

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

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра
**НАПІВПРОВІДНИКОВІ ЛАЗЕРИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ
СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

Магістрант гр.ЕП.м - 91н

О.М. Гончаренко

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

Л.В. Однодворець

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

І.Ю. Проценко

Суми - 2021

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні фізичних та конструктивно-технологічних принципів функціонування лазерних діодів різного функціонального призначення та проведенні розрахунків параметрів діодного лазера.

У кваліфікаційній роботі магістра розглянуті питання стосовно фізичних принципів функціонування, особливостей конструкції, параметрів і характеристик діодних лазерів як елементів сучасних електронних систем.

Показано, що вплив лазерного випромінювання на фізичні та біологічні об'єкти заснований на використанні стимульованого електромагнітного випромінювання, отриманого від робочої речовини в результаті дії на атоми електромагнітної енергії зовнішнього джерела. Стимульоване випромінювання має наступні характеристики: когерентність; мала розбіжність променя; висока щільність потужності. Оптичний спектр лазерних діодів залежить від конкретних характеристик оптичного резонатора лазера. У напівпровідникових лазерів центральна генеруюча частота залежить від щільності носіїв в активній області, яка є функцією струму; флуктуацией струму, що приводить до зміни частоти. Центральна довжина хвилі лазерного діода прямо пропорційна його робочій температурі.

Робота викладена на 33 сторінках, у тому числі включає 19 рисунків, використано 15 літературних джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЛАЗЕРНИЙ ДІОД, КОГЕРЕТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЦЕНТРАЛЬНА ДОВЖИНА ХВИЛІ, ЧАСТОТА ГЕНЕРАЦІЇ.

ЗМІСТ**С.**

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ЛАЗЕРНІ ДІОДИ ЯК ДЖЕРЕЛА КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	6
1.1 Характеристика лазерного випромінювання	6
1.2 Фізичні основи роботи лазерних діодів	7
1.3 Особливості підключення	13
1.4 Види драйверів	14
1.5 Підключення до побутової мережі	16
1.6 Лазерні діоди з волоконним виводом	18
1.7 Схема одномодового лазерного діода	21
1.8 Багатомодові лазерні діоди з волоконної зв'язком	22
РОЗДІЛ 2 РЕЖИМИ РОБОТИ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ	23
2.1 Спектральні і температурні характеристики лазерного діода	23
2.2. Теоретичні основи розрахунку параметрів напівпровідникових лазерів для оптичних стандартів частоти	27
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	32

ВСТУП

Розвиток нових інноваційних електронних технологій сприяв можливості отримання лазерного променя в побутових умовах. Електронна промисловість сьогодні виробляє мініатюрні напівпровідникові прилади, які можуть генерувати лазерний промінь – лазерні діоди. Підвищена оптична потужність і ефективні функціональні параметри приладу дозволяють застосовувати його в вимірювальних електронних системах підвищеної точності, в різних галузях виробництва, медицині. Вони є основою для запису і зчитування комп'ютерних дисків, шкільних лазерних вказівок, рівнемірів, вимірників відстані і багатьох інших корисних для людини пристроїв.

Лазерний діод – 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 діодних лазерів стала революцією в створенні електронних пристроїв різної складності. Діоди високої потужності утворюють промінь, який використовується в медицині при виконанні різних хірургічних операцій (відновлення зору, корекція кришталика ока). Лазерні діоди різної потужності використовуються в контрольно-вимірювальних приладах, промисловості, побуті.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягала у вивченні фізичних та конструктивно-технологічних принципів функціонування лазерних діодів різного функціонального призначення та проведенні розрахунків параметрів діодного лазера.

Результати роботи представлені на Міжнародній конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021» (м.Суми).

РОЗДІЛ 1

ЛАЗЕРНІ ДІОДИ ЯК ДЖЕРЕЛА КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Характеристика лазерного випромінювання

Вплив лазерного випромінювання на фізичні та біологічні об'єкти заснований на використанні змушеного (стимульованого) електромагнітного випромінювання, отриманого від робочої речовини в результаті дії на атоми електромагнітної енергії зовнішнього джерела.

Стимульоване випромінювання має наступні характеристики:

- когерентність (постійна величина різниці фаз між коливаннями і монохроматичність - практично ширина смуги випромінювання 2 Гц);
- мала розбіжність променя (22° – теоретична, 2° – практична);
- висока щільність потужності (10^{14} Вт/см²).

Густина потужності лазерного випромінювання на малій площині об'єкта визначається співвідношенням:

$$P_s = \frac{P \cdot D^2}{(\lambda)^2 \cdot f^2},$$

де P - вихідна потужність випромінювання лазера; D - діаметр об'єкта оптичної системи; λ - довжина хвилі; f - фокусна відстань оптичної системи.

Лазерне випромінювання з високою густиною потужності супроводжується високою напруженістю електричного поля:

$$E_n = \sqrt{\eta_0 \cdot \rho_s} = \sqrt{2 \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\mu/\varepsilon}},$$

де μ – магнітна проникність середовища (для повітря $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);
 ε – діелектрична проникність середовища (для повітря $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Значення електричної напруженості у вакуумі при $P=1$ МВт складає $2,74 \cdot 10^6$ В/м.

Дія лазерного випромінювання на організм людини відзначається складним характером, а біологічні ефекти, які при цьому виникають можна підрозділити на дві групи: первинні ефекти – органічні зміни, що виникають безпосередньо в опромінених тканинах; вторинні ефекти – фізіологічні зміни, що виникають в організмі, як реакція на опромінення.

При експлуатації лазера виникає небезпека, пов'язана не лише з дією лазерного випромінювання, а й з низкою супутніх несприятливих чинників, а саме: підвищеною запиленістю та загазованістю повітря робочої зони продуктами взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом мішені та повітрям (утворюється озон, окиси азоту та ін.); ультрафіолетовим випромінюванням імпульсних ламп накачки або кварцових газорозрядних трубок у робочій зоні; світлом високої яскравості від імпульсних ламп накачування і зони взаємодії лазерного променя з матеріалом мішені; іонізуючими випромінюваннями, які використовуються для накачування; електромагнітними випромінюваннями радіочастотного діапазону, які виникають при роботі генераторів накачування газових лазерів; підвищеною напругою в електричних колах керування та живлення лазера.

