починається

охолодження фотодіода (червона лінія – температура поверхні елемента Пельтьє.) При включенні струму починається охолодження фотодіода, чутливість його збільшується, і збільшується сигнал. Потім струм відключається, сигнал з фотодіода зменшується.

Для зменшення впливу різних перешкод сигнали пропускалися через цифровий фільтр нижніх частот програми PowerGraph.

На рис. 17 видно деякий спад сигналів в кінці процесу пропускання струму через елемент Пельтьє (близько 100 с). Це вказує на те, що тепловідведення стає недостатньо ефективним.

Температура робочої поверхні охолоджувалась -40° відносно температури навколишнього середовища.

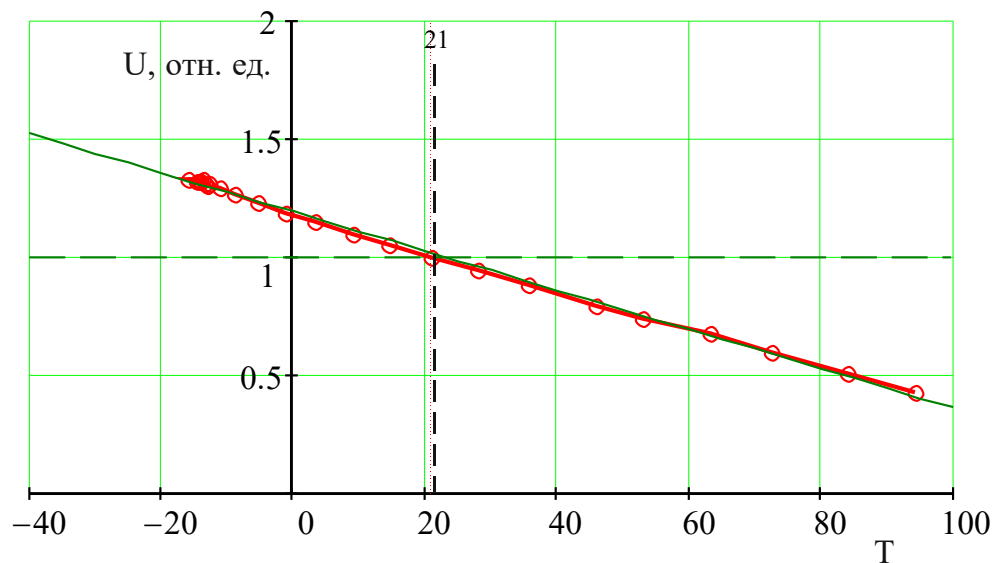


Рис. 18.

На рис. 18 показані результати вимірювань чутливості фотодіода у діапазоні температур від -20° до $+90^{\circ}$. За одиницю прийнято сигнал при температурі навколишнього середовища 21°C .

Залежність сигналу від температури досить сильна - приблизно 1% на градус, що в діапазоні температур від -40° до $+85^{\circ}$, які вказуються в паспортних даних про фотодіод, дає зміну чутливості в 3 рази.

3.7. Висновки до розділу

Проведені експерименти підтвердили, що фотодіод IPD1450-200-SMB демонструє лінійну амплітудну характеристику при значеннях вихідного сигналу до 200 мВ, що забезпечує точність вимірювань інтенсивності падаючого світла у цьому діапазоні.

Залежність сигналу фотодіода від кута повороту поляризатора добре описується законом Мальюса ($I = I_0 \cos^2\theta$), що підтверджує коректність експериментальної схеми та надійність отриманих даних.

Незважаючи на наявний розкид експериментальних точок, викликаний засвіткою та невеликими похибками встановлення кута поляризатора, основна тенденція відповідає теоретичним передбаченням, що дозволяє будувати амплітудну характеристику для подальшого аналізу.

Отримані результати створюють основу для проведення наступних експериментів, зокрема оцінки чутливості фотодіода, спектральної залежності та температурної стабільності, а також дозволяють оптимізувати параметри експериментальної установки для максимальної точності вимірювань.

Лінійність амплітудної характеристики є ключовим фактором для кількісних оптичних вимірювань і забезпечує можливість точної інтерпретації результатів експериментів з фотодіодом у низькоінтенсивних режимах та при зміні зовнішніх умов.

ВИСНОВКИ

У рамках виконання дипломної роботи були досліджені ключові аспекти вимірювальної техніки та характеристик оптичних елементів, необхідних для проведення точних експериментів. У першому розділі було проведено серію вимірювань із використанням лазерного дальноміра, що дозволило оцінити точність вимірювання відстаней та перевірити стабільність сигналу в різних умовах освітлення. Результати показали високу повторюваність вимірювань та підтвердили придатність обраної установки для подальших експериментів.

У другому розділі основна увага була приділена фотодіоду **IPD1450-200-SMB**. Було проведено вимірювання амплітудної характеристики, кута огляду, спектральної чутливості та температурної залежності сигналу. Експериментальна амплітудна характеристика підтвердила лінійність фотодіода до вихідного сигналу 200 мВ, а також відповідність закону Мальюса при зміні кута поляризації світла. Ці результати створили надійну основу для оцінки чутливості та оптимізації експериментальної схеми в подальших дослідженнях.

