

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувачка кафедри
_____ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

за спеціальності 171 «Електроніка» освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи»

на тему: **ЛАЗЕРНІ ДЮДИ В СИСТЕМАХ ПРОМИСЛОВОЇ І МЕДИЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

Здобувача групи ЕП.м-32 Северина Назара Віталійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Назар СЕВЕРИН

Керівник: доцент кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
к.ф.-м.н., доцент

Юрій ШАБЕЛЬНИК

Суми – 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 «Електроніка», освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри
Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
«04» листопада 2024 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Северина Назара Віталійовича

1. Тема роботи «Лазерні діоди в системах промислової і медичної електроніки» затверджена наказом по університету від «01» листопада 2024 р., № 1130-VI
2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 11 грудня 2024 року
3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета):

Розвиток електроніки, а особливо в автомобільній промисловості та медицині потребує нових підходів до розробки різних приладів. Такі технологічні процеси, як прецизійне зварювання або різання, певні хірургічні операції потребують сучасного обладнання, до якого ставляться більш серйозні вимоги щодо точності та безпеки використання. Можливим рішенням є заміна звичайних світлодіодів на лазерні діоди. Лазерні діоди ефективно генерують когерентне випромінювання. У даному класі приладів спостерігається лінійне зростання потужності після досягнення порогового струму. Ці особливості виділяють лазерні діоди серед інших класів приладів.

Метою роботи є критичний аналіз переваг та недоліків лазерних діодів та особливостей їх застосування в промисловій та медичній електроніці, а також дослідження вихідної потужності діода на основі арсеніду галію.

4. Зміст текстової частини роботи (перелік питань, які необхідно розробити):
 1. Розділ 1. Сучасні розробки та практичне застосування лазерних діодів. Літературний огляд
 2. Розділ 2. Теоретичні основи лазерних діодів

3. Розділ 3. Дослідження вихідної потужності лазерного діода
4. Висновки
5. Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу для презентації:

Слайди № 1, 2 – Вступ. Мета та актуальність.

Слайди № 3-5 – Сучасні розробки та практичне застосування лазерних діодів.
Літературний огляд

Слайди № 6-7 – Теоретичні основи лазерних діодів

Слайди № 8-9 – Дослідження вихідної потужності лазерного діода. Таблиці та залежності параметрів

Слайд № 10 – Висновки

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка про стан виконання роботи
1	Аналіз літературних даних	до 04.11.2024 р.	Вик.
2	Освоєння методики проведення розрахунків і моделювання	до 25.11.2024 р.	Вик.
3	Підготовка тексту магістерської роботи	до 01.12.2024 р.	Вик.
4	Попередній захист роботи	12.12.2024 р., 10 ⁰⁵ (онлайн)	Вик.
5	Захист кваліфікаційної роботи	18.12.2024 р. – 11 ⁴⁰	Вик.

Здобувач

Назар СЕВЕРИН

Керівник

Юрій ШАБЕЛЬНИК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 33 сторінках, зокрема, містить 8 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел із 19 найменувань.

Лазерні діоди відіграють важливу роль у сучасній електроніці та широко використовуються в різних галузях промисловості та медицини. До приладів ставляться більш серйозні вимоги щодо їх точності та безпеки використання. Це відкриває нові можливості для впровадження приладів на основі лазерних діодів у такі промислові технологічні процеси, як, наприклад, прецизійне зварювання, різання. Лазерні діоди також широко використовуються в діагностичному медичному обладнанні та лікуванні хворих.

Метою роботи є критичний аналіз переваг та недоліків лазерних діодів та особливостей їх застосування в промисловій та медичній електроніці, а також дослідження вихідної потужності діода на основі арсеніду галію.

Дослідження проводились з використанням аналітичних методів для аналізу літературних джерел та конструктивних особливостей лазерних діодів, експериментальних методів для визначення характеристик лазерних діодів в промислових та медичних умовах, а також математичного моделювання для оцінки їх ефективності.

У результаті досліджень встановлено, що лазерні діоди ефективно генерують когерентне випромінювання, з лінійним зростанням потужності після досягнення порогового струму. Показано, що вони мають переваги порівняно з іншими джерелами світла завдяки високій енергоефективності та компактності, що робить їх придатними для медичних і промислових застосувань. Практичне значення отриманих результатів полягає в їх потенційному застосуванні при розробці нових лазерних систем промислового та медичного призначення, а також в удосконаленні існуючих підходів до використання лазерних діодів у цих галузях.

Отримані результати та сам пристрій можна використати при розробці лабораторних та розрахункових робіт з дисципліни «Інтегральна і функціональна мікроелектроніка».

Ключові слова: ВИХІДНА ПОТУЖНІСТЬ, ДОВЖИНА ХВИЛІ СВІТЛА, ЛАЗЕРИ, ЛАЗЕРНІ ДІОДИ, КУТ ПРОМЕНЮ, ПОРОГОВИЙ СТРУМ.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ РОЗРОБКИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	6
1.1 Огляд існуючих розробок та рішень у галузі лазерних діодів.....	6
1.1.1 Сучасні розробки в галузі промислового застосування лазерних діодів	6
1.1.2 Використання лазерних діодів у медичних технологіях.....	8
1.1.3 Перспективи розвитку та новітні напрямки досліджень у галузі лазерних діодів	10
1.2 Аналіз переваг і недоліків лазерних діодів порівняно з іншими джерелами випромінювання	12
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ	14
2.1 Принцип роботи лазерного діода.....	14
2.2 Основні параметри та характеристики	19
2.3 Розрахунки, що описують роботу лазерних діодів у різних умовах.....	21
2.3.1 Вихідна потужність лазерного діода	21
2.3.2 Пороговий струм	22
2.3.3 Довжина хвилі випромінювання.....	23
2.3.4 Кут вертикальної та горизонтальної розбіжності променя.....	24
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ДІОДА	26
3.1 Опис досліджуваного лазерного діода	26
3.2 Методика розрахунку	27
3.3 Результати розрахунків та графічне представлення результатів.....	28
3.4 Аналіз отриманих результатів.....	30
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	32

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ РОЗРОБКИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Огляд існуючих розробок та рішень у галузі лазерних діодів

1.1.1 Сучасні розробки в галузі промислового застосування лазерних діодів

Лазерні діоди стали незамінним елементом сучасної промисловості завдяки своїй високій ефективності, компактності і надійності. В останні роки технологія прямого діодного лазера досягла значних успіхів, відкривши нові можливості в різних галузях промисловості, таких як металообробка, зварювання, обробка матеріалів та системи маркування.

Одним з найбільш яскравих прикладів використання лазерних діодів в промисловості є система автоматичного зварювання. Лазерні діоди використовуються в автомобільній промисловості для зварювання тонкостінних деталей через їх високу точність та швидкість зварювання, що має вирішальне значення для зменшення ваги конструкцій та підвищення енергоефективності [1]. Наприклад, лазерне зварювання (рис. 1.1), яке гарантує високу якість шву і швидкість обробки, стало стандартом при виготовленні автомобільних кузовів, що скорочує час і вартість виготовлення.

Крім того, лазерні діоди активно використовуються в металообробці для різання різних матеріалів. Лазерне різання забезпечує чисте і точне різання, зменшуючи потребу в подальшій обробці [2]. Використання лазерних діодів у процесі різання металів, таких як нержавіюча сталь та алюміній, може покращити якість продукції та зменшити вартість матеріалів.

