

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ЛАЗЕР НА ІТЕРБІЙ-ЕРБІЄВОМУ СКЛІ
З ДІОДНИМ НАКАЧУВАННЯМ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІм-18-1
Герасимов С.С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Дзюбенко М.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Мачехін Ю.П.
(прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Герасимову Сергію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лазер на ітербій-ербієвому склі з діодним накачуванням

затверджена наказом університету від " 30 " жовтня 2019 р. № 1577 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 17 грудня 2019 р.

3. Вихідні дані до роботи Довжина хвилі випромінювання ербію – 1535 нм, накачка
активного елементу – діодна, режим генерації – безперервний та імпульсний, стабільність
номінальної потужності лазерного випромінювання $\pm 5\%$, модулятор
добротності – пасивний.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Твердотільний лазер. 2 Активне
середовище. 3 Системи накачування. 4 Види резонаторів. 5 Методи модуляції добротності.
6 Застосування твердотільних лазерів. 7 Розробка лазера на ітербій-ербієвому склі. 8 Схема
експериментальної установки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Кресленик загального виду: Лазерний випромінювач– А4 – 1 шт.

Демонстраційний матеріал – 11 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел твердотільні лазери та способи їй накачки	04.11.19 – 09.11.19	Виконано
2	Дослідження типів та конструкції твердотільних лазерів	10.11.19 – 14.11.19	Виконано
3	Проектування та збірка приладу для дослідження	15.11.19 – 19.11.19	Виконано
4	Аналіз отриманих результатів дослідження	20.11.19 – 25.11.19	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	26.11.19 – 03.12.19	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	04.12.19 – 05.12.19	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	10.12.19 – 16.12.19	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	17.12.19 – 19.12.19	

Дата видачі завдання 03 листопада 2019 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Дзюбенко М.І.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи: 72 с., 28 рис., 1 табл.,
2 додатки, 32 джерел.

ТВЕРДОТІЛЬНИЙ ЛАЗЕР, РЕЗОНАТОР, АКТИВНИЙ ЕЛЕМЕНТ,
ДІОДНА НАКАЧКА, ВИПРОМІНЮВАННЯ, ДОВЖИНА ХВИЛІ,
МОДУЛЯТОР ДОБРОТНОСТІ.

Об'єкт дослідження – твердотільний лазер на ітербій-ербієвому склі з діодним накачуванням.

Метою роботи є закріплення знань про фізичні принципи роботи твердотільних лазерів з діодним накачуванням, про їх конструктивні особливості, технології виробництва, а також розвиток навичок інженерної і конструкторської роботи, необхідних під час розробки і створення оптоелектронних пристроїв.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні.

В атестаційній роботі проведений аналітичний огляд твердотільних лазерів, принципу дії, активного середовища, способів накачування, методів модуляції та областей застосування. Здійснений вибір активного елементу, а саме сенсibilізаторів, підбір параметрів резонатору та проаналізовані вихідні параметри лазерної установки.

ABSTRACT

The explanatory slip of attestation work contains: 72 p., 28 fig., 1 tabl., 2 appendices, 32 sources.

SOLID LASER, RESONATOR, ACTIVE ELEMENT, TECHNOLOGY, DIODE PUMP, RADIATION, WAVE LENGTH, MODULATOR OF Q-FACTOR.

The object of study – Ytterbium Erbium-diode-pumped solid-state laser

The aim of the work is securing the knowledge of the physical principles of operation of diode pumped solid-state lasers, their design features, production technology, as well as the development of skills of engineering and design work required during the development and creation of optoelectronic devices.

Research methods – analytical and numerical.

In the attestation work, an analytical review of solid-state lasers, the principle of action, the active medium, pumping methods, modulation methods and fields of application was carried out. The selection of the active element, namely sensitizers, selection of the resonator parameters

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к аттестационной работы: 72 с., 28 рис., 1 табл., 2 приложения, 32 источников.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР, РЕЗОНАТОР, АКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ, ТЕХНОЛОГИЯ, ДИОДНАЯ НАКАЧКА, ИЗЛУЧЕНИЕ, ДЛИНА ВОЛНЫ, МОДУЛЯТОР ДОБРОТНОСТИ.

Объект исследования – твердотельный лазер на иттербий-эрбиевом стекле с диодной накачкой.

Целью работы является закрепление знаний о физических принципах работы твердотельных лазеров с диодной накачкой, об их конструктивных особенностях, технологии производства, а также развитие навыков инженерной и конструкторской работы, необходимых во время разработки и создания оптоэлектронных устройств.

Методы исследования – аналитические и численные.

В аттестационной работе проведен аналитический обзор твердотельных лазеров, принципа действия, активной среды, способов накачки, методов модуляции и областей применения. Проведен выбор активного элемента, а именно сенсibilизаторов, подбор параметров резонатора и проанализированы выходные параметры лазерной установки.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Твердотільний лазер з діодним накачуванням.....	10
1.1 Різновиди лазерів з діодним накачуванням.....	10
1.1.1 Твердотільні лазери.....	10
1.1.2 Волоконні лазери.....	12
1.1.3 Лазери на барвниках.....	14
1.2 Активне середовище.....	15
1.2.1 Активне середовище на основі іонів ербію.....	17
1.3 Методи накачування ербієвих лазерів.....	22
1.3.1 Діодне або лазерне накачування.....	23
1.3.2 Поперечне накачування.....	24
1.3.3 Поздовжнє накачування.....	27
1.3.4 Лампове накачування	28
1.3.5 Порівняння лампового і діодного накачування.....	30
1.4 Режим роботи лазерів.....	32
1.4.1 Режим вільних коливань.....	32
1.4.2 Режим модульованої добротності.....	33
1.5 Методи модуляції добротності ербієвого лазера.....	34
1.5.1 Активні модулятори.....	35
1.5.2 Пасивні модулятори.....	39
1.6 Застосування ербієвих твердотільних лазерів	40
2 Ербієвий лазер с діодною накачкою.....	44
2.1 Особливості накачування твердотільних лазерів напівпровідниковими світловипромінюючими діодами.....	44
2.2 Вибір схеми накачування ербієвого активного елемента напівпровідниковими діодами	46

	8
2.3 Особливості ербієвого активного середовища.....	51
2.4 Джерело живлення лазерних лінійок.....	53
2.5 Модуляція добротності лазера.....	55
2.6 Експериментальний зразок ербієвого лазера з накачуванням ЛДЛ	58
2.7 Оптимізація енергетичних характеристик ербієвого лазера	63
Висновки.....	69
Перелік джерел посилання.....	70
Додаток А Графічні матеріали.....	73
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	75

ВСТУП

Лазер (від англ. Laser, акронім від light amplification by stimulated emission of radiation «посилення світла за допомогою вимушеного випромінювання»), або оптичний квантовий генератор – це пристрій, що перетворює енергію накачування (світлову, електричну, теплову, хімічну та ін.) В енергію когерентного, монохроматичного, поляризованого та узконаправленого потоку випромінювання

Твердотільні лазери (ТТЛ), з яких в 1960 р. почалася лазерна ера (першим в світі був сконструйований ТТЛ на кристалі рубіна (1960 р.), у 1961 р. був створений лазер на неодимовому склі та ін.), продовжують активно розвиватися і грають важливу роль в сучасних технологіях.

Специфіка використовуваних лазерних активаторів – рідкоземельних іонів неодиму, ербію, ітербію (або іонів хрому, титану) дозволяє в твердотільних лазерах накопичувати енергію збудження на верхньому лазерному рівні по трьох- та чотирьохрівневою схемою і забезпечити ефективну роботу лазера в найрізноманітніших режимах роботи.

Твердотільні лазери займають унікальне місце в розвитку лазерів. Це прості в обслуговуванні пристрої, здатні генерувати енергію високої потужності. В даний час ТТЛ займають лідируюче місце за обсягом виробництва. Потужні безперервні ТТЛ можуть використовуватися в різних технологічних процесах завдяки компактності і надійності конструкції, стабільності параметрів і можливості застосування гнучких волокон для доставки випромінювання до об'єкту впливу. Вони знайшли широке застосування для обробки матеріалів, в медицині, наукових дослідженнях, лазерних системах з перетворенням частоти випромінювання.

1 ТВЕРДОТІЛЬНИЙ ЛАЗЕР З ДІОДНИМ НАКАЧУВАННЯМ

1.1 Різновиди лазерів з діодним накачуванням

Твердотільний лазер з діодним накачуванням (Diode-pumped solid-state laser, DPSS) – різновид твердотільного лазера, в якому в якості джерела оптичного накачування використовується лазерний діод. DPSS-лазери характеризуються високою ефективністю і компактністю в порівнянні з газовими та іншими твердотільними лазерами. В останні роки DPSS-лазери набули особливої популярності як джерела випромінювання в лазерних указках зеленого, жовтого і деяких інших кольорів.

1.1.1 Твердотільні лазери

Твердотільні лазери – це оптичні квантові генератори, в яких активною речовиною є діелектричні кристали і стекла, що містять іони рідкісноземельних або перехідних елементів, енергетичні рівні яких використовуються для створення інверсної населеності. Напівпровідникові лазери, будучи також твердотільними, виділяються в особливу групу, так як в них використовуються не квантові переходи між енергетичними рівнями «робочих» іонів, а квантові переходи між дозволеними енергетичними зонами напівпровідників. Твердотільний лазер знаходить широке застосування як в фундаментальних наукових дослідженнях, так і в промисловості, і медицині, що обумовлено головним чином можливістю досягнення великої ударної енергії і імпульсної потужності генерації завдяки високій концентрації активних частинок.

Використовуються лазери на кристалі рубіна – оксиду алюмінію (Al_2O_3), в якому близько 0,05 % атомів алюмінію заміщені іонами хрому Cr^{3+} , широко застосовують кристали на алюмоітрієвому гранаті ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), на стеклах з домішкою іонів неодиму (Nd^{3+}), тербія (Tb^{3+}), ітербію (Yb^{3+}), ербію (Er^{3+}) і ін.

Вимушене випромінювання різних частот дають більше 250 кристалів і близько 20 стекол [1].

DPSSL і діодні лазери є двома найбільш поширеними типами твердотільних лазерів. Однак обидва типи мають свої переваги і недоліки. DPSSL зазвичай мають більш високу якість променя і можуть досягати дуже високих потужностей при збереженні щодо хорошої якості променя. Оскільки кристал, що накачується діодом, діє як власний лазер, якість вихідного променя не залежить від якості вхідного променя. Для порівняння, діодні лазери можуть досягати декількох сотень міліват, якщо вони не працюють в декількох поперечних режимах. Такі багатомодові лазери мають більший діаметр пучка і велику розбіжність, що часто робить їх менш бажаними. Фактично, в деяких додатках, таких як оптичні приводи, істотно важлива робота в одномодовому режимі. З іншого боку, діодні лазери дешеві та енергоефективні. Оскільки кристали DPSSL неефективні на 100 %, при перетворенні частоти втрачається деяка потужність. DPSSL також більш чутливі до температури і можуть оптимально працювати тільки в невеликому діапазоні. В іншому випадку лазер буде страждати від проблем зі стабільністю, таких як стрибкоподібна перебудова між модами і великі коливання вихідної потужності. DPSSL також вимагають більш складної конструкції. Діодні лазери також можуть бути точно модульовані з більшою частотою, ніж DPSSL. Твердотільні лазери, леговані неодимом, продовжують залишатися кращим лазерним джерелом для промислового застосування. Пряма накачування верхнього рівня лазера на Nd при довжині хвилі 885 нм (а не в більш традиційної широкій смузі шириною 808 нм) забезпечує потенціал підвищення продуктивності за рахунок зменшення квантового дефекту генерації, що підвищує ефективність системи, знижує вимоги до охолодження і включення подальшого масштабування потужності TEM₀₀. Через вузької 885 нм характеристики поглинання в Nd:YAG деякі системи можуть виграти від використання діодних джерел накачування з

блокуванням довжини хвилі, які служать для звуження і стабілізації спектру випромінювання накачування, щоб він був точно вирівняний з цією характеристикою поглинання. До теперішнього часу схеми фіксації потужних діодних лазерів, такі як брегівські решітки з внутрішнім зворотним зв'язком та оптика VHG з об'ємно-вирівняними об'ємними голографічними ґратами, не отримали широкого застосування через зросту вартість і передбачуваного зниження продуктивності технології. Проте, останні досягнення у виробництві стабілізованих джерел з діодним накачуванням, які використовують зовнішню синхронізацію по довжині хвилі, тепер пропонують поліпшені спектральні властивості з мінімальним впливом на потужність і ефективність. Переваги цього підходу включають підвищення ефективності лазера, ширини спектральної лінії і ефективності накачування.

1.1.2 Волоконні лазери

Волоконні лазери – це лазери з напівпровідниковим накачуванням. Вони були розроблені в 1980-х роках минулого століття. В даний час відомі моделі волоконних технологічних лазерів потужністю до 20 кВт. Сьогодні ці пристрої досягли рівня характеристик, в першу чергу, потужності, надійності, що дозволяють з успіхом використовувати їх для вирішення різних завдань лазерної обробки матеріалів. Перші волоконні лазери були створені на кварцових волокнах, легованих іонами неодиму.

Принципово конструкція резонатора волоконного лазера мало чим відрізняється від того, що використовується в звичайному твердотільному лазері з діодним накачуванням (DPSS). Основна конструкція резонатора також складається з потужних діодів накачування і схеми введення енергії накачування в активне середовище.

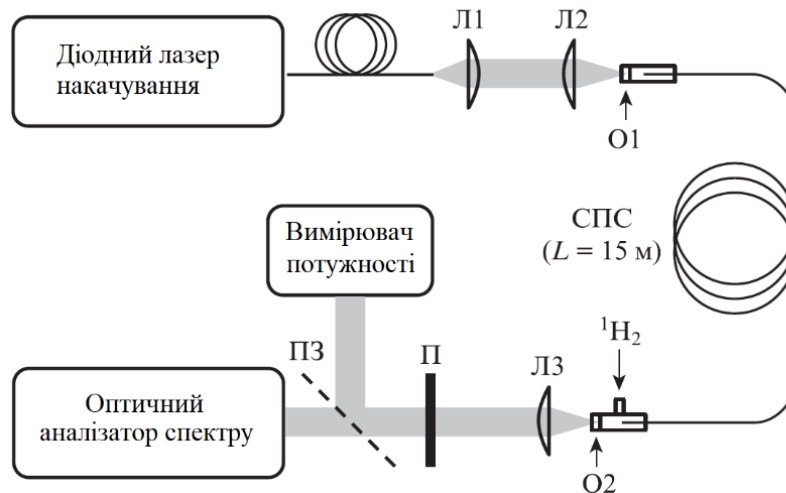


Рисунок 1.1 – Приклад застосування діодного накачування в волоконних лазерах

В даний час генерація отримана в кварцових волокнах, легованих неодимом, ербієм, ітербієм, талієм, празеодимом. Однак найбільш поширені волоконні лазери, леговані неодимом, ербієм (рис. 1.1).

Лазерне волокно довжиною в кілька десятків метрів, як правило, складається з двох волокон: центрального і внутрішнього. Внутрішнє волокно, заповнене активним середовищем (наприклад, ітербій), має діаметр в 6 – 8 мкм і знаходиться всередині кварцового (центрального) волокна діаметром 400 – 600 мкм. Внутрішні стінки волокна покриті світловідбиваючої поверхнею, тому потік квантів, що рухається, зазнає багатократне віддзеркалення. Стикаючись між собою кванти, вибивають фотони і іони рідкісноземельних елементів, які посилюють сумарний потік світла. Всі світлові хвилі, багаторазово відбиваючись, накладаються, тим самим, утворюють стоячу хвилю. Так як перетин центрального волокна має малий діаметр, а саме волокно має велику довжину, то для компактності волокно можна навити на будь-якої об'єкт.

