

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної  
та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра  
**Діодні лазери як елементи електронних інформаційних систем**  
спеціальності 171 – Електроніка

Здобувач вищої освіти гр.ЕП.м-01н

І.М. Ковальов

Науковий керівник  
д-р фіз.-мат. наук, професор

Л.В. Однорець

Завідувач кафедри ЕЗПФ  
д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

Суми – 2022

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

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«02» травня 2022 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**  
**Ковальова Івана Миколайовича**

Тема роботи **Діодні лазери як елементи електронних інформаційних систем**

затверджена наказом по університету від «18» квітня 2022 р., № 0270-VI \_\_\_\_\_

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 17 травня 2022 року \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета) Діодний лазер – це твердотільний напівпровідниковий лазер, принцип функціонування якого заснований на виникненні інверсії носіїв заряду в напівпровіднику після інжекції носіїв в зону р-п – переходу; компактний лазер, в якому активним середовищем є електронно-дірковий газ, а робочою областю - напівпровідниковий р-п перехід. Розробка лазерних діодів стала революцією в конструюванні електронних пристроїв різної складності. Діодні лазери різної потужності використовуються в контрольно-вимірювальних електронних системах, обладнанні для формування інтегрованої електроніки, медичній апаратурі. Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у вивченні фізичних та конструктивно-технологічних принципів функціонування діодних лазерів різного функціонального призначення та проведенні розрахунків їх робочих параметрів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Характеристики лазерного випромінювання.

2. Фізичні принципи роботи та класифікація діодних лазерів.

3. Спектральні і температурні характеристики.

4. Теоретичні основи розрахунку параметрів напівпровідникових лазерів для оптичних стандартів частоти.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-3. Актуальність роботи, мета, фізичні принципи роботи діодних лазерів.

Слайди № 4-6. Конструктивно-технологічні особливості діодних лазерів різних типів.

Слайди № 7-8. Спектральні і температурні характеристики.

Слайди №9-10. Результати розрахунків.

Слайди №11-12. Висновки, публікації.

6. Дата видачі завдання 02.05.2022 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 02.05.2022 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 12.05.2022 р.	<i>вик.</i>
4.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 17.05.2022 р.	<i>вик.</i>
5.	Попередній захист роботи	18.05.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>
6.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	26.05.2022 р., онлайн	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

Ковальов І.М.

Науковий керівник

Однодворець Л.В.

## РЕФЕРАТ

Предметом дослідження кваліфікаційної роботи є фізичні принципи функціонування, конструктивно-технологічні особливості та галузі застосування лазерних діодів як елементів електронних інформаційних систем.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей, фізичних принципів роботи та галузей застосування діодних лазерів як елементів електронних інформаційних систем.

Показано, що вплив лазерного випромінювання на фізичні та біологічні об'єкти заснований на дії стимульованого електромагнітного випромінювання, яке має наступні характеристики: когерентність; мала розбіжність променя; висока щільність потужності. Оптичний спектр лазерних діодів залежить від характеристик оптичного резонатора лазера. Більшість звичайних пристроїв з підсиленням або індексацією мають спектр з декількома піками, в той час як пристрої з розподіленим зворотним зв'язком (DFB) і розподіленим брегговським відбивачем (DBR) відображають один чітко визначений спектральний пік. Зроблено висновок, що у напівпровідникових лазерах центральна генеруюча частота залежить від щільності носіїв в активній області, яка є функцією струму; флуктуацією струму, що приводить до зрушення центральної частоти.

Робота викладена на 40 сторінках, у тому числі включає 17 рисунків, список цитованої літератури із 20 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ЛАЗЕРНИЙ ДІОД, ЕЛЕКТРОННО ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, КОГЕРЕНТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ГЕНЕРУЮЧА ЧАСТОТА, СВІТЛОВИЙ СИГНАЛ

## ЗМІСТ

	стор.
<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ДІОДНИХ ЛАЗЕРІВ ТА ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В НИХ</b> .....	7
1.1 Загальна інформація .....	7
1.2 Конструкція і принципи функціонування .....	9
1.3 Класифікація діодних лазерів.....	12
1.4 Особливості підключення.....	16
<b>РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДНИХ ЛАЗЕРІВ</b> .....	17
2.1 Спектральні характеристики .....	18
2.2 Модулі на основі діодних лазерів .....	19
2.3 Частотні характеристики .....	22
<b>РОЗДІЛ 3. ЛАЗЕРНІ ДІОДИ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ</b> .....	29
3.1 Моделювання оптичної системи .....	29
3.2 Електронні інформаційні системи на основі лазерних діодів .....	32
3.3 Лазерне охолодження та захоплення атомів та іонів.....	36
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	38
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	39

## ВСТУП

Діодні лазери добре зарекомендували себе як компоненти різних електронних систем, такі як лазерні указки, сканери штрих-кодів або приводи CD / DVD / Blu-ray. Їх успіх обумовлений тим, що вони компактні, зручні в експлуатації, економічні і високоефективні. Однак спектр випромінювання голих діодних лазерів широкий, а довжина хвилі генерації не дуже добре визначена. У загальному випадку дві грані лазерного діода утворюють резонатор і визначають (поздовжні) режими генерації. Широкий профіль посилення напівпровідника підтримує безліч режимів одночасно, кожен з різною частотою. Навіть діоди з одним поздовжнім режимом демонструють зміну режиму при найменших змінах температури чіпа або струму драйвера. В результаті виходить недосконалий, спектрально нестабільний вихідний пучок.

Діодні лазери мають унікальні робочі характеристики і властивості: вузьку ширину лінії випромінювання, велику довжину когерентності, точний вибір довжини хвилі і налаштування або стабілізація частоти випромінювання яка досягаються шляхом введення частотно-селективного зворотного зв'язку в резонатор лазера. Існують два методи реалізації перебудовування одночастотних діодних лазерів. Одна з них – діодний лазер із зовнішнім резонатором (ECDL), до складу якого входять оптична решітка, другий резонатор, який формують зовні між задньою гранню діода і елементом зворотного зв'язку. Друга реалізація діода – це діодний лазер з ґраткою, вбудованою в напівпровідник: розподілений зворотний зв'язок (DFB) і розподілені діодні лазери бреггівського відбивача (DBR).

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні конструктивно-технологічних особливостей, фізичних принципів роботи та галузей застосування діодних лазерів як елементів електронних інформаційних систем.

Результати роботи представлені на Міжнародній конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2022» (м.Суми).

## Розділ 1

# КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ДІОДНИХ ЛАЗЕРІВ ТА ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В НИХ

### 1.1 Загальна інформація

Діодний лазер – лазер, в якому активним середовищем є електронно-дірковий газ, а робочою областю напівпровідниковий р-п перехід, аналогічний р-п переходу звичайного світло діода [1]. На рис. 1.1. зображений діодний лазер TVS Blue 300mw з довжиною хвилі 445 нм.



Рисунок 1.1 – Діодний лазер TVS Blue 300mW. Із роботи [1]

Основним елементом інжекційного лазера є р-п-перехід. Дія лазера базується на тому, що при прямому зміщенні електрони інжектуються у р-область, де відбувається їх випромінювальна рекомбінація з дірками, що там знаходяться. Для створення стану з інверсною населеністю потрібна велика концентрація дірок у валентній зоні, що досягається шляхом збільшення концентрації легуючої акцепторної домішки. Для того, щоб інжекція електронів у р-область перевищувала інжекцію дірок в п-область, необхідно, щоб концентрація донорної домішки в п-області була вищою за концентрацію акцепторної домішки в р-області. Таким чином, для отримання стану з інверсною населеністю в р-області необхідна висока ступінь легування домішками обох областей р-п-переходу. Інверсна населеність досягається при великій густині прямого струму крізь діод (поріг генерації відповідає густині струму 1-4 кА/см<sup>2</sup>, а при зниженій температурі  $\sim 10^2$  А/см<sup>2</sup>) [2, 3].

Конструкція напівпровідникового лазера представлена на рисунку 1.2. Випромінювачем є вузька частина р-області, що прилягає до р-n-переходу. Функцію дзеркал виконують грані напівпровідникового кристала, який є й активною речовиною [4]. Вимушене випромінювання відбувається паралельно р-n-переходу.