У третьому розділі були проведені мобільні експерименти, спрямовані на перевірку поведінки системи у реальних умовах та оцінку впливу зовнішніх факторів. Використання мобільної установки дозволило перевірити стабільність показників фотодіода та лазерного дальноміра, а також підготувати експериментальні протоколи для майбутніх досліджень.

Таким чином, проведені експерименти забезпечили комплексну перевірку ключових характеристик оптичних елементів та вимірювальної техніки, підтвердили їхню точність і надійність, а також створили основу для подальших досліджень у рамках дипломного проекту. Отримані дані дозволяють впевнено оцінювати результати наступних експериментів і планувати нові серії вимірювань з урахуванням особливостей кожного елемента системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. T. Bosch and M. Lescure, Eds., Selected Papers on Laser Distance Measurement, SPIE Milestone Series, Vol. MS 115, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA , 1995.
2. B. Newhall, “Photosculpture,” Image 7~5!, 100–105 ~1958!. 3. M. Rioux, F. Blais, J.-A. Beraldin, and P. Boulanger, “Range imaging sensors development at NRC laboratories,” in Proc. IEEE Workshop on Interpretation of 3D Scenes, pp. 154–160, Austin, TX , 1989.
3. M. Rioux, G. Bechthold, D. Taylor, and M. Duggan, “Design of a large depth of view three-dimensional camera for robot vision,” Opt. Eng. 26~12, 1245–1250, 1987.
4. R. Baribeau and M. Rioux, “Influence of speckle on laser range finders,” Appl. Opt. 30-20, 2873–2878 ,1991.
5. R. Myllylä, J. Marszalec, J. Kostamovaara, A. Mañtyniemi, and G.-J. Ulbrich, “Imaging distance measurements lidar,” J. Opt. 29, 188–193, 1998.
6. K. Mañtta, J. Kostamovaara, and R. Myllylä, “Profiling of hot surfaces by pulsed time-of-flight laser,” Appl. Opt. 32-27, 5334–5347 , 1993.
7. M. R. Maier and P. Sperr, “On the construction of a fast constant fraction trigger with integrated circuits and application to various phototubes,” Nucl. Instrum. Methods 87, 13–18 , 1970.
8. T. Ruotsalainen, P. Palojañvi, and J. Kostamovaara, “A current-mode gain-control scheme with constant bandwidth and propagation delay for transimpedance preamplifier,” IEEE J. Solid-State Circuits 34–2, 253–258, 1999.
9. E. Rañisañnen-Ruotsalainen, T. Rahkonen, and J. Kostamovaara, “Integrated time-to-digital converters based on interpolation,” J. Analog Integr. Circ. Signal Process. 15-1, 49–57, 1998.
10. A. J. Joblin, “Method of calculating the image resolution of a nearinfrared time-of-flight tissue-imaging system,” Appl. Opt. 35-4, 752–757 ,1996.

11. J. Carlsson, P. Hellentin, A. Malmqvist, W. Persson, and C.-G. Wahlström, "Time-resolved studies of light propagation," *Appl. Opt.* 34-9, 1528–1535, 1995.
12. Zhihui Li, Xin Jin, Changfu Yuan, Kai Wang. Photon Detector Technology for Laser Ranging: A Review of Recent Developments. *Coatings*, 2025, 15, 798. DOI: 10.3390/coatings15070798.
13. Zhenxing Liu, Ning An, Xingwei Han, Natalia Edith Nuñez, Liang Jin, Chengzhi Liu. Progress in Avalanche Photodiodes for Laser Ranging. *Sensors*, 2025, 25(9), 2802. DOI: 10.3390/s25092802. MDPI
14. P. Martyniuk et al. Infrared avalanche photodiodes from bulk to 2D materials. *Light: Science & Applications*, 2023. DOI: 10.1038/s41377-023-01259-
15. C. Liu et al. Advances in near-infrared avalanche diode single-photon detection. *Opto-Electronic Advances*, 2022. ScienceDirect
16. E. Scattolo et al. Near Infrared Efficiency Enhancement of Silicon Photodiodes. *Sensors*, 2023. PMC Open Access. PMC
17. Cox, James F. (2001). *Fundamentals of linear electronics: integrated and discrete* (<https://books.google.com/books?id=FbezraN9tvEC&pg=PA91>). Cengage Learning. pp. 91–. ISBN 978-0-7668-3018-9.
18. Tavernier, Filip and Steyaert, Michiel (2011) *High-Speed Optical Receivers with Integrated Photodiode in Nanoscale CMOS*. Springer. ISBN 1-4419-9924-8. Chapter 3 From Light to Electric Current – The Photodiode.
19. "Photodiode slide"(<http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/>
20. "Photodiode Application Notes – Excelitas – see note 4" (<http://www.pacer.co.uk/Assets/Pacer/User/Photodiodes.pdf>)
21. Riordan, Michael; Hoddeson, Lillian (1998). *Crystal Fire: The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age*. ISBN 9780393318517.
22. "The phototransistor" (<http://www.smecc.org/phototransistor.htm>). Bell Laboratories RECORD. May 1950.
23. Held. G, *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*, CRC Press, (Worldwide, 2008). Ch. 5 p. 116. ISBN 1-4200-7662-0.