1.1.3 Лазери на барвниках

Лазери на барвниках мають безліч застосувань, таких як спектроскопія, зондування атмосфери, поділ ізотопів. Заміна традиційних джерел накачування барвників напівпровідниковими лазерами дозволить реалізувати низьке енергоспоживання і компактність лазерів, а також знизити їх вартість. Основною проблемою при накачуванні напівпровідниковими лазерами є нестача щільності потужності для збудження молекул барвника. Поріг генерації обернено пропорційний твору часу життя в збудженому стані на перетин посилення. Хоча полоси посилення у барвників досить великі, але через малий час життя молекул в збудженому стані для помітного посилення потрібно близько 1 МВт/см^2 при поздовжньому накачуванні. Спроби здійснити накачування лазерів на барвниках напівпровідниковими лазерами були, але до недавнього часу навіть в кращих роботах ККД не перевищував 2 %. У 2015 році вийшла робота, де диференційний ККД досягає 11 % (барвник – DCM), але з резонатором непридатним для перебудови довжини хвилі і поздовжньої схемою накачування, що обмежує максимальне число використовуваних діодів всього лише двома.

Створено перебудований лазер на барвнику з діодним накачуванням. Селекція довжини хвилі здійснювалася інтерференційно-поляризаційним фільтром (ІПФ) Ліо: двупроменезаломлююча пластинка з кристалічного кварцу і скляна стопа (скло К-8), встановлені під кутом Брюстера всередині резонатора. Роль часткових поляризаторів в такій схемі виконують похилі грані пластини і стопи. Перебудова довжини хвилі генерації здійснювалася поворотом ІПФ в площині заломлюючих поверхонь. Представлений лазер на барвнику генерує в зеленій і червоній областях. Отримано області перебудови від 40 нм до 100 нм на одному барвнику, в діапазоні довжин хвиль від 510 нм до 700 нм. Виміряні

генераційні характеристики ряду лазерних барвників, в тому числі і вперше синтезованих, в ширококутовому резонаторі (без ПФ Ліо в компенсуючому плечі) при оптимальних коефіцієнтах відображення вихідних дзеркал. У цій конфігурації отримано рекордні значення диференціальних ККД для лазерних барвників з напівпровідниковою накачкою.

1.2 Активне середовище

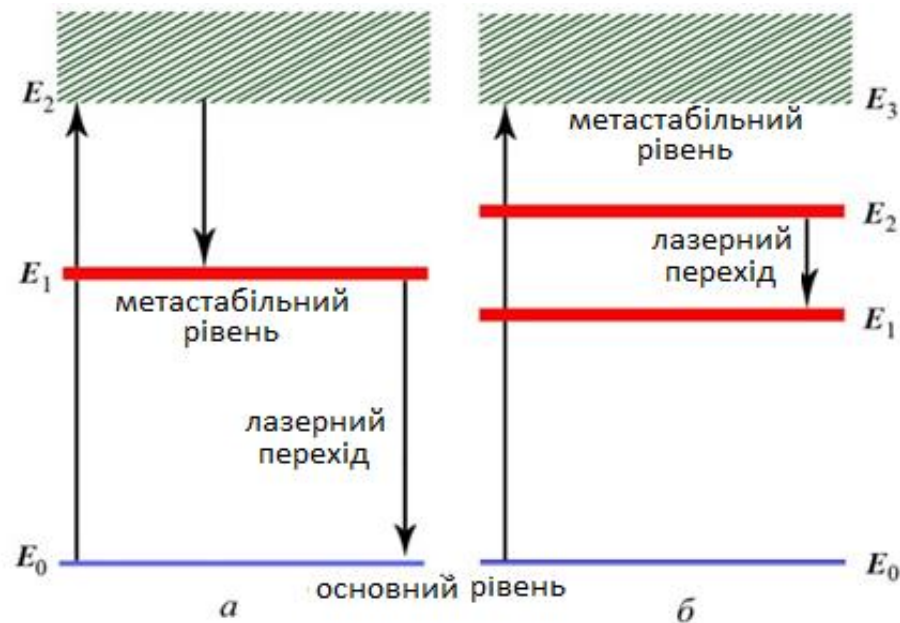
Матеріали для твердотільних лазерів використовуються такі ж, як і для лазерних підсилювачів: рубін, олександрит, алюмоітрієвий гранат, легований іонами неодиму, скло, леговане неодимом або єрбієм та ін.

Для отримання ефекту лазерної генерації активну середу на основі згаданих матеріалів необхідно просто помістити в оптичний резонатор. В якості основи для твердотільних лазерів використовуються в основному близько десятка кристалічних сполук: оксиди, гранати, фториди, ванадати, з яких найпоширенішими є: сапфір (Al_2O_3), алюмоітрієвий гранат ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (АІГ)), гадоліній-галієвий гранат ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (ГГГ)), ітрій-літієвий фторид (ІЛФ) та ванадат ітрію (YVO_4). Серед скляних основ можна виділити сполуки на основі кварцу (некристалічний SiO_2 або кварцове скло), фосфатовмісних з'єднання, які використовуються в потужних імпульсних лазерах [1].

Всі ці активні елементи працюють або на трьох- або на чотирьохрівневій схемі (рис 1.2).

На відміну від лазерів на основі скла, лазери на кристалічній основі мають більш вузьку спектральну лінію (і, відповідно, більш низьку порогову різницю заселеності), нижчий рівень легування, підвищену стійкість до опромінення (ультрафіолет в спектрі газорозрядної лампи призводить до потемніння), і більш високу теплопровідність. З іншого боку лазери на скляній основі володіють також безсумнівною перевагою: вони ізотропні, їх легко виготовити в

потрібному розмірі і формі, поверхня легко піддається обробці, а однорідне легування домішками не складає особливих труднощів. Оскільки стекла – погані провідники тепла, вони переважно використовуються в потужних лазерах, які працюють в імпульсному режимі з малим заповненням (тобто з великою скважністю імпульсів) [2].



а – трьохрівнева схема;

б – чотирьохрівнева схема.

Рисунок 1.2 – Схема рівнів лазера

Іонізовані домішки, які є активним середовищем кристалічних лазерів, найчастіше відносяться до рідкоземельних і перехідних металів. Іноді зустрічаються лазери з іонами актинідів. Домішкові іони розподіляються зазвичай по всій твердотільній основі і поведуться як незалежні джерела випромінювання. Концентрація домішок зазвичай становить близько 1 %, але є лазери містять від 0,01 % до 50 % домішок (все залежить від матеріалу господаря, домішок і призначення). Щоб уникнути появи дефектів або

механічних напруженостей у склі, активні середовища намагаються вибирати з такими поєднаннями, щоб розміри атома домішки і атомів, які будуть заміщатися у матеріалу-господаря приблизно збігалися [1, 2].

Отримані безліч активних середовищ досить широко, найбільшого поширення набули такі поєднання: $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$; $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$; $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$; Ti^{3+} : сапфір; Er^{3+} : кварцове волокно.

Найбільш важливі лазери на основі діелектриків, легованих рідкоземельними елементами: $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$; $\text{Ho}^{3+}:\text{YAG}$; $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$; оптоволокно, леговане тулієм.

Енергетичні рівні (але не їх тонка структура) іонів рідкоземельних елементів по суті не залежить від матеріалу-господаря, оскільки 4f-електрони добре захищені від решітки заповненими 5s- і 5f-рівнями.

Рубіновий лазер зараз використовується крайне рідко, хоча і був винайдений першим. Олександрит іноді знаходить своє застосування в дерматології.

1.2.1 Активне середовище на основі іонів ербію

Монокристали оксиду ербію використовуються в якості високоефективних лазерних матеріалів.

З усіх смуг поглинання іонів ербію в кварцовому склі для накачування лазерів в переважній більшості випадків використовується смуга поглинання на 980 нм і короткохвильовий край смуги з максимумом поглинання в районі 1530 нм. Даний факт насамперед пов'язаний з наявністю ефективних джерел накачування на даних довжинах хвиль. Також подальше зменшення довжини хвилі накачування, наприклад для волоконних лазерів, при використанні діодів в області 800 нм, призводить до зниження ефективності роботи світловода і збільшення його нагрівання в силу зростаючого квантового дефекту.

На даний час ербієві лазери є найбільш поширеними джерелами півторамікронного лазерного випромінювання. Як всякі твердотільні лазери, їх відрізняє простота, достатня компактність і можливість масштабування. Також їх перевагою є велика (до 7 – 8 мс) час життя верхнього лазерного рівня. Великий час життя легко дозволяє здійснювати накопичення енергії інверсної населеності в лазерній середовищі для її подальшого випромінювання у вигляді коротких потужних імпульсів (режими модуляції добротності і посилення імпульсного випромінювання), що потрібно в переважній більшості застосувань.

Однак оскільки нижнім лазерним рівнем є основний стан, для виникнення інверсії на зазначеному переході необхідно порушити близько половини іонів ербію. Такий високий необхідний рівень збудження укупі з обмеженою потужністю джерел оптичного накачування призводять до обмеження концентрацій ербію в лазерній середовищі. Невисокі (зазвичай порядку декількох десятих вагового відсотка) концентрації ербія роблять неможливу ефективну пряму оптичну накачування при невеликих габаритах активних елементів лазерів. В волоконній техніці (де ербієві лазери і підсилювачі отримали велике поширення) ця проблема може бути вирішена за рахунок великої довжини активного елементу. Предметом же цієї роботи є лазери на малогабаритних об'ємних елементах. У цьому випадку проблема може бути вирішена введенням в активну середу достатньої кількості сенсibilізаторів, поглинаючих випромінювання накачування і безвипромінювальним чином передають її до лазерним іонів. Для іонів ербію ефективними сенсibilізаторами є іони ітербію Yb^{3+} , які мають єдину, але сильну (особливо при високій концентрації Yb^{3+}) смугу поглинання в області від 0.9 мкм до 1 мкм.

В активному середовищі з іонами ербія генерація випромінювання відбувається за трьохрівневою схемою. Причина, по якій використовуються

іони ербія полягає в тому, що атом ербія має енергетичні рівні, які відповідають області прозорості скла з якого виготовлений світловод. Робочі рівні ербія можуть поглинати енергію випромінювання на довжині хвилі 980 нм і 1480 нм, а генерувати випромінювання на довжині хвилі 1550 нм. Схема енергетичних рівнів ербія зображена на рис.1.3.

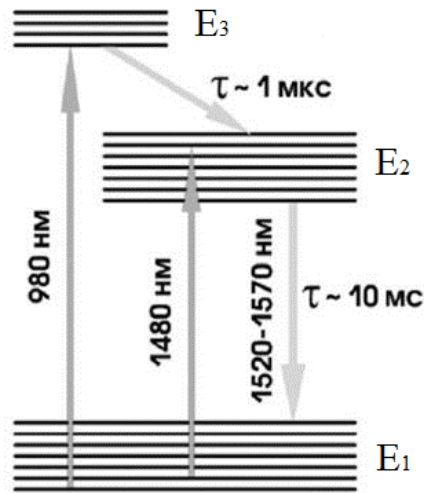


Рисунок 1.3 – Схема енергетичних рівнів ербія

Інверсія населеності досягається накачуванням довжиною хвилі 980 нм на рівень E_3 , а також можливе накачування довжиною хвилі 1480 нм на підрівень метастабільного рівня E_2 . При накачуванні $\lambda = 980$ нм, перехід з верхнього на робочий рівень $E_3 \rightarrow E_2$ є швидким безвипромінювальним переходом. Час життя метастабільного рівня E_2 становить 10 – 12 мс в залежності від складу скла. Генерація відбувається на переході з робочого на основний рівень $E_2 \rightarrow E_1$. Довжина хвилі накачування спеціально підбирається для спектра поглинання активної речовини (рис. 1.4).

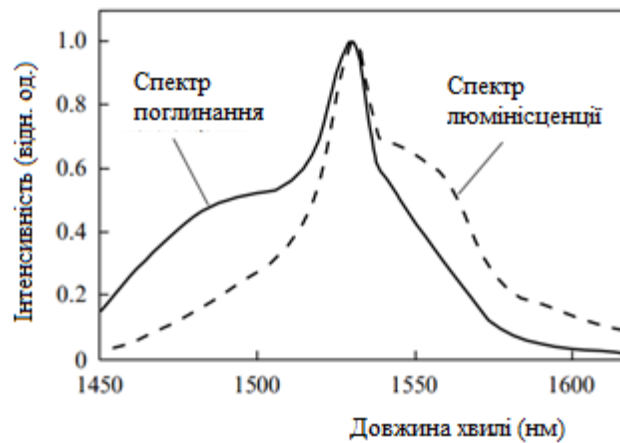


Рисунок 1.4 – Спектр поглинання и люмінесценції іонів ербія

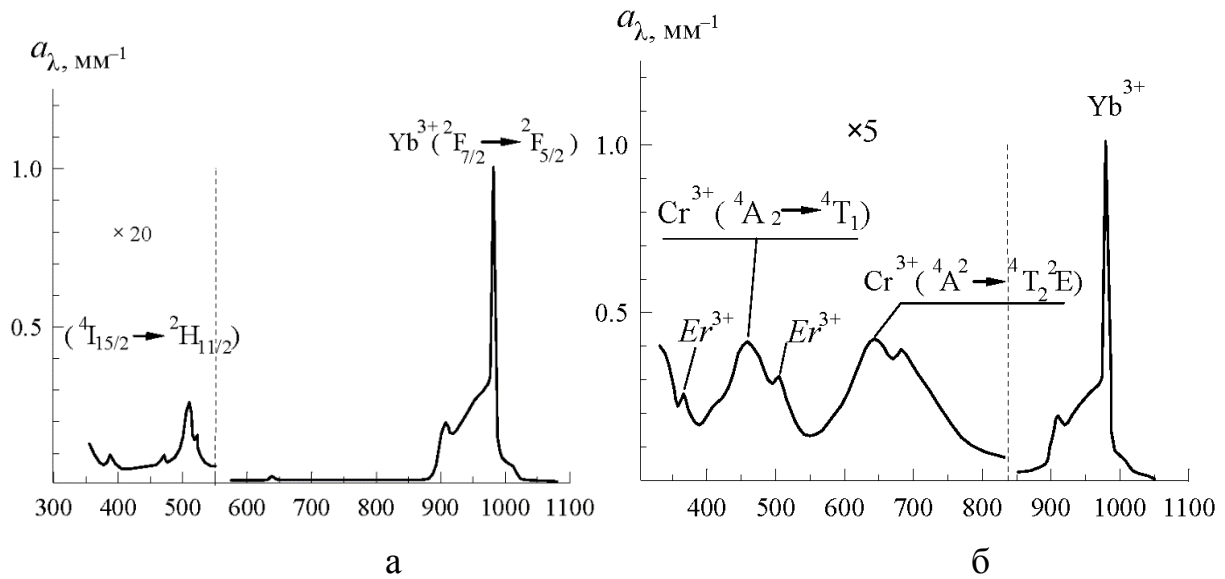
Для отримання ефективної генерації потрібне створення високого ступеня інверсії. Як видно на рис. 1.4 в спектральній області 1,56 – 1,6 мкм люмінесценція домінує над поглинанням, що дозволяє знизити вимоги до ступеня інверсії населеності і використовувати активні середовища з більшим діаметром і потужні джерела накачування [3].

Активним елементом для таких лазерів може застосовуватися ітербій-ербієве скло. Активними центрами в цих стеклах служать іони Er^{3+} , що випромінюють на переході $I_{13/2} \rightarrow I_{15/2}$ ($\lambda = 1,536$ мкм). Особливістю цього переходу є те, що генерацію на ньому можна отримати тільки при порівняно низьких концентраціях іонів ербію ($\leq 1\%$). При низьких концентраціях слабкі полоси поглинання, які відповідають переходам іона Er^{3+} та не можуть забезпечити високу оптичну щільність активного елементу і як результат низька ефективність використання випромінювання ламп накачування. Слабкі смуги поглинання, низькі значення поперечного перерізу стимульованого випромінювання і трирівнева схема роботи ербія призводять до вельми високих порогів і низького ККД генерації, що не дозволяє досягти практично прийнятних лазерних параметрів. За цих обставин єдиним шляхом підвищення

ефективності півторамікронного лазера є використання ефекту сенсibilізації. Як сенсibilізатор широко використовується іон ітербію Yb^{3+} [7, 8]. Використання тривалентного ітербію як сенсibilізатора, дозволило дещо поліпшити енергетичні показники лазера. Однак, оскільки ітербій має лише одну смугу поглинання з максимумом приблизно 975 нм, положення і форма якої слабо залежать від складу скла, ефективність використання випромінювання накачування навіть ітербій-ербієвими стеклами досить низька.

