
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

УДК 621.375: 535.6

О.С. КОМАРОВА, В.В. ХОЛІН, М.Т. ПЕТРАШ, С.В. ПАВЛОВ,
К. М. ЧЕПУРНА, Р.В. ЄГОРОВ, М.В. ГОЛУБ, Ю.Л. ЗАБУЛОНОВ

ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТУЖНИХ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАСИВНОГО ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ ДЛЯ МЕДИЧНИХ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ

*Приватне підприємство "Фотоніка Плюс", м. Черкаси, Україна, e-mail:
info@fotonikaplus.com.ua*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна*

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

*Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України",
м. Київ, Україна*

Анотація. У роботі досліджено теплові характеристики потужних лазерних діодів та оцінено ефективність пасивного тепловідведення для медичних лазерних систем. Проведено експериментальні вимірювання оптичної потужності та температури діодів різних довжин хвиль (810, 940, 975, 1064, 1470 нм) при різних робочих струмах. Виявлено залежність температурного дрейфу потужності від струму та довжини хвилі, а також ефективність конструктивних рішень із пасивним охолодженням і комбінованим охолодженням (пасивне охолодження та примусова конвекція повітря).

Ключові слова: лазерний діод, тепловідведення, пасивне охолодження, температурний дрейф, медичні лазери, активне охолодження

Abstract. The study investigates the thermal characteristics of high-power laser diodes and evaluates the effectiveness of passive heat dissipation in medical laser systems. Experimental measurements of optical power and diode temperature were conducted for various wavelengths (810, 940, 975, 1064, and 1470 nm) at different operating currents. The dependence of power thermal drift on current and wavelength was observed, as well as the effectiveness of design solutions with passive cooling and combined cooling (passive cooling with forced air convection).

Keywords: laser diode, heat dissipation, passive cooling, thermal drift, medical lasers, active cooling

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-300-310

1. ВСТУП

Стрімкий розвиток напівпровідникових лазерних технологій зумовив широке впровадження лазерних діодів та їх масивів (лазерних модулів) у сучасних оптоелектронних системах, зокрема в медичних, наукових і промислових застосуваннях. Завдяки високій електрооптичній ефективності, компактності, малій масі та відносній простоті інтеграції, напівпровідникові лазери стали базовими джерелами когерентного випромінювання в широкому спектрі практичних задач. Водночас експлуатаційні характеристики таких пристроїв істотно залежать від теплових процесів, що відбуваються в активній області лазерного діода.

Теплові ефекти є одним із ключових обмежувальних факторів у роботі потужних лазерних діодів, оскільки підвищення температури напівпровідникового переходу безпосередньо впливає на їхні спектральні, електричні та енергетичні параметри, спричиняючи деградацію випромінювача.

© О.С. КОМАРОВА, В.В. ХОЛІН, М.Т. ПЕТРАШ, С.В. ПАВЛОВ, К. М. ЧЕПУРНА,
Р.В. ЄГОРОВ, М.В. ГОЛУБ, Ю.Л. ЗАБУЛОНОВ, 2025

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Нерівномірний розподіл температури в активній області та конструктивних елементах лазерного чипа призводить до виникнення термічних напружень і механічних деформацій кристала, що, у свою чергу, погіршує якість лазерного пучка, знижує стабільність вихідної потужності та може викликати оптичні пошкодження діода.

Крім того, температурна нестабільність прискорює процеси старіння активної області, зменшуючи термін служби лазерних діодів, що є особливо критичним для компактних систем, орієнтованих на тривалу безперервну або імпульсну роботу. У зв'язку з цим теплове керування та мінімізація термічних напружень розглядаються як одні з найважливіших завдань при проєктуванні й експлуатації потужних напівпровідникових лазерів [1].

Отже, термічна стабільність лазерних діодів має визначальний вплив на надійність і ефективність систем, що використовуються у медичній галузі — від дерматології до хірургії. Ряд досліджень [2–5] свідчить, що перегрів лазерного діода призводить до зростання порогового струму, зниження електрооптичної ефективності, зміщення спектра випромінювання та деградації активної області, що, у свою чергу, спричиняє падіння вихідної потужності під час роботи та скорочення терміну експлуатації апаратури. У зв'язку з цим детальне дослідження теплових режимів лазерних діодів і розподілу температури в їх конструктивних елементах є актуальним науково-технічним завданням.

Традиційно стабілізацію температури лазерних діодів забезпечують термоелектричні охолоджувачі (ТЕС), які за наявності відповідних систем керування дозволяють підтримувати температуру активної області в межах $\pm 0,1 \dots 0,3$ °C [6, 7].