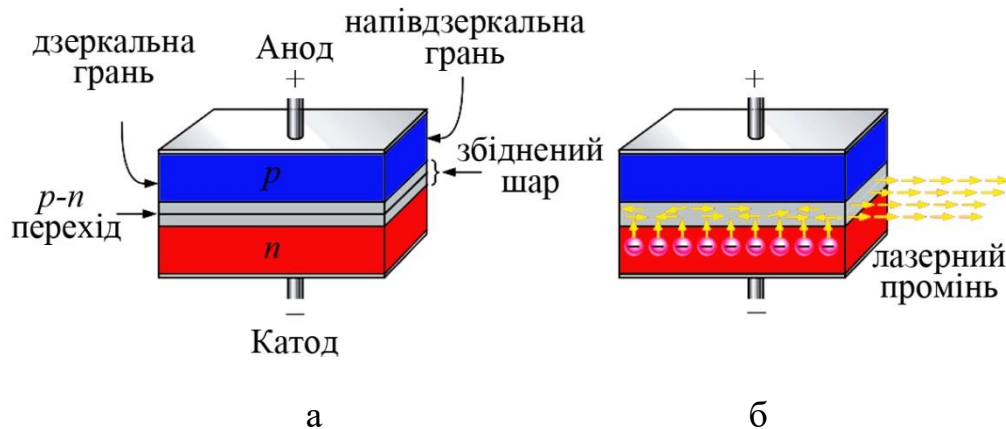


Рисунок 1.2 – Конструкція напівпровідникового інжекційного лазера (а) та принцип генерації лазерного випромінювання (б)

Комерційне та промислове використання діодних лазерів останнім часом різко зросло. Оптичні характеристики, невеликі розміри і міцність діодних лазерів дозволили комерціалізувати багато нових видів застосування. Вихід діодних лазерів дуже яскравий, враховуючи їх невеликі розміри. Сьогодні у продажу такі представники які мають сотні Ват потужності, що працюють в умовах безперервної хвилі (CW) в упаковках розміром всього в кілька кубічних дюймів. Ця характеристика робить ці пристрої придатними для передачі кабельного телебачення, розробки телевізорів високої чіткості (HDTV) і медичного застосування [5].

Крім того, у порівнянні з іншими типами лазерів діодні лазери споживають дуже мало енергії. Більшість діодних лазерів працюють з перепадами напруги менше 2 В, а вимоги до живлення визначаються їх поточною налаштуванням. Загальна ефективність перевищує 30%. Це є типовим у випадку з лазерними діодами. Оскільки діодні лазери виготовлені з



напівпровідникових матеріалів, вони не вимагають крихких скляних корпусів або дзеркального вирівнювання, характерного для газових лазерів.

Отримана міцність і невеликі розміри дозволяють використовувати діодні лазери в середовищах і просторах, в яких інші типи лазерів не можуть працювати. Когерентність і однохвильові характеристики діодних лазерів дозволяють фокусувати виходи цих пристроїв до дифракційно обмеженого розміру плями [6]. Розмір отриманої плями залежить від довжини хвилі лазера – чим коротша довжина хвилі світла, тим менший розмір плями, яке може бути згенеровано. Робота на коротших синіх і ультрафіолетових довжинах хвиль робить можливими менші розміри плям, що дозволяє зберігати більше інформації на оптичних дисках з більш високою щільністю. Ще однією перевагою діодних лазерів є те, що вони можуть бути безпосередньо модульовані на високих частотах. Модулюючи струм приводу, вихід лазерного діода модулюється з частотами до декількох ГГц в високошвидкісних каналах передачі даних.

## **1.2. Конструкція і принципи функціонування**

Діодні лазери оснащені двома дзеркалами на протилежних кінцях напівпровідника. Одне з дзеркал має часткову прозорість, подібно двосторонньому дзеркалу [8-10]. При низьких рівнях потужності, діодний лазер працює аналогічно тому, як працює звичайний світлодіод з дуже малою ефективністю віддачі. Однак, як тільки електрична потужність досягає порогу щільності, Рівного приблизно  $4 \text{ кВт/см}^2$ , напівпровідник випромінює достатньо світла для частини довжин хвиль, що відображаються між дзеркалами. Ці умови дозволяють лазерному діоду випромінювати значно більше світла, ніж це робить звичайний світлодіод. Крім того, відбитий між дзеркалами світло, проходить крізь напівпрозоре дзеркало, завдяки чому формується вузький промінь синього. Цей промінь далі може бути спрямований на люмінофор для подальшої генерації жовтого світла. Варто відзначити цікаву деталь: звичайні

сині світлодіоди мають високу світловіддачу, регенеруючи до 70% електричної потужності, що проходить через прилади при щільності потоку  $3 \text{ Вт/см}^2$ . Це значно ефективніше, ніж у випадку з лазерними діодами синього випромінювання, потужність конверсії яких не перевищує 30%, коли щільність електроенергії становить не більше  $10 \text{ кВт/см}^2$ .

Але світлодіоди здатні досягати високої ефективності при низьких струмових рівнях. Тому ефективна віддача вимагає значної маси дорогих напівпровідників. Посилення струму, що пропускається через світлодіоди, підвищує яскравість випромінювання [11]. Але збільшення струму різко знижує ефективність світлодіодів. Це явище відоме як "спад". А ось ефективність діодних лазерів зі збільшенням струму не змінюється. Таким чином, при щільності електроенергії близько  $5 \text{ кВт/см}^2$ , світлодіоди стають менш ефективними в порівнянні з діодними лазерами. Ця різниця продуктивності збільшується пропорційно з рівнем потужності.

Крім того, відбите між дзеркалами світло, проходить крізь напівпрозоре дзеркало, завдяки чому формується вузький промінь синього. Цей промінь далі може бути спрямований на люмінофор для подальшої генерації жовтого світла. Варто відзначити цікаву деталь: звичайні сині світлодіоди мають високу світловіддачу, регенеруючи до 70% електричної потужності, що проходить через прилади при щільності потоку  $3 \text{ Вт/см}^2$ .

При подачі на анод звичайного діода позитивної напруги діод зміщений в прямому напрямі. При цьому дірки з р-області інжектуються в n-область р-n переходу, а електрони з n-області інжектуються в р-область напівпровідника. Якщо електрон і дірка виявляються "поблизу" (на відстані коли можливо тунелювання), то вони можуть рекомбінувати (або анігілювати) з виділенням енергії у вигляді фотона певної довжини хвилі (через збереження енергії) і фонона (через збереження імпульсу, тому що імпульс фотона малий).

Такий процес називається спонтанним випромінюванням, і є основним джерелом випромінювання в світлодіодах. Проте, за певних умов, електрон і дірка, перед рекомбінацією, можуть знаходитися в одній області простору

достатньо довго (до мікросекунд). Якщо через дану область простору пройде фотон потрібної частоти (резонансної частоти), він може викликати вимушену рекомбінацію з виділенням другого фотона, причому його напрям, вектор поляризації і фаза будуть точно збігатися з тими ж характеристиками першого фотона.

У лазерному діоді напівпровідниковий кристал виготовляють у вигляді дуже тонкої прямокутної пластинки. Така пластинка по суті є оптичним хвилеводом, де випромінювання обмежене у відносно невеликому просторі. Верхній шар кристала легується для створення n-області, а в нижньому шарі створюють р-область. В результаті виходить плоский р-n перехід великої площі. Дві бічні сторони (торці) кристала поліруються для утворення гладких паралельних площин, які утворюють оптичний резонатор, званий резонатором Фабрі-Перро.

Фотон спонтанного випромінювання, що поширюється перпендикулярно цим площинам, пройде через весь оптичний хвилевід і кілька разів віддзеркалиться від них, перш ніж вийде назовні. Щоразу, коли фотон проходить уздовж резонатора, випромінювання посилюватиметься завдяки механізму вимушеного випромінювання. І як тільки підсилення перевищить втрати почнеться лазерна генерація [12-14].

Діодні лазери можуть бути декількох типів. У основної їх частини шари зроблені дуже тонкими, і така структура може генерувати випромінювання тільки в напрямі, паралельному цим шарам. З іншого боку, якщо хвилевід зробити достатньо широким в порівнянні з довжиною хвилі, він зможе працювати вже в декількох поперечних режимах. Такий діодний лазер називається багатоходовим, його застосування можливо в тих випадках, коли від пристрою потрібна висока потужність випромінювання, і не ставиться умова хорошої збіжності променя (тобто допускається його значне розсіювання).

Такими галузями застосувань є: друкувальні пристрої, хімічна промисловість, накачка інших лазерів. З іншого боку, якщо потрібне хороше

фокусування променя, ширина хвилеводу повинна виготовлятися порівнянної з довжиною хвилі випромінювання. Тут вже ширина променя визначатиметься тільки межами, що накладаються дифракцією. Такі пристрої застосовуються в оптичних модулях пам'яті, лазерних указках, а також в оптоволоконній техніці. Слід, проте, помітити, що такі лазери можуть підтримувати декілька подовжніх режимів, тобто можуть випромінювати на різних довжинах хвиль одночасно.

Довжина хвилі випромінювання лазерного діода залежить від ширини забороненої зони між енергетичними рівнями р- і n-областей напівпровідника. У зв'язку з тим, що випромінюючий елемент достатньо тонкий, промінь на виході діода, завдяки дифракції, практично відразу розходить. Для компенсації цього ефекту і отримання тонкого променя необхідно застосовувати збираючі лінзи. Для багатомодових широких лазерів, найчастіше застосовуються циліндрові лінзи. У простому пристрої, який був описаний вище, неможливо виділити окрему довжину хвилі, виключаючи значення, характерне для оптичного резонатора [15].

Проте в пристроях з декількома подовжніми режимами і матеріалом, здатним підсилювати випромінювання в достатньо широкому діапазоні частот, можлива робота на декількох довжинах хвиль. У багатьох випадках, включаючи більшість лазерів з видимим випромінюванням, вони працюють на єдиній довжині хвилі, яка, проте володіє сильною нестабільністю і залежить від безлічі факторів — зміни сили струму, зовнішньої температури і т.д.

