

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)
ГОЛЬМІЄВИЙ ЛАЗЕР
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІм-18-1
(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., зав. каф. ФОЕТ Мачехін Ю.П.
(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»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Темній Олені Анатоліївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Гольмієвий лазер

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 режим генерації – безперервний; довжина хвилі випромінювання – 2,1 мкм; потужність лазерного випромінювання – 0,67 мВт; поглинена потужність накачування – 85 мВт; постійна часу люмінесценції – 0,5 мс.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Фізичні особливості волоконних лазерів 2. Особливості моделювання волоконного лазера 3. Вплив концентрації активних іонів на динаміку генерації гольмієвого волоконного лазера 4. Результати розрахунку основних параметрів гольмієвих лазерів

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

Схема оптична структурна (Л1) – лінійного волоконного лазера

Схема оптична структурна (Л1) – кільцевого волоконного резонатора

Демонстраційний матеріал – 14 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни	Примітка
		виконання етапів	
1	Аналіз технічної літератури по гольмієвому волоконному лазеру	04.11.19 – 20.11.19	Виконано
2	Огляд літератури з основних моделей волоконних лазерів	21.11.19 – 24.11.19	Виконано
3	Оформлення аналітичного огляду	25.11.19 – 28.11.19	Виконано
4	Моделювання волоконного лазера	29.11.19 – 01.12.19	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	02.12.19 – 06.12.19	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	07.12.19 – 08.12.19	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	09.12.19 – 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., зав. каф. ФОЕТ Мачехін Ю.П.
(підпис) (посада, прізвиціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 71 с., 31 рис., 6 табл., 2 додатки, 20 джерел.

ГОЛЬМІЄВИЙ ЛАЗЕР, ІОНИ, КОЕФІЦІЄНТ, ВОЛОКОННИЙ ХВИЛЕВІД, ДОВЖИНА ХВИЛІ, ПОТУЖНІСТЬ, НАКАЧУВАННЯ, ПЕРЕРІЗ ПОГЛИНАННЯ, ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ, НАПІВПРОВІДНИКОВЕ ДЖЕРЕЛО, БРЕГГІВСЬКА РЕШІТКА, СЕРЦЕВИНА.

Об'єкт дослідження – волоконний гольмієвий лазер з довжиною хвилі 2 мкм.

Мета роботи – моделювання волоконного лазера, що дозволяє отримувати випромінювання з довжиною хвилі в діапазоні 2 мкм, перекриваючи практично увесь ближній ІЧ діапазон.

Метод дослідження – теоретичний та чисельний.

У роботі був розглянутий волоконний лазер, легований іонами гольмію, його характеристики і конструкція. Проаналізовані технічні особливості, на основі яких був вичислений переріз поглинання та переріз люмінесценції іонів гольмію. Виявлений і досліджений динамічний режим роботи гольмієвих лазерів залежно від концентрації іонів гольмію в активному волокні; запропонована схема імпульсного гольмієвого волоконного лазера, працюючого в режимі модуляції добротності, де в якості затвора використовується відрізок висококонцентрованого гольмієвого волокна.

ABSTRACT

Explanatory message of attestation work: 71 p., 31 rice., 6 tables., 2 additions, 20 sources.

HOLMIUM LASER IONS, THE RATIOS OF OPTICAL FIBER, WAVELENGTH, FLUENCE, PUMP ABSORPTION CROSS SECTION, LUMINESCENCE, SOLID SOURCE, BRAGG GRATING CORE.

Research obgekt – holmium fibre laser with a wavelength of 2 mkm.

Purpose of work – modeling fiber laser allows to obtain radiation with a wavelength in the range of 2 m, covering almost the entire near-infrared range.

Research method – theoretical and numeral.

Considered fiber laser doped with holmium ions, and its characteristics design. Analyzed the technical features, which are calculated on the basis of the absorption cross section and the cross section of the luminescence of holmium. The educed and investigational dynamic mode of operations of holmium lasers is depending on the concentration of ions of holmium in an active fibre; offer chart of impulsive holmium of fiber laser working in the mode of modulation of good quality, where as a breech-block the segment of highly concentrated holmium fibre is used.