Водночас застосування ТЕС супроводжується низкою суттєвих недоліків, а саме:

- істотним ускладненням конструкції та зростанням вартості лазерних модулів;
- збільшенням маси оптоелектронних систем за рахунок додаткових компонентів, зокрема термоелектричних модулів Пельтьє, радіаторів, теплообмінників і охолоджувальних блоків;
- підвищенням енергоспоживанням, пов'язаним з роботою ТЕС та допоміжної електроніки керування;
- зменшенням конструктивної простоти та гнучкості порівняно з пасивними або альтернативними методами тепловідведення;
- виникненням циклічних термічних напружень, зумовлених режимами нагрівання та охолодження ТЕС, що за тривалої експлуатації може негативно впливати на довговічність лазерних діодів.

Зростаюча кількість робіт, включно з [7], показує, що альтернативні методи тепловідведення можуть бути достатніми у медичних системах, де спектральна стабільність менш критична, ніж у телекомунікаціях або наукових установках.

2. ВИМОГИ ДО ВИБОРУ ЛАЗЕРНИХ ДІОДІВ

Лазерні діоди є напівпровідниковими оптоелектронними компонентами, які використовуються як активні елементи у складі лазерних та оптичних систем для генерації когерентного електромагнітного випромінювання. Формування випромінювання відбувається внаслідок процесу стимульованого випромінювання в активній області р–п-переходу напівпровідникової структури. Випромінювання лазерних діодів характеризується високим ступенем когерентності, відносно вузькою спектральною смугою та визначеною довжиною хвилі, що забезпечує ефективне формування і передавання лазерного пучка в прикладних пристроях [8].

2.1. Структура потужних лазерних діодів та особливості теплових процесів

Потужні лазерні діоди з активною областю, що працює в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,81\text{--}1,47$ мкм, викликають підвищений інтерес завдяки широкому спектру застосувань. У цьому діапазоні вони використовуються як джерела оптичної накачки твердотільних та волоконних лазерів у медичних системах та інших високотехнологічних галузях.

Основою лазерного діода є напівпровідниковий гетероструктурний кристал, який включає активну область, хвилевідні шари, р–п перехід, контактні та перехідні шари. У вертикально інжекттованих гетероструктурах (AlGaAs/GaAs або InGaAsP/InP) саме активна область визначає процес генерації випромінювання за рахунок стимульованої емісії [9].

Під час роботи значна частина електричної потужності перетворюється на тепло, яке виникає безпосередньо в активній області. Оскільки вона має мікрометрові розміри (товщина ~ 1 мкм), тепловиділення зосереджується в малому об'ємі, що формує високу густину теплових потоків. Відведення тепла здійснюється через структуру кристала до підкладки, а далі — до тепловідвідних елементів та системи охолодження.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

2.2. Неоднорідність теплових потоків у лазерному діоді

Теплопередача в лазерному діоді має тривимірну неоднорідність, зумовлену низкою факторів:

- анізотропією теплопровідності GaAs, InP та AlGaAs у різних кристалографічних напрямках;
- гетероструктурною будовою, де шари мають різну товщину й теплопровідність;
- локальною концентрацією тепла в активній області;
- неоднорідністю контакту між діодом і тепловідводом (припій, індієва пайка, притискання);
- високим термічним опором між шарами, зокрема на межах GaAs–припій–мідний радіатор.

У результаті теплові потоки розподіляються нерівномірно у всіх трьох координатах (X, Y, Z), що спричиняє формування неоднорідного температурного поля в кристалі — як по вертикалі (від р-шару до підкладки), так і в площині активної області.

2.3. Вплив температурних профілів на параметри лазерного діода

Неоднорідні температурні поля впливають практично на всі вихідні характеристики:

- Оптичну потужність та ефективність. Підвищення температури зменшує квантову ефективність та збільшує поріг генерації.
- Стабільність довжини хвилі. Зміна забороненої зони та показника заломлення призводить до температурного зсуву спектра.
- Модову структуру. Температурні градієнти змінюють оптичний профіль хвилеводу, впливаючи на модовий склад.
- Надійність. Локальні перегриви прискорюють деградацію контактів і дифузію домішок.
- Повторюваність експериментів. Мінімальні відхилення у тепловому контакті або початкових умовах викликають різницю температур до $\approx 1^\circ\text{C}$, що є типовим для потужних діодів і проявляється навіть при ідентичних умовах запуску.