Дослідження, проведені в Україні, підтверджують важливість лазерних технологій в галузі. У статті [3] зазначається, що оптична лазерна система може бути успішно інтегрована у виробничий процес, особливо в систему маркування та

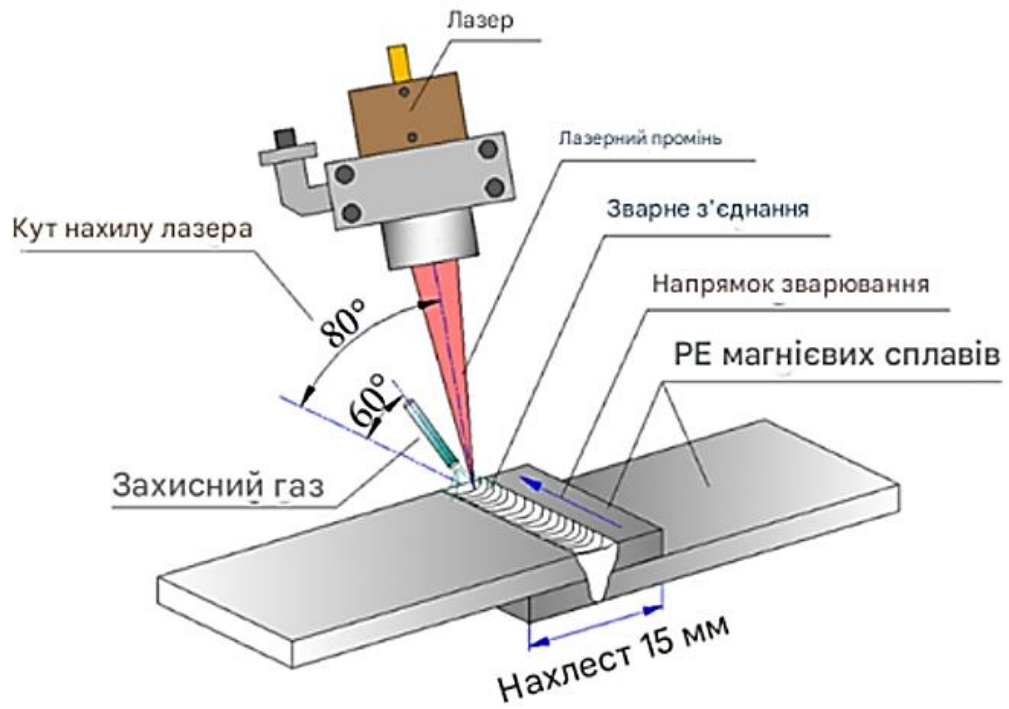


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення процесу лазерного зварювання.

Адаптовано із роботи [1]

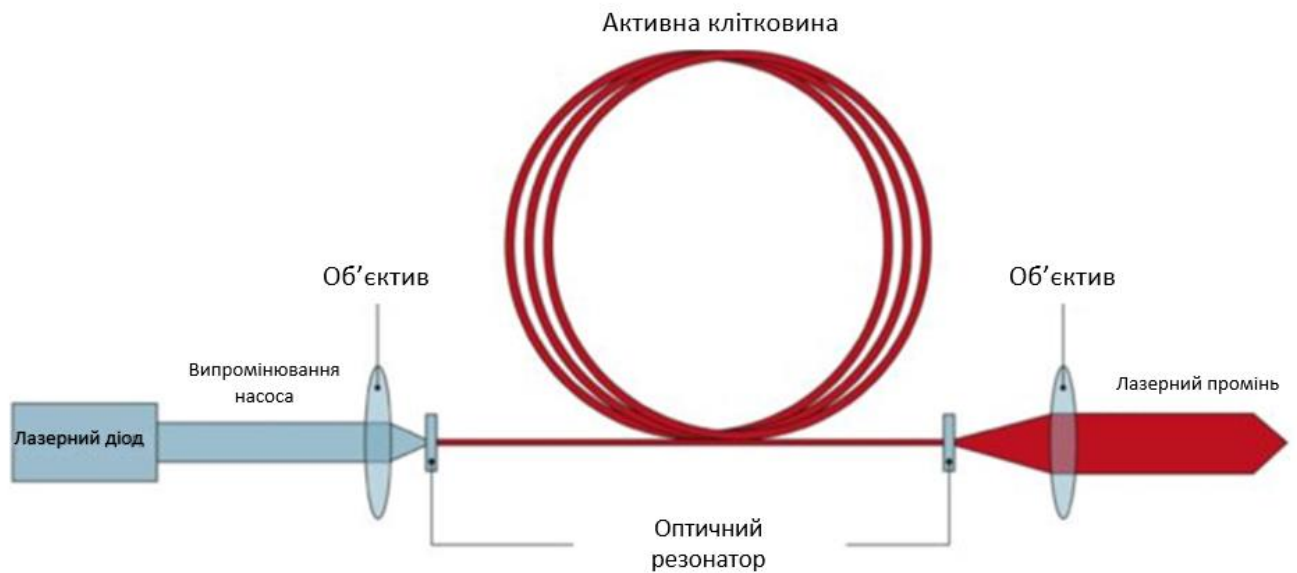


Рисунок 1.2 – Схема процесу лазерного маркування. Адаптовано із роботи [1]

ідентифікації продукції (рис. 1.2). Використання лазерних діодів у системі маркування може точно ідентифікувати товари та забезпечити простежуваність. Це особливо важливо в умовах, коли компанії прагнуть підвищити автоматизацію та ефективність виробництва.

Також варто відзначити, що сучасні технології виробництва лазерних діодів постійно розвиваються. Методи епітаксії, такі як MOCVD (металоорганічне хімічне осадження пари) та MBE (молекулярно-променева епітаксія), дозволяють виготовляти високоякісні напівпровідникові матеріали, які мають значний вплив на продуктивність лазерних діодів. В результаті таких інновацій лазерні діоди стають меншими, міцнішими та енергоефективнішими, відкриваючи нові горизонти для промислового застосування [2].

В результаті сучасні розробки в області лазерних діодів демонструють значний потенціал в промислових застосуваннях. Завдяки постійному розвитку технологій, інтеграції нових матеріалів та інноваційних підходів лазерні діоди залишаються важливим компонентом виробничого процесу, створюючи нові можливості для автоматизації та підвищення ефективності.

1.1.2 Використання лазерних діодів у медичних технологіях

У сучасній медицині лазерні технології відіграють важливу роль у багатьох медичних процедурах завдяки своїй високій ефективності, точності та безпеці. Лазерні діоди – важливий компонент цих технологій, пропонують інноваційні рішення в галузі хірургії (рис. 1.3), стоматології, дерматології та офтальмології. Їх використання має значні переваги, які суттєво покращують результати лікування та якість медичної допомоги.

Лазерна хірургія – один з найважливіших прикладів застосування лазерних технологій в медицині. Сучасні лазерні системи використовуються для виконання складних хірургічних процедур, які раніше вимагали відкритого хірургічного втручання. Лазерні промені дозволяють лікарям оперувати з мінімальним травмуванням навколишніх тканин, що особливо важливо при видаленні пухлин.