РЕФЕРАТ

Объяснительная записка аттестационной работы: 71 с., 31 рис., 6 табл., 2 дополнения, 20 источников.

ГОЛЬМИЕВЫЙ ЛАЗЕР, ИОНЫ, КОЭФФИЦИЕНТ, ВОЛОКОННЫЙ ВОЛНОВОД, ДЛИНА ВОЛНЫ, МОЩНОСТЬ, НАКАЧКА, ПЕРЕРЕЗ ПОГЛОЩЕНИЯ, ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ, ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИСТОЧНИК, БРЕГГОВСКАЯ РЕШЕТКА, СЕРДЦЕВИНА.

Объект исследования – волоконный гольмиевый лазер с длиной волны 2 мкм.

Цель работы – моделирование волоконного лазера, что позволяет получать излучение с длиной волны в диапазоне 2 мкм, перекрывая практически весь ближний ИК диапазон.

Метод исследования – теоретический и численный.

В работе был рассмотрен волоконный лазер, легированный ионами гольмия, его характеристики и конструкция. Проанализированные технические особенности, на основе которых был вычисленный разрез поглощения и разрез люминесценции ионов гольмия. Выявленный и исследованный динамический режим работы гольмиевых лазеров в зависимости от концентрации ионов гольмия в активном волокне; предложенная схема импульсного гольмиевого волоконного лазера.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	8
Вступ.....	9
1 Особливості волоконних лазерів та їх застосування у різних областях медицини	Ошибка! Закладка не определена.1
<u>1.1</u> Фізичні особливості волоконних лазерів	Ошибка! Закладка не определена.1
<u>1.2</u> Застосування гольмієвого лазера в медицині та хірургії зокрема	Ошибка! Закладка не определена.2
<u>1.3</u> Довжина хвилі та режим роботи гольмієвого лазера	Ошибка! Закладка не определена.7
<u>1.4</u> Технічні характеристики гольмієвих лазерів	Ошибка! Закладка не определена.8
2 Моделювання волоконного лазера	20
2.1 Специфіка створення волоконних лазерів.....	20
<u>2.2</u> Елементи волоконного лазера.....	20
<u>2.3</u> Активні добавки для оптичних волокон	21
<u>2.4</u> Схеми накачування активних волокон	28
3 Вплив концентрації активних іонів на динаміку генерації гольмієвих волоконних лазерів	34
3.1 Концепція впливу на генерацію волоконного гольмієвого лазера	34
3.2 Суть експерименту та експериментальні зразки	34
3.3 Характеристики активних волокон	40
3.4 Дослідження властивостей гольмієвих волоконних лазерів	42
3.5 Дія випромінювання гольмієвого лазера на біологічну тканину	47
4 Розрахунок параметрів волоконного лазера.....	53
4.1 Розрахунок коефіцієнту перекриття	53
4.2 Розрахунок перерізу поглинання	57
4.3 Розрахунок перерізу люмінесценції для волоконних лазерів легованих іонами гольмію	58
4.4 Моделювання коефіцієнта підсилення	63

Висновки	67
Перелік джерел посилання	69
Додаток А Графічний матеріал.....	72
Додаток Б Демонстраційний матеріал	76

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВБР	– волоконні бреггівські решітки;
ВКР	– вимушене комбінаційне розсіювання;
РК	– рідкокристалічний;
ІЧ	– інфрачервоний;
БФП	– багатофункціональний пристрій;
п/п	– півпровідниковий;
ЧПУ	– числове програмне управління;
СО ₂ -лазери	– газові лазери з тепловим накачуванням;
DPSS-лазери	– Diode-pumped solid-state laser (твердотільні лазери з діодним накачуванням);
GTW	– понижений показник заломлення;
MCVD	– Modified chemical vapor deposition (модифіковане осадження з газової фази);
SMF-28	– Single-Mode Fiber (одномодовое волокно).

ВСТУП

Волоконні лазери є одним з найбільш яскравих досягнень сучасної квантової електроніки. Цей напрямок виник на стику лазерної фізики та волоконної оптики. Ряд переваг волоконних лазерів у порівнянні з традиційними квантовими генераторами дозволяють їм знайти різні застосування та замінити традиційні випромінювачі.