Таким чином, повторні вимірювання можуть демонструвати незначні, але систематичні відмінності, що пов'язано зі складною геометрією тепловідводу та високою чутливістю лазерного діода до температури активної області.

2.4. Температурна залежність характеристик лазерних діодів

За даними експериментальних досліджень, спектральна довжина хвилі лазерних діодів зміщується в довшу сторону з підвищенням температури на кілька десятих нанометра на градус. Наприклад, у 940 нм лазерних діодах зсув довжини хвилі становить $\approx 0,275 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ при збільшенні температури кристала, що узгоджується з типовими температурними коефіцієнтами для діодів у діапазонах $\sim 0,28\text{--}0,33 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ у ближньому ІЧ-діапазоні та $\sim 0,35\text{--}0,45 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ у довгих ІЧ-діапазонах [3, 10]. Крім того, підвищення температури призводить до зниження вихідної оптичної потужності (через збільшення порогового струму та зниження ефективності перетворення), а зменшення прямої напруги на діоді при постійному струмі добре описується температурним коефіцієнтом напруги $\sim 1,5\text{--}2,0 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$, характерним для р–n-структур з прямим переходом.

2.5. Технології термостабілізації та ефективність пасивного охолодження лазерних діодів

У сучасних лазерних діодних системах застосовується широкий спектр підходів до теплового керування, вибір яких визначається вимогами до температурної стабільності, габаритів, енергоспоживання та вартості кінцевого виробу. Класичним рішенням для забезпечення високоточної температурної стабілізації активної області лазерного діода є використання термоелектричних охолоджувачів (ТЕС), які забезпечують найвищу стабільність робочої температури за наявності відповідних систем керування. Оглядова стаття показує, що ТЕС-системи при всій їхній ефективності суттєво збільшують складність, масу та собівартість лазерних модулів порівняно з альтернативними рішеннями [7].

З огляду на ці обмеження, у літературі активно досліджуються альтернативні методи тепловідведення, які не потребують активного термоелектричного охолодження. Зокрема, застосування масивних радіаторів, компонентів з підвищеною тепловою масою та теплових трубок дозволяє ефективно відводити тепло від активної області лазерного діода [7].

Аналіз експериментальних і прикладних робіт підтверджує, що використання пасивних методів охолодження є доцільним компромісом між температурною стабільністю, конструктивною простотою та енергоефективністю. Описи та моделювання теплових систем із застосуванням теплових трубок у споріднених пристроях також підкреслюють, що такі рішення можуть істотно поліпшувати розподіл тепла без додаткових активних компонентів [7, 11].

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Метою роботи є експериментальне дослідження температурних характеристик потужних лазерних діодів без застосування охолодження та перевірка ефективності конструктивного рішення медичного лазера із пасивним охолодженням або комбінованим охолодженням (пасивне охолодження та примусова конвекція повітря).

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Експеримент проведено на лазерних діодах:

- C-MOUNT 808 нм, 8 Вт (SEC8-808A-01);
- C-MOUNT 975 нм, 9 Вт (SEC9-975-01);
- C-MOUNT 1064 нм, 5 Вт (LD-1064-5000-M);
- C-MOUNT 1470 нм, 6 Вт (CM-1470-6).

Методика експерименту. Для досліджень використовувалася установка на базі контролера NEWPORT LDC-37620, призначеного для високопотужних лазерних діодів. Діод фіксували на головці LDC-37620, при цьому температура активної області контролювалась за допомогою термоелектричного охолоджувача (TEC), рис. 1.

Експериментальна процедура складалася з таких кроків:

1. Охолодження діода: TEC підтримував температуру активної області на рівні 15 °С до досягнення стабілізації.

2. Відключення TEC: після стабілізації температури на рівні 15 °С термоелектричний охолоджувач було вимкнено. За умови подачі робочого струму лазерний діод генерував лазерне випромінювання та переходив у режим пасивного нагрівання, при якому температура зростала до 35 °С.

3. Реєстрація параметрів: протягом усього циклу нагріву до 35 °С здійснювалось безперервне вимірювання потужності та температури.

4. **Повторні виміри:** для довжин хвиль 810 нм, 975 нм і 1470 нм проводилася аналогічна серія експериментів при меншій робочій потужності для тих самих діодів.

Для вимірювання оптичної потужності використовувалася система NEWPORT Power Meter Model B43-R. Ця система дозволяє проводити високоточні виміри оптичної потужності та реєструвати їх у реальному часі, забезпечуючи стабільне калібрування та точність протягом усього експерименту.