Останніми роками описана вище конструкція простого лазерного діода піддавалася численним удосконаленням, щоб пристрої на їх основі могли відповідати сучасним вимогам.

### **1.3 Класифікація діодних лазерів**

Діодні лазери з n-p структурою мають низьку ефективність, вимагають значну потужність на вході, і працюють тільки в режимі імпульсів. По-іншому

вони працювати не можуть, так як швидко перегріються, тому не отримали широкого застосування на практиці [1, 3, 5, 18].

Лазери з подвійною гетероструктурою мають шар речовини з вузькою забороненою зоною. Цей шар знаходиться між шарами матеріалу, у якого широка заборонена зона. Зазвичай для виготовлення лазера з подвійною гетероструктурою застосовують арсенід алюмінію-галію і арсенід галію. Кожні з цих сполук з двома різними напівпровідниками отримали назву гетероструктури. На рис. 1.3 зображено лазери з подвійною гетероструктурою. Перевагою лазерів з такою особливою структурою є те, що область дірок і електронів, яку називають активною областю, знаходиться в середньому тонкому шарі. Отже, що створювати посилення будуть набагато більше пар дірок і електронів. В області з малим посиленням таких пар залишиться мало, світло стане відбиватися від гетеропереходів. Іншими словами випромінювання буде повністю перебувати в області найбільшого ефективного посилення.

**Діод з квантовими ямами.** При виконанні середнього шару діода більш тонким, він починає функціонувати як квантової ями. Тому електронна енергія буде квантованим вертикально. Відмінність між рівнями енергії квантових ям застосовується для утворення випромінювання замість майбутнього бар'єру. На рис.1.4 зображено діоди з квантовими ямами. Це ефективно для управління хвилею променя, що залежить від товщини середнього шару. Такий вид лазера набагато ефективніше, на відміну від одношарового, так як щільність дірок і електронів розподілена більш рівномірно [6, 19].

**Гетероструктурні діодні лазери.** Основною особливістю тонкошарових лазерів є те, що вони не здатні ефективно утримувати промінь світла. Для вирішення цього завдання по обидва боки кристала прикладають два додаткових шару, які мають більш низьким заломленням, на відміну від центральних шарів. Подібна структура схожа на світловод. Вона набагато краще утримує промінь. На рис.1.5 і 1.6 зображені гетероструктурні діодні лазери.

Для стабілізації хвилі на р-п переході виконують поперечну насічку для створення дифракційної решітки. Існують також діодні лазери VCSEL і

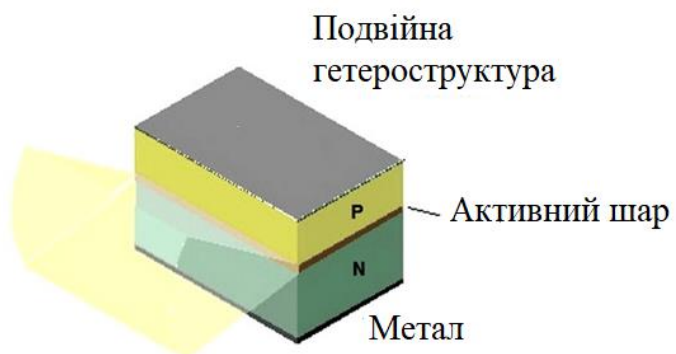


Рисунок 1.3 – Лазери з подвійною гетероструктурою. Із роботи [2]

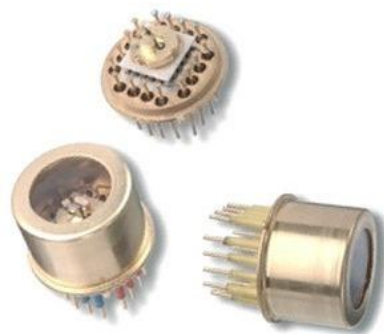


Рисунок 1.4 – Діоди з квантовими ямами. Із роботи [2]

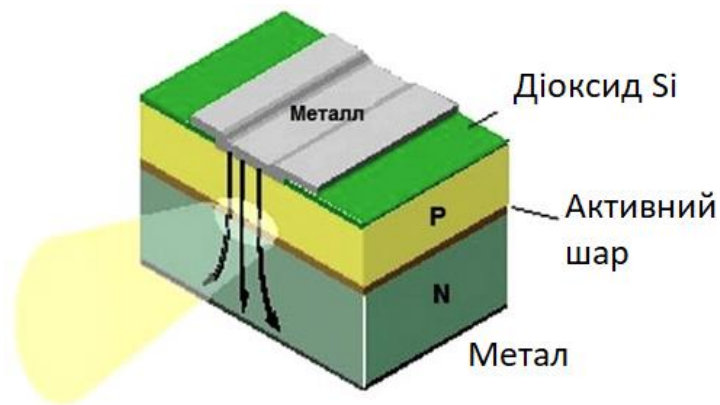


Рисунок 1.5 – Гетероструктурні діодні лазери. Адаптовано із роботи [2]

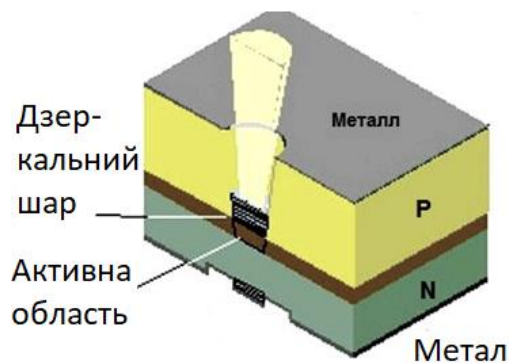


Рисунок 1.6 – Лазер зі зворотним зв'язком. Адаптовано із роботи [2]

VECSEL, які є поверхнево-які випромінюють моделями з вертикальним резонатором. Їх відмінність полягає в тому, що у моделі VECSEL резонатор зовнішній, і його конструкція буває з оптичною і струмового накачуванням.

На відміну від інфрачервоних і довгохвильових лазерів, що використовуються для зв'язку, лазери, які випромінюють видимого для людського ока світло, такі як червоні і сині лазери в діапазоні довжин хвиль лазерного випромінювання приблизно 400-700 нм, називаються видимими лазерами [7, 9-11].

Червоні лазери використовують матеріали AlGaInP і випромінюють червоне світло в діапазоні довжин хвиль від 630 до 680 Нм. Червоні лазери використовуються для таких застосувань, як оптичні приймачі DVD, зчитувачі

штрих-кодів в супермаркетах і цілодобових магазинах, лазерні принтери і лазерні указки.

Сині лазери використовують матеріали GaN і випромінюють синій (синьо-фіолетовий) світло в діапазоні довжин хвиль від 400 до 500 Нм. Як дискових лазерів синього випромінювання використовуються синьо-фіолетові лазери з довжиною хвилі 405 нм. Принцип роботи дисків Blue-ray в значній мірі співпадає з принципом роботи CD і DVD. Однак для досягнення більшої ємності потрібно синьо-фіолетовий лазер з довжиною хвилі 405 нм, що менше, ніж у використовуваного для DVD, для запису і відтворення заглиблень (пазів) на диску.

**Двохвильовий лазер.** Оптичні датчики, CD / DVD-приводів вимагають лазери з довжиною хвилі, що використовується для запису і відтворення CD і DVD-дисків. Лазери, які можуть випромінювати лазерний світло в двох довжинах хвиль в одному корпусі, називаються двохвильовими лазерами. Вони дозволяють зменшити кількість компонентів двохвильових оптичних датчиків, а також значно підвищити надійність. Це дозволяє реалізувати прості двохвильові оптичні датчики з хорошою масовою продуктивністю. Двохвильові лазери бувають монолітного і гібридного типів. Фірма Sony розробила і представила перший в світі комерційний монолітний двохвильовий діодний лазер, а також використовувала його у своїй домашньої ігрової консолі PlayStation 2 і DVD-плеєрах [20].

Порівняно з гібридними типами, які містять два чіпа LD в одному корпусі, монолітні типи мають менше компонентів, легше збираються, можуть досягати точності інтервалу точок випромінювання  $\pm 1$  мкм або менше і допомагають підвищити оптичні характеристики. Ці характеристики унікальні для монолітних двохвильових лазерів [5-7].



## 1.4 Особливості підключення

Діодні лазери використовуються в багатьох пристроях, де є потреба у направлений світловий промінь. Основним процесом в збірці пристрою з застосуванням лазера своїми руками є правильне підключення. Діодні лазери відрізняються від LED діодів мініатюрним кристалом. Тому в ньому концентрується велика потужність, а отже і величина струму, що може привести до виходу його з ладу. Для полегшення роботи лазера існують особливі схеми пристроїв, які називаються драйверами [18-20].

Для лазерів необхідно стабільне живлення. Однак існують їх моделі, що мають червоне свічення променя, і функціонують в нормальному режимі навіть з нестабільною мережею. Якщо є драйвер, то все одно діод можна підключати безпосередньо. Для цього додатково потрібен датчик струму, роль якого часто грає резистор, підключений між цими елементами. Таке підключення має недолік в тому, що негативний полюс живлення не з'єднаний з мінусом схеми.