1.2 Фізичні основи роботи лазерних діодів

Принцип дії лазерних діодів аналогічний принципам роботи світловипускаючих діодів, з деякими відмінностями. У них необхідно створити інверсійну заселеність (багато електронів в збудженому стані і мало - в основному стані). Це зручно зробити в області р-п-переходу. Дуже велика концентрація електронів провідності (вони відповідають збудженому рівню лазера) забезпечується їх надходженням з п-області. Велика концентрація дірок, що надходять з р-області, відповідає малій кількості електронів в основному стані переходу (N_1), який використовується в лазері. В такому випадку можна забезпечувати умова інверсійної заселеності (багато - N_2 - електронів в збудженому стані і мало - N_1 - в основному стані) в

області р-n-переходу. Як дзеркала лазерного резонатора використовують відполіровані торці самого напівпровідникового кристала (рис.1); одне з них роблять частково прозорим (нижня на рис.1) для виходу випромінювання з резонатора.

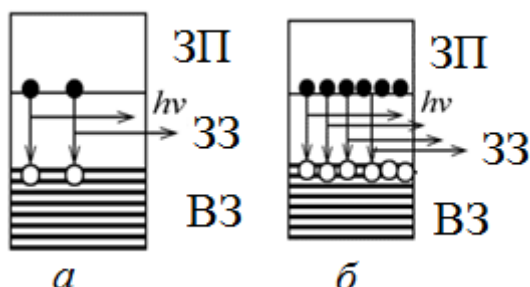


Рис.1.1. Енергетичні переходи при виникненні лазерного випромінювання. Адаптована із роботи [2]

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 освіти гладких паралельних площин, які утворюють оптичний резонатор, званий резонатором Фабрі-Перро. Випадковий фотон спонтанного випромінювання, випущений перпендикулярно цим площинам, пройде через весь оптичний хвилевід і кілька разів відіб'ється від торців, перш ніж вийде назовні. Проходячи вздовж резонатора, він буде викликати вимушену рекомбінацію, створюючи нові і нові фотони з тими ж параметрами, і випромінювання буде посилюватися (механізм вимушеного випромінювання). Як тільки посилення перевищить втрати, почнеться лазерна генерація.

Лазерні діоди можуть бути декількох типів. У основної їх частини шари зроблені дуже тонкими, і така структура може генерувати випромінювання тільки в напрямку, паралельному до цих шарів. З іншого

боку, якщо хвилевід зробити досить широким у порівнянні з довжиною хвилі, він зможе працювати вже в декількох поперечних режимах. Такий діод називається багатомодовим (англ. «Multi-mode»). Застосування таких лазерів можливо в тих випадках, коли від пристрою потрібна висока потужність випромінювання, і не ставиться умова гарної збіжності променя (тобто допускається його значне розсіювання). Такими областями застосувань є: друкуючі пристрої, хімічна промисловість, накачування інших лазерів. З іншого боку, якщо потрібне гарне фокусування променя, ширина хвилеводу повинна виготовлюватися порівняною з довжиною хвилі випромінювання. Тут вже ширина променя буде визначатися тільки межами, що накладаються дифракцією.

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 досить тонкий, промінь на виході діода, завдяки дифракції, практично відразу розходить. Для компенсації цього ефекту і отримання тонкого променя необхідно застосовувати збираючі лінзи.

У найпростішому пристрої, який було описано вище, неможливо виділити окрему довжину хвилі, виключаючи значення, характерне для оптичного резонатора. Однак в пристроях з декількома поздовжніми режимами і матеріалом, здатним посилювати випромінювання в досить 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, однак володіє сильною нестабільністю і залежить від безлічі факторів - зміни сили струму, зовнішньої температури і т.д. В останні роки описана вище конструкція найпростішого лазерного діода піддавалася численним удосконаленням, щоб пристрої на їх основі могли відповідати сучасним вимогам.

У більшості випадків шар лазерного діода досить тонкий і генерація фотонного потоку відбувається паралельно структурі цього шару. Однак, при конструкції достатньої ширини, діод може функціонувати в поперечному варіанті. Це багатомодові діоди, і їх використання демонструє високу потужність випромінювання в комбінації з високою його розхідністю.

З метою забезпечення кращого фокусування по ширині, хвилевід повинен зіставлятися з довжиною хвилі випромінювання. Зважаючи на малу товщини випромінюючого елемента і дифракції спостерігається сильна розбіжність променя в момент виходу. Компенсувати цей ефект можна за допомогою збираючих лінз. У випадку з багатомодовими лазерами зазвичай використовують лінзи циліндричного типу. А якщо для стандартного лазера застосувати симетричні лінзи, то промінь в перерізі придбає форму еліпса оскільки в вертикальному напрямку промінь розходиться сильніше, ніж в горизонтальному. Лазерні діоди даного типу не відрізняються ефективністю. Для їх роботи застосовується велика вхідна потужність і імпульсний вплив (що дозволяє уникнути перегріву). У виробництві вони практично не використовуються.

Лазерний діод з подвійною гетероструктурою (ПГС). Особливістю діодів даного типу є те, що в них кристалічний шар, який має більш вузьку заборонену зону, фіксується між двох кристалічних шарів, що мають ширшу заборонену зону.

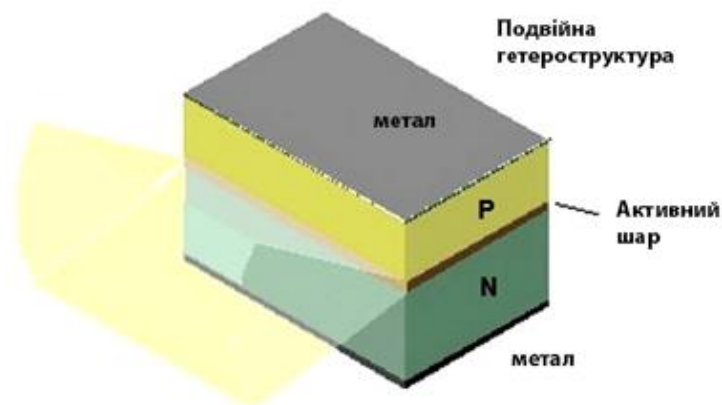


Рис 1.2. Лазерний діод з подвійною гетеро структурою. Адаптовано із роботи [14]

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. На додаток світло стане відбиватися від гетеропереходов. Іншими словами випромінювання буде повністю перебувати в області найбільшого ефективного посилення.

Лазерний діод з квантовими ямами. Лазерні діоди з квантовими ямами - окремий клас лазерних діодів з подвійною гетероструктурою, в яких товщина активної області D наближається до довжини хвилі де Бройля.

$$D = \lambda_{\text{de Broglie}} \approx h/p.$$

При більш сильному витонченню середнього шару в діодах ПГС-типу, його властивості змінюються таким чином, що він перетворюється в квантову яму. Таким чином по вертикалі електронна енергія буде піддаватися квантуванню. При виконанні середнього шару діода більш тонким, він починає функціонувати як квантова яма. Тому електронна енергія буде квантована вертикально. Відмінність між рівнями енергії квантових ям застосовується для утворення випромінювання замість майбутнього бар'єру. Це ефективно для управління хвилею променя, що залежить від товщини середнього шару.