Більш ефективним додатковим сенсibilізатором для цих стеклов є неодим Nd^{3+} [7, 8]. Використання трикомпонентної системи неодим-ітербій-ербій призводить до деякого поліпшення енергетичних параметрів лазерних стеклов. Однак, застосування іонів неодиму, як додаткового сенсibilізатора, все ж обмежено через гасіння люмінесценції ербія неодимом внаслідок зворотної передачі енергії електронного збудження [8, 9]. Цього можна уникнути, якщо застосовувати активні елементи у вигляді багат шарового активованого скла [8]. У таких активних елементах оболонка виготовлена зі скла з Nd^{3+} і Yb^{3+} , а серцевина – скла з Yb^{3+} і Er^{3+} . Більш ефективним виявилось, однак, застосування в якості додаткового сенсibilізатора в фосфатних ітербій-ербієвих стеклах тривалентного іона хрому [9]. Випускаються в даний час ербієві фосфатні скла, наприклад, російські скла ЛМР-Х, ЛМР-ХМ (фірма "ІРЕ-Полюс"), КГСС 0135/15, КГСС 0185/132 (фірма НІТІОМ ВНЦ "ГОІ"), які мають високі експлуатаційні характеристики [9]. Повний ККД лазерів на цих стеклах знаходиться в межах від 1 % до 3 %, що порівняно з ККД неодимових лазерів складає 2 – 5 %.

Деякі характерні спектри поглинання ербієвого скла представлені на рис. 1.5. На ньому зображений спектр поглинання ербієвого скла без іонів хрому (рис. 1.5, а), а на рис. 1.5, б – при наявності Cr_2O_3 з концентрацією 0,06 мас %.



а – без іонів ербію;

б – з 0,06 % мас. Cr_2O_3 .

Рисунок 1.5 – Спектри поглинання ербієвого скла

З рисунку видно, що смуги поглинання ербія вузькі і слабкі, що є однією із основних перешкод для отримання ефективної генерації на склі, що не містить додаткових сенсibilізаторів. Крім того, область спектра від 550 нм до 900 нм, де висвічується значна частка світлової енергії лампи накачування, навіть при наявності в якості сенсibilізатора іонів ітербію залишається невикористаною. Ця обставина і є однією з причин високих порогів генерації ітербій-ербієвих стекол.

1.3 Методи накачування ербієвих лазерів

Накачування твердотільних лазерів здійснюється оптичним шляхом. Для цього електрична енергія за допомогою спеціальних ламп накачування або за допомогою напівпровідникових лазерних діодів перетворюється в оптичне

випромінювання, яке поглинається атомами активної речовини, переводячи їх в збуджений стан. Наявність такого проміжного процесу перетворення електричної енергії накачування знижує загальний ККД твердотільних лазерів, що не перевищує кількох відсотків при ламповому накачуванні і досягає 30 % при накачуванні інжекційними лазерами [3].

1.3.1 Діодне або лазерне накачування

Поява в кінці 80-х років потужних діодів дозволило створювати малогабаритні блоки діодної накачки і розробляти на їх основі твердотільного лазера (ТТЛ) кіловатного рівня потужності.

Висока квантова ефективність і вузька ширина лінії генерації лазерного діода дозволяють здійснювати селективне накачування в лінію поглинання активного елементу з високим оптичним ККД, що досягає значення приблизно 50 %. Оскільки діоди виготовляються у вигляді готових до використання дискретних модулів, все, що їм потрібно – це фокусування і джерело енергії. Вони малочутливі до вібрацій, ударів і інших зовнішніх механічних впливів. Також може використовуватися інжекційні напівпровідниковий лазер.

При накачування лазерних активних середовищ (АС), які мають вузькі лінії поглинання, необхідно враховувати ширину спектра випромінювання діодних лазерів. Спектральна ширина діодних лазерів може становити приблизно 1 нм, що добре узгоджується з спектральної шириною багатьох твердотільних АС.

Існує два типи геометрії накачування діодними лазерами: а) поздовжнє накачування, при якому випромінювання накачування вводять в АС уздовж осі резонатора; б) поперечне накачування, при якій випромінювання накачування вводять в АС з одного або декількох напрямків, перпендикулярних осі резонатора.

1.3.2 Поперечне накачування

Головна відмінність лазерів з діодним накачуванням від «лампових» полягає в більш високій ефективності перетворення випромінювання потужних лазерних діодів, що дозволяє уникнути високого електроспоживання, інтенсивного зовнішнього водяного охолодження (зазвичай внутрішній контур водяного охолодження активного тіла лазера все ж необхідний). Очевидно, це робить системи з такими лазерами дуже зручними в експлуатації. Їх головною перевагою є високий, понад 50 %, ККД [5].

Схеми накачування за допомогою матриць лазерних діодів можуть відрізнятися кількістю та положенням цих діодів. Приклад схеми твердотільного лазера з діодним накачуванням приведена на рис.1.6 і складається з наступних конструктивних елементів: 1 – непрозоре дзеркало; 2 – лазерні діоди оптичного накачування; 3 – активний елемент; 4 – корпус; 5 – заслінка; 6 – вихідне дзеркало; 7 – модулятор світла; 8 – фокусуюча оптична система [4].

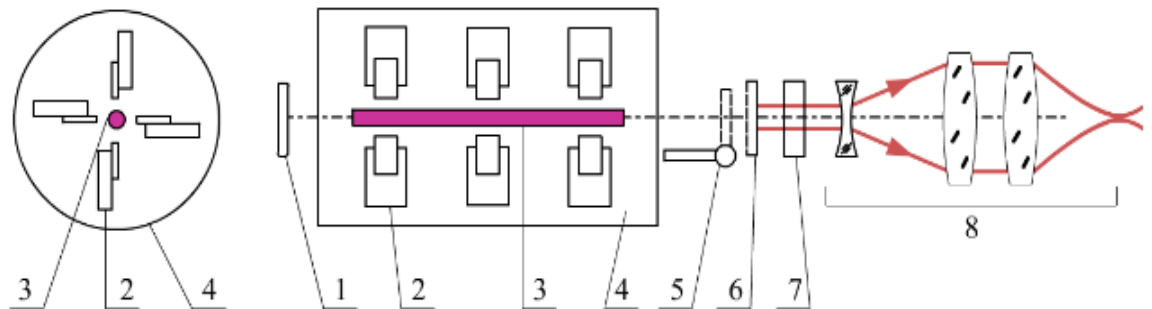


Рисунок 1.6 – Схема твердотільного лазера з діодним накачуванням

Квантрон (вузол накачування активного елемента) потужного твердотільного лазера призначений для роботи в безперервному (CW) та квазібезперервному (QCW) режимах і розрахований на вихідну потужність від 300 Вт до 600 Вт, в залежності від використовуваних діодних лінійок (рис. 1.7).

У квазібезперервному режимі квантрон розрахований на потужність накачування до 5 кВт [4].



Рисунок 1.7 – Квантрон з лінійками лазерних діодів

Розподіл люмінесценції підсилюється випромінюванням при накачуванні діодними лазерами (рис. 1.8).

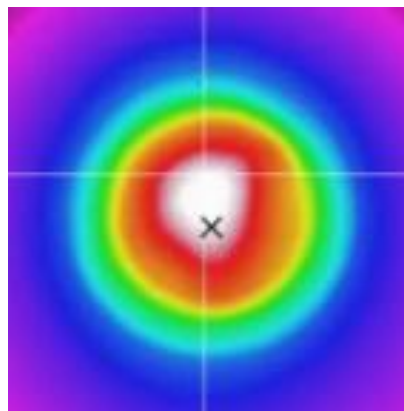


Рисунок 1.8 – Розподіл за поперечним перерізом активного елементу випромінювання при накачуванні діодними лазерами

Діодне накачування дозволяє отримати високу ефективність генерації, якість випромінювання при відносній простоті реалізації і компактності. Перевага лазерів з діодним накачуванням пов'язана з тим, що випромінювання лазерних діодів спектрально узгоджується зі смугами поглинання активаторних іонів в кристалі, що генерує.

Через відносно високу дифракційну розбіжність випромінювання напівпровідникових лазерів основні її переваги можуть бути ефективно реалізовані в лазерах з малою (близько одного міліметра) довжиною активного елементу. Підвищення ефективності твердотільних лазерів з діодним накачування може бути досягнуто за рахунок оптимізації резонатора, що узгоджує оптики і джерела накачування.

Основна перевага DPSS-лазерів в порівнянні з лазерними діодами – висока якість випромінювання, як з точки зору монохроматичності, так і з точки зору фокусування і розбіжність променя. DPSS-лазери мають більш вузький діапазон довжин хвиль (менше 1 нм в порівнянні з 5 – 20 нм у доданих лазерів) і значно меншу розбіжність променя. Завдяки низькій залежності вихідного променя від вхідного можливе використання більш дешевих і потужних багатомодових лазерних діодів як джерело накачування, а також лінійки з декількох діодів, які накачують один кристал.

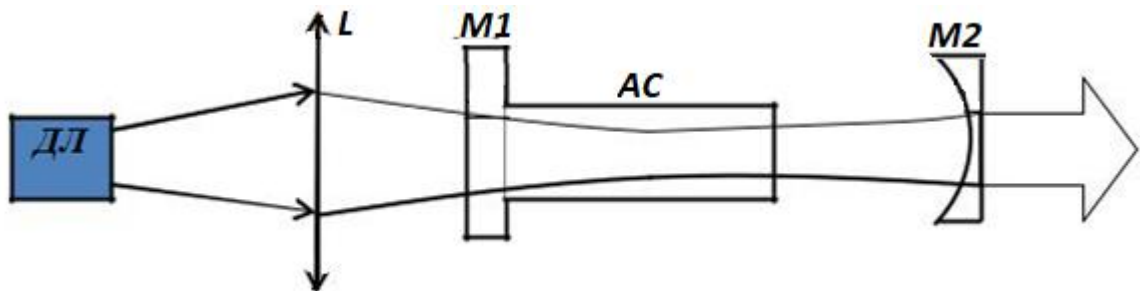
З іншого боку напівпровідникові лазери простіше у використанні і дешевше DPSS, мають більший ККД. Лазерні діоди продаються у вигляді закінчених дискретних елементів, які вимагають тільки електроживлення та фокусування, в той час як твердотільний лазер містить багато додаткових, прецизійних деталей, чутливих до ударів і вібрацій. У разі, якщо висока якість променя не потрібна, багатомодові лазерні діоди видають велику потужність при тих же (або менших) габаритах і електроживленні. Крім того, лазерні діоди можуть працювати при більшому діапазоні температур і витримують більш високочастотний режим модуляції.

1.3.3 Поздовжнє накачування

Для поздовжнього накачування випромінювання діодного лазера фокусується в активному елементі в малу ($0,1 - 1$ мм) пляму по можливості круглого перетину.

На рис. 1.9. приведена найпростіша оптична схема лінійного резонатора з вихідним сферичним дзеркалом. Використання блоку лінійок діодних лазерів в комбінації зі світловолоконною оптичною системою передачі випромінювання в АС дозволяє досягти ефективності перетворення випромінювання накачування в лазерне випромінювання до 50 %.

При поперечному накачуванні можна використовувати АС у вигляді пластин або стрижнів.



ДЛ – діодний лазер; L – плосковипукла лінза; M1 і M2 – дзеркала резонатора; АС – активне середовище

Рисунок 1.9 – Оптична схема лінійного резонатора з поздовжнім діодним накачуванням

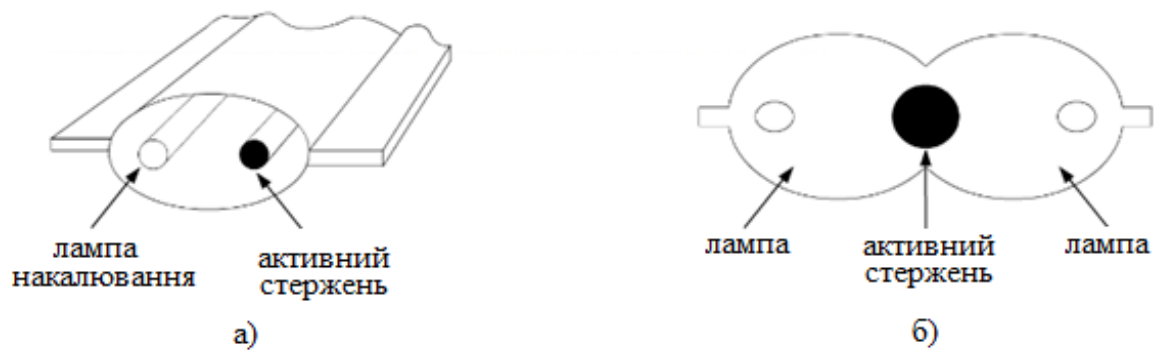
Порівняння некогерентного накачування (лампове накачування) з когерентним накачуванням (поздовжнє і поперечне діодне накачування) дозволяє отримати оптимальні вихідні параметри лазерного випромінювання.

Порівняння можна провести з точки зору чотирьох чинників ККД: η_r , η_t , η_a , і η_{pq} . Отже, повний ККД можна обчислити за формулою:

$$\eta_p = \eta_r \eta_t \eta_a \eta_{pq} . \quad (1.1)$$

1.3.4 Лампове накачування

При ламповому накачуванні використовують квантрон різних видів як еліптичні, так і круглі, в яких можливе накачування однієї лампи декількох стрижнів, і навпаки один стрижень – кілька ламп накачування (рис 1.10).



а – еліптична з одним стрижнем і однією лампою;

б – подвійний еліпс з двома лампами накачування.

Рисунок 1.10 – Конструкції квантронів

Схема твердотілого лазера з ламповим накачуванням представлена на рис. 1.15. У конструкцію входить: 1 – непрозоре дзеркало; 2 – лампа накачування; 3 – активний елемент, 4 – відбивач; 5 – заслінка; 6 – вихідне дзеркало; 7 – модулятор світла; 8 – фокусуюча оптична система. Це перевірене надійне рішення, адже компоненти таких лазерів відпрацьовувалися протягом

декількох десятиліть, і сьогодні їх виробництвом займаються сотні компаній в усьому світі [4].

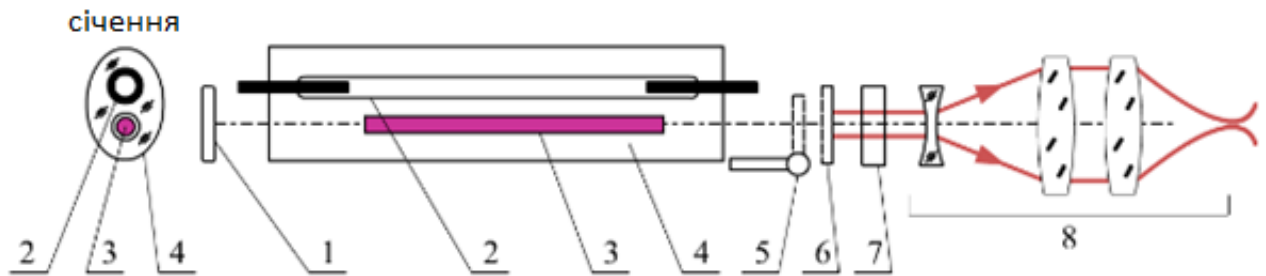


Рисунок 1.11 – Схема твердотілого лазера з ламповим накачуванням

Однак «ламповим» лазерам притаманний ряд недоліків, які змушують в деяких випадках шукати їм заміну: невисокий коефіцієнт корисної дії, велике енергоспоживання, необхідність в зовнішньому водяному охолодженні і періодичної заміни ламп накачування.

Розподіл люмінесценції підсилюється випромінюванням при ламповоу накачуванні (рис. 1.12).

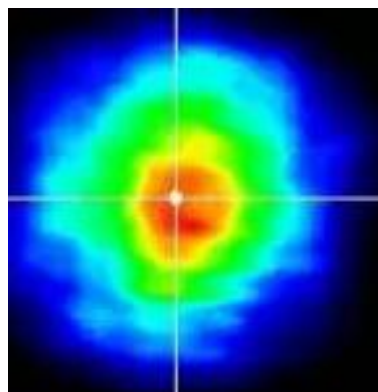


Рисунок 1.12 – Розподіл за поперечним перерізом активного елемента випромінювання при ламповому накачуванні

1.3.5 Порівняння лампового і діодного накачування

Основні переваги лазерних діодів над імпульсними лампами в якості джерел накачування є загальна лазерна ефективність і збільшення терміну служби. Збільшення ефективності пов'язано з більш ефективним використанням оптичного випромінювання накачування.