У даний час розроблені та промислово виробляються потужні лазери на основі волокон, легованих іонами Yb^{+3} , Er^{+3} , Tm^{+3} , також ведуться активні дослідження в області лазерів на основі волокон, легованих вісмутом. Ці джерела в сукупності дозволяють перекрити спектральний діапазон від 1 мкм до 2 мкм. У той же час, волоконні лазери, що випромінюють на довжинах хвиль більше 2 мкм, розроблені значно слабкіше. Інтерес до таких джерел обумовлений тим, що в області від 2,1 мкм до 2,2 мкм розташований локальний максимум пропускання атмосфери.

Дана робота має дослідницький характер та теоретичну можливість реалізації ефективного гольмієвого лазера у повністю волоконному виконанні, що випромінює на довжинах хвиль 2,02; 2,05; 2,07; 2,1; 2,13; 2,15 мкм.

Актуальність досліджень у цій області підтверджується зростанням в останні роки уваги до неї з боку застосування гольмієвих лазерів в медицині та інших галузях. Слід зазначити, що розглянуті у цій роботі проблеми реалізації гольмієвих волоконних лазерів включають в себе широке коло питань, яким до теперішнього часу присвячено ряд опублікованих статей.

На даний час реалізовані гольмієві лазери широко використовуються в області медицини по Україні, зокрема у Харкові. Застосування такого типу лазерів в медичних закладах почалося з використання твердотілого гольмієвого лазера Ho:YAG зеленого спектру випромінювання і є актуальним до цього часу. Вперше такий лазер був встановлений в Харківському обласному центрі урології та нефрології ім. В.І. Шаповала, де була проведена

перша операція по видаленню аденоми. Це стало початком для проведення операцій в Україні, тоді як вони були можливі тільки за кордоном.

Використання волоконних гольмієвих лазерів зараз також є актуальним, але знаходиться процесі розробки потрібних аспектів для їх реалізації та впровадження.

До положень даної атестаційної роботи відносяться: реалізація набору гольмієвих лазерів, а також широкосмугового джерела двохмікронного діапазону; концентрація легуючих домішок та склад сітки скла, які впливають на ефективність генерації гольмієвих волоконних лазерів, можливість її оптимізації, а також оптимізація схеми лазера для підвищення ефективності генерації.

Наукова новизна роботи полягає в наступному: виявлений і досліджений динамічний режим роботи гольмієвих лазерів залежно від концентрації іонів гольмію в активному волокні; запропонована схема імпульсного гольмієвого волоконного лазера, працюючого в режимі модуляції добротності, де в якості затвора використовується відрізок висококонцентрованого гольмієвого волокна.

Практична цінність роботи полягає в тому, що результати досліджень мають широке коло можливих застосувань, як в наукових, так і в прикладних областях. На основі проведених досліджень реалізований ряд ефективних джерел лазерного випромінювання середнього інфрачервоного діапазону з довжиною хвилі випромінювання 2 – 2,15 мкм, які можуть бути використані для моніторингу газового складу повітря, для лазерної локації, в системах зв'язку, в медицині, в теплобаченні, для військово-технічних застосувань та ін. Таким чином, подальші дослідження волоконних лазерів є актуальним і представляють практичний інтерес для розробників і користувачів лазера цього типу.

Метою роботи є моделювання волоконного гольмієвого лазера, що дозволяє отримувати випромінювання середньої потужності довжини хвилі в діапазоні 2 мкм, перекриваючи практично увесь ближній ІЧ діапазон.