Рис.1.3. Лазерний діод з квантовими ямами [4]

Такий вид лазера набагато ефективніше, на відміну від одношарового, так як щільність дірок і електронів розподілена більш рівномірно.

Лазерний діод з гетероструктурою та роздільним утриманням.

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 шара, які мають більш низьке заломлення, на відміну від центральних шарів. Подібна структура схожа на світловод. Вона набагато краще утримує промінь. Це гетероструктура з окремим утриманням. За такою технологією вироблено більшість лазерів в 90-х роках.

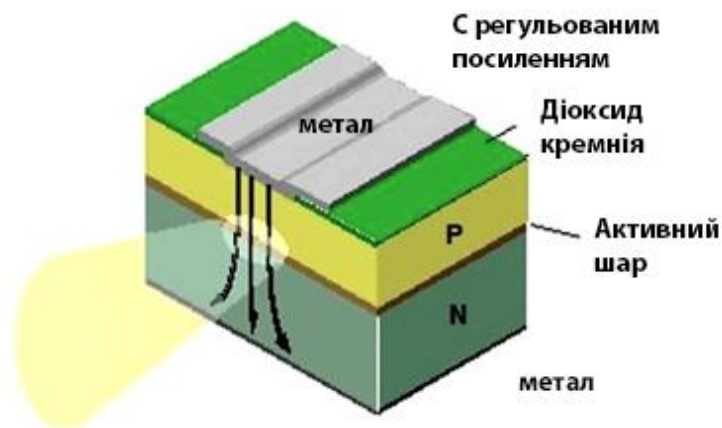


Рис 1.4. Лазерний діод з гетероструктурою та роздільним утриманням. Адаптовано із роботи [14]

Лазерні діоди з розподілом зворотного зв'язку (РЗЗ). Лазери зі зворотним зв'язком в основному застосовують для волоконно-оптичного зв'язку. Для стабілізації хвилі на р-п переході виконують поперечну насічку для створення дифракційної решітки. Через це в резонатор повертається і посилюється лише одна довжина хвилі. Такі лазери мають постійну довжину хвилі. Вона визначена кроком насічки решітки. Під дією температури насічка

змінюється. Подібна модель лазера є основою телекомунікаційних оптичних систем.

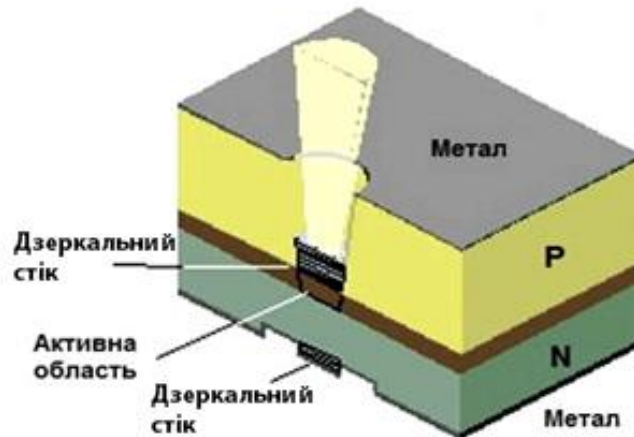


Рис 1.5. Лазерний діод з розподілом зворотного зв'язку. Адаптовано із роботи [14]

Існують також лазерні діоди VCSEL і VECSEL, які є поверхнево-випромінюючими моделями з вертикальним резонатором. Їх відмінність полягає в тому, що у моделі VECSEL резонатор зовнішній, і його конструкція буває з оптичним і струмовим накачуванням.

1.3 Особливості підключення

Лазерні діоди використовуються в багатьох пристроях, де є потреба у направленому світловому промені. Основним процесом в збірці пристрою з застосуванням лазера своїми руками є правильне підключення. Лазерні діоди 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.

Лазерам необхідне 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. Іншим недоліком є падіння потужності на резисторі. Тому перед підключенням лазера необхідно ретельно підібрати драйвер.

1.4 Види драйверів

Драйвер не тільки регулює потужність, але й виконує роль терморегулятора через охолоджувач. Конструкція керуючого блоку при цьому може бути як поєднана, так і роздільна. Існують два основних види драйверів, здатних забезпечити нормальний режим експлуатації лазерних діодів.

- Імпульсний драйвер виконаний за аналогією імпульсного перетворювача напруги, здатного підвищувати і знижувати цей параметр. Потужності виходу і входу такого драйвера приблизно рівні. Однак, існує деякий виділення тепла, на яке витрачається незначна кількість енергії.

- Лінійний драйвер діє за схемою, яка найчастіше подає напругу на діод більше, ніж потрібно. Для його зниження необхідний транзистор, що перетворює зайву енергію в теплоту. Драйвер має малий ККД, тому не знайшов широкого застосування.

При застосуванні лінійних мікросхем в якості стабілізаторів, при зменшенні напруги на вході діодний струм буде знижуватися. Так як живлення лазерів виконується двома видами драйверів, схеми підключення мають відмінності. Схема також може містити джерело живлення у вигляді батареї або акумулятора. Акумулятори повинні видавати напругу 9 вольт. Також в схемі повинен бути резистор, що обмежує струм, і лазерний модуль. Лазерні діоди можна знайти в несправному приводі дисків від комп'ютера.

Лазерний діод має 3 виводи. Середній вивід підключається до мінуса (плюса) живлення. Плюс підключається до правої, або лівої ніжки, в

залежності від фірми виробника. Щоб визначити потрібну ніжку для підключення, необхідно подати живлення.

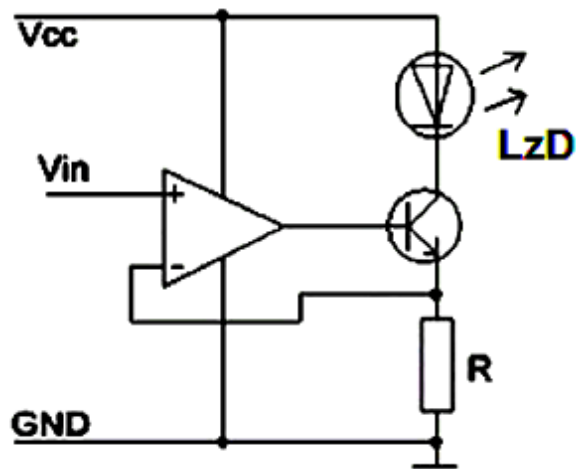


Рис. 1.6. Схема підключення імпульсного драйвера. Із роботи [2]