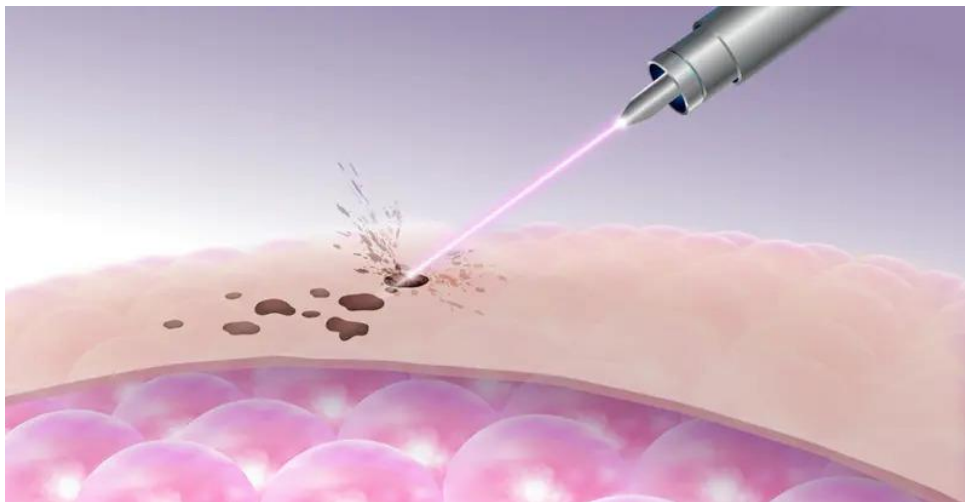


Рисунок 1.3 – Використання лазера в хірургії. Із роботи [4]

Це відбувається завдяки високоточному фокусуванню лазерного променя, який може знищити тільки уражені клітини, залишаючи здорові тканини неушкодженими. Такий підхід не тільки знижує ризик післяопераційних ускладнень, але й значно скорочує час відновлення пацієнта [4]. Лазерні системи використовуються для омолодження шкіри, видалення рубців і татуювань, надаючи лікарям потужний інструмент для поліпшення естетичних якостей своїх пацієнтів [5].

Лазерні діоди також стають все більш популярними в стоматології. Серед них виділяється діодний лазер SmartM PRO, який отримав визнання серед стоматологів завдяки своїй ефективності та безпеці. Цей лазер дозволяє проводити широкий спектр стоматологічних процедур, таких як видалення карієсу, гінгівотерапія і навіть імплантація. Стоматологи відзначають, що використання лазерів значно зменшує дискомфорт пацієнта під час процедур, оскільки лазерне лікування зазвичай вимагає менше анестезії, а стерильність лазерного променя знижує ризик інфікування. Крім того, використання лазерних технологій у стоматології дозволяє скоротити час лікування та період відновлення [6].

Сучасні лазерні технології також активно використовуються в офтальмології для корекції зору. Лазери використовуються в таких операціях, як LASIK і PRK (рис. 1.4), де високоточні лазерні промені замінюють рогівку ока для корекції зору.

Завдяки цим технологіям мільйони людей змогли відновити якість життя без необхідності носити окуляри або контактні лінзи. Лазерна хірургія в офтальмології характеризується високою ефективністю і коротким часом відновлення.

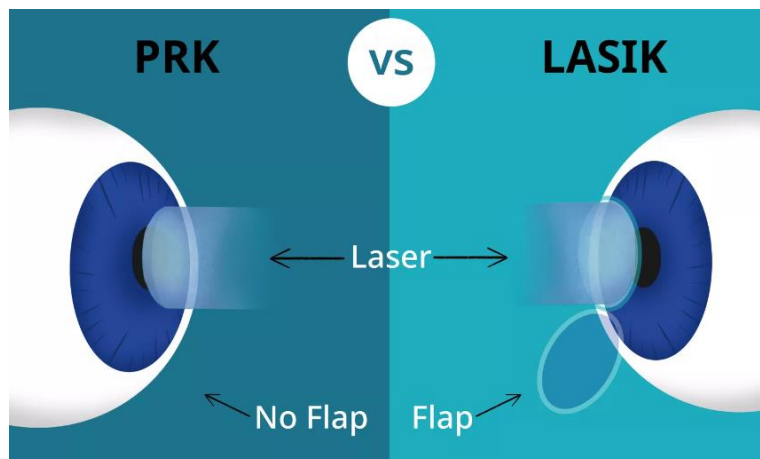


Рисунок 1.4 – Різниця між LASIK і PRK. Адаптовано із роботи [5]

Таким чином, лазерні діоди стали незамінним інструментом у сучасній медицині, відкриваючи нові горизонти в лікуванні та діагностиці. Лазери не тільки підвищують ефективність медичних процедур, але й покращують загальний стан пацієнтів завдяки своїй здатності зменшувати травматичність і час відновлення. Лазерні технології мають великий потенціал для подальшого розвитку і практичного застосування в нових галузях медицини і обіцяють поліпшити якість життя пацієнтів вже в найближчому майбутньому.

1.1.3 Перспективи розвитку та новітні напрямки досліджень у галузі лазерних діодів

Лазерні діоди залишаються одним з найважливіших елементів сучасної електроніки завдяки широкому спектру їх застосування в промисловості та медицині. В останні роки вчені та інженери активно вивчають новітні розробки, які обіцяють значно покращити характеристики та продуктивність лазерних діодів.

Одним з найважливіших досягнень у розвитку лазерних діодів є вдосконалення технології їх виготовлення. Використання методів металоорганічного хімічного осадження з газової фази (MOCVD) та молекулярно-променевої епітаксії (MBE) дозволяє досягти вищої якості матеріалу та зменшити виробничі витрати [7]. Ці методи гарантують високу чистоту кристалічної решітки, що безпосередньо впливає на ефективність лазерних діодів.

Крім того, дослідження інтеграції лазерних діодів з іншими електронними компонентами відкривають нові горизонти для застосування лазерних діодів. Поєднання лазерних діодів з мікроелектронікою дозволяє створювати компактні та ефективні системи для телекомунікацій, збільшуючи швидкість передачі даних та зменшуючи витрати на електроенергію [8]. Наприклад, нові лазерні діоди можна використовувати у волоконно-оптичних системах зв'язку.

Медичні технології також активно впроваджують лазерні діоди для різних терапевтичних і діагностичних застосувань. Сучасні лазерні діоди здатні точно генерувати світло, що дозволяє проводити щадні процедури в дерматології та стоматології [9]. Наприклад, лазерні діоди використовуються в лікуванні акне, видаленні татуювань і косметології, демонструючи свою універсальність і здатність адаптуватися до потреб медичної галузі.

Іншим перспективним напрямком є покращення теплових властивостей лазерних діодів. Сучасні технології охолодження, засновані на використанні наноматеріалів, можуть значно покращити продуктивність лазерів, зменшити ризик перегріву та продовжити термін їхньої служби [10]. Такі технології забезпечують краще відведення тепла і дають змогу досягти вищої вихідної потужності без ризику втрати ефективності.

Дослідження новітніх технологій, їх інтеграція з іншими компонентами та покращення теплових властивостей створюють нові можливості для їх використання в промисловості, медицині та телекомунікаціях. Лазерні діоди набувають все більшого значення в контексті сучасних технологій і підтримують можливість подальших інновацій у найближчому майбутньому [11].

1.2 Аналіз переваг і недоліків лазерних діодів порівняно з іншими джерелами випромінювання

Лазерні діоди (ЛД) стали важливим компонентом сучасної світлотехніки завдяки своїм унікальним властивостям. Порівняно зі звичайними джерелами світла, такими як лампи розжарювання, люмінесцентні лампи та світлодіоди, лазерні діоди мають низку переваг. По-перше, вони забезпечують високу яскравість і високий коефіцієнт використання світла, що робить їх ідеальними для застосувань, які потребують потужного освітлення, таких як лазерні медичні та промислові системи. Лазерні діоди демонструють значно вищу енергоефективність порівняно зі звичайними джерелами світла, що допомагає знизити енергоспоживання і, відповідно, експлуатаційні витрати [12].