Лампи і лазерні діоди обмежені часом життя, але лазерний діод має час життя значно більше. При безперервній роботі, лампи повинні замінюватися кожні кілька сотень годин, а лазерні діоди мають час життя на порядок вище, це десятків тисяч годин. В імпульсному режимі, час життя лазерних діодів становить близько 10^9 імпульсів в порівнянні зі значенням для імпульсних ламп в 10^7 імпульсів. Довгий термін служби лазерного діода, як джерела накачування, має особливу перевагу в космічних лазерних системах, так як заміна джерела накачування буде дорога.

Основним недоліком лазерних діодів в якості джерел накачування це економічний аспект; вони набагато дорожче, ніж лампові або дугові лампи. У поточних цінах, лампа, необхідна для збудження лазерного 10Вт-середньої потужності становить кілька сотень доларів; вартість еквівалентного числа лазерних діодів становить десятки тисяч доларів. Прогнози вказують, однак, що ціна лазерних діодів значно знизиться, оскільки обсяг виробництва збільшується, аналогічно іншим напівпровідниковим технологіям, таким як інтегральні схеми.

У табл. 1.1 наведені оцінки величин лампової, поперечної і поздовжньої лазерної конфігурацій накачування. У разі поздовжньої лазерного накачування наведені дані для АС з кристалічного стержня YAG: Nd³⁺ з довжиною 1 см, а для поперечного лазерного накачування АС – кристалічний стрижень з YAG: Nd³⁺ з діаметром 4 см.

Таблиця 1.1 Порівняння ККД лампової накачки і накачування випромінюванням діодних лазерів

Конфігурація накачування	η , %	ηt , %	ηa , %	ηpq , %	ηp , %
Лампова	43	82	17	59	3.5
Лазерна поперечна	50	80	90	82	30
Лазерна поздовжня	50	80	98	82	32

З табл. 1.1 видно, що випромінювальна ефективність η і ефективність передачі ηt є приблизно однаковими для накачування від лампи і діодного лазера. Майже десятикратне збільшення повного ККД при накачуванні від діодного лазера обумовлено ефективністю поглинання ηp майже в 6 разів і збільшенням квантового виходу накачування ηpq приблизно в 1,5 рази.

Також видно, що поперечна і поздовжня лазерні накачування приблизно рівні при злегка меншою величиною ефективності поглинання ηa для поперечної накачування.

Істотно, що при високій ефективності і більш низькому порозі когерентне випромінювання, в порівнянні з некогерентним випромінюванням, має додаткову перевагу в тому, що надає в 2 рази менше теплове навантаження на АС, ніж лампове накачування. Це призводить до зменшення утворення теплової лінзи і появи наведеного двупроменезаломлення в АС. Ці два ефекти є важливими факторами для отримання високоефективного пучка лазерного випромінювання в одній поздовжній і поперечній моді.

1.4 Режими роботи лазерів.

1.4.1 Режим вільних коливань

Якщо в процесі роботи лазера параметри резонатора (втрати і пов'язана з ними добротність) залишаються незмінними, лазер працює в так званому "режимі вільних коливань". Очевидно, що в цьому випадку при стаціонарному накачуванні лазер буде працювати в безперервному режимі, при імпульсному накачуванні – в імпульсному. У безперервному режимі лазер генерує при пороговій інверсії населеності. Вихідне випромінювання має вигляд неупорядкованих піків тривалістю порядку одиниць мікросекунд.

Часто інтенсивність випромінювання між піків також має ненульову величину. Перевагою безперервного режиму є те, що в цьому режимі найбільш повно реалізуються такі властивості лазерів, як монохроматичність, когерентність, спрямованість і низький рівень шумів випромінювання.

Безперервні лазери мають найширший діапазон застосування. Можна виділити датчики контролю технологічних процесів, зв'язок, лазерну технологію, зокрема різання і зварювання з великими глибинами проплавлення. В імпульсному режимі накачування носить імпульсний характер (тривалість імпульсу накачування може варіюватися від десятків мікросекунд до сотень мілісекунд), лазер генерує поблизу порога, а генерація має вид гребінки, досить нерегулярних по амплітуді і частоті проходження піків, що з'являються в результаті конкуренції зростання інверсії за рахунок накачування і зменшення її за рахунок висвітлювання фотонів.

Характерна тривалість піку в гребінці – одиниці мікросекунд, інтервал між піками – десятки мікросекунд, кількість піків в гребінці від 10 до 1000. Цей режим в основному застосовується в технології товстолистових матеріалів, зварювання, різання з великими глибинами проплавлення. Окремо слід виділити режими генерації повторюваних імпульсів:

Імпульсно-періодичний (ІП), що має на увазі генерацію імпульсів в режимах вільної генерації або модуляції добротності з частотами повторення 5 – 100000 Гц.

Квазібезперервний режим. В цьому режимі частота повторення досягає десятків гігогерц. Характерною відмінністю від ІП режиму є те, що середня потужність квазібезперервних генерації порівнянна з піковою потужністю складових імпульсів. Він використовується в локації, зв'язку, різних технологічних процесах.

1.4.2 Режим модульованої добротності

Для ряду застосувань важливо скоротити тривалість імпульсу, тому що при заданій енергії імпульсу пікова потужність лазера зростає зі зменшенням його тривалості. З цією метою розроблено метод модульованої добротності (модулюється добротність резонатора), що складається в наступному: попередньо виробляють оптичне накачування, штучно перешкоджаючи виникненню генерації. Це здійснюють, наприклад, поміщаючи усередині резонатора оптичний затвор. При закритому затворі генерація неможлива, і енергія накопичується в резонаторі у вигляді наростаючої кількості збуджених атомів. Якщо потім швидко відкрити затвор, то вся запасена енергія збудження, або більша її частина висвічується у вигляді короткого світлового імпульсу. Тривалість такого лазерного імпульсу визначається або швидкістю відкривання затвора або, якщо ця швидкість досить велика, часом встановлення електромагнітного поля в резонаторі.

Режим модульованої добротності здійснюється наступним чином: після досягнення максимальної інверсії добротність резонатора швидко збільшується, втрати зменшуються і починає розвиватися генерація, проходячи спершу лінійний етап розвитку з спонтанного випромінювання, а потім швидкий

нелінійний етап, за час якого, збережена в робочому речовині енергія вихлюпується у вигляді короткого (на практиці до $3 - 10$ нс) і потужного імпульсу. Типові значення потужностей відповідають $10^7 - 10^8$ Вт, рекордні від 10^{13} Вт до 10^{15} Вт. Наприклад, для рубінового лазера, що дає в режимі вільних коливань $P = 10^3$ Вт, в режимі модульованої добротності $P = 10^8$ Вт, тобто зростає на п'ять порядків.

В цьому режимі застосовуються різні типи оптичних затворів: механічно обертаються дзеркала і призми, осередки Керра і Поккельса, керовані електричним сигналом, і т.п. За допомогою оптичних затворів зазвичай отримують імпульси тривалістю від 10^{-7} сек до 10^{-8} сек.

Повна енергія імпульсу в режимі модульованої добротності виявляється меншою, ніж в режимі вільної генерації. Проте, виграш в потужності за рахунок зменшення тривалості імпульсу досягає декількох порядків.

Режим модуляції добротності знайшов безліч застосувань: локація, лідари, науковий експеримент, лазерна технологія тонколистових матеріалів.

1.5 Методи модуляції добротності ербієвого лазеру

Лазери з модульованою добротністю можуть працювати або в імпульсному режимі, або в імпульсно-періодичному режимі. При цьому для забезпечення імпульсно-періодичного режима необхідно безперервне накачування. Залежно від режиму роботи лазера застосовують активний чи пасивний методи модуляції. Модулятори добротності, в яких використовуються механічні вузли, є активними. Однак модуляцію добротності можна здійснити і автоматично, без зовнішніх керуючих пристроїв, такі модулятори називаються пасивними.

1.5.1 Активні модулятори

Для активної модуляції використовуються затвори: 1. Оптико-механічні. 2. Акустооптичні. 3. Електрооптичні.

1. Оптико-механічні затвори. З різних механічних затворів найбільш поширеним вважається спосіб модуляції добротності, в якому використовується обертання одного з дзеркал резонатора навколо перпендикулярної осі. У цьому випадку висока добротність досягається в той момент, коли дзеркало, яке обертається, приходить в стан, в якому воно паралельно другому дзеркалу резонатора. Для того, щоб послабити вимогу до юстування, замість дзеркала встановлюють 90-градусну призму, у якій ребро прямого кута перпендикулярно осі обертання. На рис. 1.13 приведена оптична схема такого оптико-механічного модулятора добротності з призмою, яка обертається.

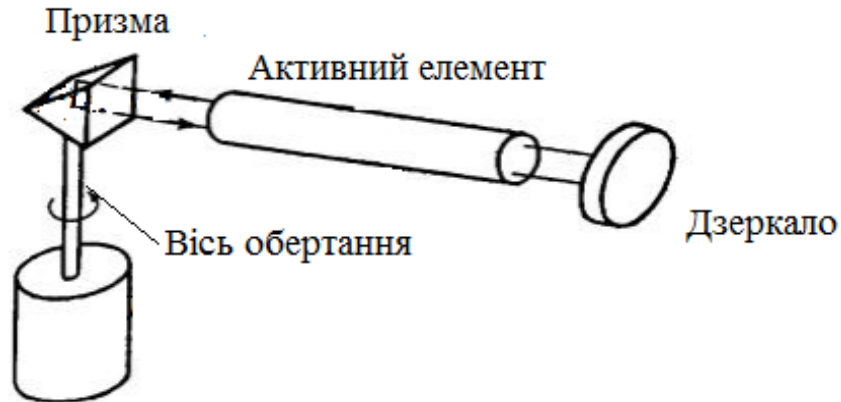


Рисунок 1.13 – Схема оптико-механічного модулятора добротності

Модулятори добротності з обертанням призми є простими і недорогими пристроями і можуть бути виготовлені для будь-якої довжини хвилі. Однак вони створюють шум при роботі і забезпечують повільну модуляцію добротності внаслідок того, що швидкість обертання дзеркал має обмеження.

2. Акустооптичні модулятори добротності. Принцип дії акустооптичного модулятора заснований на зміні коефіцієнта заломлення середовища при поширенні в ній ультразвукової хвилі. В якості таких середовищ застосовують оптично прозорі матеріали, що мають великі значення акустооптичних постійних (наприклад, плавлений кварц для видимого діапазону, германій для інфрачервоного діапазону). Конструктивно акустооптичний модулятор виготовляється наступним чином: з однієї сторони оптично прозорого матеріалу прикріплюється п'єзоелектричний перетворювач, підключений до джерела ультразвукової хвилі. Протилежна сторона перетворювача зрізана під деяким кутом і на неї нанесений поглинач акустичної хвилі, для того, щоб в середовищі не утворилися відбиті хвилі, а залишилися тільки бігучі хвилі. Наведена ультразвукова хвиля викликає в середовищі періодичну зміну показника заломлення з періодом, рівним періоду ультразвукової хвилі. На рис. 1.14 показано проходження лазерного променя в акустооптичному модуляторі.

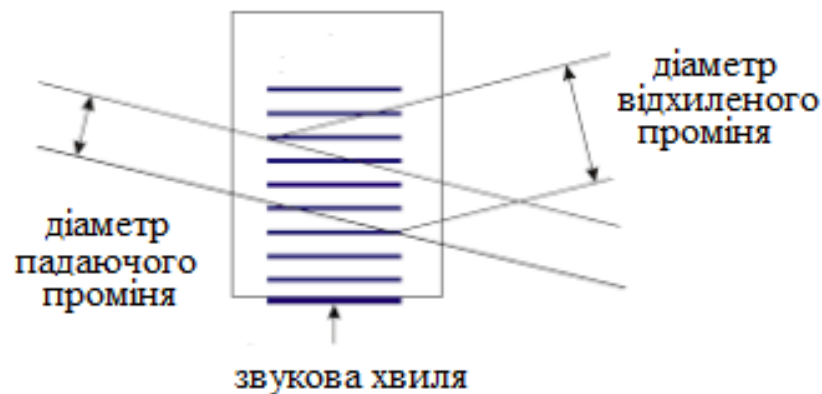


Рисунок 1.14 – Принцип роботи акустооптичного модулятора добротності

Якщо акустооптичний модулятор помістити в резонатор лазера, то до тих пір, поки до перетворювача прикладена електрична напруга, в резонаторі будуть додаткові втрати. Частина лазерного пучка виводиться з резонатора

внаслідок дифракції на наведеній фазовій дифракційній решітці, утвореної високочастотним генератором в оптичному матеріалі акустооптичної осередки. Якщо вимкнути електричну напругу на перетворювачі, лазер повертається в стан з високої добротності.

Основною перевагою акустооптичних модуляторів є те, що вони вносять мало втрат лазерного променя і можуть працювати в імпульсно-періодичному режимі з високою частотою повторення. Однак вони мають невелику швидкість перемикання добротності.

3. Електрооптичні модулятори засновані на електрооптичному ефекті, зазвичай на ефекті Поккельса. Осередок Поккельса є нелінійний кристал (наприклад, кристал ніобата літію та ін.), показник заломлення якого змінюється під впливом зовнішнього електричного поля. Розглянемо лінійно-поляризований світловий промінь, падаючий під кутом 45° на площину xu кристала. В осередку Поккельса світловий промінь розкладається на дві компоненти: E_x і E_y . На виході кристала обидві компоненти набувають різні фазові набіги, різниця між якими визначається співвідношенням:

$$\Delta\varphi = k_0 \Delta n L,$$

де $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ – хвильове число;

$\Delta n = n_x - n_y$ – величина наведеного двопріміневе заломлення;

L – довжина кристала.

Якщо прикладена зовнішня напруга таке, що $\Delta\varphi = \pi/2$, то дві компоненти будуть відрізнятися по фазі на $\pi/2$, так що коли компонента досягає максимуму, компонента y дорівнює нулю і навпаки, коли хвиля стає поляризованою по колу. На рис. 1.15. приведена оптична схема імпульсного лазера з електрооптичними властивостями модулятора у середині резонатора.

Проходячи через комірку Поккельса промінь відбивається від дзеркала M_2 і ще раз проходить через комірку, набуваючи додатковий зсув фази на $\pi/2$ так, що сумарний фазовий зсув по осях x і y становить π .

Таким чином, коли компонента x позитивна і максимальна, компонента y досягає свого максимального від'ємного значення. В результаті повне світлове поле E знову лінійно поляризоване, але напрямок його поляризації складає кут 90° з напрямком поляризації падаючої хвилі. Отже, це випромінювання не пропускається поляризатором, а відбивається з резонатора назовні. Такий стан відповідає закритому режиму. Модулятор відкривається, коли зовнішня напруга вимикається, при цьому зникає наведене двопріміневе заломлення і промінь світла проходить без зміни поляризації.

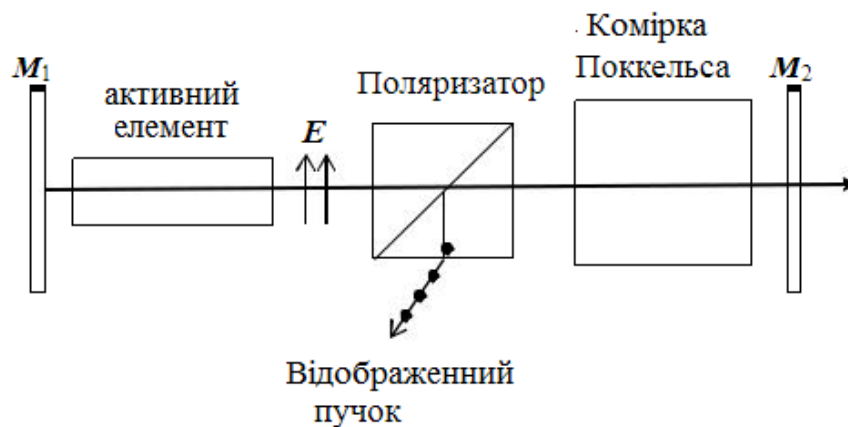


Рисунок 1.15 – Оптична схема лазера з електрооптичним модулятором

Величина прикладаємої зовнішньої четвертьхвильової напруги змінюється в межах від 1 кВ до 5 кВ, в залежності від типу нелінійного кристала, довжини хвилі лазерного променя і конфігурації поля.