Кристал напівпровідника лазерного діода являє собою досить тонку прямокутну пластинку. Розподіл на р і n області тут відбувається за принципом не ліво-право, а верх-низ. Тобто, вгорі розташована р-область, а внизу - n-область.

Як результат: площа р - n-переходу досить велика. Для торцевих сторін обов'язкове полірування, оскільки формування оптичного резонатора (Фабрі-Перо) потрібні наявність паралельних площин абсолютної гладкості. Перпендикулярно спрямований відносно однієї з таких площин випадковий фотон буде рухатися по всьому оптичному хвилеводу, періодично відбиваючись від бічних граней, поки нарешті не покине резонатор. Під час руху цей фотон стане причиною декількох актів вимушеної рекомбінації, формування подібних фотонів і посилення випромінювання. У момент, коли посилення достатньо для перекриття втрат, відбувається лазерна генерація.

Найбільш зручним для роботи буде червоний діод потужністю близько 200 мВт. Такі діодні лазери встановлені на дисковій приводи комп'ютерів.

## РОЗДІЛ 2

### ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДНИХ ЛАЗЕРІВ

#### 2.1 Спектральні характеристики

Оптичний спектр діодних лазерів залежить від конкретних характеристик оптичного резонатора лазера. Більшість звичайних пристроїв з підсиленням або індексацією мають спектр з декількома піками, в той час як пристрої з розподіленим зворотним зв'язком (DFB) і розподіленим брегговським відбивачем (DBR) відображають один чітко визначений спектральний пік. На рис.2.1 показано порівняння цих двох спектральних характеристик [5, 8, 12].

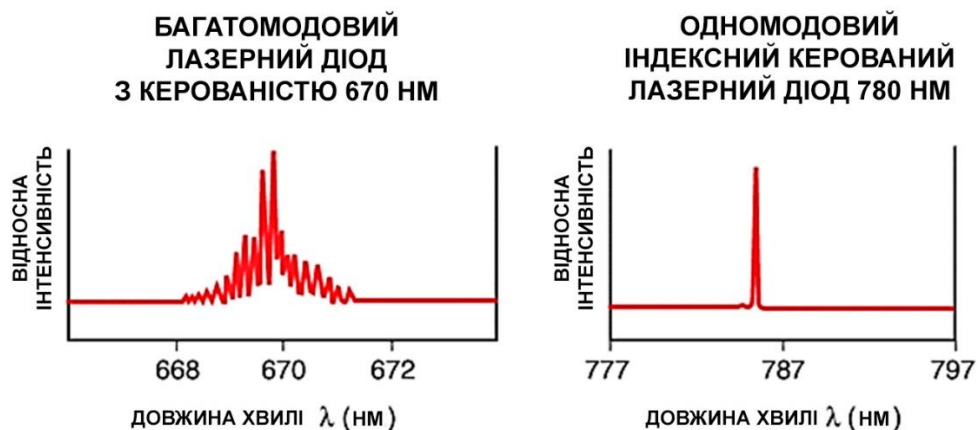


Рисунок 2.1 - Порівняння багаторежимного та однорежимного спектра. Адаптовано із роботи [6]

Кількість спектральних ліній, які здатний підтримувати лазер, залежить від структури резонатора, а також від робочого струму. В результаті багатомодові діодні лазери демонструють спектральні виходи з декількома піками навколо їх центральної довжини хвилі.

Оптична хвиля, що поширюється через резонатор лазера, утворює стоячу хвилю між двома дзеркальними гранями лазера. Відстань  $L$  між двома дзеркалами визначає період коливань цієї кривої. Ця стояча оптична хвиля

резонує тільки тоді, коли довжина резонатора  $L$  дорівнює цілому числу  $m$  напівхвиль, існуючих між двома дзеркалами. Іншими словами, вузол повинен існувати на кожному кінці порожнини. Єдиний спосіб, яким це може статися, полягає в тому, щоб  $L$  було точно цілим числом, кратним половині довжини хвилі  $\lambda/2$ . Це означає, що  $L = m(\lambda/2)$ , де  $\lambda$ -довжина хвилі світла в напівпровідниковій матерії і пов'язана з довжиною хвилі світла у вільному просторі через показник заломлення  $n$  співвідношенням  $\lambda = \lambda_0/n$ .

В результаті такої ситуації в резонаторі лазерного діода може існувати безліч поздовжніх мод, кожна з яких резонує на своїй окремій довжині хвилі  $\lambda_m = 2L/m$ . з цього можна відзначити, що дві сусідні поздовжні лазерні моди розділені довжиною хвилі  $\Delta\lambda = (\lambda_0)^2/2NL$ .

При зростанні робочого струму один режим починає домінувати до тих пір, поки за межами певного рівня робочої потужності не з'являється один вузький спектр ширини лінії [10]. Зміна центральної довжини хвилі за допомогою температури. Центральна довжина хвилі лазерного діода прямо пропорційна його робочій температурі. Існує лінійна залежність між температурою і центральною довжиною хвилі. З підвищенням температури збільшується і центральна довжина хвилі лазерного діода. Ця характеристика корисна в спектроскопії, лазерної діодної накачування твердотільних лазерів і волоконних підсилювачах, легованих ербієм, де довжина хвилі випромінювання лазерного діода може бути точно налаштована на конкретні властивості матеріалу, з яким він взаємодіє. Одномодові лазери демонструють явище, зване стрибкоподібною перебудовою, при якому центральна частота лазерного діода «скаче» в дискретних діапазонах довжин хвиль і не показує безперервне налаштування в широкому діапазоні.

Можна змінити довжину хвилі, на якій відбуваються розриви, вносячи невеликі зміни в струм приводу. При виборі конкретного лазерного діода для застосування, що вимагає певну довжину хвилі, наприклад для спектроскопії, при температурному налаштуванні пристрою необхідно враховувати стрибкоподібну зміну режиму.

## 2.2. Модулі на основі діодних лазерів

Невеликі діодні лазери використовуються в лазерних покажчиках і сканерах штрих-кодів. Однак найбільш поширені діодні лазери можна знайти в CD-ROM і CD-плеєрах. Ці типи діодних лазерів створюють невидимий пучок з довжиною хвилі 780 нм або приблизно в цьому діапазоні, що знаходиться в ближньому інфрачервоному спектрі.

Приводи DVD-RW використовують більш потужні діодні лазери, ніж ті, які використовуються при читанні компакт-дисків. Ще більш потужними є сині діодні лазери, що застосовуються в програвачах Blu-ray (звідси і назва). Лазери з короткою довжиною хвилі (приблизно 405 нм), що використовуються в пристроях DVD, дозволяють їм зберігати у вісім разів більше даних у порівнянні з компакт-дисками; DVD-диски можуть зберігати близько 5 ГБ, а компакт-диски можуть зберігати лише близько 650 МБ [13, 15].

Кожен тип лазерного діода знаходить практичне застосування, зважаючи на свої унікальні особливості. Вартість малопотужних зразків знизилася в рази, про що свідчить їх застосування в дитячих іграшках і указка.

Ними оснащують лазерні рулетки-далекоміри, що дозволяє одній людині проводити завмер відстаней і супутні обчислення. На червоних лазерах заснована робота зчитувачів штрих-кодів, комп'ютерних маніпуляторів і DVD-програвачів. Деякі види використовують в проведенні наукових досліджень і для накачування інших лазерів. Найбільш затребувані діодні лазери для передачі даних в оптоволоконних мережах. Нові моделі VCSEL забезпечують швидкість в 10 Гбіт / с, що відкриває додаткові можливості для комплексу телекомунікаційних послуг, в тому числі:

- сприяють зростанню швидкості інтернету;
- поліпшенню телефонного та відеозв'язку;
- підвищують якість телевізійного прийому.

Результатом вдосконалення лазерного діода став збільшений термін служби, який тепер можна порівняти з напрацюванням на відмову

світловипромінювальних діодів. Зменшення струму накачування підвищило надійність приладів, а їх вклад в розвиток технічного прогресу не менше, ніж у інших електронних компонентів.

Навіть малопотужні лазери (з вихідною потужністю декілька міліват) можуть бути небезпечні для зору [8]. Для видимих довжин хвиль (400-700 нм), які добре пропускаються і фокусуються кришталіком, потрапляння лазерного променя в око, навіть на кілька секунд, може призвести до часткової або навіть повної втрати зору. А лазери більшої потужності можуть призводити навіть до пошкодження шкірних покривів. Лазери діляться на 4 класи безпеки, від 1 — практично безпечний, до 4, у якого навіть розсіяний промінь може стати причиною опіку ока або шкіри.

Клас 1. Лазери та лазерні системи малої потужності, які не можуть випромінювати рівень потужності, що перевищує максимально дозволена опромінення. Лазери та лазерні системи Класу 1 не здатні заподіяти пошкодження людському оку.

Клас 2. Малопотужні лазери, здатні заподіяти пошкодження людському оку в тому випадку, якщо дивитися безпосередньо на лазер протягом тривалого періоду часу. Такі лазери не слід використовувати на рівні голови.