Дослідження [13] показало, що лазерні діоди можуть забезпечити високоякісне випромінювання з низькими втратами енергії, що важливо в таких сферах, як оптичний зв'язок і високоточне позиціонування. Крім того, компактні розміри лазерних діодів дозволяють інтегрувати їх у невеликі пристрої, що не завжди можливо зі звичайними джерелами світла. Крім того, лазерні діоди пропонують широкий спектр можливостей модуляції, що робить їх дуже корисними для цифрових застосувань.

Однак лазерні діоди мають і недоліки. Наприклад, вузький спектральний діапазон лазерних діодів є серйозним недоліком, оскільки він може обмежити їх використання в певних сферах освітлення. Чутливість до температури також може впливати на стабільність роботи лазерних діодів, і її слід враховувати при проектуванні систем [14].

Варто зазначити, що лазерні діоди забезпечують вищу яскравість та енергоефективність порівняно зі світлодіодами (LED), але світлодіоди мають перевагу в ширшій кольоровій гамі та нижчій вартості. Для деяких застосувань, де важлива кольорова гама та енергоефективність, світлодіоди можуть бути кращим вибором [15].

Таким чином, лазерні діоди є потужними та ефективними джерелами світла, які мають значні переваги над традиційними джерелами світла. Однак їх використання вимагає ретельного аналізу залежно від особливостей застосування та вимог до світлових характеристик. Узагальнені переваги та недоліки наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки лазерних діодів

Переваги	Недоліки
Висока яскравість та концентрація світла	Обмежений спектральний діапазон
Висока енергоефективність	Чутливість до температури
Компактні розміри	Вища вартість виробництва
Широкі можливості модуляції	Вимоги до систем охолодження
Зменшення експлуатаційних витрат	Необхідність специфічних умов експлуатації

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ

2.1 Принцип роботи лазерного діода

Лазерні діоди (рис. 2.1) – це лазери, в яких активним середовищем є електронно-дірковий газ, а робочою областю – напівпровідниковий p - n -перехід, подібний до p - n -переходу у звичайних світловипромінювальних діодах.

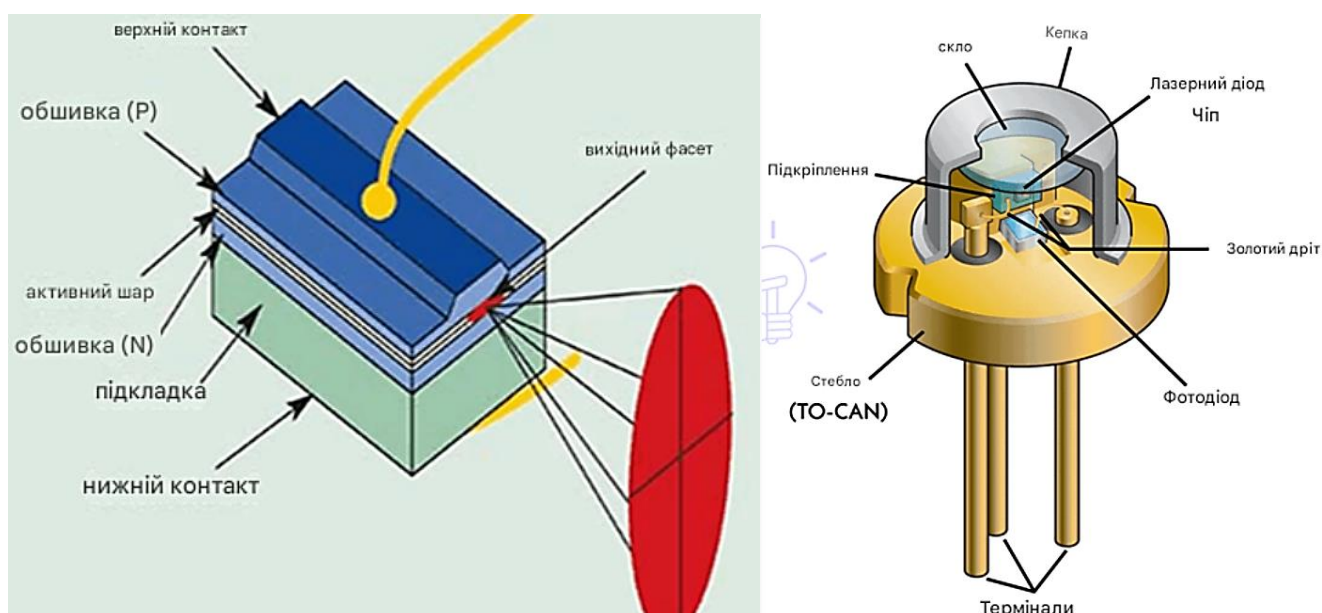


Рисунок 2.1 – Голівка лазерного діода. Адаптовано із роботи [11]

Принцип роботи лазерного діода полягає в наступному. Коли на анод звичайного діода подається позитивний потенціал, діод вважається зміщеним вперед. У цьому випадку дірки інжектуються з p -області в n -область p - n -переходу, а електрони з n -області в p -область напівпровідника. Якщо електрони і дірки знаходяться «близько» (на відстані, яка дозволяє тунелювання), вони можуть рекомбінувати (або зникати) і випромінювати енергію у вигляді фотонів (для збереження енергії) і фононів (для збереження імпульсу через малий імпульс фотонів) на певних довжинах хвиль. Цей процес відомий як спонтанне випромінювання і є основним джерелом випромінювання в світлодіодах.

Однак за певних умов електрони і дірки можуть залишатися в одному полі деякий час (протягом мікросекунд), перш ніж рекомбінувати. Якщо в цей момент через цю просторову область проходить фотон потрібної частоти (резонансної частоти), він може викликати вимушену рекомбінацію шляхом випромінювання другого фотона, напрямком, вектор поляризації і фаза якого точно відповідають тим же характеристикам, що і у першого фотона.

У лазерних діодах напівпровідниковий кристал являє собою дуже тонку прямокутну пластину. Такі пластини, по суті, є оптичними хвилеводами, і випромінювання обмежується відносно невеликою площею. Верхній шар кристала легується для формування *n*-областей, а нижній – для формування *p*-областей. В результаті утворюється плоский *p-n*-перехід з великою площею (рис. 2.2). Дві сторони (обидва кінці) кристала відполіровані до утворення гладких паралельних площин, створюючи оптичний резонатор, який називається резонатором Фабрі-Перо. Фотони, випромінювані перпендикулярно до цих площин, проходять через повністю оптичний хвилевід і відбиваються кілька разів. Кожного разу, коли фотон проходить через резонатор, випромінювання посилюється завдяки механізму вимушеного випромінювання. Як тільки коефіцієнт підсилення перевищує втрати, починається лазерне випромінювання світла [16].