Рисунок 1 – Фотографія експериментальної установки: контролер струму NEWPORT LDC-37620, TEC-модуль стабілізації та оптична вимірвальна система NEWPORT Power Meter Model B43-R.

Температуру лазерного діода та оптичну потужність фіксували синхронно для подальшого аналізу залежності потужності від температури та часу нагріву.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Лазерний діод з довжиною хвилі 810 нм

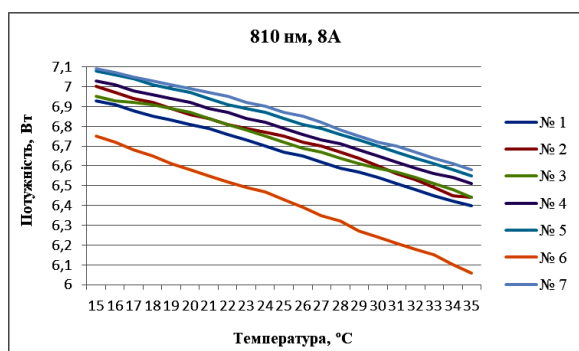
Експеримент проводили для двох робочих точок струму: 8 А та 5 А, з використанням 7 діодів на кожен струм. Вимірювання включали оптичну потужність у діапазоні температур 15–35 °С, втрати потужності ΔP та час нагріву після відключення ТЕС. Основні результати наведено в таблиці 1. На рис. 2 представлено залежність потужності лазерного діода від температури.

Таблиця 1 – Результати експерименту

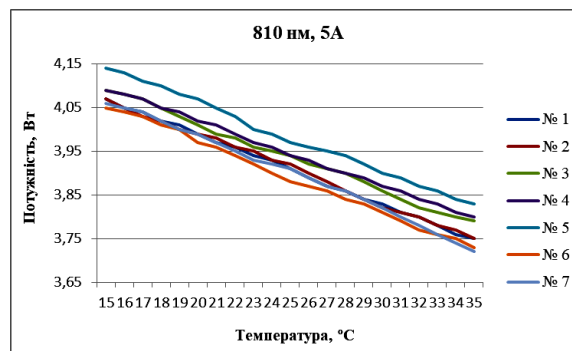
Струм	Початкова потужність при 15 °С, Вт (середнє)	Потужність при 35 °С, Вт (середнє)	ΔP , Вт (%)	Час нагріву $\Delta T = 20$ °С, хв	Температурний коефіцієнт потужності, %/°С (середнє)
8 А	6.98	6.43	0.55 (7.88%)	3.2–4.5	0.39
5 А	4.07	3.75	0.32 (7.86 %)	8.3–23	0.39

Основні спостереження:

1. Температурний дрейф потужності зростає зі збільшенням струму, що відповідає очікуванням.
2. Час нагріву $\Delta T \approx 20$ °С для 8 А значно коротший, ніж для 5 А, через менше тепловиділення при нижчому струмі.
3. Аномально тривалий час нагріву для діода №4 при 5 А (23 хв) ймовірно зумовлений особливостями монтажу та теплового контакту з радіатором.



а)



б)

Рисунок 2 – Залежність потужності лазерного діода від температури.
(Залежність потужності лазерного діода 810 нм (струм 8А) від температури (а),
Залежність потужності лазерного діода 810 нм (струм 5А) від температури (б))

4.2. Лазерний діод з довжиною хвилі 975 нм

Експеримент проводили для двох робочих точок струму: 9 А та 4,5 А, із застосуванням 5 діодів для кожної точки. Вимірювання включали оптичну потужність у діапазоні температур 15–35 °С, втрати потужності ΔP та час нагріву після відключення термоелектричного охолоджувача (ТЕС). Основні результати наведені в таблиці 2, а на рис. 3 показано залежність потужності лазерного діода від температури.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Таблиця 2 – Результати експерименту

Струм	Початкова потужність при 15 °С, Вт (середнє)	Потужність при 35 °С, Вт (середнє)	ΔP , Вт (%)	Час нагріву $\Delta T = 20$ °С, хв	Температурний коефіцієнт потужності, %/°С (середнє)
9 А	7.53	7.24	0.29 (3.9 %)	4.1-5.4	0.2
4.5 А	3.77	3.66	0.11 (2.87 %)	37-42	0.14

Основні спостереження:

1. Температурний дрейф потужності збільшується зі зростанням струму, аналогічно до випадку 810 нм.
2. Час нагріву $\Delta T \approx 20$ °С значно коротший для 9 А, ніж для 4,5 А, через більший тепловий потік при вищому струмі.