Клас 3а. Лазери і лазерні системи, які зазвичай не становлять небезпеку, якщо дивитися на лазер неозброєним поглядом тільки протягом короткочасного періоду. Лазери можуть становити небезпеку, якщо дивитися на них через оптичні інструменти (бінокль, телескоп).

Клас 3б. Лазери і лазерні системи, які становлять небезпеку, якщо дивитися безпосередньо на лазер. Це саме можна сказати і до дзеркального відображення лазерного променя.

Клас 4. Лазери та лазерні системи великої потужності, які здатні заподіяти сильне пошкодження людського оку короткими імпульсами (<0,25 с) прямого лазерного променя, а також дзеркальний або дифузійно відбитого. Лазери та лазерні системи даного класу здатні заподіяти значне пошкодження шкірі людини, а також надати небезпечне вплив на горючі матеріали.

Існує дві основні конструкції драйверів для лазерного діода, імпульсний, це один з різновидів імпульсного перетворювача напруги. Здатний працювати як на зниження, так і на підвищення вихідної напруги щодо вхідного значення. Потужність на вході наближається до показників на виході, різниця між ними утворена деякими втратами на нагрівання провідників [12, 17].

Лінійний, як правило, він отримує від схеми більшу напругу, ніж номінал напівпровідника. Різницю зазвичай компенсують за допомогою транзистора, який надлишки енергії віддає у вигляді тепла. ККД лінійних драйверів невисокий, що є причиною обмеженого застосування.

Оптичні датчики являють собою оптичні головки, що складаються з оптичної системи і напівпровідникового лазера, і використовуються для зчитування сигналів з поглиблень (канавок) на дисках і для запису сигналів на диски в системах оптичних дисків, таких як CD, DVD і Blu-ray Disc.

Роль оптичних датчиків полягає в наступному: щоб сфокусувати лазерний промінь в ямках на диску; щоб простежити сфокусований лазерний промінь; щоб виявити світло, відбите від ям на диску.

### **2.3 Частотні характеристики**

Для стабілізації частоти лазера необхідно виявити зміни частоти, щоб їх можна було виправити. Вимірювання опорних показників порівнюється із заданим значенням, і електроніка повертає частоту лазера до заданого значення. Прямим способом вимірювання частоти або довжини хвилі є використання вимірювачів довжини хвилі: вимірювачі довжини хвилі, такі як серія HighFinesse WS, доступні з точністю до 10 або навіть 2 МГц, і якщо цього достатньо, їх можна використовувати для зворотного зв'язку з лазером [18-20].

Програмне забезпечення контролю вимірює частоту лазера і адресує лазер керуючою напругою, щоб підтримувати довжину хвилі на заданому значенні. Використання вимірювача довжини хвилі для компенсації дрейфу має перевагу, що довжину хвилі можна встановити на будь-яке значення в межах

діапазону вимірювання довжиноміра і не вимагає природної лінії поглинання. Пропускна здатність блокування обмежена однак за часом вимірювання приладу (кілька мс), і тому дуже низький. Інші посилення - це лінії атомного поглинання або режими оптичного резонатора: атомні переходи можуть мати дуже добре визначені оптичні частоти і можуть бути значною мірою незалежними від оточення, тоді як порожнини зазвичай дрейфують. Проте спеціальні резонатори ULE (ультра низьке розширення) можуть показувати дрейф нижче 50 Гц протягом кількох годин.

Стабілізований лазер, природно, має фіксовану частоту. Якщо частоту лазера потрібно сканувати відносно фіксованої частоти, можна використовувати акустооптичні модулятори (АОМ).

Регулювання частоти діодного лазера. Для ECDLs повільний зворотний зв'язок з лазером може бути застосований через п'єзо лазера, для лазерів на основі DFB через температуру діода. Обидва змінюють довжину хвилі, змінюючи довжину оптичної порожнини. П'єзо, як правило, мають резонансні частоти, які можуть обмежити пропускну здатність регулювання. У той час як звичайні ECDLs мають резонансні частоти близько 1 кГц, сучасні, такі як TOPICA DL pro, показують свою першу резонансну частоту вище 4 кГц, що дозволяє збільшити пропускну здатність блокування з П'єзо.

Для ще більш швидких відхилень частоти діодний струм можна змінити. Це впливає на індекс заломлення в діоді, а значить, знову на довжину оптичної порожнини лазера. Діодні лазерні системи TOPICA доступні з поточною платою модуляції, DLMod, яка призначена для цієї мети. Він має постійний струм в поєднанні і дуже швидкий змінного струму пов'язані модуляції введення. Дуже швидкий вхід може бути використаний для розміщення бічних смуг на лазері, тоді як пов'язаний з DC вхід ідеально підходить для подачі назад на лазерний струм.

Фіксація бокової межі. Класично для виявлення змін частоти використовуються оптичні лінії поглинання атомних газів або моди порожнин. Вони переводять зміну частоти в зміну інтенсивності, коли частота лазера

лежить на нахилі такого поглинання або пропускання. За допомогою фотодетектора можна визначити частотно-залежну інтенсивність, а вихідну напругу фотодетектора можна використовувати для порівняння з еталонною напругою. Оскільки частота лазера лежить на схилі, частота може бути зафіксована збоку від лінії поглинання або пропускання резонатора зображено на рис.2.2.

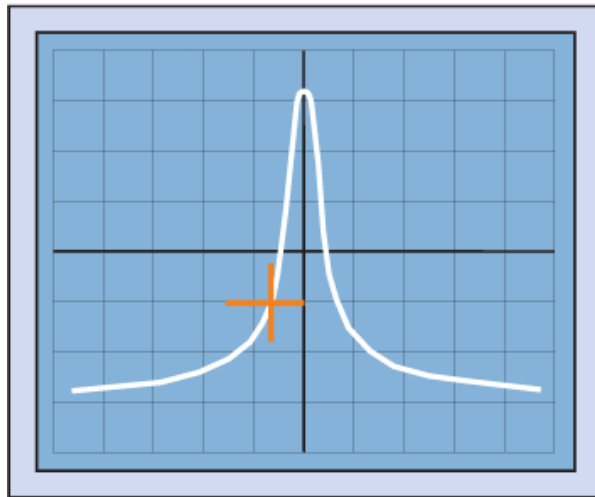


Рисунок 2.2 – Фіксація бокової межі

Резонаторна передача перетворює зміни частоти в зміни інтенсивності. Їх можна використовувати для зворотного зв'язку з лазером, щоб утримувати його (зафіксувати) збоку від краю порожнини. Абсолютна стабільність із блокуванням бічних країв часто залежить від інтенсивності лазера. Навіть при нормалізуючих налаштуваннях абсолютна частота для заданої заданої напруги може змінюватися, оскільки вона також залежить від ширини лінії опорного елемента та фоновому шуму. Техніка блокування та фіксація верхньої межі. Якщо лазер повинен залишатися «на вершині» резонансу як показано на рис. 2.3, то з вимірювання інтенсивності не видно, в якому напрямку змінилася частота, оскільки вимірювана напруга зменшується в обох напрямках.

Щоб утримувати лазер у верхній або нижній частині межі, необхідно використовувати методи модуляції. Злегка модулюючи частоту лазера та демодулюючи (розмножуючи) сигнал фотодіода на вхід модуляції, можна



отримати похідну від вхідного сигналу. Він показує безперервний нахил і перетин нуля на резонансній частоті і добре підходить як сигнал помилки для блокування як показано на рис. 2.3. Це важко зрозуміти, не дивлячись на математику за ним, але, дивлячись на знак виходу, стає очевидним, що він протилежний зліва і справа від лінії поглинання – і зверху від лінії поглинання. резонансу амплітуда повинна наблизитися до нуля. Демодуляція робить це видимим, а результат показано в нижній частині рис.2.3.

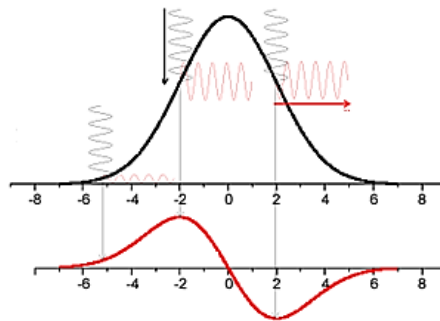


Рисунок 2.3 – Техніка модуляції (Lock-In) для блокування верхньої межі.  
Адаптовано із роботи [12]

Потрібно звернути увагу на знак і амплітуду вихідних коливань за допомогою демодуляції ця інформація призводить до похідної від вхідного сигналу. Похідна має перетин нуля з крутим схилом на максимумі вхідного сигналу [3, 4, 8].

Блокування верхньої межі, Паунд-Древер-Холл. Техніка блокування Паунд-Древер-Холла дуже схожа, тільки вона використовує набагато вищі частоти модуляції. Найчастіше використовується для фіксації порожнин. Якщо частота модуляції вища за ширину лінії лазера та резонатора, відображення і пропускання резонатора показують бічні смуги на частоті модуляції. Отриманий сигнал помилки для блокування верхньої межі має покращений діапазон захоплення, який охоплює від однієї бічної смуги до іншої, і має дуже крутий нахил з нульовим перетином на частоті, де передача порожнини показує

максимум на рис.2.4 та рис. 2.5 зображено сигнал Паунда-Древера-Холла для різних частот модуляції.