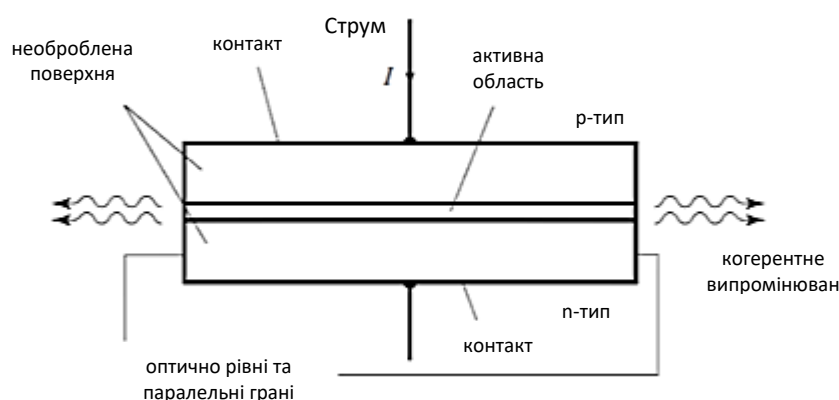


Рисунок 2.2 – Базова структура лазера з *p-n*-переходом. Адаптовано із роботи [14]

Як правило, p - n -переходи створюються шляхом підсумовування листа p -типу на підкладці n -типу. Струм є джерелом енергії накачування, необхідної для створення інверсії в активній зоні, прилеглої до p - n -переходу. Оскільки напівпровідниковий матеріал має високий показник заломлення, коефіцієнт відбиття від поверхні становить 30-35%, дві паралельні торцеві поверхні працюють як резонаторні дзеркала і виготовляються шляхом відколів уздовж осі кристала для створення позитивного оптичного зворотного зв'язку, необхідного для генерації випромінювання. Основні параметри лазерного діода включають частотний спектр випромінювання (оптичний режим), пороговий струм, вихідну потужність випромінювання і ефективність роботи. Коли струм проходить через лазерний діод, світло генерується шляхом інверсії об'єму спонтанно за допомогою збудженого випромінювання. Через відбиття від кінців, світло послідовно проходить через активну деку і посилюється в основному збудженим випромінюванням. Стоячі хвилі з цілим числом напівхвиль поміщаються всередині лазерного діода між Тор деками. Номер режиму m задається числом на півхвилю

$$m = 2L \frac{n}{L_w},$$

де L – відстань між торцями; n – показник заломлення; L_w – довжина хвилі випромінювання у вакуумі.

Поділ моди можна встановити, взявши похідну dm/dL_w . Тоді

$$\frac{dm}{dL_w} = -2 \frac{L_n}{L_w^2} + \left(2 \frac{L}{L_w} \right) \left(\frac{d_n}{dL_w} \right).$$

При $d_m = -1$, що відповідає втраті однієї напівхвилі в резонаторі, отримаємо вираз для модового поділу:

$$dL_w = \frac{dL_w^2}{2L \left(n - L_w \left(\frac{dn}{dL_w} \right) \right)}$$

Спектр випромінювання лазерного діода показано на рисунку 2.3, де розділення мод напівпровідникового лазера на основі GaAs становить $dL_w = 0,3$ нм. Для того, щоб лазер працював в одній моді, основна центральна мода повинна залишатися, а небажані бічні моди повинні бути якимось чином придушені.

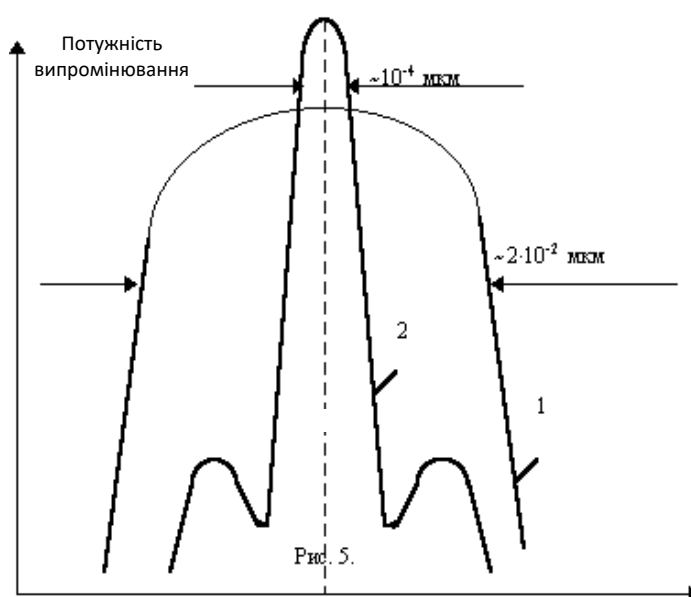


Рисунок 2.3 – Спектр випромінювання лазерного діода. Адаптовано із роботи [18]

Коли подається напруга від зовнішнього джерела, лазерний діод не відразу починає випромінювати світло. Мимовільне випромінювання відбувається при малих струмах (рис. 2.3) з шириною спектра випромінювання в кілька сотень мікрометрів. У міру збільшення струму накачування в області p - n -переходу виникає високий ступінь інверсії населеності, яка випромінює більше світла. Окремі фотони проходять строго дека за дном в площині p - n -переходу і піднімаються перпендикулярно кінця діода. Коли відбувається індуковане випромінювання, в одиницю часу утворюється велика кількість електронно-діркових пар, що збільшує інтенсивність випромінювання. Випромінювання

лазерного діода, отримане при щільності струму вище порогового значення, є когерентним. У цьому випадку форма спектральної дисперсійної кривої значно варіюється від широкої дисперсійної кривої спонтанного випромінювання 1 до кривої деякого вузького режиму 2 (рис. 2.3).

Значення порогового струму може бути отримано з наступних міркувань, в залежності від характеру матеріалу і геометричних параметрів. Припустимо, що в області p - n -переходу є світловипромінюючий шар товщиною D , який більше товщини шару D , який має зворотну населеність. Тоді з усіх доступних електронно-діркових пар можна припустити, що тільки частина d/D залишається в активному центрі і може брати участь в індукованому випромінюванні. Передбачається, що світлова хвиля поширюється по кристалу, і з урахуванням потужності P_s і коефіцієнта відбиття p світловий потік потрапляє на кожен торцеву грань. У присутності лазерного випромінювання добуток $p \times P_s$ експоненціально зростає з довжиною L активної області. Наявні втрати світлової хвилі значно перевищують лазерне підсилення за рахунок індукованого випромінювання. Кожен кінець діода випромінює світло наступної потужності [16]:

$$P_{\text{вих}}/2 = (1 - p)P_s.$$

Якщо μ [см^{-1}] коефіцієнт втрат для хвилі при її поширенні в кристалі, а H [см^{-1}] коефіцієнт посилення, то потужність в залежності від пройденого хвилею відстані уздовж активної області буде:

$$P = pP_s \exp\left(H\left(\frac{d}{D}\right) - \mu\right)z.$$

Посилення хвилі відбувається тільки в області з інверсної населеністю, тому величину H необхідно помножити на d/D , в той час як втрати мають місце по всьому об'єму і тому коефіцієнт μ не має такого множника. Тоді при проходженні кристала довгою L будемо мати:

$$P = pP_s \exp\left(H\left(\frac{d}{D}\right) - \mu\right)L$$

$$\ln\left(\frac{l}{p}\right) = \left(H\left(\frac{d}{D}\right) - \mu\right)L$$

Таким чином, умова лазерного випромінювання має вигляд

$$H\left(\frac{d}{D}\right) = \mu + \left(\frac{l}{L}\right) \ln\left(\frac{l}{p}\right)$$

Коефіцієнт посилення H пов'язаний з щільністю інжекттованих струму. Вираз для величини H буде:

$$H = \frac{gL_w^2 I}{8en^2 dV}$$

2.2 Основні параметри та характеристики

Лазерні діоди мають широкий спектр застосувань, включаючи оптоволоконний зв'язок, медичні та косметичні прилади, оптичні носії інформації та друковані пристрої. Для забезпечення оптимальної продуктивності лазерних діодів важливо розуміти їхні базові параметри, такі як довжина хвилі, пороговий і робочий струми, кути розбіжності світлового променя та контрольний струм. Лазерні діоди мають низку ключових характеристик, які визначають їхню функцію та застосування. Одним з важливих параметрів є довжина хвилі, яка являє собою робочу довжину хвилі лазерної трубки. Діапазон можливих довжин хвиль включає такі значення, як 635 нм, 650 нм, 670 нм, 690 нм, 780 нм, 810 нм, 860 нм і 980 нм. Вибір тієї чи іншої довжини хвилі залежить від призначення лазера, зокрема необхідності роботи з певними матеріалами та світлочутливими середовищами.