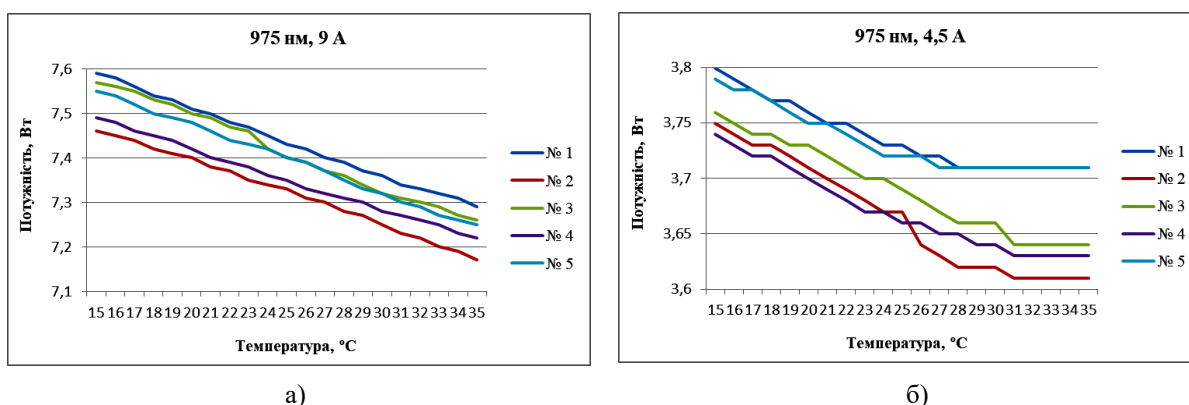


Рисунок 3 – Залежність потужності лазерного діода від температури.
(Залежність потужності лазерного діода 975 нм (струм 9 А) від температури (а),
Залежність потужності лазерного діода 975 нм (струм 4.5 А) від температури (б))

Потужніші діоди 975 нм при високому струмі нагріваються швидше, потребують більш ефективного відведення тепла (радіатор + вентилятор), тоді як діоди меншої потужності можна експлуатувати без ТЕС більш тривалий час.

4.3. Лазерний діод з довжиною хвилі 1470 нм

Експеримент проводився для двох робочих точок струму: 11 А та 5,5 А, із застосуванням 5 діодів для кожної точки. Вимірювання включали оптичну потужність у діапазоні температур 15–35 °С, втрати потужності ΔP та час нагріву після відключення ТЕС. Основні результати наведені в таблиці 3, а на рис. 4 показано залежність потужності лазерного діода від температури.

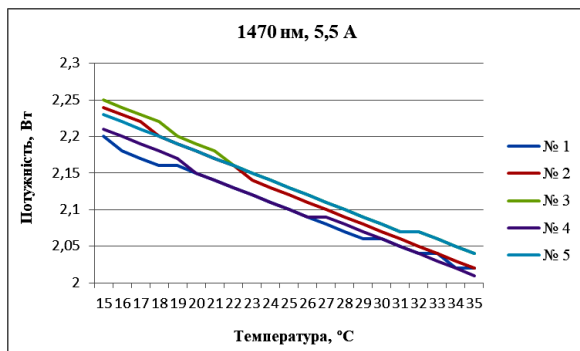
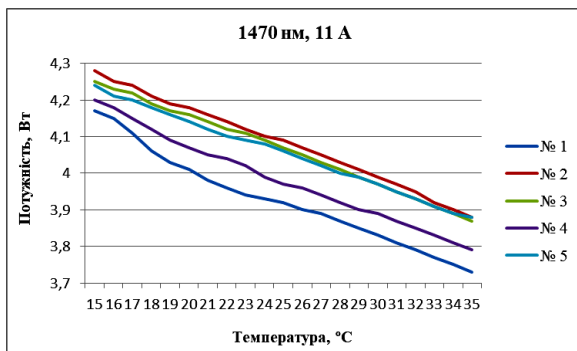
Основні спостереження:

1. Температурний дрейф потужності збільшується зі зростанням струму, аналогічно до випадку 810 нм та 975 нм.
2. Чутливість до температури дуже висока, майже подвійна порівняно з 975 нм
3. Час нагріву $\Delta T \approx 20$ °С значно коротший для 11 А, ніж для 5,5 А, через більший тепловий потік при вищому струмі.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Таблиця 3 – Результати експерименту

Струм	Початкова потужність при 15 °С, Вт (середнє)	Потужність при 35 °С, Вт (середнє)	ΔP , Вт (%)	Час нагріву $\Delta T = 20$ °С, хв	Температурний коефіцієнт потужності, %/°С (середнє)
11 А	4.23	3.83	0.40 (9.45 %)	1.48-2.12	0.47
5.5 А	2.23	2.06	0.17 (7.63 %)	15.4-22	0.38



а)

б)

Рисунок 4 – Залежність потужності лазерного діода від температури.