1 ОСОБЛИВОСТІ ВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У РІЗНИХ ОБЛАСТЯХ МЕДИЦИНИ

1.1 Фізичні особливості волоконних лазерів

Окремим напрямком волоконної оптики є розробка та дослідження волоконних лазерів. В цих пристроях у якості активного середовища використовуються волокна, леговані різними добавками, перш за все рідкоземельними елементами. Слід зазначити, що вперше волоконний лазер був створений Снітцером у 1961 р., коли була продемонстрована лазерна генерація у склі, легованому іонами Nd^{3+} . Активний елемент лазера представляв собою скляну нитку, покриту оболонкою зі скла з пониженим показником заломлення. Розвиток технології отримання волокон та напівпровідникових джерел накачування дозволив повернутися до ідеї волоконного лазера на якісно новому рівні. Початок бурхливого розвитку цього напрямку відноситься до кінця 80-х р.р. минулого століття, коли було показано, що волокна леговані іонами Er^{3+} , можуть знайти застосування у волоконних підсилювачах сигналу на довжинах хвиль в діапазоні від 1,53 мкм до 1,56 мкм [1], тобто у спектральній області мінімальних оптичних втрат волокон на основі кварцевого скла. Дослідження в області волоконно-оптичних підсилювачів послужили поштовхом для створення потужних напівпровідникових джерел накачування. Відкриття фоторефрактивного ефекту у волокнах та розробка методики записів внутрішньоволоконних бреггівських відображаючих решіток дозволили формувати бреггівські дзеркала [2], що утворюють резонатор безпосередньо у самих волокнах, та реалізувати широкий набір лазерних конфігурацій в чисто волоконному виконанні. Усі ці параметри призвели до початку розвитку реалізації волоконних лазерів.

Слід зазначити, що поняття «волоконні лазери» охоплює надзвичайно широке коло лазерних конфігурацій, що характеризуються різними

масштабами вихідної потужності, а також спектральними та часовими характеристиками вихідного випромінювання.

В даній роботі розглядаються безперервні волоконні лазери, які останніми роками привертають велику увагу завдяки широкому кругу як реалізованих, так і потенційних застосувань. В останні декілька років інтенсивно розвивається напрям, пов'язаний з потужними волоконними лазерами.

Зростання інтересу для дослідження лазерів, довжина хвилі випромінювання яких лежить в області більше 2 мкм, обумовлений широтою їх застосування (моніторинг газового складу повітря, контроль навколишнього середовища, спектроскопія, теплобачення, військово-технічні застосування, медицина та ін.).

1.2 Застосування гольмієвого лазера в медицині та в хірургії зокрема

Область застосування лазерної техніки в медицині постійно розширюється. Так, наприклад, в урології [3], гінекології, хірургії захворювань вуха, горла і носа, ортопедії широко використовуються гольмієві твердотільні лазери, однак вони працюють тільки в імпульсному режимі генерації високоенергетичних довгих імпульсів з частотою проходження до 20 Гц. Очевидно, що при існуючій різноманітності патологій потрібні інші режими роботи – такі, що можуть забезпечити волоконні гольмієві лазери. Більш того, волоконні лазери дозволяють знизити вартість випромінювача та його обслуговування.

Застосування гольмієвого лазера в хірургії поділяється на такі категорії як:

– урологія: трансуретральна резекція шийки сечового міхура при стенозі; трансуретральна фотокоагуляція і резекція новоутворень сечового міхура; літотрипсія; посічення і фотокоагуляція новоутворень уретри;

оптична внутрішня уретротомія; трансуретральна резекція аденоми передміхурової залози; лазерна абляція простати; лікування пухлин;

- гінекологія: міомектомія; усунення ерозії шийки матки; лікування ендометріозу; лапароскопічні операції;

- оториноларингологія: тонзилотомія; тонзилектомія; бронхоскопічні операції;

- лапароскопічна хірургія: лапароскопічна холецистектомія; лапароскопічна ваготомія; лапароскопічна апендектомія;

- хірургія суглобів: синовектомія; менискетомія; хондропластика; видалення суглобової рідини; пластичні операції на хрящі; випарювання кісткових сегментів; капсулоектомія; черезшкірна дискектомія;

- проктологія: гемороїдектомія; посічення анальних тріщин; видалення періанальних кондилом; колоноскопічна поліпектомія;

- спінальна хірургія: декомпресія дисків; спінальна ендоскопія; нуклеотомія;

- косметологія: випар пухлин, бородавок, пілінг.