Найбільший і найкрутіший сигнал помилки досягається при частоті модуляції в діапазоні ширини лінії резонатора. Більші частоти модуляції призводять до ширшого діапазону захоплення, оскільки бічні смуги віддаляються від несучої, а також до більш високої пропускну здатності блокування, оскільки, очевидно, пропускну здатність блокування обмежена частотою модуляції.

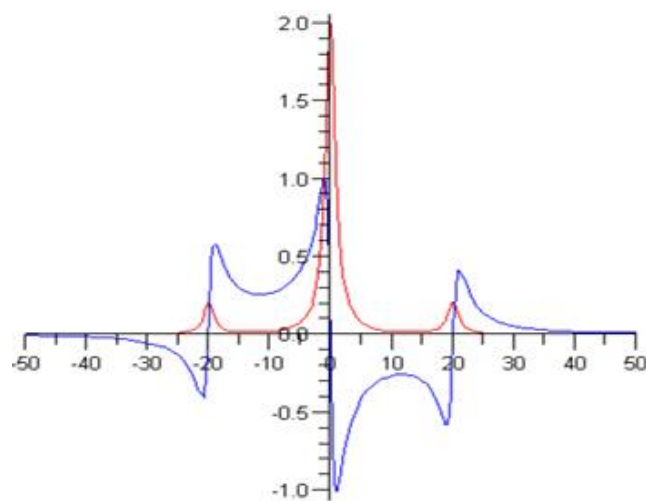


Рисунок 2.4 – Каверна передача з бічними смугами (червоний) та сигналом помилки Паунда-Древера-Холла (синій). Адаптовано із роботи [13]

Зменшення ширини лінії. Якщо ширина лінії лазера обмежує роздільну здатність або точність вимірювання, ширину лінії часто можна зменшити для вимірювань з більш високою роздільною здатністю. У цьому випадку потрібне швидке блокування для усунення коливань частоти, які є швидшими, ніж вимірювання або експеримент, і, отже, додають до ширини лінії лазера.

Можна оцінити спектр частотного шуму процесів, які розширюють ширину лінії, налаштувавши лазер на сторону еталонної смуги або атомного резонансу та вимірявши спектр шуму результуючого амплітудного шуму. У підході з блокуванням з боку краю, зменшення ширини лінії може бути досягнуто за допомогою ТОРТИСА FALC 110, швидкого PID-регулятора

(FALC = Fast Analog Linewidth Control). Він оптимізований для таких застосувань і має час затримки сигналу менше 15 нс. На додаток до електроніки швидкого блокування, також має бути швидким вимірювання ширини лінії або частотний дискримінатор. Блокуючи два DL про до різних режимів одного загального FPI 100 за допомогою FALC 110 або DigiLock 110, ТОРТИСА змогла продемонструвати ширини ударів менше 300 Гц що показано на рис. 2.8. Оскільки обидва лазери вносять свій внесок у цю ширину удару, ширина лінії ідентичних лазерів була приблизно 150 Гц (тобто вдвічі менша, якщо припустити лоренціанську форму лінії).

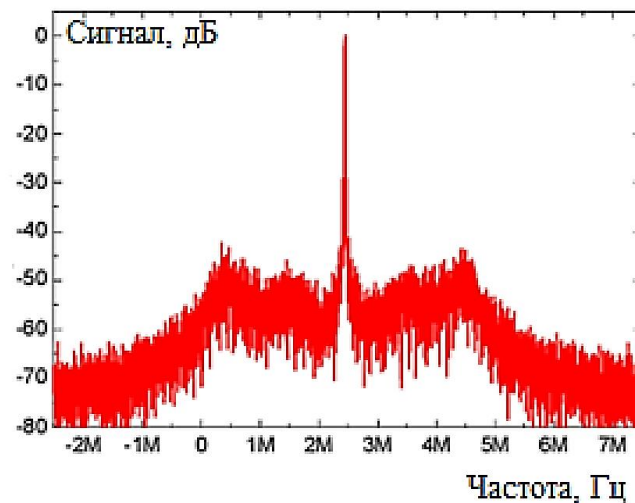


Рисунок 2.5 – Спектр ударів двох DL про, прив'язаних до одного FPI 100. Адаптовано із роботи [16]

Для теоретичного аналізу особливостей роботи напівпровідникового лазера з зовнішнім резонатором доцільно використовувати модель Ланга-Кобаясі [1, 5, 20].

$$dE_0/dt = \frac{1}{2}G_N\Delta N(t) E_0(t) + \frac{x}{\tau}E_0(t-\tau)\cos\Delta(t) + (R/2VE_0(t)) + F_E(t), \quad (2.1)$$

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{2}\alpha G_N\Delta N(t) - \frac{x}{\tau} \frac{E_0(t-\tau)}{E_0(t)}\sin\Delta(t) + F_\phi(t), \quad (2.2)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = J(t) - \frac{N(t)}{\tau_S} - G(N) E_0^2(t) + F_N(t), \quad (2.3)$$

де  $\Delta(t) = \omega_0\tau + \phi(t) - \phi(t-\tau)$ ;  $E(t) = E_0(t) e^{i(\omega t + \phi(t))}$  – поле, яке виходить з діодного лазера з зовнішнім резонатором;  $N(t)$  – щільність носіїв усереднених по всьому

об'єму активної зони лазерного діода. Сам діод генерує в одномодовому режимі на частоті  $\omega_0$ .

Умови посилення і умова балансу фаз наступні:

$$\Delta G = -\frac{2}{\tau_i} N_1, \quad \omega = \Omega + \frac{1}{\tau_i} (\alpha N_1 - P_1) \quad . \quad (2.4)$$

При використанні оптичної зворотного зв'язку це зменшення може досягати  $F$  раз:

$$F = \frac{d\Omega}{d\omega} = 1 + \frac{\tau}{\tau_i} (N_2 - \alpha P_2), \quad (2.5)$$

де  $d\Omega$ ,  $d\omega$  – малі девіації центральної частоти у самого лазерного діода і лазерів з зовнішнім резонатором;  $\Delta\nu_0 = \frac{1+\alpha^2}{4\pi l_0} R$  – ширина лінії самого лазерного діода.

Для оцінки звуження лінії випромінювання уявимо, що похідна  $dI(t)/dt = 0$  та умови балансу фаз і амплітуд. Нехай  $I(t) = I_0$ , отримуємо наступне співвідношення:

$$\dot{\varphi}_n(t) = \frac{1}{F} \left[ F_\varphi(t) - \frac{\alpha}{2l_0} F_I(t) \right], \quad (2.6)$$

з якого отримуємо  $\Delta\nu_0/\Delta\nu = F^2$ . У загальному випадку,  $F$  залежить від  $r_2$ ,  $R_3$  та фази  $\varphi$ ; у випадку слабого зв'язку  $F$  виглядає так

$$F = 1 + k\tau\sqrt{1+\alpha^2}\cos(\varphi + \varphi_R), \quad (2.7)$$

де  $\varphi_R = \arctg(\alpha)$ ;  $k = \frac{1-r_2^2}{\tau_i r_2} R_3$ .

## 3 ЛАЗЕРНІ ДІОДИ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

### 3.1 Моделювання оптичної системи

Можна розрахувати кількість оптичного зворотного зв'язку, що досягає грані лазерних діодів. Тому компоненти лазерної діодної системи необхідно описувати окремо. Оптичні компоненти, показані на рис. 3.1, є типовими для високопотужних лазерних діодних систем. Однак VBG і волоконне з'єднання є необов'язковими і залежать від потреб програми.

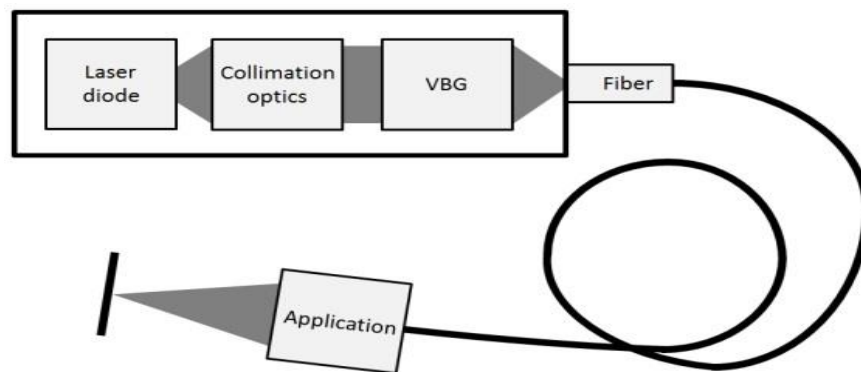


Рисунок 3.1 – Типові елементи оптичної системи, що відповідають величині оптичного зворотного зв'язку [19]

Оптичні елементи можна розділити на три основні групи, а траєкторії їх променів наведені на рис. 3.2. Розбіжний лазерний промінь потрапляє на лінзу швидкої колімації по осі (FAC). Зазвичай перша плоска поверхня має відстань лише від 70 до 150 мкм до випромінювача. Світло відбивається розбіжно, і лише невелика частина відбивається в випромінювачі. Промінь колімується і потрапляє на плоску поверхню, де він частково відбивається. Коли відбитий промінь колімується, він може передаватися на великі відстані всередині оптичної системи.