(Залежність потужності лазерного діода 1470 нм (струм 11 А) від температури (а).

Залежність потужності лазерного діода 1470 нм (струм 5.5 А) від температури (б))

4.4. Лазерний діод з довжиною хвилі 1064 нм

Експеримент проводився для однієї робочої точки струму 5,5 А, з використанням 7 діодів. Вимірювання включали оптичну потужність у діапазоні температур 15–35 °С, втрати потужності ΔP , час нагріву після відключення ТЕС. Основні результати наведені в таблиці 4, а на рис. 5 показано залежність потужності лазерного діода від температури.

Таблиця 4 – Результати експерименту

Струм	Початкова потужність при 15 °С, Вт (середнє)	Потужність при 35 °С, Вт (середнє)	ΔP , Вт (%)	Час нагріву $\Delta T = 20$ °С, хв	Температурний коефіцієнт потужності, %/°С (середнє)
5.5 А	3.55	3.35	0.20 (5.63 %)	15-32	0.28

Основні спостереження для 1064 нм:

1. Температурний дрейф потужності для струму 5,5 А становить $\Delta P \approx 0,20$ Вт ($\approx 5,6$ %) при переході від 15 °С до 35 °С.

2. Час нагріву $\Delta T \approx 20$ °С коливається від 15 до 32 хв залежно від діода, що значно довше, ніж для високих струмів у діодах інших довжин хвиль, через менший тепловий потік.

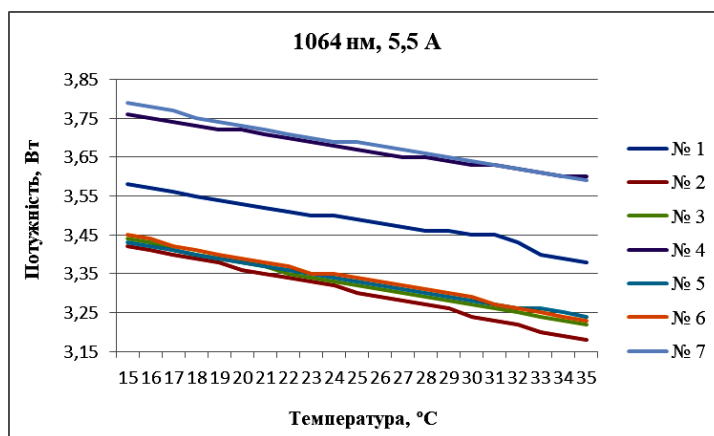


Рисунок 5 – Залежність потужності лазерного діода 1064 нм (струм 5,5 А) від температури

Висновки:

1. Температурний дрейф потужності зростає зі збільшенням струму для всіх довжин хвиль (810, 975, 1064, 1470 нм). Це узгоджується з очікуванням, оскільки вищий струм призводить до більшого тепловиділення та швидшого нагріву активної області діода.

2. Час нагріву $\Delta T \approx 20$ °C значно коротший при високих струмах і довгих хвилях із високою потужністю (975 нм, 1470 нм), що вказує на необхідність ефективного тепловідведення при високих робочих струмах.

3. Діоди з меншим струмом та потужністю (810 нм при 5 А, 975 нм при 4,5 А, 1064 нм при 5,5 А) демонструють повільний нагрів і відносно невеликий температурний дрейф, що дозволяє їх експлуатувати без активного ТЕС протягом тривалого часу.

4. Найчутливішими до температури виявилися лазерні діоди 1470 нм (ΔP до 9,45% при високому струмі), що майже вдвічі перевищує температурний дрейф 975 нм та 1064 нм. Це обмежує їх застосування без активного охолодження навіть при помірних струмах.

5. Конструктивне рішення з пасивним тепловідведенням може бути ефективним для низькопотужних діодів або при короткотривалій експлуатації високопотужних діодів із невеликим струмом, але для потужних медичних лазерів з високим струмом ТЕС або активне охолодження є обов'язковим.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПРИЛАД (10 ВТ, 940 НМ)

Для експериментальної перевірки працездатності конструкції без термоелектричних охолоджувачів було виготовлено макетний зразок медичного лазерного приладу з вихідною оптичною потужністю 10 Вт на довжині хвилі 940 нм.