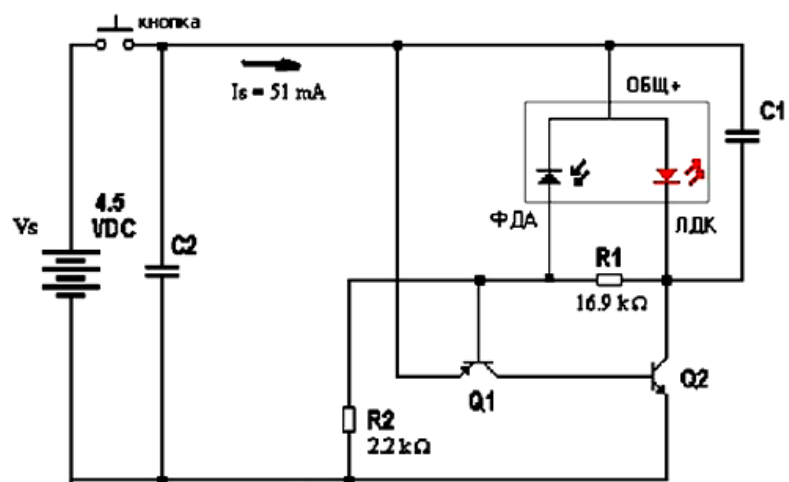


Рис.1.7. Схема підключення лінійного драйвера. Із роботи [5]

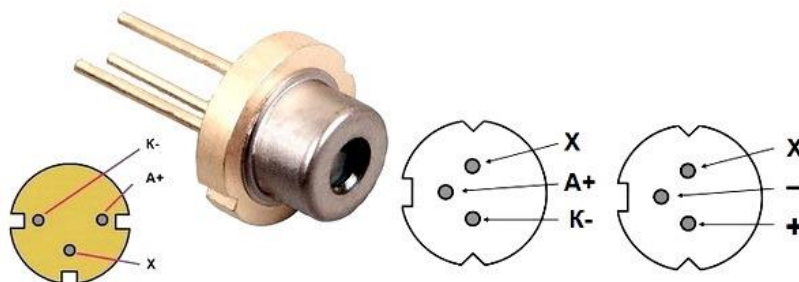


Рис.1.8. Виводи для підключення лазерного діода. Із роботи [4]

Для цього можна взяти дві батарейки по 1,5 В і опір 5 Ом. Мінус джерела підключають до середньої ніжки діода, а плюс спочатку до лівої, потім до правої ніжки. Шляхом такого експерименту можна побачити, яка з цих ніжок є «робочою». Таким же методом діод підключають до мікроконтролеру. Лазерні діоди можуть працювати від пальчикових батарейок, акумулятора сотового телефону. Однак не можна забувати, що додатково потрібно обмежує резистор номіналом 20 Ом.

1.5 Підключення до побутової мережі

Для підключення до побутової мережі необхідно забезпечити додатковий захист від сплесків напруги високої частоти.

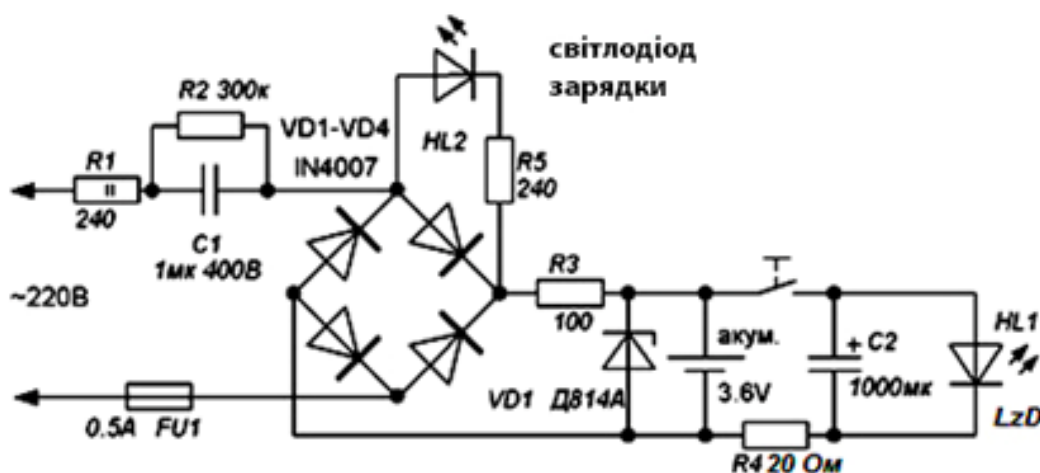


Рис.1.9. Схема підключення до побутової мережі. Із роботи [5]

Стабілізатор і резистор створюють блок, що запобігає перепаду струму. Для вирівнювання напруги застосовують стабілітрон. Ємність запобігає виникненню стрибків напруги високої частоти. При правильній збірці забезпечується стабільна робота лазера.

Найбільш зручним для роботи буде червоний діод потужністю близько 200 мВт. Такі лазерні діоди встановлені на дискові приводи комп'ютерів.

- Перед створенням з'єднання з використанням батарейки перевірити роботу лазерного діода.
- Вибрати необхідно найяскравіший напівпровідник. Якщо діод узятий з дискового приводу комп'ютера, то він світить інфрачервоним світлом.
- Промінь лазера забороняється наводити на очі, так як це призведе до погіршення якості зображення.
- Діод монтувати на радіатор для охолодження, у вигляді алюмінієвої пластини. Для цього попередньо свердлити отвір.
- Між діодом і радіатором промазати термопастой.
- Резистор на 20 Ом і 5 ват підключити по схемі з батарейками і лазером.
- Діод шунтують керамічним конденсатором будь-якої ємності.
- Відвернути від себе діод і перевірити його роботу, підключивши живлення. Повинен з'явитися червоний промінь.
- При підключенні слід пам'ятати про безпеку. Всі з'єднання повинні бути якісними.

Можна визначити колірний *спектр випускаючого світлового променя 650 нм*. Потік фотонів червоного кольору найбільш часто використовується в конструкціях дисководів. При денному світлі промінь цього лазера видно не дуже добре, але причина цього тільки несприйнятливість людського зору. При потужності від 20-50 мВт і фокусування світлового плями в мінімально можливу за площею точку проявляється ефект «печіння». Потужність на 200 мВт при правильному фокусуванні дозволяє різати папір різної щільності.

Довжина хвилі 532 нм. Зелений потік. Лазери даного типу дуже крихкі і чутливі до температурних сплесків, вимагають вкрай обережного поводження. До того ж мають складний пристрій і до недавнього часу були вкрай дорогими. Головний позитивний момент їх застосування: візуальне випромінювання на 532 нм найбільш добре помітно. Тому використовувати лазер зеленого кольору могутніше, ніж на 5Мвт буде небезпечно для зору.

Крім того, в силу особливостей конструкції разом із зеленим спектром лазер поставляє і інфрачервоний з довжиною хвилі на 808 нм і 1064 нм, а це тільки підвищує небезпеку такого приладу. Правда в більш дорогих примірниках стоять спеціальні фільтри, але це обов'язково потрібно перевіряти.