1.5.2 Пасивні модулятори

Модулятори добротності, для управління параметрів яких не потрібні додаткові пристрої, називаються пасивними.

Принцип дії пасивних модуляторів заснований на ефекті насичення поглинання на довжині хвилі лазерного випромінювання. Як пасивний модулятор використовуються різні поглинаючі матеріали в газовому, рідинному або твердому агрегатному стані, в залежності від довжини хвилі лазерного випромінювання.

Поглинач, який насичується, представляється у вигляді дворівневої системи з дуже великим перетином поглинання в максимумі лазерного випромінювання ($\sigma \sim 10\text{--}16 \text{ см}^2$). Це означає, що інтенсивність поглинання ($I_s \sim 1/\sigma$) порівняно мала і під впливом інтенсивного лазерного випромінювання поглинач стає прозорим (завдяки насиченню) [7].

Якщо помістити поглинач, який насичується в резонатор лазера, довжина хвилі якого збігається з максимумом поглинання затвора, то в початковий момент часу відбувається лінійне поглинання падаючого світла. Внаслідок великого поглинання, лазерна генерація відсутня, при цьому критична інверсія заселеність виявляється дуже високою. У момент часу, коли інтенсивність падаючого світла стає порівнянною з інтенсивністю поглинання I_s , відбувається насичення поглинача і він починає просвітлюватися. Внаслідок цього збільшується швидкість наростання інтенсивності лазерного випромінювання, що, в свою чергу, призводить до збільшення швидкості просвітлення поглинача. Після просвітлення інверсійна заселеність значно перевищує втрати в резонаторі лазера, і як наслідок цього, на виході лазера з'являється випромінювання у вигляді короткого ($\sim 20 \text{ нс}$) і інтенсивного ($\sim 10^6 \text{ Вт}$) світлового імпульсу. Слід зауважити, що за час досягнення падаючим світлом максимального значення відбувається багаторазове проходження світла

всередині резонатора. В результаті цього відбувається природна селекція мод. Тому використання пасивного модулятора в резонаторі лазера призводить до одномодової генерації лазера. Для порівняння з активною модуляцією, повне число проходів при пасивній модуляції перевищує майже 100 раз.

Пасивна модуляція добротності є найпростішим і дешевим способом модуляції добротності. Однак цей спосіб модуляції має ряд недоліків, що обмежує його широке застосування. Основним недоліком насичуючогося поглинача є фотохімічна деградація.

1.6 Застосування ербієвих твердотільних лазерів

Твердотільні лазери з діодним накачуванням знайшли широке застосування в промисловому, медичному, лабораторному устаткуванні, в системах контролю якості, в технологічних цілях для маркування друкованих плат, кабелів, дорогоцінних каменів, фотоелектричних пластин, для внутрішнього і поверхневого маркування скла, мікрообробки матеріалів (біологічних тканин, тонких плівок, багат шарових і напівпровідникових структур), при виготовленні сонячних батарей, в лазерній мікроскопії, голографії, в біотехнологіях (в тому числі в мас-спектроскопії, Раман-спектроскопія, лазерної мікродісекції), для лазерних далекомірів, лидаров і висотомірів і ін. [8]. Особливо слід зупинитися на індустріальних надпотужних нано- та пікосекундних твердотільних DPSS лазерах з накачуванням ЛД серії Baltic [9]. Ці лазери забезпечені інтелектуальною системою управління. Всі параметри лазерів знаходяться під невідпинним контролем з метою забезпечення довготривалої стабільності робочих характеристик і простоту інтегрування лазера в високопродуктивні системи обробки матеріалів. Коротка тривалість імпульсу, висока частота їх проходження і надійна конструкція роблять ці лазери привабливими для обробки багатьох матеріалів, включаючи полімери,

напівпровідники, композити і діелектрики. Лазери допускають дистанційне і процесорне управління [11].

Випромінювання лазера відрізняється від випромінювання звичайних джерел опромінення наступними характеристиками:

- висока спектральна щільність енергії;
- монохроматичність;
- висока тимчасова і просторова когерентність;
- висока стабільність лазерного випромінювання в стаціонарному режимі;
- можливість генерації дуже коротких світлових імпульсів.

З появою промислових лазерів настала нова ера в хірургії. При цьому у нагоді знадобився досвід фахівців з лазерної обробки металу. Приварювання лазером відшарованої сітківки ока – це точкове контактне зварювання; лазерний скальпель – автогенне різання; зварювання кісток – стикове зварювання плавленням; з'єднання м'язової тканини – теж контактне зварювання [13].

Також ТТЛ лазери застосовуються в дерматології, в діагностиці організму. Двома найбільшими розділами неінвазивної лазерної медичної діагностики є оптична когерентна і дифузійна томографія і неінвазивна медична спектрофотометрія. Перший напрямок передбачає отримання прижиттєвих оптичних зображень на рівні окремих клітинних шарів і структур тканини, а друге – отримання прижиттєвих відомостей про динаміку біохімічного складу тканини (рівня гемоглобіну, оксигемоглобіна, колагену, білірубину та ін.) у зоні обстеження.

Також ербієві твердотільні лазери використовується для шліфування шкіри, лазерного фотоомолодження і для видалення утворень шкіри. Лазери здійснюють мікроскопічні зони впливу і впливають на конкретну глибину в шкірі. Це особливо корисно для лікування вугрового висипу, зморшок, пошкодженої сонцем шкіри, меланоза шкіри і т.д. Довжина хвилі знаходиться в діапазоні 1550 нм, а поглинаючими хромофорами є вода в тканині.

Важливо знати, який лазер підходить для конкретного типу шкіри, і конкретно для якої косметичної процедури. Вплив лазерного випромінювання на різні ділянки шкіри залежить від довжини хвилі, щільності потужності і температурних характеристик лазера. Перші лазери, які використовуються для операцій на шкіри, були лазери з безперервним випромінюванням, такі як лазер на діоксиді вуглецю і аргонний лазер. Вони широко використовувалися для лікування родимих плям, таких як емангіома. Хоча родимі плями і віддалялися, побічний ефект утворення рубців був неприйнятно високим в цих лазерах. Нові лазери, які були створені протягом останніх двох десятиліть, порівняно безпечні і набагато більш ефективні в порівнянні зі старими версіями.

Також широке використання ербієві лазери з діодним накачуванням здобули у далекометрії. Лазерний далекомір – прилад для вимірювання відстаней із застосуванням лазерного променя.

Широко застосовується в інженерній геодезії, при топографічній зйомці, у військовій справі, в навігації, в астрономічних дослідженнях, у фотографії. Сучасні лазерні далекоміри в більшості випадків компактні і дозволяють в найкоротші терміни і з великою точністю визначити відстані до об'єктів, що цікавлять [18].

В даний час для задач лазерної локації і лазерного зв'язку в космосі пропонується використовувати твердотільні лазери з діодним накачуванням. Їх перевагами є:

- досить високий коефіцієнт корисної дії;
- можливість ефективної генерації другої гармоніки випромінювання у видимому спектральному діапазоні;
- генерація випромінювання в діапазоні прозорості атмосфери;
- висока спектральна яскравість випромінювання;
- мала розходимість лазерного поміня;
- значний робочий ресурс – до 10⁹ імпульсів.

В імпульсно-періодичному і безперервному режимах роботи ТТЛ істотний вплив на розбіжність випромінювання надають температурні спотворення показника заломлення АЕ [21]. Для їх компенсації використовуються спеціальні схеми резонаторів або додаткові оптичні компенсатори спотворень хвильового фронту лазерного пучка.

2 ЕРБІЄВИЙ ЛАЗЕР С ДІОДНОЮ НАКАЧКОЮ

2.1 Особливості накачування твердотільних лазерів напівпровідниковими світловипромінюючими діодами

В даний час розробляються і експлуатуються, по суті справи, два типи лазерів: лазери з немонохроматичним ламповим накачуванням активного середовища і лазери з напівпровідниковим діодним накачуванням. Прогрес в лазерній техніці багато в чому визначається саме досягненнями в області вдосконалення пристроїв лазерного діодного накачування і застосуванням їх для збудження твердотільних безперервних та імпульсно-періодичних лазерів. Області застосування цих двох типів лазерів спочатку були різними, однак, у міру вдосконалення лазерних діодів, збільшення потужності, розширення спектрального діапазону випромінювання і зниження їх вартості спостерігається інтенсивний процес заміщення лазерів з ламповим накачуванням на більш надійні і компактні з великим ресурсом роботи у всіх областях науки і техніки. Цей процес відбувається навіть в промисловості, де використовуються потужні технологічні твердотільні лазери.

Використання напівпровідникових лазерів в якості джерел накачування активних твердотільних середовищ усунуло ряд проблем, що виникають при роботі твердотільних лазерів з ламповим накачуванням. Так в лазерах з ламповим накачуванням ККД обмежений через неузгодженість спектра випромінювання газорозрядних ламп і спектра поглинання активного середовища. Крім того робота лазера з ламповим накачуванням супроводжується високим тепловиділенням і енергоспоживанням. Малий робочий ресурс ламп накачування (500 – 1000 годин роботи) знижує термін служби твердотільного лазера. Тому необхідна регулярна заміна газорозрядних ламп накачування. Крім того, поступове старіння ламп в процесі роботи вимагає підстроювання вихідних параметрів випромінювача лазера.

Застосування напівпровідникових лазерів в якості джерел накачування твердотільних активних середовищ усунуло ряд проблем, що виникають при роботі твердотільних лазерів з ламповим накачуванням:

- по-перше, за рахунок застосування для збудження активного середовища вузькосмугових напівпровідникових випромінювачів значно виріс ККД накачування.

- по-друге, новий вид монолітної або полумонолітної конструкції лазера сприяє стабільності параметрів вихідного випромінювання. У багатьох випадках конструкція лазера об'єднує в одному вузлі активне середовище, оптичний резонатор і елементи управління.

- по-третє, за рахунок застосування нових активних середовищ розширилися функціональні можливості твердотільних лазерів.

Заміна газорозрядних ламп напівпровідниковими лазерами як джерела накачування твердотільних лазерів забезпечила високу надійність і дозволила збільшити терміни експлуатації твердотільних лазерів. Завдяки великому ресурсу роботи лазерних діодів, який сягає 20000 годин, твердотільні лазери перетворилися в надійний лазерний інструмент. Низьке виділення тепла в активному середовищі лазера з напівпровідникової накачуванням не вимагає водяного охолодження, а це дозволило знизити масогабаритні показники лазера в цілому. Зниження тепловиділення спричинило за собою зниження термічних напружень в активному елементі лазера, що в свою чергу дозволило сформувати лазерний пучок з високою просторово-кутовою яскравістю. Важливим є і те, що заміна газорозрядних ламп лазерними діодами знизилу небезпеку ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу, так як для діодного накачування використовують більш низьку напругу живлення в порівнянні з їх аналогами для лампової накачки.

Широке впровадження лазерів з напівпровідникової діодною накачкою

стимулювало в свою чергу розробки надійних джерел живлення напівпровідникових лазерів. Відзначимо ряд відмінних рис джерел живлення для діодної накачки. По-перше, ширина лінії поглинання активних елементів лазерів і ширина лінії випромінювання напівпровідникових діодів досить вузькі. Тому виникає проблема їх узгодження для досягнення максимальної ефективності збудження.

Спектральне розташування лінії випромінювання лазерних діодів сильно залежить від температури, що і використовується для управління її спектральним положенням. Тому, як правило, імпульсні джерела включають в себе блоки стабілізації температури лазерних лінійок. По-друге, лазерні діоди на відміну від ламп не витримують зворотних викидів струму по задньому фронту імпульсу. Джерела живлення лазерних діодів повинні мати підвищену стабільність параметрів вихідних імпульсів. Навіть короткочасне перевищення допустимого струму призводить до руйнування структури. Крім того, для поліпшення роботи лазерних діодів накачування потрібен постійний струм підставки.

2.2 Вибір схеми накачування ербієвого активного елемента напівпровідниковими діодами

Твердотільні лазери з активними елементами, активованими іонами ербію Er^{3+} працюють за трьохрівневою схемою, що призводить до високого порогу генерації. Додавання іонів ітербію Yb^{3+} дозволяє істотно знизити поріг генерації за рахунок передачі енергії збудження, поглиненої іонами ітербію, і передачі її іонам ербію. Далі відбувається безвипромінювальний перехід іона Er^{3+} з енергетичного рівня $^4I_{11/2}$ на рівень $^4I_{13/2}$ (вставка на рис. 2.1). Безпосередньо генерація випромінювання ербієвого лазера ($\lambda = 1,54$ мкм) обумовлена оптичними переходами між рівнями $^4I_{13/2}$ і $^4I_{11/2}$ [3]. Паразитними процесами для

зазначеної схеми роботи лазера, що знижують інверсну населеність на рівні $^4I_{13/2}$, є зворотна передача енергії від іонів Er^{3+} до іонів Yb^{3+} , спонтанне випромінювання іонів ербію і процеси ап-конверсії [4]. У зв'язку з цим найбільш підходящою основою для реалізації квазітріохрівневої схеми на основі іонів Yb^{3+} і Er^{3+} служить фосфатне скло, оскільки воно забезпечує високий перетин вимушеного випромінювання, малу інтенсивність процесів ап-конверсії і низьку ймовірність зворотної передачі енергії від іонів ербію іонів ітербію [5].

Для накачування активного елемента на основі фосфатного скла, активованого іонами ітербію і ербію, необхідно використовувати випромінювання, що припадає на спектральний діапазон 910 – 990 нм (рис. 2.1).

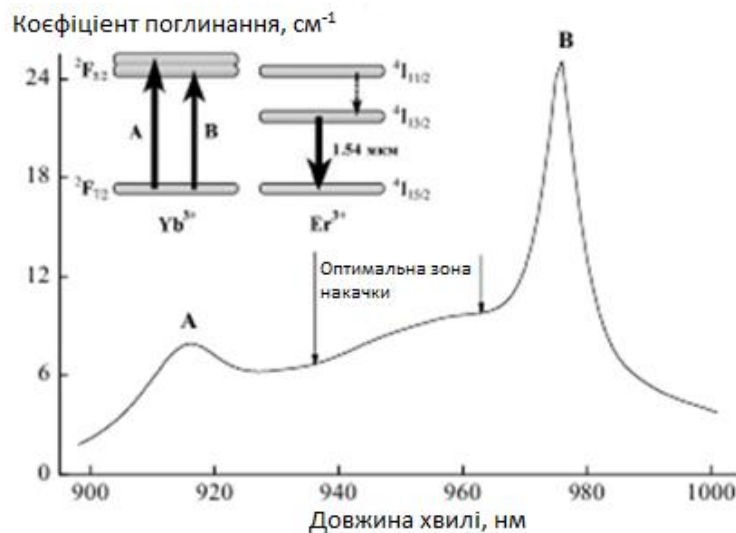


Рисунок 2.1 – Спектр поглинання фосфатного скла з концентрацією іонів ітербію $4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ і ербію $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Тривалий час в якості джерел накачування ербієвого лазера, як зазначалося вище, використовувалися імпульсні газорозрядні лампи, одним з недоліків яких є відносно малий час працездатності. Однак, протягом останніх двадцяти років завдяки розвитку технологій виготовлення напівпровідникових

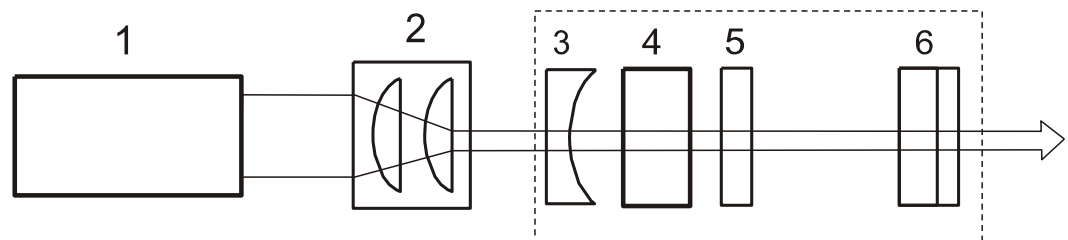
гетероструктур з'явилася можливість здійснювати накачування ербієвого активного елементу за допомогою лазерних діодів або діодних лазерних лінійок, випромінюючих в діапазоні 920 – 980 нм.