В основі конструкції використовуються лазерні діоди PLD-40-974-T, інтегровані у лазерний модуль з волоконно-оптичними комбайнерами. Модуль закріплено на масивному алюмінієвому радіаторі з оптимізованою геометрією тепловідведення. Конструкція модуля забезпечує:

- низький тепловий опір між діодом, комбайнером та радіатором;
- рівномірний розподіл теплових потоків;
- зменшення локальних перегрівів активної області;
- стабілізацію температурного профілю без застосування ТЕС.

Завдяки цьому прилад працює в режимі повністю пасивного (якщо лазерний модуль нагрівається нижче 30 °C) або комбінованого охолодження (пасивне охолодження та примусова конвекція повітря).

Для дослідження температурної та енергетичної стабільності приладу застосована така експериментальна методика:

- Температура лазерного модуля вимірювалася точковими термодатчиками, встановленими безпосередньо на корпусі лазерного модуля в зоні найбільшого тепловиділення.
- Оптична потужність реєструвалася високоточним вимірювальним комплексом OPHIR з перетворювач потужності L40(250)A-LP2-50, термоелектричним датчиком 3A-P-V1 ROHS, монітором потужності NOVA II DISPLAY ROHS.
- Температура навколишнього середовища становила 21 °C.

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Це означає, що тепловідведення у режимі активного обдуву повністю компенсує теплову потужність лазерного модуля. Система переходить у теплостационарний режим, де накопичення тепла не відбувається.

Потужність після стабілізації температури зростає від 10,91 Вт (момент увімкнення вентилятора) до 11,15 Вт (на 20-й хвилині).

Зміна $\Delta P = +0.24$ Вт ($\approx +2.2\%$).

Причини зростання потужності:

- зменшення внутрішніх температурних градієнтів;
- вирівнювання температурного профілю активної області;
- зростання квантової ефективності p-n переходу.

Це узгоджується з положеннями розділів 1 і 2, де показано вплив локального перегріву активної області на зменшення вихідної потужності.

Висновки:

1. ТЕС-free конструкція повністю працездатна. Температура в пасивному режимі не перевищила 30 °С, що є безпечним робочим рівнем для 940 нм діодів.
2. Активний обдув забезпечує абсолютну температурну стабільність. Температура утримувалась на рівні 30 °С до кінця експерименту без коливань.
3. Повернення потужності до номінальних значень. Після стабілізації температури потужність плавно відновила від 10,91 Вт до 11,15 Вт.
4. Відсутність довготривалого теплового дрейфу. Після переходу в стабільний режим температура та оптична потужність не демонструють ознак деградації чи накопичення тепла.

ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження показали, що температурний дрейф оптичної потужності лазерних діодів зростає зі збільшенням робочого струму та вихідної потужності. Діоди високої потужності та довгої хвилі (975 нм, 1470 нм) нагріваються швидше і потребують більш ефективного тепловідведення, тоді як діоди з меншими струмами і потужністю (810 нм, 940 нм, 1064 нм) демонструють повільний нагрів та невеликий температурний дрейф, що дозволяє їх експлуатувати без активного ТЕС протягом тривалого часу.

Найчутливішими до температури виявилися лазерні діоди 1470 нм, для яких температурний дрейф в середньому досягає 9,45 % при високому струмі. Це обмежує їх застосування без активного охолодження навіть при помірних струмах. Для середньопотужних лазерних модулів 940 нм пасивне тепловідведення з масивним радіатором забезпечує стабільність температури до 30 °С з мінімальним падінням оптичної потужності ($\sim 0,9\%$).

Досліджено, що комбіноване пасивне та активне повітряне охолодження забезпечує повну стабілізацію температури та повернення оптичної потужності до номінальних значень. Таким чином, для медичних лазерних систем низької та середньої потужності ТЕС-free конструкції є придатними, а для високопотужних діодів із великим робочим струмом доцільне застосування активного охолодження або ТЕС для забезпечення надійної та стабільної роботи протягом тривалого часу.