Довжина хвилі 405 нм. Фіолетове випромінювання. Небезпечно тим, що слабо помітне для людського ока і здається слабким по потужності, хоча на ділі ситуація строго протилежна. Його важко сфокусувати. Загалом, з метою експлуатації не найзручніший варіант. Може бути актуальним хіба що при роботі з фоторезисторами.

Довжина хвилі 780 нм. Інфрачервоне випромінювання. Небезпечно в силу того, що не сприймається людським зором від слова зовсім. А це загрожує різними травмами зору. Робота можлива тільки при відсутності інфрачервоного фільтра, що забезпечить хоча б відносну видимість променя.

Довжина хвилі 10 мкм. Випромінювання також інфрачервоне з надбавкою CO₂. Найбільш широко застосовується в промисловості. Подібні лазери мають низьку вартість, високу потужність і відрізняються високим ККД. Використовуються дані лазерні діоди для різання металу або фанери. З їх допомогою виконується гравірування.

1.6 Лазерні діоди з волоконним виводом

Лазерні діоди сьогодні можна зустріти практично скрізь, адже це найпростіший елемент для перетворення електроенергії в потужне лазерне випромінювання. Лазерні діоди складаються з шарів напівпровідникових матеріалів, наприклад, GaAs, InP або GaN. Одномодові лазерні діоди характеризуються малою потужністю (зазвичай <1 Вт), багатомодові ж лазерні діоди здатні розвинути потужності від 10 Вт до декількох кіловат.

Цей тип лазерних діодів зазвичай укладено в корпус під назвою «Метелик», оснащений системою охолодження і термістором. Одномодовий лазерний діод з волоконної зв'язкою може досягати вихідної потужності від

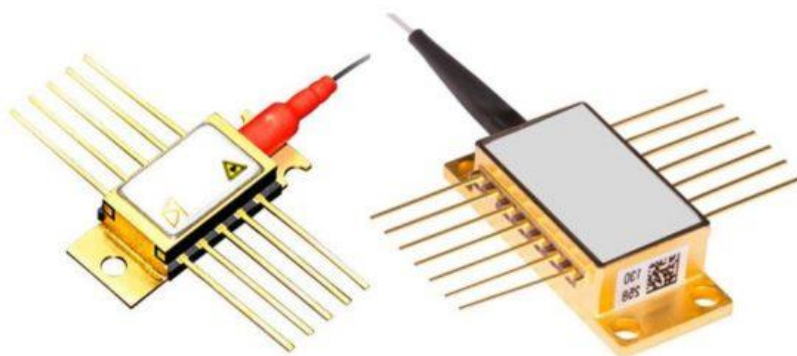


Рис 1.10. Лазерний діод в корпусі типу «метелик» з одномодовим волокном, що випромінює на довжині хвилі 976 нм. Міні- «метелик» з десятима висновками (зліва) і стандартна «метелик» з 14-ю висновками (праворуч) [13]



Рис 1.11. Інші форм-фактори лазерних діодів з волоконно-оптичним зв'язком

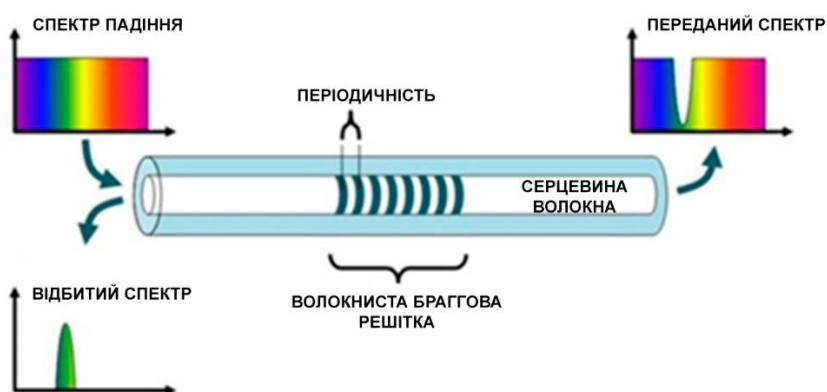


Рис 1.12. Лазерний діод з решіткою Брегга. Із роботи [11]

декількох сотень міліват до півтора ват. Лазерний діод з волоконно-оптичним зв'язком в корпусі типу «метелик» - складний пристрій, що має безліч різних можливих конфігурацій контактів і заземлення (повністю незаземлений, з заземленим анодом і т.д.). Сьогодні серед виробників малопотужних лазерних діодів є тенденція до розробки діодів коаксіального типу. Незважаючи на малі габарити, термоохолодження і термістор як і раніше будуть присутні всередині такого діода [14].

Лазерні діоди Фабрі Перро з решіткою Брегга (або без неї). «Стандартний» лазерний діод з волоконної зв'язком являє собою звичайний частково відображає напівпровідниковий резонатор, у якого задня грань має покриття з високою здатністю, що відображає, а передня грань - частково відображає покриття. Типовий розмір мікросхеми лазерного діода становить $\sim 1 \times 0,5 \times 0,2$ мм. Робочі характеристики: діапазон потужності може досягати більше 1,5 Вт; смуга пропускання зазвичай широка, більше 1 нм; вихідний пучок має високу ступінь еліптичної поляризації; щоб звужити смугу випромінювання і поліпшити загальну стабільність лазерного діода, виробники встановлюють у вихідне волокно волоконну решітку Брегга.

Лазерні діоди з розподіленням відбивачем Брегга і зворотним зв'язком.

У лазерних DBR - діодах секція брегівська решітка безпосередньо інтегрована в мікросхему лазерного діода. Це дозволяє звужити смугу випромінювання з звичайних 10 нм до 0,1 нм [16].

Відмітимо, що спектр лазерного діода Фабрі-Перро, що працює в імпульсному режимі, характеризується стрибками в перші 100 з нс. На наведеному нижче графіку показані деякі виміряні криві такої смуги пропускання. Спектральна ширина DFB - діода в безперервному режимі набагато вужче, ніж у лазера Фабрі-Перро, навіть оснащеного брегівськими ґратами.

Діоди з розподіленням зворотним зв'язком також демонструють деякі коливання довжини хвилі випромінювання в залежності від температури і струму.

1.7 Схема одномодового лазерного діода

Компанія AeroDIODE розробила три драйвера лазерних діодів, розроблених як для НДДКР, так і для повної інтеграції фотонних систем. Всі ці драйвери включають в себе елемент управління системою охолодження, що дозволяє користувачеві регулювати температуру лазерного діода.