Використання лазерних діодів дозволяє більш ніж на порядок збільшити ефективність перетворення потужності випромінювання накачування в потужність генерації і істотно знизити теплові втрати в активному елементі, що обумовлює зниження енергоспоживання ербієвого лазерів. До додаткових переваг використання напівпровідникових лазерів можна віднести великий час напрацювання і малі габарити, що дозволяє використовувати ербієві лазери в компактних переносних і космічних системах.

Як впливає з рисунку 2.1, для накачування активних елементів на основі фосфатного скла, активованого іонами Yb^{3+} і Er^{3+} , найбільш ефективним є використання лазерних діодів, що генерують на довжині хвилі 980 нм. У той же час, добре відомо, що зі зміною температури навколишнього середовища довжина хвилі генерації напівпровідникових лазерів помітно змінюється. Оскільки пік поглинання активного елементу досить гострий, то наслідком зміни зовнішньої температури, що приводить до зрушення довжини хвилі генерації лазерного діода, буде також і зміна енергетичних характеристик ербієвого лазера. Усунути вплив зміни температури на характеристики ербієвого лазера можна, використовуючи системи термостабілізації лазерного діода, але це пов'язане з подорожчанням виготовлення, збільшенням габаритів і енергоспоживання ербієвого лазера. Використання ж лазерних діодів, що генерують випромінювання в діапазоні від 930 нм до 965 нм, дозволяє відмовитися від термостабілізації, оскільки поглинання випромінювання накачування більш рівномірно в зазначеному спектральному інтервалі в порівнянні з діапазоном поблизу 980 нм. Тому теплові варіації довжини хвилі генерації лазерних діодів для роботи ербієвого лазера не настільки критичні, як у випадку лазерних діодів, що генерують на довжині хвилі 980 нм.

Великий час життя збуджених станів іонів ітербію (1 мс) і ербію (близько 8 мс) дозволяє використовувати довготривалі імпульси накачування (3 – 5 мс) навіть для режимів роботи з модульованою добротністю без помітного зменшення ефективності. Тривалість імпульсів накачування близько 5 мс відповідає максимуму ефективності перетворення світло-світло для ербієвого лазера. На таких тривалостях імпульсів працюють багато лазерних діодних лінійок, що серійно виробляються [8, 10].

Як відомо, накачування твердотільних лазерів за допомогою випромінюючих лазерних діодів здійснюється за двома схемами – поздовжньої і поперечної. Поздовжнє накачування (рис. 2.2) дозволяє досягти найкращого узгодження мод накачування і генерації [8]. Але застосування цієї схеми пов'язане з необхідністю використання щодо складних пристроїв введення випромінювання накачування в активний елемент.

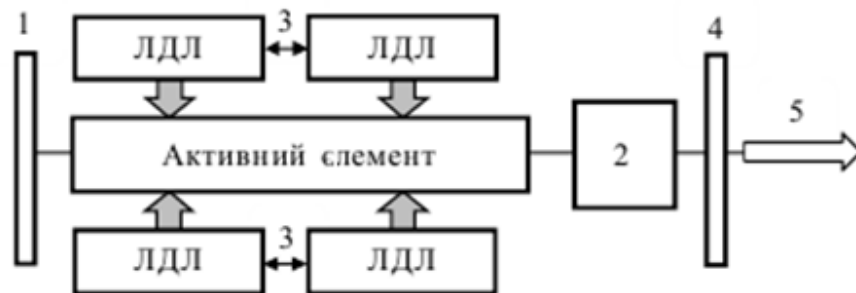


1 – лінійка діодних лазерів (ЛДЛ); 2 – оптична схема фокусування випромінювання ЛДЛ; 3 – “глухе” дзеркало резонатора; 4 – активний елемент; 5 – пасивний модулятор добротності; 6 – вивідне дзеркало резонатора.

Рисунок 2.2 – Схема поздовжньої накачки ербієвого лазера

Для досягнення високих потужностей генерації ербієвого лазера необхідна висока потужність накачування, що при використанні поздовжньої схеми пов'язане з виникненням суттєвого градієнта температур уздовж

активного елементу. Це в свою чергу призводить до погіршення оптичних характеристик і прискореного руйнування елементів лазера. Поперечна ж схема накачування (рис. 2.3) дозволяє використовувати великі потужності накачування без виникнення температурного градієнта за рахунок розміщення лазерних діодів або лазерних діодних лінійок уздовж активного елементу. При цьому інтенсивність накачування має рівномірний розподіл, а її щільність потужності на самому активному елементі нижча в порівнянні з поздовжньою схемою. При поперечній схемі накачування лазерні діодні лінійки можуть бути або впритул притиснуті до активного елементу ербієвого лазера, або відстояти від нього на деякій відстані. Очевидно, що при щільному примиканні лазерної діодної лінійки до активного елементу розподіл випромінювання накачування в активному елементі в точності повторює розподіл вихідного випромінювання лазерної діодної лінійки. Якщо лазерна діодна лінійка розташована на деякій відстані від активного елемента, то в силу дифракції розподіл випромінювання в активному елементі буде більш рівномірним, ніж в лазерної діодній лінійці.



- 1 – глухе дзеркало резонатора; 2 – затвор; 3 – зазор між лазерними діодними лінійками в блоці накачування; 4 – вихідне дзеркало резонатора;
5 – випромінювання генерації ербієвого лазера.

Рисунок 2.3 – Схема поперечної накачки лазера

2.3 Особливості ербієвого активного середовища

Великий інтерес до ербієвого скла, обумовлений на ряді його переваг, як активного середовища лазера.

По-перше, як згадувалося вище, довжина хвилі випромінювання ербієвого лазера (близько 1,54 мкм) потрапляє в відносно безпечний для зору діапазон довжин хвиль.

По-друге, великий час життя іонів ербію (8 мс) дозволяє використовувати для досягнення достатньої інверсної населеності відносно малопотужні лазерні діоди і лазерні діодні лінійки, що працюють в режимі довгих тривалостей імпульсів (до 5 мс), а також зменшення їх числа в порівнянні з неодимовими активними середовищами. Все це помітно спрощує конструкцію випромінювача, здешевлює вартість лазера і далекоміра в цілому.

По-третє, широка смуга поглинання іонів ітербію (910 – 960 нм) з відносно слабкою зміною коефіцієнта поглинання допускає роботу лазера в режимі одиночних імпульсів в широкому діапазоні температур навколишнього середовища без будь-якої термостабілізації ЛДЛ або світловипромінювальних діодів. Як показано в роботі [11] зміна довжини хвилі випромінювання напівпровідникових лазерів при зміні температури на один градус становить $T = 0,33 \text{ нм}/^{\circ}\text{C}$. Тому, при зміні температури навколишнього середовища в діапазоні від -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$, зміна довжини хвилі випромінювання ЛЛД або лазерного діода відбувається в діапазоні 920 – 950 нм. Це дозволяє здійснювати ефективне накачування ітербій-ербієвого скла у всьому зазначеному діапазоні без додаткових пристроїв стабілізації температури.

До основних недоліків лазерів на ербієвому склі відноситься трьохрівневий характер роботи, малий перетин поглинання і випромінювання, і як результат цього низький коефіцієнт посилення. Окрім того слід відмітити і те, що для ербієвого скла притаманний великий стоксів зсув між енергією

кванта збудження ($h\nu_{940} = 2,093 \cdot 10^{-19}$ Дж) і кванта, що генерується ($h\nu_{1540} = 1,295 \cdot 10^{-19}$ Дж). Нагрівання активного елемента ербієвого лазера відбувається як за рахунок різниці енергій квантів накачування і генерації $\Delta h\nu_{\text{ст}} = 7,98 \cdot 10^{-20}$ Дж (стоксів зсув) так і за рахунок втрати енергії накачування при її передачі від іонів сенсibilізатора ітербію до йонів ербія, який випромінює. Все це призводить до значного тепловиділення в активному елементі лазера. Низька теплопровідність скла в поєднанні з великим виділенням тепла обмежують частоту слідування імпульсів випромінювання ербієвого лазера, яка не перевищує 5 – 10 Гц. Збільшення частоти слідування імпульсів призводить до збільшення розходження лазерного випромінювання, обумовленого неоднорідністю поглинання випромінювання накачування за поперечним перерізом активного елемента і утворенням теплової лінзи зі змінною у часі фокусною відстанню. Просторова неоднорідність тепловиділення, в свою чергу, призводить до градієнту температури і пов'язаним з ним внутрішнім напруженням, що при подальшому збільшенні частоти веде до руйнування активного елемента лазера.

Застосування імпульсного діодного напівпровідникового накачування ітербій-ербієвого скла в випромінювачі дозволяє в повній мірі скористатися як можливостями активного середовища, так і перевагами напівпровідникового накачування. Дійсно, спектральна смуга поглинання сенсibilізатора, в якості якого виступають іони ітербію, дозволяє здійснювати ефективне накачування випромінюванням окремих лазерних діодів або лазерних діодних лінійок (ЛДЛ), випромінюючих на довжині хвилі в районі 940 нм при +20°C.

Вся інша частина поглиненої енергії збудження перетворюється в люмінесценцію іонів ітербію і ербію, квантовий вихід якої є достатньо високий.

Як згадувалося вище, ітербій в лазері на ербієвому склі грає роль основного сенсibilізатора. При збільшенні концентрації іонів ітербію аж до $2,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ зростає і швидкість передачі енергії збудження від ітербію до

ербію. Останній є активним іоном, на переходах якого і відбувається вимушене випромінювання. Величина поглинання випромінювання накачування активним середовищем, а, отже, і енергія генерації ербієвого лазера визначається концентрацією іонів ітербію. Крім того, з огляду на високу неоднорідність накачування, властивій поперечній схемі збудження, вона ж визначає і просторово-кутові характеристики вихідного випромінювання лазера.

Оскільки лазер на ербієвому склі працює за трьохрівневою схемою генерації, для мінімізації порогової енергії накачування концентрація іонів ербію повинна бути якомога нижче. З іншого боку, для забезпечення високого коефіцієнта перетворення енергії збудження в енергію лазерного випромінювання необхідно підвищувати концентрацію іонів ербію. Таким чином, з наведених міркувань випливає, що питання про концентрацію активаторів в лазерних активних елементах на ербієвих стеклах, використовуваних в якості активних елементів в лазерах з поперечною схемою накачування, вимагає компромісного рішення.

2.4 Джерело живлення лазерних лінійок

Для живлення експериментального макета лазерного випромінювача з діодною накачкою на першому етапі роботи нами було розроблено і виготовлено лабораторний зразок імпульсного джерела струму з розширеними функціональними можливостями. Це джерело призначалось для живлення діодних лазерних лінійок збудження ербієвого активного елемента [12 – 17]. В цьому зразку живлення є можливість регулювання струму від 10 А до 80 А з кроком встановлення значення струму 1 А. Тривалість імпульсів струму може регулюватися в межах від 1,5 мс до 5,0 мс з кроком 0,1 мс. Частота слідування імпульсів регулюється від 0,1 Гц до 5 Гц з кроком 0,1 Гц. Зразок забезпечує нерівномірність вершини імпульсів струму не більше 5 % та відсутність будь

яких різких викидів з тривалістю менше 10 мкс на вершині імпульсів струму, а також на їх передньому та задньому фронтах.

Розроблений зразок живлення складається з наступних основних частин: блок з накопичувальними ємностями, блок заряду ємностей, аналоговий ПІД регулятор струму з польовим транзистором [18], який працює в лінійному режимі, блок захисту, блок управління і блок зв'язку з зовнішніми пристроями. На рис. 2.4 представлена спрощена функціональна схема джерела живлення. Перетворювачі напруги, які служать для живлення блоків на цій схемі не показані.



Рисунок 2.4 – Функціональна схема джерела живлення лазерної лінійки

Основні технічні характеристики джерела живлення лазерної лінійки.

1. Максимальна сила струму 70 А.
2. Початкова амплітуда імпульсів струму в навантаженні 40 А при тривалості імпульсу 5 мс.

3. Після вмикання джерела живлення передбачена можливість автоматичного підвищення струму в навантаженні від початкового ступенями по 1 А до 70 А та зупинка підвищення струму по зовнішньому сигналу.

4. Джерело вмикається по зовнішньому сигналу.
5. Тривалість імпульсів струму 3 – 5 мс.
6. Форма імпульсів струму – прямокутна.
7. Тривалість переднього та заднього фронтів не перевищує 30 мкс.
8. Частота слідування імпульсів від 0,3 Гц до 5 Гц.
9. Нерівномірність вершини імпульсів струму становить не більше 5 %.
10. При вмиканні/вимиканні джерела живлення, на час перехідних процесів, коло живлення навантаження є закороченим.
11. Джерело живлення забезпечує відсутність будь-яких різких викидів з тривалістю менше 10 мкс на вершині імпульсів струму, а також на передньому і задньому фронтах імпульсів струму.
12. Джерело живлення забезпечує відсутність будь-яких негативних викидів (в тому числі, при включенні /виключенні джерела живлення, включенні/вимиканні імпульсного режиму роботи джерела живлення, під час імпульсного режиму роботи).
13. Джерело має захист навантаження при перевищенні струму більше значення 70 А.
14. Напруга зовнішнього джерела живлення 27 В.
15. Габарити джерела 100×90×50 мм³.

2.5 Модуляція добротності резонатора

Важливим елементом ербієвого лазера, як втім, і будь-якого іншого твердотільного лазера, який багато в чому визначає його властивості є модулятор добротності резонатора. Як відомо, в твердотільних лазерах набули широкого поширення як активні, так і пасивні методи модуляції добротності. Перевагою активних модуляторів добротності в лазерах, використовуваних в

далекомірах, є контрольований момент випромінювання гігантського імпульсу. Це дозволяє відмовитися від стартового фотоприйомного пристрою і тим самим спростити конструкцію далекоміра.

У лазерах на ербієвому склі переважне поширення набули схеми активної модуляції добротності резонатора на основі призми порушеного повного внутрішнього відбиття (ППВВ-затвори) [19, 20]. Даний тип затвора характеризується досить низьким рівнем оптичних втрат (не більше 1 – 2 % на прохід), що особливо важливо при роботі в лазерах з активним середовищем, яке має слабе підсилення. Слід також відмітити, що зазначені модулятори можуть також модулювати випромінювання будь-якої поляризації в тому числі і неполяризоване. Однак низька швидкодія ППВВ-затвора, перешкоджає отриманню коротких імпульсів тривалістю менше 30 нс. Крім того повільне включення високої добротності резонатора може призводити до появи додаткового імпульсу генерації, що для деяких застосувань, зокрема, таких як дальнометрія, неприпустимо.

Один із способів боротьби з додатковим імпульсом є подача на затвор замикаючої напруги відразу ж після проходження основного імпульсу. Цей спосіб ускладнює конструкцію призми ППВВ і висуває додаткові вимоги до керуючої електроніки, які не завжди можна виконати в силу приладових обмежень.

Другий спосіб усунення додаткового імпульсу, застосований в роботі [21], полягає в селекції мод шляхом використання щілинних діафрагм в активному елементі лазера.

Серед керованих модуляторів добротності перспективними для використання в лазерах, що працюють у відносно безпечному діапазоні довжин хвиль, є акустооптичні модулятори добротності. Вони отримали широке поширення, в основному, в лазерах на алюмоітрієвому гранаті з довжиною хвилі випромінювання 1064 нм. Акустооптичні модулятори (АОМ)

характеризуються низьким рівнем оптичних втрат, що не перевищує 0,5 %, високою променевої стійкістю прозорого середовища (наприклад, плавленого кварцу для видимої та ближньої ІЧ областей або германію для середньої і далекої ІЧ частини спектру). Для них характерні низькі рівні керуючої напруги, відносно швидке включення і виключення втрат (100 нс) та малі габарити.

Останнім часом з'явилося повідомлення про розробку ербієвих лазерів з акустооптичним модулятором добротності. Зокрема, відома американська фірма «Kigre» [22] розробила малогабаритний лазер на ербієвому склі з наступними вихідними характеристиками: енергія в імпульсі 7 мДж при тривалості імпульсу 6 нс, частота повторювання імпульсів до 30 Гц, розбіжність 4,2 мрад при діаметрі лазерного променя 0,8 мм, розміри ербієвого випромінювача $127 \times 56 \times 36 \text{ мм}^3$.