Іншим важливим параметром є пороговий струм (I_{th}), тобто струм, при якому лазерна трубка починає коливатися. Для малопотужних лазерів пороговий струм зазвичай становить десятки міліампер, але в сучасних моделях з особливою структурою квантової ями це значення становить 10 міліампер, що значно підвищує ефективність і дозволяє використовувати їх у більш енергоефективних системах.

Робочий струм (I_{op}) також є важливим параметром, оскільки саме цей струм забезпечує номінальну потужність діода. Знання цього параметра має вирішальне значення при проектуванні та налагодженні лазерно-керованої електроніки і забезпечує стабільну роботу пристрою при різних навантаженнях.

Лазерні діоди характеризуються кутом розбіжності їх вертикального і горизонтального оптичних променів. Вертикальний кут розбіжності зазвичай становить від 15 до 40 градусів і вказує на те, що промінь відхиляється перпендикулярно до p - n -переходу. Горизонтальний кут розбіжності, з іншого боку, коливається приблизно від 6 до 10 градусів і вказує на те, що оптична смуга розгортається в площині, паралельній p - n -з'єднанню. Ці кути визначають, наскільки ефективно можна сфокусувати лазерний промінь, що важливо для застосувань, де потрібна точна локалізація світла.

Нарешті, важливим є керуючий струм (I_m), що протікає через лазерну трубку при досягненні номінальної потужності. Цей параметр має вирішальне значення для стабільної роботи лазерного діода і особливо важливий для довготривалого використання, оскільки він допомагає контролювати роботу лазера в безпечному діапазоні потужності.

Ці фактори роблять лазерні діоди універсальним компонентом у таких галузях, як волоконно-оптичний зв'язок, оптичне зберігання даних, медична косметика та друк. Конкретні параметри лазерного діода підбираються відповідно до його застосування з урахуванням усіх ключових технічних характеристик для досягнення максимальної продуктивності [18].

2.3 Розрахунки, що описують роботу лазерних діодів у різних умовах

Лазерні діоди є одними з найбільш чутливих і гнучких джерел світла, що використовуються в системах від телекомунікаційного та медичного обладнання до промислових технологій. Для ефективної роботи в різних умовах експлуатації важливо розуміти і враховувати ключові робочі параметри, такі як робочий струм, пороговий струм, довжина хвилі випромінювання, температурні ефекти і кут розбіжності променя. Кожен з цих параметрів визначає характеристики лазерного діода і впливає на його загальну продуктивність і надійність.

2.3.1 Вихідна потужність лазерного діода

Розрахунок вихідної потужності лазерного діода є важливим етапом у визначенні його ефективності та придатності для використання в різному обладнанні. Вихідна потужність P_{out} лазерного діода залежить від кількох ключових параметрів, зокрема від робочого струму I_{op} та порогового струму I_{th} . [16].

Для опису вихідної потужності можна використовувати загальну формулу:

$$P_{out} = \eta * (I_{op} - I_{th}) * V_f$$

де:

- P_{out} – вихідна потужність (Вт),
- η – квантова ефективність (безрозмірна величина, яка вказує на відношення між кількістю фотонів, що генеруються, і кількістю електронів, які подаються на вхід),
- I_{op} – робочий струм (А),
- I_{th} – пороговий струм (А),
- V_f – робоча напруга (В).

Важливо відзначити, що вихідна потужність безпосередньо залежить від робочого струму. Лазерні діоди зазвичай працюють в режимі, при якому вихідна потужність безпосередньо залежить від струму до насичення, після чого починається теплове перевантаження.

Для більш детального аналізу можна використовувати формулу, що описує вплив теплового навантаження та зниження ефективності зі збільшенням струму.

2.3.2 Пороговий струм

Пороговий струм I_{th} є важливим параметром лазерних діодів, оскільки він визначає мінімальний струм, необхідний для генерації лазерного світла. Коли струм досягає цього значення, в ядрі діода починається когерентне випромінювання, яке є основою для роботи лазера.

Значення порогового струму залежить від матеріалу діода і конструктивних особливостей. Крім того, пороговий струм змінюється під впливом зовнішніх факторів, таких як температура. Наприклад, при підвищенні температури пороговий струм має тенденцію до збільшення. Це збільшення може призвести до теплового перевантаження діода, оскільки пороговий струм не може бути досягнутий без збільшення робочого струму, що ускладнює використання лазерних діодів у високотемпературних середовищах. [16]

Для врахування впливу температури на пороговий струм можна використовувати наступне рівняння:

$$I_{th}(T) = I_{th0} * e^{\alpha(T-T_0)}$$

де:

- I_{th0} – початкове значення порогового струму при базовій температурі T_0 ,
- T – поточна температура,
- T_0 – початкова температура, при якій вимірювалося I_{th0} ,

– α – температурний коефіцієнт, що характеризує, як змінюється пороговий струм з температурою.

Знання та контроль порогового струму важливі для забезпечення стабільної роботи лазерного діода. Правильне управління цим параметром може оптимізувати продуктивність діода в різних умовах експлуатації, запобігти перегріву та знизити ефективність. Таким чином, належний моніторинг кордонів і поточне управління ними є ключем до довгострокової і надійної роботи лазерних систем в медичних, промислових та інших технологіях.

2.3.3 Довжина хвилі випромінювання

Довжина хвилі випромінювання-один з важливих параметрів лазерного діода, що визначає спектральну область, в якій працює прилад, і, відповідно, його застосування залежно від матеріалу, що використовується для сердечника діода, може бути отримано певне значення довжини хвилі. Наприклад, арсенід галію (GaAs) дозволяє налаштовувати лазерні діоди для роботи в ближньому інфрачервоному діапазоні, що зазвичай використовується в телекомунікаційних та медичних пристроях.

Однак довжина хвилі випромінювання лазерного діода також чутлива до змін температури. Коли діод нагрівається або охолоджується, довжина хвилі змінюється, що може призвести до відхилень у його початкових властивостях, особливо в умовах значних коливань температури. Щоб пояснити ці зміни, було введено температурний коефіцієнт [16].

Температурний зсув довжини хвилі можна розрахувати за такою формулою:

$$\Delta\lambda = \beta * (T - T_0)$$

де:

- $\Delta\lambda$ – зміна довжини хвилі (нм),
- β – температурний коефіцієнт (нм/°C), що залежить від матеріалу діода,

- T – поточна температура ($^{\circ}\text{C}$),
- T_0 – початкова температура, при якій визначено вихідну довжину хвилі ($^{\circ}\text{C}$).

Ця залежність важлива для багатьох застосувань, особливо для чутливих систем, що вимагають високої стабільності довжини хвилі. Щоб зменшити вплив на температуру, лазерний діод може бути оснащений системою температурної компенсації або охолодження, яка допомагає підтримувати постійну довжину хвилі навіть при значній зміні температури навколишнього середовища.