CCS від Aerodiode. Імпульсні драйвери дорожче лінійних, проте вони захищають світлодіоди від коливань напруги в мережі живлення. Ефективність сучасних імпульсних драйверів досягає 98%, вони не вимагають додаткових заходів охолодження, а споживана світильником потужність дорівнює потужності використаних світлодіодів. Саме імпульсні драйвери дозволяють скористатися всіма благами енергозбереження, які надають світлодіодні технології.

Драйвер AeroDIODE оснащений двома каналами. Один оптимізований для роботи в режимі безперервного випромінювання з низьким рівнем шуму, інший - оптимізований як для безперервного випромінювання, так і для короткоімпульсного випромінювання. Центральна плата драйвера може діяти як «центр управління» для волоконного лазера.

Плата Shaper - ще один драйвер від AeroDIODE, який може вирішити багато проблем, пов'язаних з імпульсним і безперервним випромінюванням. За допомогою драйвера легко компенсувати форму імпульсу або знизити вплив сторонніх мод. Внутрішній генератор сигналів довільної форми генерує одну точку кожні 500 пс з динамічним діапазоном 48 дБ.



Рис 1.13. Зовнішній вигляд драйверів лазерних діодів AeroDIODE. Із роботи [1]

1.8 Багатомодові лазерні діоди з волоконної зв'язком

Багатомодові лазерні діоди з волоконної зв'язком мають конфігурацію, схожу з багатомодовими. Існує 3 типи конфігурацій багатомодових лазерних діодів з оптоволоконним зв'язком.

Випромінювачі. Мікросхема лазерного діода ізольована, зібрана на допоміжній опорі і укладена в модуль лазерного діода. Зазвичай їх потужність досягає 15 Вт. Кілька емітерів: конфігурація, в якій кілька випромінювачів розділені і оптично пов'язані разом з іншими ізольованими емітерами в багатомодового волокна. Таким чином, рівень вихідної потужності можна збільшити до кількох сотень ват, а діаметр ядра оптоволокна може бути невеликим, наприклад, 100 або 200 мкм.

Смуги. Конфігурація, в якій кілька емітерів з'єднані в смуги і укладені в модуль. Потужність досягає 50 Вт.

Стрижні. Конфігурація, в якій кілька стрижнів зібрані в великий корпус з водяним охолодженням і з'єднані в багатомодове волокно великого діаметру. Потужність таких випромінювачів досягає сотні ват, іноді кіловат. Такі діоди зазвичай підключаються до багатомодовим волокнам з серцевиною діаметром 600 або 800 мкм.

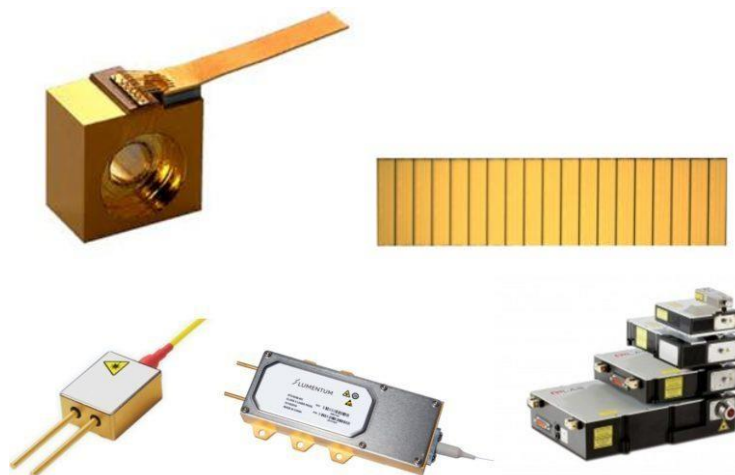


Рис 1.14. Приклади складених конфігурацій багатомодових лазерних діодів. Із роботи [7]

РОЗДІЛ 2

РЕЖИМИ РОБОТИ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ

2.1 Спектральні і температурні характеристики лазерного діода

Оптичний спектр лазерних діодів 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. Кількість спектральних ліній, які здатний підтримувати лазер, залежить від структури резонатора, а також від робочого струму. В результаті багатомодові лазерні діоди демонструють спектральні виходи з декількома піками навколо їх центральної довжини хвилі [8, 9].

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 λ -довжина хвилі світла в напівпровідниковій матерії і пов'язана з довжиною хвилі світла у вільному просторі через показник заломлення n співвідношенням $\lambda = \lambda_0/n$. У 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 $\Delta\lambda = (\lambda_0)^2/2NL$ [10].

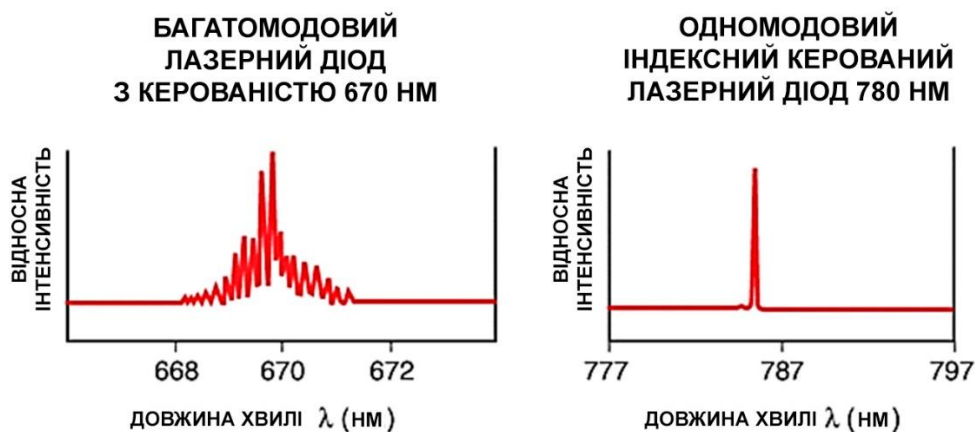


Рис.2.1. Порівняння багаторежимного та однорежимного спектра.
Адаптовано із роботи [11]