У Росії розроблено експериментальний зразок ербієвого лазера з АОМ, який в режимі модульованої добротності забезпечує в гігантському імпульсі тривалістю 16 нс енергію 15 мДж при енергії накачування 0,65 Дж і частотою повторювання імпульсів 2 – 5 Гц. Керуюча потужність, що підводиться до акустооптичного перетворювача, становить 25 Вт на частоті 80 МГц [23]. Ербієвий лазерний випромінювач розміщується в герметичному корпусі з габаритними розмірами $62 \times 56 \times 25 \text{ мм}^3$.

В роботі [24] наводиться опис лазера на ербієвому склі з АОМ, який генерує імпульси з енергією 8 мДж тривалістю 20 нс, частотою слідування від 1 Гц до 10 Гц і розходженням випромінювання 10 мрад. Експериментальний зразок здатний стабільно працювати в широкому температурному діапазоні із збереженням вихідних параметрів випромінювання.

Перевагою пасивних методів модуляції добротності лазерних резонаторів перед активними методами є простота конструкції і малі габарити, як самого модулюючого елемента, так і лазерного випромінювача в цілому. В даний час для реалізації режиму пасивної модуляції добротності резонатора лазера на

ербієвому склі використовуються різні нелінійно-поглинаючі середовища (фототропні або просвітлювані середовища) – напівпровідникові насичуємі поглиначі (SESAM) [25], кристали селеніду цинку (ZnSe) з домішкою двовалентних іонів кобальту Co^{+2} [26, 27] і хрому Cr^{+2} [28], леговані іонами Co^{+2} кристали $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ і MgAl_2O_4 [29].

Найкращі характеристики лазерного випромінювання в теперішній час отримані з пасивними затворами на основі алюміній-магнієвої шпінелі MgAl_2O_4 , легованої кобальтом. Перетин поглинання шпінелі на довжині хвилі генерації ербієвого лазера становить приблизно $1,5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$, а час життя збудженого рівня 4T1 (4F) іона Co^{+2} при кімнатній температурі становить приблизно 200 нс [29]. Ефективність пасивного модулятора на основі алюміній-магнієвої шпінелі тільки на 20 % нижче, ніж ефективність затвора на порушеному повному внутрішньому відбитті, який, як відомо, має малі власні оптичні втрати [19]. Слід також зазначити, що в лазерах з пасивним затвором відбувається природна селекція поперечних мод [30]. Вона обумовлена відмінністю в величині втрат і часі формування основної поперечної моди і мод вищого порядку. Зокрема, різниця в часі формування гігантських імпульсів зі структурою основної моди і мод вищих порядків становить кілька сотень наносекунд. Так що після генерації моноімпульсу, відповідного основній поперечній моді TEM_{00} , фільтр, що просвітлюється встигає частково закритися і тим самим придушити випромінювання мод вищих порядків, що розвиваються.

2.6 Експериментальний зразок ербієвого лазера з накачуванням ЛДЛ

Як джерело випромінювання накачування в роботі використовувалися дві 100-ватні ЛДЛ довжиною по 10 мм кожна, встановлені в лінію. Довжина хвилі генерації ЛДЛ становила 933,3 нм, полуширина смуги випромінювання 2,2 нм при $+ 20^\circ\text{C}$. Робочий імпульсний струм складав близько 55 А, максимально

допустимий струм – 70 А, падіння напруги на здвоєній лінійці становить близько 3 В. Тривалість імпульсу струму 5000 мкс. Вольт-амперна характеристика використовуваної в роботі ЛДЛ представлена на рис. 2.5. Видно, що при струмі накачування 50 А лінійка випромінювала імпульси потужністю приблизно 90 Вт. При цьому повний коефіцієнт корисної дії (ККД) досягав 60 %. Слід зазначити, що лінійки не мали додаткових оптичних елементів для формування просторових характеристик випромінювання. Діаграма спрямованості випромінювання представляла собою пучок світла з расхождением 30° в площині, перпендикулярній лінійці і близько 10° в площині лінійки.

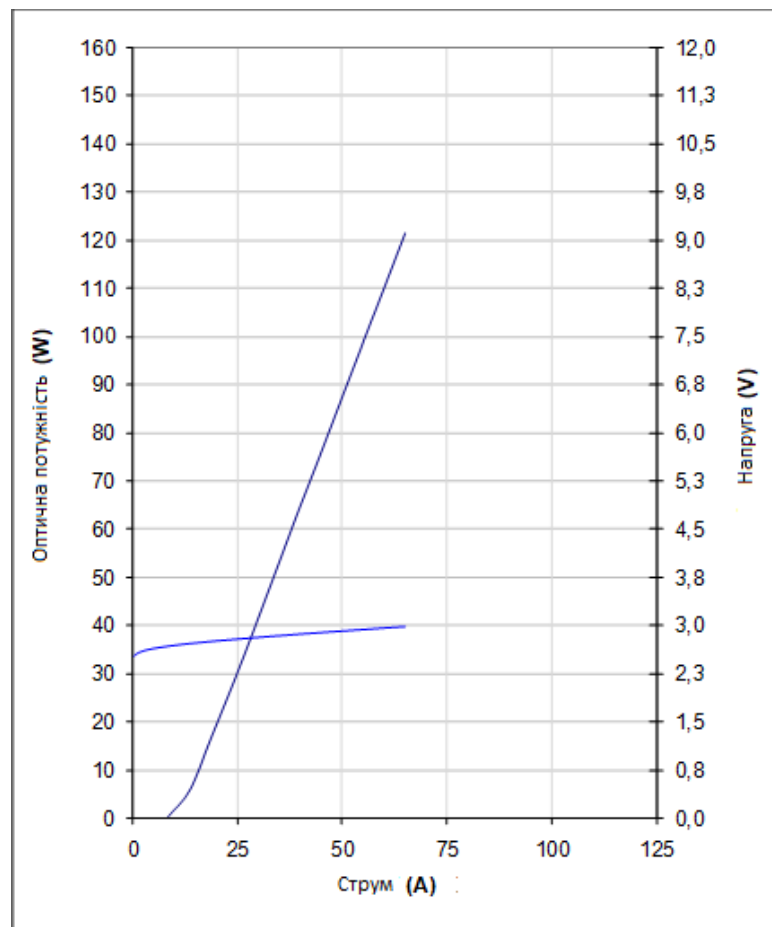
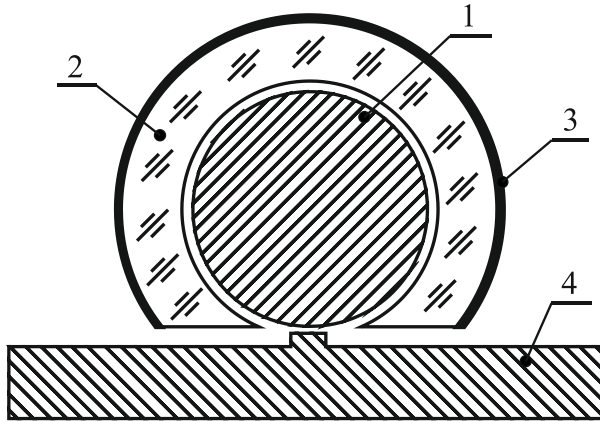


Рисунок 2.5 – Вольт-амперна характеристика лазерної діодної лінійки

Активним елементом лазера був циліндричний стрижень діаметром 2 мм і довжиною 25 мм, виготовлений з фосфатного скла, активованого іонами ітербію і ербію. Концентрація іонів активаторів становила $4,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для Er^{3+} і $2,12 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ для Yb^{3+} відповідно. Коефіцієнт поглинання Yb^{3+} на довжині хвилі збудження 940 нм приблизно дорівнює $5,3 \text{ см}^{-1}$ (при перетині поглинання іонів ітербію $\sigma \approx 2,5 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$). Стрижень мав плоскопаралельні торцеві поверхні з антивідбиваючими покриттями на довжині хвилі генерації 1,54 мкм. Активний елемент розміщувався в сапфіровому циліндрі який мав внутрішній діаметр 3,5 мм (рис. 2.6). Для оптимізації введення випромінювання накачування бокова поверхня сапфірового циліндра була відшлифована. Через щілину шириною близько 0,5 мм здійснювалось введення випромінювання накачування. Зовнішня поверхня сапфірового циліндру мала відбиваюче покриття, для повернення в активний елемент випромінювання накачування, що не було поглинуто на першому проході. Дійсно, легко можна перекопатися в тому, що зразок активного елемента, виготовленого із ітербій-ербієвого скла товщиною 2 мм поглинає за перший прохід всього приблизно 65 % випромінювання накачування. Підвищити потужність накачування активного елемента можна, повернувши не поглинуту при першому проході частину випромінювання в об'єм активного середовища за допомогою відбиваючого покриття. Лазерна діодна лінійка розташовувалася на відстані приблизно 0,3 мм від бічної поверхні активного елемента лазера, паралельно його осі.

Схема діодного накачування ербієвого лазера з дифузним сапфіровим відбивачем приведена на рис. 2.6. Лазерні діодні лінійки розташовувалися з одного боку, що завдяки кращому компонуванню, яке забезпечує відведення тепла, вирішує завдання мінімізації розмірів випромінювача. Схема розташування елементів квантрона приведена на рис. 2.7.

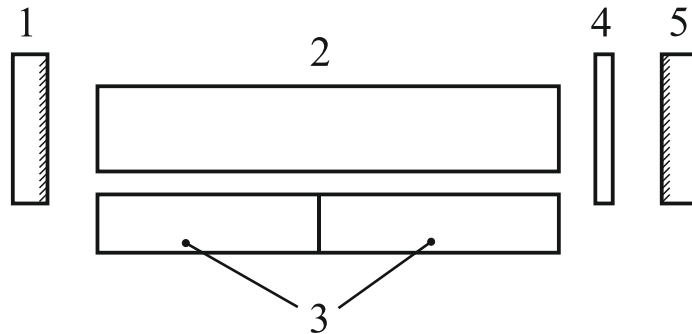


1 – активний елемент; 2 – сапфіровий циліндр; 3 – відбиваюче покриття;
4 – діодні лазерні лінійки.

Рисунок 2.6 – Схема оптичного накачування ітербій-ербієвого активного елемента лазерними діодними лінійками

Оптичний резонатор завдовжки 75 мм був утворений плоскими діелектричними дзеркалами з коефіцієнтами відбиття на довжині хвилі генерації $R = 99,5 \%$ (глухе дзеркало) і частково прозоре вихідне дзеркало. Для реалізації режиму модуляції добротності в резонатор між активним елементом і глухим дзеркалом, розміщувався затвор на основі поглинача, що насичувався. Пасивний модулятор являв собою плоско паралельну пластинку (паралельність: $< 10''$, площинність: $\lambda/10$ на довжині хвилі 633 нм) діаметром 6 мм і товщиною 1 мм, виготовленої на основі алюмо-магнієвої шпінелі з домішкою іонів кобальту ($\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$). Перетин поглинання з основного стану алюмо-магнієвої шпінелі складає $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ [19].

Початкове пропускання пасивного затвора, який застосовувався в роботі складало $T = 87 \%$. Обидві поверхні затвора мали антивідбиваюче покриття (коефіцієнт відбиття в спектральному діапазоні $\Delta\lambda = 1535 - 1550 \text{ нм}$ не перевищував $R < 0,2 \%$). Щільність енергії руйнування пасивного затвора складає більше 40 Дж/см² на довжині хвилі 1550 нм при тривалості імпульсів випромінювання 20 нс.



1 – глухе дзеркало резонатора; 2 – активний елемент; 3 – діодні лазерні лінійки;
4 – пасивний модулятор добротності; 5 – вихідне дзеркало резонатора.

Рисунок 2.7 – Схема розташування елементів лазерного випромінювача

Енергія вихідного випромінювання лазера вимірювалася калориметричним вимірником типу ІМО-2Н. Часові параметри випромінювання реєструвалися і аналізувалися Ge-фотодіодом з постійною часу менше 3 нс і осцилографом DDA-125 (LeCroy) з смугою пропускання 1000 МГц. Зовнішній вигляд випромінювача без верхньої кришки представлений на рис. 2.8.

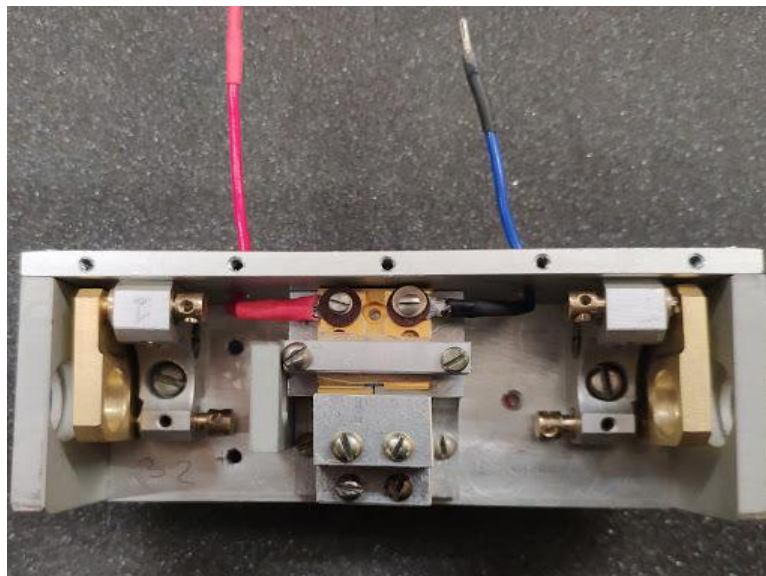


Рисунок 2.8 – Фото випромінювача

2.7 Оптимізація енергетичних характеристик ербієвого лазера

Вимірювання основних енергетичних та часових характеристик випромінювання ербієвого лазера проводилося в плоскому резонаторі. Спочатку ми досліджували вплив добротності резонатора лазера на ефективність генерації. Експериментальні результати, проведені з різними вихідними дзеркалами резонатора, показали, що для даної системи, при майже дворазовому перевищенні порогу (порогова енергія становила 540 мДж), оптимальним по енергії генерації виявилось вихідне дзеркало, яке має коефіцієнт відбиття близько 83 %.

Експериментально було встановлено, що нанесення відбиваючого покриття на зовнішню бокову поверхню сапфірової трубки приводить до зменшення порогу генерації майже в 1,2 рази.

На рис. 2.9 представлені осцилограми імпульсу вільної генерації лазерного скла (верхня осцилограма) і імпульсу накачування (нижня осцилограма), час розгортки становить 1000 мкс на одну поділку. Як видно з малюнка, тривалість імпульсу накачування становить 4 мс, а тривалість імпульсу генерації близько 500 мкс. Видно, що в даній системі затримка лазерного імпульсу становить близько 3,7 мс по відношенню до переднього фронту імпульсу накачування, тобто відбувається в самому кінці імпульсу накачування. Слід зазначити, що при збільшенні тривалості імпульсів накачки при збереженні величини струму тривалість імпульсів вільної генерації збільшується. Зі збільшенням струму при збереженні тривалості імпульсів накачування затримка лазерного імпульсу по відношенню до переднього фронту імпульсу накачування зменшується.

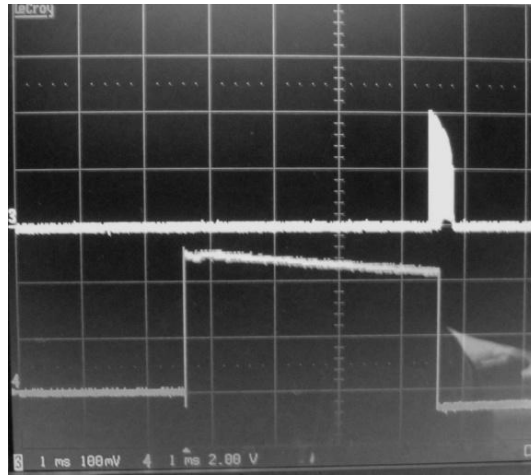


Рисунок 2.9 – Осцилограми імпульсу струму (нижня) і вільної генерації (верхня) (ціна поділки 1 мс)

Порогова енергія накачування в нашій системі становила близько 790 мДж. Залежність вихідної енергії генерації від енергії накачування (струму діодним лінійки) представлена на рис. 2.10. Вона отримана для випадку, коли резонатор був утворений сферичним ($F = 256$ см) і плоским дзеркалами з коефіцієнтами відбиття $R = 99,0\%$ і $R = 84,0\%$ відповідно. Видно, що залежність носить майже лінійний характер. При енергії накачування приблизно 1150 мДж вихідна енергія в режимі вільної генерації становила близько 27 мДж при тривалості імпульсу 550 мкс.