2.3.4 Кут вертикальної та горизонтальної розбіжності променя

Кути розбіжності променя, особливо вертикальні θ_{\perp} і горизонтальні θ_{\parallel} , є важливими характеристиками лазерних діодів, які визначають напрямок і ступінь розсіювання світла. Ці кути визначають, як лазерний промінь розширюється в просторі, і мають значний вплив на ефективність його використання в різних додатках.

Кут вертикальної розбіжності θ_{\perp} зазвичай становить від 15 до 40 градусів. дек. Це характеризує, як світло розсіюється в напрямку, перпендикулярному площині рп-переходу. Чим більше цей кут, тим ширше промінь розсіюється по вертикалі, що може бути корисно в ситуаціях, коли необхідно покрити велику площу або забезпечити певний кут огляду.

Кут горизонтальної розбіжності θ_{\parallel} зазвичай менше і коливається від 6 до 10 градусів. дек. Горизонтальний кут відхилення зазвичай менше і становить від 6 до 10 градусів. Цей кут являє собою розсіювання світла в напрямку, паралельному площині рп-переходу. Нижчий горизонтальний кут означає, що промінь має вирішальне значення в додатках, де потрібна висока точність фокусування, і лазер підтримує більш сфокусований спрямований світловий потік, такий як медичні пристрої або високоточне промислове обладнання.

Правильне розуміння і вибір цих кутів є ключем до досягнення оптимального напрямку променя і фокусування в системах, де точність має вирішальне значення.

Наприклад, лазерні системи для хірургії можуть забезпечити точність виробничого процесу в промислових застосуваннях, але точність концентрації променя може вплинути на результат процедури. Таким чином, найкращі результати можуть бути досягнуті за певних умов використання, якщо враховувати особливості відхилення променя при проектуванні лазерних систем.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЛАЗЕРНОГО ДІОДА

3.1 Опис досліджуваного лазерного діода

Лазерні діоди є важливими компонентами сучасної електроніки, зокрема в медичних і промислових системах. Для виконання розрахунків у даній роботі було обрано лазерний діод на основі GaAs (арсеніду галію). Цей тип напівпровідникових лазерів широко використовується завдяки своїм високим технічним характеристикам і універсальності застосування.

Основні характеристики обраного лазерного діода:

- Тип: GaAs (арсенід-галієвий напівпровідниковий лазер).
- Квантова ефективність (η): 85%.
- Пороговий струм (I_{th}): 20 мА.
- Робоча напруга (U): 2 В.
- Довжина хвилі випромінювання: 808 нм (ближній інфрачервоний діапазон).

Лазерні діоди на основі GaAs знаходять широке застосування як у медицині, так і в промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. У медицині вони відіграють важливу роль у лазерній терапії, що спрямована на стимуляцію регенерації тканин, зменшення болю та запалення. Завдяки своїй здатності проникати в тканини, випромінювання з довжиною хвилі 808 нм забезпечує ефективне лікування внутрішніх ушкоджень. У стоматології такі лазери використовуються для очищення корневих каналів, лікування карієсу та інших процедур, що потребують високої точності й мінімальної травматичності. Крім того, у косметології лазери цього типу стали незамінними у виконанні процедур епіляції, омолодження шкіри, видалення пігментації, рубців і татуювань.

У промисловості лазерні діоди GaAs також займають важливе місце завдяки своїй точності й енергетичній ефективності. Вони використовуються для лазерного різання металів і пластиків, забезпечуючи чисті та точні зрізи, які мінімізують

необхідність додаткової обробки. Також такі лазери активно застосовуються у лазерному маркуванні, дозволяючи створювати стійкі серійні номери, логотипи та іншу важливу інформацію на різних матеріалах. Ще одним важливим напрямком є лазерне зварювання, яке є незамінним у виробництві тонкостінних конструкцій, наприклад, в автомобільній і авіаційній галузях, де потрібна висока точність і міцність з'єднань.

Лазерні діоди на основі GaAs успішно поєднують універсальність, ефективність і точність, що робить їх ідеальним інструментом для використання в сучасних технологіях, спрямованих на покращення якості медичних процедур і підвищення ефективності промислових процесів.

3.2 Методика розрахунку

Розрахунок вихідної потужності лазерного діода виконувався на основі формули, наведеної в підрозділі 2.3.1. Ця формула описує залежність вихідної потужності від робочих параметрів напівпровідникового лазера.

Розрахунок проводився для діапазону робочого струму від 20 мА до 100 мА із кроком 10 мА. Нижня межа цього діапазону відповідає пороговому струму ($I_{th} = 20$ мА), після якого починається генерація когерентного випромінювання.

Для розрахунків були використані такі параметри лазерного діода:

- $\eta = 0.85$ (85%),
- $I_{th} = 0,02$ А (20 мА),
- $V_f = 2$ В.

Згідно з цією формулою, вихідна потужність лазерного діода починає зростати лише після досягнення порогового струму, оскільки при значеннях $I_{op} \leq I_{th}$ генерація випромінювання не відбувається ($P_{out} = 0$).

Отримані результати представлено у вигляді таблиці та графічно в розділі 3.3. Аналіз показує лінійну залежність вихідної потужності від струму в межах робочого діапазону.

3.3 Результати розрахунків та графічне представлення результатів

Розрахунки виконувались для робочих струмів від 20 мА (пороговий струм I_{th}) до 200 мА з кроком 10 мА. Таким чином, значення струму I_{op} для розрахунків будуть такими:

$$I_{op} = 0,002; 0,003; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,10 \dots 0,20 \text{ А}$$

За допомогою наведеного рівняння розраховуємо вихідну потужність P_{out} для кожного значення струму I_{op} .

Для кожного струму, який перевищує пороговий, розрахунок виконується таким чином (для прикладу $I_{op} = 0,02 \text{ А}$):

$$P_{out} = 0,85 \times (0,02 - 0,02) \times 2 = 0,000 \text{ Вт}$$

Розраховані значення вихідної потужності для кожного значення робочого струму наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Отримані результати розрахунків

Робочий струм (А)	Вихідна потужність (Вт)
0,02	0
0,03	0,017
0,04	0,034
0,05	0,051
0,06	0,068
0,07	0,085
0,08	0,102
0,09	0,119
0,10	0,136

Робочий струм (А)	Вихідна потужність (Вт)
0,11	0,153
0,12	0,17
0,13	0,187
0,14	0,204
0,15	0,221
0,16	0,238
0,17	0,255
0,18	0,272
0,19	0,289
0,20	0,306

На рисунку 3.1 представлений графік залежності вихідної потужності від робочого струму. Як показує графік, вихідна потужність починає збільшуватися лише після досягнення порогового струму $I_{th} = 0.02$ А. Після цього, з підвищенням струму, потужність лазерного діода зростає лінійно.