Промінь фокусується на плоскій поверхні оптичного елемента, як світловодне волокно. Цей випадок цікавий при спостереженні багатовипромінювальної смуги. Кожен шлях променя випромінювача

віддзеркалюється і повертається і, нарешті, закінчується на випромінювачі, протилежному вихідному. Тут можна спостерігати сильний зв'язок між кожними двома випромінювачами (рис.3.2).

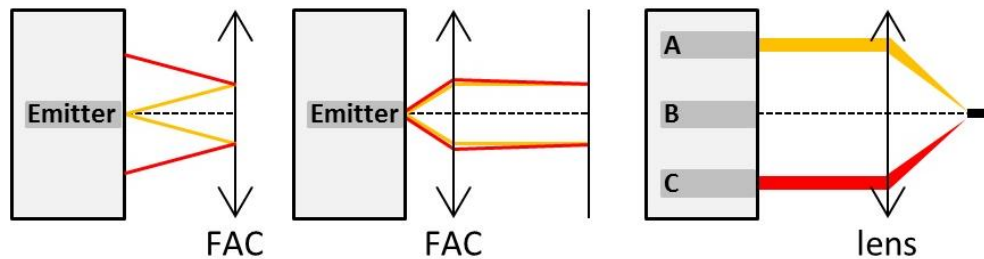


Рисунок 3.2 – Три групи оптичних елементів, які сприяють величині оптичного зворотного зв'язку: а – колімаційна оптика, б – селективна оптика і в – фокусуєча оптика. Жовті лінії представляють прямі промені, червоні ілюструють відбиті промені [19]

Оптична потужність, що досягає грані  $P_{OFB}$  лазерних діодів, розраховується за вихідною потужністю випромінювача  $P_{OUT}$ , коефіцієнтом відбиття  $R$  відбивного елемента та ефективністю пропускання  $\eta$  оптичної системи.

$$P_{OFB} = P_{OUT} R \eta \quad (3.1)$$

Поки  $P_{OUT}$  і  $R$  можна виміряти,  $\eta$  треба обчислити.  $\eta$  описує, яка частина кутового та просторового розподілу інтенсивності лазерного діодного випромінювача передається через оптичну систему. Оскільки розподіл інтенсивності випромінювача не є однорідним, він апроксимується супергаусовим розподілом.

$$\eta = \int I_0 e^{-2\left|\frac{x}{\sigma}\right|^{2SG}} dx \quad (3.2)$$

Це справедливо для просторового та кутового розподілу шляхом вибору відповідних параметрів.  $\sigma$  являє собою половину ширини або кут

випромінювання при інтенсивності  $1/e^2$  відповідно. Значення SG використовується для відповідності розподілу Гаусса до вимірюного розподілу інтенсивності.  $I_0$  використовується для встановлення результату в 1, коли обчислюється інтеграл у всьому діапазоні.

Обмеження інтеграла залежать від окремої оптичної складової. Залежно від кількості змінних рівняння 2 необхідно інтегрувати як у просторовому, так і в обох кутових напрямках. FAS відбиття (рис.3.2), промені, що випромінюються з грані з однієї точки, відбиваються назад в активну область, дотримуючись цих верхніх і нижніх кутових обмежень:

$$\alpha_{FAu,FAI} = \frac{\tan^{-1}\left(\pm\frac{h_E}{2} - y_E\right)}{2d_{BFL}} \quad (3.3)$$

Змінюючи висоту випромінювача  $h_E$  на ширину  $w_E$  і положення точки випромінювання  $y_E$  на  $x_E$ , задаються обмеження інтегрування в напрямку повільної осі.

Крім того, це має бути просторово інтегровано в напрямках  $x$  і  $y$ . Апертура FAS, через залишкову дивергенцію розмір променя збільшується після колімації. При відображенні через оптичну систему його можна відрізати на отворі оптичних елементів.

Особливо об'єктив FAS зазвичай має малу апертуру  $A$ . Обмеження інтегрування рівняння 3.2 визначаються відстанню  $d$  між лінзою FAS і відбиваючим елементом і фокусною відстанню  $f$ :

$$\alpha_{FAu,FAI} = \tan^{-1} \frac{\pm\frac{A}{2} - y_E + 2d \tan \frac{y_E}{f_{FAC}}}{f_{FAC}} \quad (3.4)$$

У цьому випадку тільки швидкий напрямок осі впливає на ефективність передачі і має бути інтегрованим кутовим і просторовим. Дуга викликана механічним впливом при паянні лазерного чіпа на радіатор, центр

випромінювача має зміщення  $\Delta u$  до оптичної осі. Кутовий розподіл в даному випадку не має значення. Тут змінюються обмеження просторової інтеграції.

$$y_{u,l} = \pm y_E + \Delta u \quad (3.5)$$

Таким чином, можна описати вплив усіх оптичних компонентів на загальну кількість оптичного зворотного зв'язку, що надходить до випромінювача.

### 3.2 Електронні інформаційні системи на основі лазерних діодів

На основі або з використанням лазерних діодів сконструйовані прилади, пристрої і електронні системи. Зупинимось на їх характеристиках більш детально.

LIR 110 – це гнучкий блокуючий регулятор, який ідеально підходить для фіксації на лініях поглинання тощо. В основному він використовується для компенсації дрейфу, а також пропонує вихід високої напруги для п'єзо. PDD 110 є детектором Паунда-Древера-Холла, він містить високочастотний генератор, фазоврацатель для гетеродина, демодулятор і фільтри.

Він генерує похідний сигнал помилки для блокування верхньої межі і разом з PID 110 або FALC 110 ідеально підходить для блокування діодних лазерів в оптичних порожнинах. FALC 110 - це надзвичайно швидкий PID-контролер з часом затримки сигналу менше 15 нс. Він спеціально розроблений для стабілізації та звуження ширини лінії діодних лазерів.

Гнучкі кутові частоти, підсилення та численні інтегратори дозволяють оптимізувати зворотний зв'язок із лазерним струмом для корекції вищої частоти та з п'єзо або температурою для компенсації дрейфу. LaseLock — це автономне рішення для блокування загального призначення, яке також підходить для лазерів сторонніх виробників.

Він поєднує в собі функціональність PID і LIR. І серія довжиномірів хвилі HighFinesse, і iScan від TOPTICA включають електроніку блокування з



опорним елементом. Довжиномір визначає абсолютну довжину хвилі, аналізуючи ряд інтерферометрів. Він порівнює фактичне число з заданим значенням і обчислює вихідний сигнал для корекції частоти лазера за допомогою PID-регулятора (пропускна здатність  $\approx 100$  Гц) iScan — це система на основі еталонів низької тонкості, що дозволяє стабілізувати лазер на будь-якій довжині хвилі з точністю в діапазоні кількох МГц.

Його також можна використовувати для дуже лінійного сканування довжини хвилі та чітко визначених швидких стрибків частоти. iScan використовується для відносної стабілізації, сканування та стрибків, якщо він не відкалібрований за абсолютним еталоном.

iScan також використовує вбудовану електроніку PID. Він набагато швидше, ніж вимірювачі довжини хвилі, і може врахувати не тільки п'єзо або температуру лазера, але також може використовувати більш високу пропускну здатність модуляції струму лазерного діода.

Дуже корисним інструментом для стабілізації абсолютної частоти до атомних резонансів є CoSy, компактний спектроскопічний блок показаний на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – CoSy, компактний спектроскопічний блок, який легко дає нормовані бездоплерівські та розширені доплерівські сигнали поглинання атомного Rb або Cs. Адаптовано із роботи [19]

Волоконний блок містить газовий елемент, наприклад, з рубідієм або цезієм. Вхідний промінь розділяється на кілька променів і виявляється кількома фотодіодами для отримання нормалізованих бездоплерівських і розширених доплерівських сигналів поглинання. Потім їх може використовувати описана вище електроніка блокування для стабілізації частоти лазера. Також підтримується блокування верхнього краю, проте зручна смуга пропускання обмежена 50 кГц .. 1 МГц (залежно від посилення), і високочастотна модуляція не може бути виявлена. За запитом доступна затишна версія 5 МГц.

Цифровий замок з DigiLock 110. Нещодавно TOPTICA Photonics представила абсолютно нове рішення для блокування: DigiLock 110, цифровий «Контролізатор» зворотного зв'язку. Він поєднує в собі всі функції різних модулів блокування в одному блоці. Він пропонує комп'ютерний контроль параметрів лазера, частотного сканування лазера та параметрів блокування. Він включає в себе кілька PID, блокуючий регулятор і детектор Pound-DreverHall.