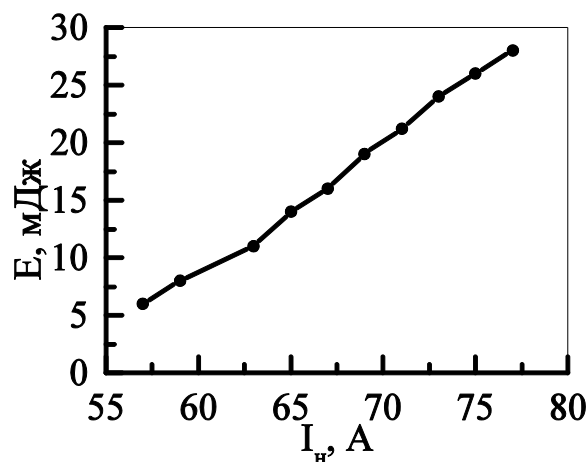
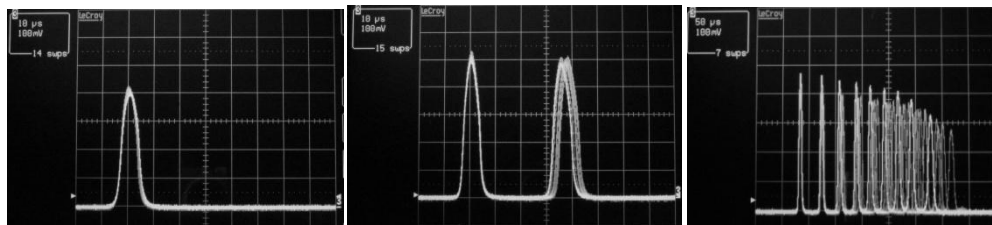


Рисунок 2.10 – Залежність енергії генерації від струму накачування

На рис. 2.11 представлені імпульси вільної генерації лазера, отримані в плоскому резонаторі при різних енергіях накачування. При енергії накачування близькою до граничної (енергія збудження 690 мДж) спостерігається один імпульс випромінювання з тривалістю близько 5 мкс (швидкість розгортки 10 мкс/діл), як показано на рис. 2.11а. Збільшення енергії накачування щодо порогової призводить до появи другого імпульсу рис. 2.11б (енергія збудження 705 мДж, швидкість розгортки 10 мкс/діл.), Який знаходиться на відстані близько 35 мкс від першого імпульсу. Подальше збільшення енергії накачування призводить до генерації періодичної послідовності мікросекундних імпульсів з плавно зменшується амплітудою рис. 2.11в (енергія збудження 900 мДж, швидкість розгортки 50 мкс/діл.).



а

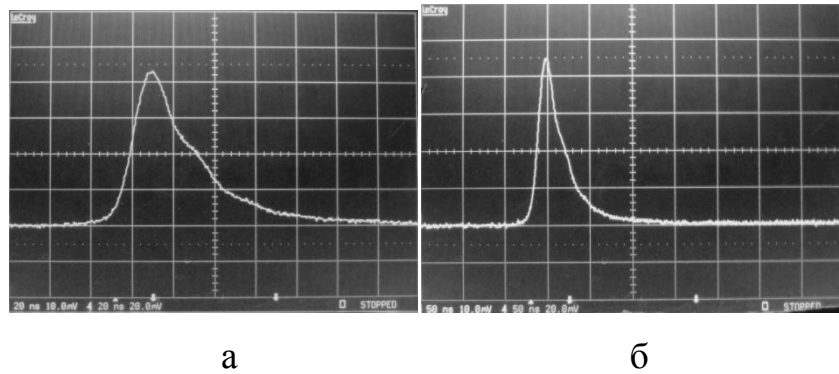
б

в

а – струм імпульсу накачки 46 А (ціна поділки 10 мкс);
 б – 47 А (ціна поділки 10 мкс); в – 60 А (ціна поділки 50 мкс).

Рисунок 2.11 – Осцилограми імпульсів вільної генерації

Для модуляції добротності резонатора і отримання гігантського імпульсу використовувався пасивний затвор на основі алюмо-магнієвої шпінелі з кобальтом. Моноімпульс генерації ербієвого лазера з цим модулятором представлений на рис. 2.12.



а – ціна поділки 20 нс; б – ціна поділки 50 нс.

Рисунок 2.12 – Осцилограми імпульсів генерації ербієвого лазера з пасивним затвором. Енергія генерації 6 мДж

В наших експериментах з вивчення енергетичних характеристик генерації ербієвого лазера з пасивною модуляцією і накачуванням лазерною діодною лінійкою було встановлено, що енергія моноімпульса не збільшується при збільшенні накачування. Це може бути обумовлено наступними факторами [31, 32].

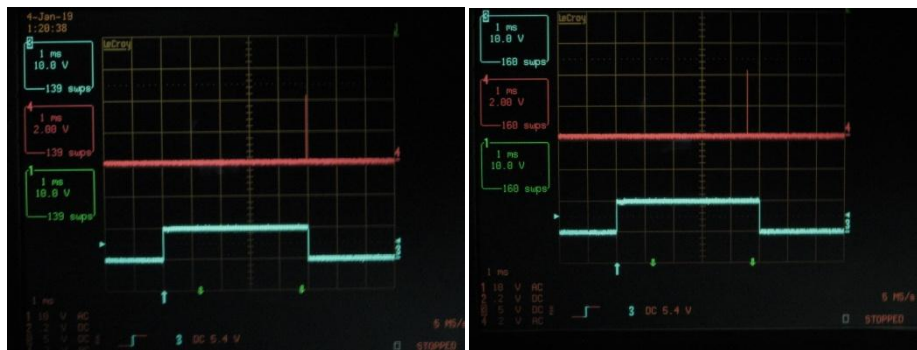
У лазері з пасивною модуляцією добротності резонатора при досягненні порогових умов генерації випромінюється моноімпульс. Енергія цього моноімпульса зберігається практично незмінною, незважаючи на подальше зростання накачування. У міру зростання накачування (збільшення імпульсного струму при збереженні його тривалості) скорочується час затримки моноімпульса щодо імпульсу струму накачування (см. рис. 2.13). При цьому поперечний розмір поля випромінювання в активному середовищі відповідає не апертурі активного елементу, а розміру нижчої поперечної моди резонатора.

Подальше збільшення накачування призводить до генерації вторинних моноімпульсів, викликаних або повторним просвітленням пасивного затвора в тому ж об'ємі активного середовища (при цьому енергії моноімпульсів порівняні з енергією першого імпульсу), або просвітленням затвора на більшій

апертурі (в цьому випадку в залежності від заповнення активного середовища полем вищих поперечних мод, що вийшли в генерацію, енергії повторних імпульсів можуть значно перевищувати енергію першого моноімпульса).

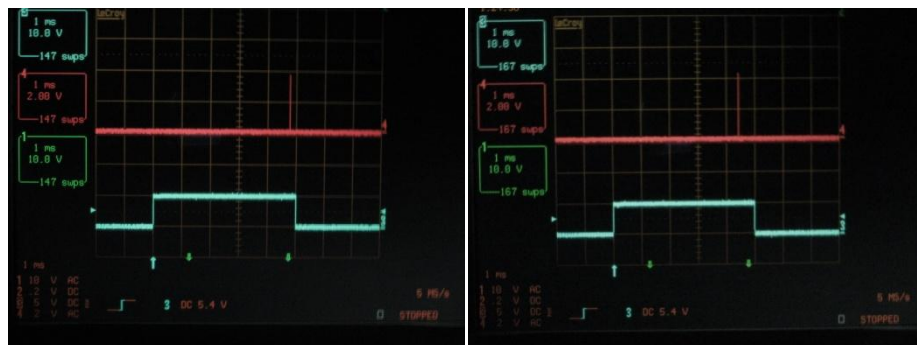
Як відомо, для збільшення вихідної енергії лазера необхідно збільшити об'єм збудженого активного середовища, а для збереження високого ККД зберегти при цьому і оптимальну об'ємну щільність енергії накачування.

Тому цілком логічно припустити, що для отримання максимальної енергії (і ККД) існує оптимальна відстань між лазерною діодною лінійкою і активним елементом. Справді, розширення області збудження дає можливість підвищити енергію випромінювання активного елементу лазера, за умови збереження щільності енергії збудження.



а

в



б

г

Рисунок 2.13 – Осцилограми імпульсів генерації і накачки

Верхні осцилограми (червоний промінь) – імпульс генерації; нижні осцилограми (зелений промінь) – імпульс накачки. Ціна поділки – 1000 мкс.

В роботі [33] показано, що розподіл енергії накачування в активному середовищі значно залежить від відстані між активним елементом і лазерною діодною лінійкою. Для збільшення вихідної енергії випромінювання при збереженні високого ККД необхідно забезпечити оптимальне заповнення активного середовища лазера полем випромінювання нижчої моди (нижчих мод), підбираючи оптимальну відстань між ЛДЛ і активним елементом. Для збільшення енергії імпульсу випромінювання слід прагнути накачати якомога більший об'єм активного середовища при збереженні питомої щільності енергії накачування. Для цього буде потрібно збільшити або імпульсний струм через лінійку, або тривалість імпульсу струму. Крім того необхідно оптимізувати і пропускання вихідного дзеркала резонатора і пасивного затвора. У всіх наших експериментах відстань між активним елементом і лазерною діодною лінійкою становила близько 0,2 мм.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено та виготовлено експериментальний макет лазера на ербієвому склі з накачкою лазерними діодними лінійками. Для підвищення ефективності накачування активного елемента розроблено та виготовлено спеціальний блок накачування на основі сапфірового освітлювача з щілиною. Як джерело накачування активного елемента використовувались дві 100-ватні ЛДЛ, які розташовані в лінію, паралельно боковій поверхні ербієвого стрижня. Застосовувалась поперечна схема накачування, як більш така, що забезпечує отримання високо інтенсивного випромінювання ербієвого лазера. В якості активного середовища лазера використовувалися циліндричні елементи на основі ітербій-ербієвого фосфатного скла розмірами 2×25 мм і наступною концентрацією активаторів: ітербій – $2,12 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$; ербій – $4,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

2. Проведена оптимізація параметрів резонатора і системи накачування. З цією метою проведені вимірювання енергії генерації ербієвого лазера в залежності від добротності резонатора. Встановлено, що в режимі вільної генерації найкращі енергетичні параметри випромінювання лазера спостерігаються при коефіцієнті відбиття вихідного дзеркала резонатора 83 % і тривалості імпульсів накачування 5,0 мс. Експериментально знайдено, що застосування відбиваючого покриття на зовнішній поверхні сапфірового циліндра приводить до зниження порогової енергії накачування ербієвого лазера в 1,2 рази. При використанні пасивного модулятора добротності резонаторі на основі алюмо-магнієвої шпінелі з кобальтом з початковим пропусканням на довжині хвилі випромінювання 87 % отримані моноімпульси тривалістю близько 30 нс і енергією 6 мДж.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Смирнов Е.А., Киселев А.С. Основы лазерной техники: методическое пособие. 2015. 48 с.
2. Звелто О. Принципы лазеров. Москва, 1990. 550 с.
3. Борейшо А. С. Лазеры: устройство и действие, 1992. 215 с.
4. Вейко В.П., Петров А.А. Опорный конспект лекций по курсу “Лазерные технологии”. Введение в лазерные технологии. Санкт Петербург, 2009. 143 с
5. Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки. А. Г. Григорьянц. Москва, 1989. 304 с.
6. А. А. Лисенков, Е. А. Смирнов, А. А. Ухов и др. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Квантовые и оптоэлектронные приборы и устройства". Санкт Петербург, 1997. 88 с.
7. Глухих И.В., Димаков С.А. и др. Мощные твердотельные лазеры на Nd : YAG с поперечной диодной накачкой и улучшенным качеством излучения. Москва, 2011. 70 с.
8. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. Москва, 1981. 440 с.
9. Н.И. Кацавец. Мощные высокоэффективные квазинепрерывные лазерные линейки для накачки твердотельных лазеров на основе Yb - содержащих активных сред. Москва, 2001. С. 43 – 48.
10. Ю.Н. Батов, А.Б. Губин, Ю.Б. Пирожков Тепловой баланс в массо-габаритных импульсных лазерах на эрбиевых стеклах с диодной накачкой. Санкт Петербург, 2002. С. 5 – 10.
11. Грамаков А. А., Фефелов А. П., Чернышев А. В. Высокоэффективные источники накачки для непрерывных твердотельных лазеров. Лазерные системы и их применение. Москва, 2006. 45 – 46 с.

12. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. Москва, 1980. 140 с.
13. Шестаков А. Активные элементы твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой. Санкт Петербург, 2007. 47 с.
14. Кравцов Н.В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой. Санкт Петербург, 2001. С. 661– 667.
15. Курунов Р. Ф. Электрофизические процессы накачки и оптические свойства активных сред мощных лазеров и усилительных систем. Санкт Петербург, 2009. 214 с.
16. Грамаков А. А., Фефелов А. П., Чернышев А. В. Высокоэффективные источники накачки для импульсных полупроводниковых лазерных линеек. Москва, 2012. С. 56 – 59.
17. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х томах = The Art of Electronics: Second Edition (© Cambridge University Press) Москва, 1980. 568 с.
18. С.В. Гагарский, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, Миниатюрные диодно-накачиваемые лазеры на иттербий-эрбиевых стеклах с модуляцией добротности оптическими затворами на нарушенном полном внутреннем отражении 2000. С. 10 – 12.
19. G.A. Bufetova, D.A. Nikolaev, V.F. Seregin, I.A. Shcherbakov Long pulse lasing with Q-switching by FTIR shutter 1999. P. 314 – 318.
20. Л.О. Бышевская-Конопко, А.Б. Губин, А.А. Изынеев, Ю.Б. Пирожков Эрбиевые активные элементы со щелевой диафрагмой 2014. С. 21 – 25.
21. Д.А. Бондаренко, В.Е. Карасик, Л.Н. Магдич Малогабаритный эрбиевый лазерный излучатель с диодной накачкой и акустооптической модуляцией добротности. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. С. 14 – 30.
22. Крылов А.А. Компактный - лазер, работающий с частотой следования импульсов 10 Гц в режиме модуляции добротности. Москва, 2018. С. 607 – 610.

23. Fluck R. , Keller U., Gini E., Meichior H. OSA Trends in optics and photonics series Washington, 1998. 146 p.
24. Boiko R.M., Ohkrimchuk A.G., Shestakov A.V. OSA Tops on Adv. Sol. State Lasers, 1998. 185 p.
25. Ymashev K.V., Denisov I.A., Kuleshov N.V. OSA Tops on Adv. Sol. State Lasers, 2004. 204 p.
26. Podlipensky A.V., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Mikhailov V.P., Levchenko V.I., Yakimovich V.N. *Opt. Lett.* 1999. 960 p.
27. Б.И. Галаган, Е.А. Годовикова, Б.И. Денкер, Эффективный просветляющийся фильтр на основе кристаллов $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Co}^{2+}$ для модуляции добротности лазеров с $\lambda=1,54$ мкм на эрбиевом стекле. Москва, 1999. С. 189 – 190.
28. Daiminger F., Dorsch F., Lorenzen D. Proc. SPIE Int. Soc. Eng., 1999. 25 p.
29. Быков В.Н. Эффективность лазера на эрбиевом стекле с пассивной модуляцией добротности резонатора. Москва, 2002. С. 202 – 204.
30. В.Н. Быков, А.А. Изынеев, А.Г. Садовой, П.И. Садовский и др. Излучатель на эрбиевом стекле с поперечной полупроводниковой накачкой и пассивной модуляцией добротности. Москва, 2008. С. 209 – 212.
31. Быков В.Н. Эффективность лазера на эрбиевом стекле с пассивной модуляцией добротности резонатора. Санкт Петербург, 2002. С. 202 – 204.
32. В.Н. Быков, А.А. Изынеев, А.Г. Садовой, П.И. Садовский и др. Излучатель на эрбиевом стекле с поперечной полупроводниковой накачкой и пассивной модуляцией добротности. Санкт Петербург, 2008. С. 209 – 212.