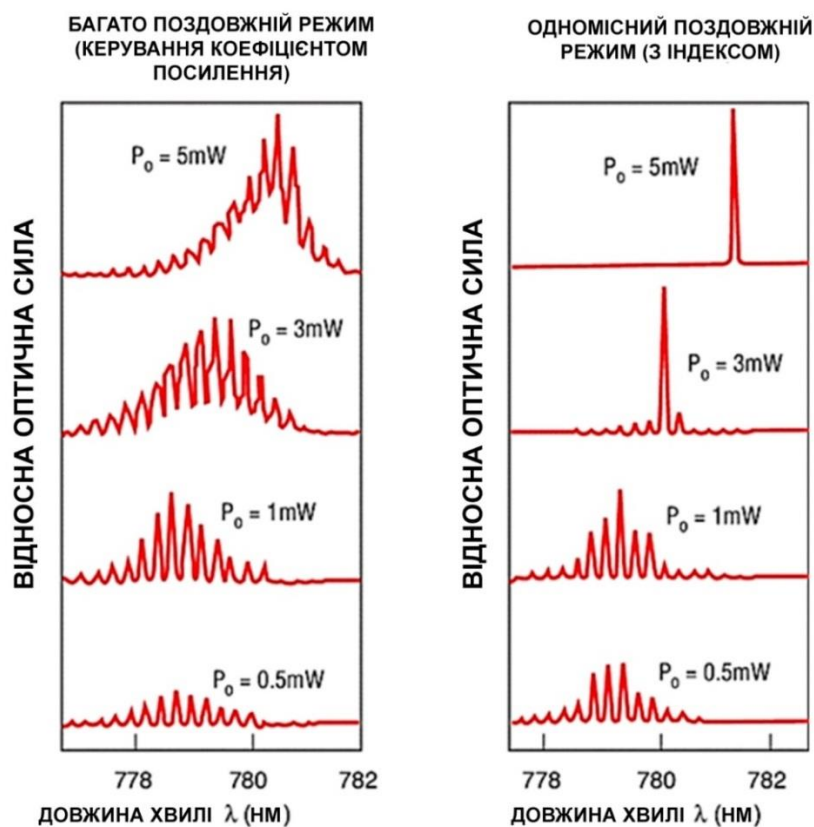


Рис. 2.2. Вплив рівня робочого струму на вихідний спектр. Адаптовано
із роботи [11]

Навіть одномодові пристрої можуть підтримувати кілька режимів при низькій вихідній потужності, як показано на рис.2.1. На рис. 2.2 зображено вплив робочого струму на вихідний опір. При збільшенні робочого струму один режим починає домінувати до тих пір, поки за межами певного рівня робочої потужності не з'являється один вузький спектр ширини лінії.

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 [12]. 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.

На рис. 2.3 зображено вплив температури на центральну довжину хвилі лазерного діода.

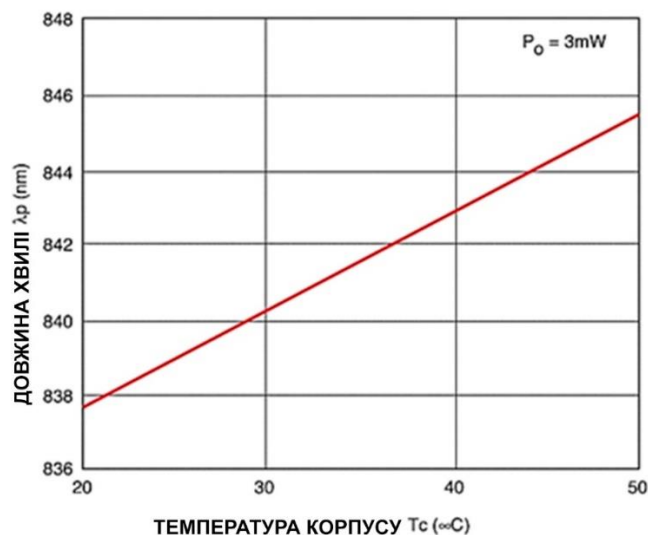


Рис. 2.3 Вплив температури на центральну довжину хвилі лазерного діода. Адаптовано із роботи [13]

Режим стрибкоподібної перебудови. 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.

На рис. 2.4 зображено стрибкоподібну зміну режиму при температурному налаштуванні одномодового лазерного діода.

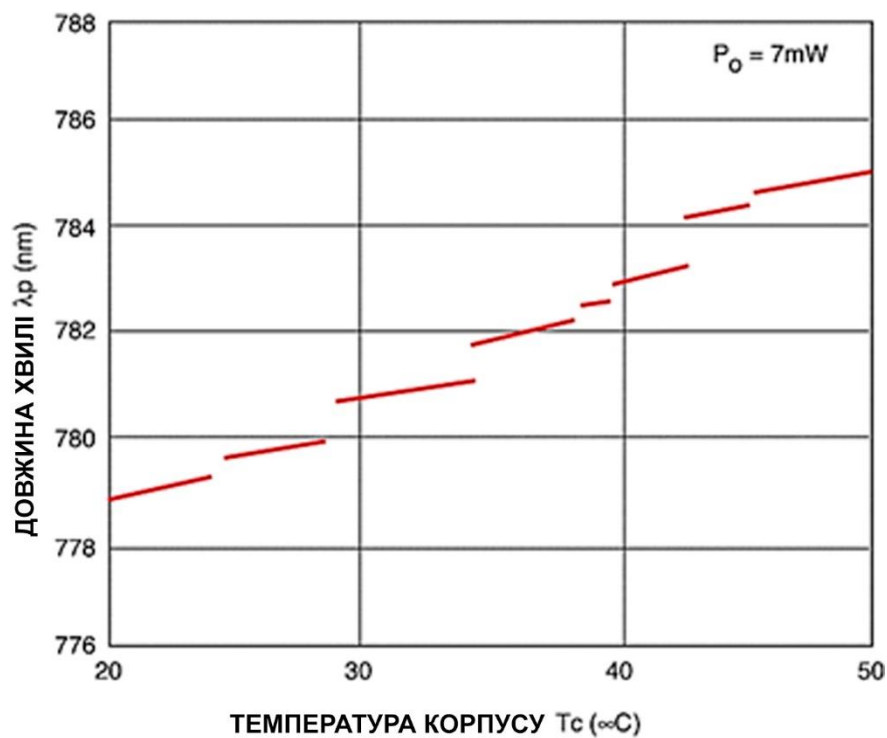


Рис. 2.4 Стрибкоподібна зміна режиму при температурному налаштуванні одномодового лазерного діода. Адаптовано із роботи [13]

Оскільки параметри додів мають сильну температурну залежність, важливо установити і підтримувати стабільну температуру за допомогою термоелектричного терморегулятора. Більшість застосувань лазерних діодів використовують термоелектричні охолоджувачі, засновані на ефекті Пельтьє,

для підтримки постійної температури. Модулі ТЕ - це напівпровідникові «теплові насоси», які переміщують тепло з одного боку пристрою на іншу. Залежно від напрямку струму, що протікає через охолоджувач ТЕ, ви можете або нагріти, або охолодити лазерний діод [14-16].

Використовуються кілька типів датчиків температури: термістори, датчики і платиновий резистивний температури (термометри опору). Найбільш часто використовується термістор через його невеликого розміру і швидкого часу відгуку. Терморезистори і термометри опору є нелінійними пристроями опору.

Обидва вимагають невеликого точного джерела струму, щоб зміщувати їх. Зміни температури призводять до зміни опору, причому падіння напруги на пристрої пропорційно температурі. Кожен пристрій має характеристичне рівняння, яке перетворює опір в температуру.