Це рішення цифрового блокування, яке використовує переваги методів цифрової фільтрації та часу затримки сигналу, не залежного від посилення. Він допомагає користувачеві з функціями AutoLock, «Click & Lock» та переблокування. І на додаток до всього цього, він також пропонує безліч інструментів для аналізу сигналів помилок (аналіз спектру), частотних приводів (аналіз мережі) та параметрів регулятора (моделювання регулятора). Будучи гнучким, він також швидкий: він заснований на польовій вентильній матриці (FPGA), що програмується на 100 МГц, і високоякісних DA/AD перетворювачах з точністю до 21 біт і тактовою частотою до 100 МГц.

Загальний час затримки в модулі становить менше 200 нс, що забезпечує пропускну здатність цифрового блокування в діапазоні кількох МГц. А аналоговий байпас, який керується FPGA, забезпечує ще більш високу пропускну здатність блокування, наприклад, для звуження ширини лінії. DigiLock 110 поєднує в собі простоту використання з гнучкістю і швидкістю, тому він ідеально підходить для більшості застосувань замків. Модуль DigiLock показаний на рис. 3.4, а програмний інтерфейс — на рис. 3.5.



Рисунок 3.4 – Digilock 110 – Контролізатор зворотного зв'язку – найбільш універсальне рішення для лазерного блокування. Адаптовано із роботи [14]



Рисунок 3.5 – Графічний інтерфейс користувача Digilock 110. Адаптовано із роботи [15]

Модуль виконує всі внутрішні блокування. Для контролю та аналізу використовується комп'ютерний інтерфейс.

### 3.3 Лазерне охолодження та захоплення атомів та іонів

Часто оптичні переходи, які використовуються для цього, є такими вузькими, як кілька МГц, і лазер повинен залишатися резонансним із переходом протягом тривалого часу. Для цього лазери безпосередньо прив'язуються до цих переходів, щоб виключити дрейф. На рис. 3.6 показаний бездоплерівський спектр Рубідію, отриманий за допомогою комбінації продіодного лазера TOPTICA DL, компактного спектроскопічного блоку CoSy, а також електроніки та програмного забезпечення блокування DigiLock 110.

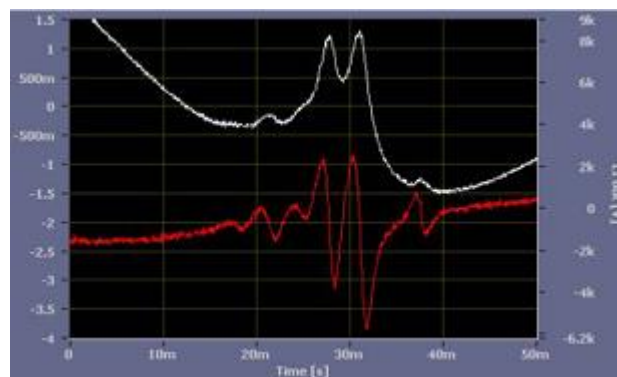


Рисунок 3.6 – Бездоплерівський спектр поглинання Rb. Білий слід: передача Rb, червоний слід: похідна, отримана за допомогою техніки Lock-In. Адаптовано із роботи [6]

Квантова оптика та квантові обчислення стають все більш важливими. Часто такі експерименти проводяться з лазерами, атомами та іонами, і лазери потрібно зафіксувати під час експерименту, щоб залишатися резонансними з конкретним переходом атома чи йона. Тільки тоді лазери можна буде використовувати для надійної модифікації та дослідження квантових станів.

Для TOPTICA найважливішим застосуванням є блокування посилюючих резонаторів для діодних лазерів для генерації другої гармоніки (SHG). SHG виконується в нелінійних кристалах, і процес набагато ефективніший з більшими потужностями.

Резонатори посилення можуть виробляти набагато більші потужності всередині резонатора, що призведе до збільшення вихідної потужності другої гармоніки, якщо кристал помістити всередину резонатора. Однак покращення працює лише в тому випадку, якщо порожнина залишається резонансною з лазером. Тому довжина порожнини повинна бути стабілізований.

Тут найкращим є метод Паунда-Древера-Холла: він пропонує високу пропускну здатність блокування та збільшений діапазон захоплення. На основі цієї технології TORTECA побудувала численні лазерні системи для екзотичних довжин хвиль, які в іншому випадку не були б досягнуті – не тільки системи SHG, а й системи генерації четвертої гармоніки та сумарної частоти.

Незалежно від ваших потреб у лазерному блокуванні, будь ласка, зв'яжіться з TORTECA Photonics. Пропонується широкий спектр електроніки та інструментів для блокування та з нетерпінням чекаємо на підтримку ваших конкретних вимог до стабілізації.

## ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі магістра вивчені питання стосовно фізичних принципів функціонування, конструктивно-технологічних особливостей, параметрів і характеристик діодних лазерів як елементів сучасних електронних систем.
2. Показано, що вплив лазерного випромінювання на фізичні та біологічні об'єкти заснований на дії стимульованого електромагнітного випромінювання з наступними властивостями: когерентність; мала розбіжність променя; висока щільність потужності.
3. Показано, що оптичний спектр лазерних діодів залежить від характеристик оптичного резонатора лазерної установки та мають спектр з декількома піками (в режимі підсилення) та одним чітко визначеним піком (пристрій з розподіленим зворотним зв'язком та бреггівський відбивач).
4. На основі літературних даних встановлено, що у напівпровідникових лазерів центральна генеруюча частота залежить від щільності носіїв в активній області та флуктуацій струму, які призводять до зміщення центральної частоти, яку треба зробити мінімальною для можливості практичного застосування лазерів.
5. Оцінка залежності ширини лінії генерації від вихідної ширини лінії та характеристик зовнішнього резонатора лазерного діода вказує на те, що при зміні довжини резонатора лазерної установки від 5 до 80 см ширина лінії генерації лазерного діода при різних значеннях рівня зворотного зв'язку (0,4 – 0,8) суттєво змінюється (від 215 до 0,12 МГц).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шуаїбов О.К., Опачко І.І., Качер І.Е., Чучман М.П. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник. – Ужгород: УжНУ, 2010. – 238 с.
2. Бобицький Я.В., Матвіїшин Г.Л. Лазерні технології: навчальний посібник. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.
3. Колесник Ю.І., Кіпенський Ю.І. Елементи та пристрої квантової електроніки: навч. посібник. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – 318 с.
4. Hjelme D.R., Mickelson A.R. On the theory of external cavity operated single-mode semiconductor lasers // IEEE J. –2017. –V. QE-23, № 6. – P.1000-1009.
5. Babich V.M., Machekhin Yu.P. Frequency stabilized lasers for the coherent optical communications// Proc. 2. International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. – Kharkiv. – 2000. – P.17-19.
6. Quinn T.J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards // Metrologia. 2003.– V.40, №1.– P.103-133.
7. Eichler Hans Joachim, Eichler Jürgen, Lux Oliver. Lasers: Basics, Advances and Applications / Springer Nature Switzerland AG. – 2018. – 220 p. DOI 10.1007/978-3-319-99895-4.
8. Liang Dong, Bryce Samson. Fiber lasers: basics, technology and applications / USA: CRC Press. – 2017. – 340 p.
9. Навчальний посібник «Квантова електроніка». Частина 1 / Л. М. Шмирнова, О. М. Бевза, Н. В. Слободян. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 98 с.
10. Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. / Ю. І. Колесник, А. В. Кіпенський. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – 318 с.
11. Оптоелектроніка. Конспект лекцій для студентів ЗДІА, що навчаються за напрямком «Мікро- та наноелектроніка» денної та заочної форм навчання / Л. Б. Дмитрієв, В. С. Дмитрієв. – Запоріжжя, 2017. – 51 с.

12. Пупань Л. І. Лазерні технології в машинобудуванні: навч. посібник. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 109 с.
13. Advances в laser technology and fibre-optic delivery systems in lithotripsy / N.M. Fried, P.B. Irby // *Nat Rev Urol.* – 2018. – V. 15, No 9. – P. 563-573.
14. Samie Matlout, Pegah Amini, Ali Rostami, Switchable Multi-color Solution Processed QD-laser // *Scientific Reports.* – 2020. – V. 10. – P. 5273.
15. Samuel S. Mao, Xiaojun Zhang. High-Throughput Multi-Plume Pulsed-Laser Deposition for Materials Exploration and Optimization // *Engineering.* – 2015. – V.1, No 3. – P. 367-371.
16. Latest Development on Pulsed Laser Deposited Thin Films for Advanced Luminescence Applications / S. N. Ogugua, O. M. Ntwaeaborwa, H. C. Swart // *Coatings.* – 2020. – V. 10. – P. 1078.
17. Ferrimagnetic Heterostructures for Applications in Magnetic Recording / F. Radu, J. Sánchez-Barriga // *Novel Magnetic Nanostructures.* – 2018. – V. 9, No 6. – P. 267–331.
18. Pimpin A. Review on Micro- and Nanolithography Techniques and their Applications / A. Pimpin, W. Srituravanich // *Engineering Journal.* – 2012. – V.16, № 5. – P. 37-55.
19. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однодворець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
20. Бобицький Я.В., Матвіїшин Г.Л. Лазерні технології: навчальний посібник. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.