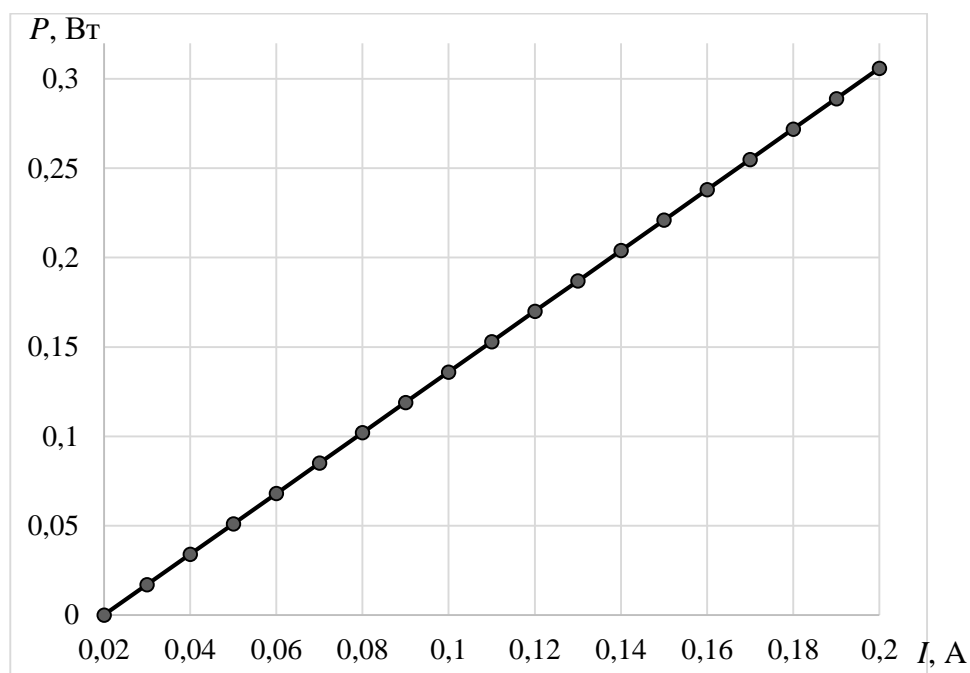


Рисунок 3.1 – Графік залежності вихідної потужності від робочого струму

3.4 Аналіз отриманих результатів

Розрахунки вихідної потужності лазерного діода, виконані для робочих струмів у діапазоні від 0.02 А до 0.20 А з кроком 0.01 А, показали важливі результати щодо характеристик лазера. Зокрема, виявилося, що вихідна потужність починає зростати лише після досягнення порогового струму, який у даному випадку становить 0.02 А. До цього моменту потужність дорівнює нулю, оскільки лазерний діод ще не почав генерувати когерентне випромінювання.

Після перевищення порогового струму вихідна потужність демонструє лінійне зростання в межах обраного діапазону струмів. При підвищенні струму, потужність лазерного діода зростає пропорційно, що свідчить про ефективне генерування світла. Така лінійна залежність є важливим показником стабільності роботи лазера і підтверджує його ефективність у вказаному діапазоні струмів.

Ці результати також вказують на те, що лазерний діод працює з високою ефективністю, де кожен додатковий міліампер струму спричиняє пропорційне збільшення вихідної потужності, що важливо для застосувань, які вимагають стабільного і контрольованого випромінювання. Лінійна залежність потужності від струму також вказує на те, що лазер не має значних втрат енергії в межах робочого діапазону, що є позитивним для його застосування в промислових і медичних технологіях.

Однак, при перевищенні максимальних значень струму, необхідно враховувати можливість перегріву лазерного діода. Це може призвести до зниження ефективності або пошкодження лазера, тому важливо контролювати робочі умови, щоб забезпечити стабільну і безпечну роботу пристрою.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання дипломної роботи було показано, що лазерні діоди є важливими компонентами сучасної електроніки, що використовуються в різних сферах промисловості та медицини завдяки своїй високій ефективності, компактності та здатності генерувати когерентне випромінювання. Розглянуто широкий спектр їх застосування, зокрема в лазерному різанні, зварюванні, медичних технологіях, таких як діагностика та терапія.

2. Основними параметри лазерних діодів є пороговий струм, вихідна потужність, довжину хвилі та кути розбіжності променя. Ці параметри суттєво впливають на ефективність роботи лазерного діода і його застосування в різних умовах, що особливо важливо для точних технологічних процесів.

3. Установлено, що пороговий струм, який для арсенід-галієвого лазера становить 0,02 є критичним для початку генерації когерентного випромінювання, і лише при струмі, що перевищує цей поріг, лазерний діод починає ефективно працювати.

4. Одержано експериментальні результати залежності робочого струму від вихідної потужності, які підтверджують високі показники ефективності лазерних діодів у медичних і промислових застосуваннях. Вихідна потужність лазерного діода лінійно зростає зі збільшенням струму і досягає значення 0,3 Вт при силі струму 0,2 А. Після досягнення порогового значення, що дозволяє прогнозувати його ефективність при різних значеннях робочого струму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Direct diode lasers: how technology evolution is opening new markets. Metal Working World Magazine. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.metalworkingworldmagazine.com/direct-diode-lasers-how-technology-evolution-is-opening-new-markets> (Дата доступу: 29.10.2024 р.).
2. Mark S. Zediker. High-Power Diode Laser Technology XVI. SPIE, the international society for optics and photonics. – 2018. – Vol. 10514.
3. Гринчишин Т. М., Кіт Г. В. / Застосування оптичних лазерних систем та перспективи їх подальшого розвитку // 805-те вид. Львів : Вісник Національного університету "Львівська політехніка", 2014.
4. Застосування лазера у хірургії. Мед Сіті. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://medcity.ua/ua/patient/section/primenenie-lazera-v-khirurgii/> (Дата доступу: 01.11.2024 р.).
5. Дослідження використання лазерів у медицині. Сучасні технології біомедичної інженерії : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Одеса. 2022. С. 129–131.
6. Діодний лазер для стоматології SmartM PRO. System Medicals. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://smed.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=263 (Дата доступу: 01.11.2024 р.).
7. Ковальчук В. М., Кисельов В. Ю. / Технології лазерних діодів та їх застосування в промисловості // Наукові праці Національного університету «Львівська політехніка». – 2019. – С. 51–58.
8. Hira Nasim, Yasir Jamil. Diode lasers: From laboratory to industry // Optics & Laser Technology. – 2014. – Vol. 56. – Pp. 211-222.
9. Лазерні технології [Текст] : навчальний посібник. Частина 1-2 / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – 2020. – 316 с.

10. Friedrich G. Bachmann Present technology, industrial applications, and future prospects of high-power diode lasers SPIE International Conference on: Advanced Laser Technologies (ALT'01), 2001, Constanta, Romania. – 2002.
11. Alexei Baranov, Eric Tournié. Semiconductor Lasers: Fundamentals and Applications // Woodhead Publishing; 1st edition. – 2013. – 664 p.
12. Shuxing Li, Yuqin Guo, Rong-Jun Xie Laser Phosphors for Next-Generation Lighting Applications *Acc. Mater. Res.* 2022, 3, 12, 1299–1308
13. High Power Diode Laser. | Best reliability & performance [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cnilaser.com/products.htm> (Дата доступу: 01.11.2024 р.).
14. Zhenxu Bai, Zhongan Zhao, Menghan Tian, Duo Jin, Yajun Pang, Sensen Li, Xiusheng Yan, Yulei Wang, Zhiwei Lu. A comprehensive review on the development and applications of narrow-linewidth lasers *MicroWave and Optical Technology Letters*. Volume64, Issue12 December 2022 Pages 2244-2255.
15. Laser diodes and LEDs light optoelectronic devices [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16550830/laser-diodes-and-leds-light-optoelectronic-devices> (Дата доступу: 20.10.2024 р.).
16. Jung H., Ahn N., Klimov V.I. Prospects and challenges of colloidal quantum dot laser diodes. *Nat. Photon.* 15, 643–655 (2021).
17. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині : навчальний посібник / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха, І. М. Лукавенко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 127 с.
18. Параметри, принципи та застосування лазерного діода. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.loshield.com/news/laser-diode-parameters-principles-and-applica-74663004.html> (Дата доступу: 25.10.2024 р.).
19. Comparison of LD, SLED and LED architectures [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.exalos.com/divi_overlay/comparison-of-architectures/ (Дата доступу: 28.10.2024 р.).