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

Для теоретичного аналізу особливостей роботи напівпровідникового лазера з зовнішнім резонатором доцільно використовувати модель Ланга-Кобаясі [1], яка представлена системою диференціальних рівнянь для щільності носіїв і комплексного електричного поля, доповнених ланжевенівськими джерелами $F_E(t)$, $F_\phi(t)$, $F_N(t)$:

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

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

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

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 ω_0 .

Для визначення поведінки поздовжніх мод зовнішнього резонатора дуже важливо розглянути умови реалізації стаціонарного режиму роботи лазера. [2]. Поклавши в останніх рівняннях всі тимчасові похідні рівними нулю, отримуємо умови посилення і умовою балансу фаз:

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

У напівпровідникових лазерів центральна генеруюча частота залежить від щільності носіїв в активній області, яка є функцією струму; флуктуацией струму, що приводить до зрушення центральної частоти. Для застосування таких лазерів в практичних цілях, потрібно мати можливість зменшити ці зрушення до мінімуму. 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.

Крім того, в напівпровідниковий лазер з зовнішнім резонатором можна отримати таке звуження ширини ліній випромінювання, яке прийнято визначати як $\Delta\nu_0/\Delta\nu$, де $\Delta\nu$ є дійсна ширина лінії лазера із зовнішнім резонатором, а $\Delta\nu_0 = \frac{1 + \alpha^2}{4\pi l_0} R$ – 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:

$$\dot{\phi}_n(t) = \frac{1}{F} \left[F_\phi(t) - \frac{\alpha}{2I_0} F_I(t) \right], \quad (2.6)$$

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

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

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

Рівняння (2.7) можна використовувати для аналізу умов динамічної стабільності процесу генерування при реалізації довільних рівнів оптичної зворотного зв'язку. Застосувавши критерій Рауса-Гурвіца [15] для нелінійних систем можна отримати характеристичне рівняння. Розглянувши розміщення коренів детермінанта на лівій комплексній півплощині, знайдемо, що умови стабільної роботи лазера є виконання умови $F > 0$.

Коли $k\tau \sqrt{1 + \alpha^2} < 1$, тоді напівпровідниковий лазер генерує в стабільному режимі при будь-якій фазі зворотного зв'язку і зменшеним зрушенням частоти і ширини лінії ($F > 1$) тому, такий зв'язок є, занадто слабким для руйнування умов, стабільної роботи лазера. Зауважимо, що межа області стабільності залежить від довжини зовнішнього резонатора L . Такому режиму роботи відповідає ліва крива на рис. 2.5. Але найбільша зацікавленість викликає область стабільної роботи лазера при сильному зворотному зв'язку (на рис. 1.5 їй відповідає область, обмежена правою кривою). Характерно, що межі стабільної роботи лазера при цьому не залежать від довжини зовнішнього резонатора L . Фізичне пояснення цьому факту полягає в тому, що для порівняно сильного зворотного зв'язку

коефіцієнт відображення від торця діода повинен бути зменшеним таким чином, щоб межа між внутрішнім і зовнішнім резонаторами практично зникла.

Проведена оцінка параметрів та установлена залежність ширини лінії генерації від вихідної ширини лінії та характеристик зовнішнього резонатора лазерного діода (Таблиця 2.1).

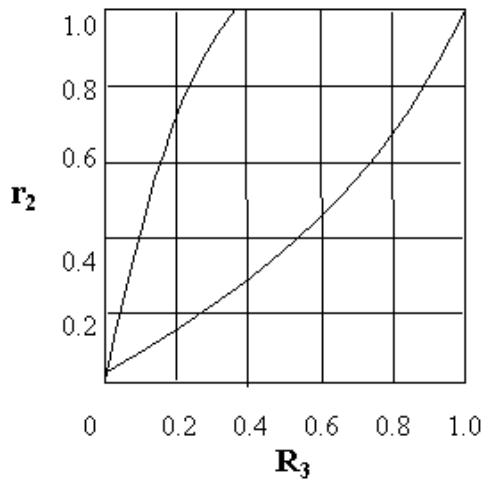


Рис.2.5. Области стабільної роботи лазера із зовнішнім резонатором:
 r_2 – коефіцієнт віддзеркалення грані діода; R_3 – рівень зворотного зв'язку

Таблиця 2.1 – Розрахункова залежність ширини лінії генерації від вихідної ширини лінії та характеристик зовнішнього резонатора лазерного діода

Довжина резонатора L , см	Коефіцієнт віддзеркалення грані діода r_2	Рівень зворотного зв'язку R_3	Ширина лінії генерації лазерного діода, МГц
10	0,32	0,4	220
100	0,32	0,4	22
100	0,32	0,8	0,25

Отримані результати вказують на залежність ширини лінії генерації від довжини резонатора та рівня зворотного зв'язку приладу.

ВИСНОВКИ

1. У кваліфікаційній роботі магістра розглянуті питання стосовно фізичних принципів функціонування, особливостей конструкції, 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, яке має наступні характеристики: когерентність; мала розбіжність променя; висока щільність потужності.

3. 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 береговським відбивачем (DBR) відображають один чітко визначений спектральний пік.

4. У напівпровідникових лазерів центральна генеруюча частота залежить від щільності носіїв в активній області, яка є функцією струму; флуктуацией струму, що приводить до зрушення центральної частоти. Для застосування таких лазерів в практичних цілях, потрібно мати можливість зменшити ці зрушення до мінімуму.

5. Центральна довжина хвилі лазерного діода прямо пропорційна його робочій температурі. Існує лінійна залежність між температурою і центральною довжиною хвилі. З підвищенням температури (від 290 до 320К) центральна довжина хвилі зростає: від 778 до 786 нм (одномодовий напівпровідниковий лазер) та від 838 до 850 (багатомодовий напівпровідниковий лазер).

6. Проведена оцінка параметрів та встановлена залежність ширини лінії генерації від вихідної ширини лінії та характеристик зовнішнього резонатора лазерного діода. Установлено, що при зміні довжини резонатора від 10 до 100 см ширина лінії генерації лазерного діода при різних значеннях рівня зворотного зв'язку (0,4 – 0,8) суттєво змінюється (від 220 до 0,25 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 «ХПІ», 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. Doo-Hwan You Ju-Hyun Lee Seong-Sik Park Sin-Doo Lee. Antiferroelectric LCD with one polarizer in a reflective configuration // Information Display, № 4. – 2000. - P. 277 – 281.

11. Kathleen M. Vaeth. OLED-Display Technology // Information Display, № 6. – 2003, P. 12 – 17.
12. Gu Xu. Fighting OLED Degradation // Information Display, № 6, 2003. – P. 18 – 21.
13. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однорець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
14. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
15. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.