Отримані результати дозволяють обґрунтовано вибирати методи тепловідведення при проєктуванні медичних лазерів, балансує температурну стабільність, конструктивну простоту та енергоефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Wu, T., Shen, J., Zou, J., Wu, P., & Liao, Y. (2024). Semiconductor Laser Packaging Technology: Thermal Management, Optical Performance Enhancement, and Reliability Studies. *Journal of Optics and Photonics Research*. <https://doi.org/10.47852/bonviewJOPR42022985>.
2. Xingsheng Liu, M.H. Hu, C.G. Caneau, R. Bhat, L.C. Hughes, and Chung-En Zah, "Thermal management strategies for high power semiconductor pump lasers," in Proc. 2004 IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM '04), vol. 2, Las Vegas, NV, USA, 01–04 June 2004, pp. 421–426, doi: <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2004.1318324>.
3. Komarova Olga, Kholin Volodymyr, et al. "Physical modeling of output cascades and terminal devices of laser medical equipment with a rectangular cross-section of the output optical beam", Proc. SPIE 13400, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024, 134000D (16 December 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3054916>

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ТА КОМПОНЕНТИ В ЛАЗЕРНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

4. Liao Y., Li J., Mi G., Wang H., Wang Y., Deng J., and Han J., "An experimental study on the temperature characteristic of a 940 nm semiconductor laser diode," Opt. Photonics J., vol. 6, no. 8B, Aug. 2016, doi: <https://doi.org/10.4236/opj.2016.68B013>.
5. He Y., Jin X., Jin P., Su J., Li F., and Lu H., "Temperature control performance improvement of high-power laser diode with assistance of machine learning," Photonics, vol. 12, no. 3, p. 241, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/photonics12030241>.
6. Analog Devices, "HFAN-08.2.1: PWM Temperature Controller for Thermoelectric Modules Keeps Components within 0.1 °C," Analog.com Technical Article, Feb. 26, 2003. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/hfan0821-pwm-temperature-controller-for-thermoelectric-modules-keeps-components-within-01degc.html>.
7. Abed R.N., "The thermal management system of laser diode: A review," ARPJ J. Eng. Appl. Sci., vol. 10, no. 12, Jul. 2015, ISSN 1819-6608.
8. RP Photonics Encyclopedia, "Laser Diodes," RP Photonics, 2025. [Online]. Available: https://www.rp-photonics.com/laser_diodes.html.
9. Pospiech M. and Liu S., "Principles of AlGaAs Laser Diodes," University of Hannover, Germany, Oct. 22, 2019. [Online]. Available: <https://www.laserdiodesource.com/laser-diode-technical-overview-two>.
10. Newport Corporation. (n.d.). Controlling temperatures of laser diodes thermoelectrically (Application Note AN01). Newport Corporation.
11. Song, X., Wei, G., Wen, J., & Cai, D. (2009). Application of heat pipe in LD end-pumped solid-state lasers cooling system. Journal of Shanghai Jiaotong University, 43(3), 398–401.

Надійшла до редакції 1.10.2025р.

КОМАРОВА ОЛЬГА СЕРГІЇВНА – інженер-технолог ПП "Фотоніка Плюс", аспірантка КПІ ім. Ігоря Сікорського, *e-mail: komarova.ollha@gmail.com*.

ХОЛІН ВОЛОДИМИР ВІКТОРОВИЧ – к.т.н., директор ПП "Фотоніка Плюс",
e-mail: info@fotonikaplus.com.ua.

ПЕТРАШ МИКОЛА ТИМОФІЙОВИЧ - інженер-електронік ПП "Фотоніка Плюс",
e-mail: info@fotonikaplus.com.ua.

ПАВЛОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем ВНТУ, *e-mail: psy@vntu.edu.ua*.

ЧЕПУРНА КАТЕРИНА МИКОЛАЇВНА - інженер-електронік ПП "Фотоніка Плюс",
e-mail: info@fotonikaplus.com.ua.

ЄГОРОВ РОМАН ВОЛОДИМИРОВИЧ - інженер-електронік ПП "Фотоніка Плюс",
e-mail: info@fotonikaplus.com.ua.

ГОЛУБ МИКОЛА ВАСИЛЬОВИЧ – інженер-технолог ПП "Фотоніка Плюс",
e-mail: info@fotonikaplus.com.ua.

ЗАБУЛОНОВ ЮРІЙ ЛЕОНІДОВИЧ - академік НАН України, проф., д.т.н., директор Державної установи "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України", *e-mail: Zabulonov@nas.gov.ua*.

O. KOMAROVA, V. KHOLIN, M. PETRASH, S. PAVLOV, K. CHEPURNA,
R. EGOROV, M. GOLUB, Yu. ZABULONOV

THERMAL CHARACTERISTICS OF HIGH POWER LASER DIODES AND EFFICIENCY OF PASSIVE HEAT DISSIPATION FOR MEDICAL LASER SYSTEMS

Private Enterprise "Fotonika Plus", Cherkasy, Ukraine,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine",
Kyiv, Ukraine