Інтерес до лазерів, що генерують в області від 2 мкм до 2,4 мкм, обумовлений специфічним спектром поглинання ліпідної тканини, що відрізняється в цій області від спектра поглинання води (рис. 1.1) [4]. Ці параметри дають можливість впливати на пухлини головного та спинного мозку, що складаються в основному з ліпідної тканини, без утворення помітної зони карбонізації – чітко вираженого чорного контуру обвугленої тканини (підвищеного вмісту вуглецю в органічній речовині під дією тепла, світла, іонізуючого випромінювання, ферментів), та зони коагуляційного некрозу (порушення клітинної структури під дією лазерного випромінювання). Вище перераховані параметри, в основному, і обумовлюють інтерес до джерел випромінювання даного спектрального діапазону. На даний момент з використанням кварцових волокон, легованих іонами гольмію, отримана лазерна генерація в діапазоні від 2 мкм до 2,21 мкм [5]. Максимально досягнута вихідна потужність склала 140 Вт, а

квантова ефективність – 0,81. Також при впливі на біологічну тканину випромінювання гольмієвого волоконного лазера спостерігається гемостатичний ефект.

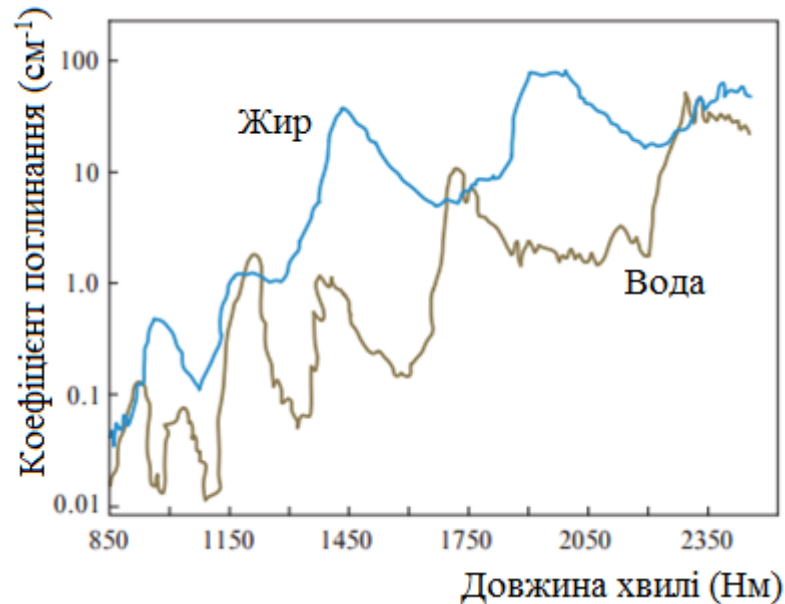


Рисунок 1.1 – Спектри поглинання жиру та води

Слід зазначити, що одним з головних напрямків розвитку сучасної хірургії є ендоскопічні методи. Однак їх застосування обмежене відсутністю джерел випромінювання, що забезпечують ефективну дію (руйнування та коагуляцію) на біологічні тканини і сумісних з хірургічними ендоскопами. Подібне обладнання може бути створено на базі волоконних лазерів, що володіють такими перевагами, як висока ефективність, стабільна вихідна потужність, висока якість вихідного пучка, компактність і легкість випромінювача, а також дозволяють здійснювати мінімальну інвазивну хірургію. Тому область застосування волоконних лазерів для медичних цілей постійно розширюється [6].

Арсенал медичних лазерних установок, що застосовуються в хірургії, на початку 90-х р.р. поповнився гольмієвим YAG-лазером (Ho:YAG), які

працюють в імпульсному режимі у середньому інфрачервоному діапазоні (довжина хвилі 2,1 мкм).

Апробація гольмієвих лазерів в таких областях практичної хірургії, як урологія, гінекологія, ЛОР-хірургія, артроскопія відразу показала її високу ефективність при розтині та абляції твердих і м'яких тканин, а також при дробленні всіх видів конкрементів.

Основні переваги гольмієвого лазера в хірургії:

- сильне поглинання в біотканині як і 10,6 мкм CO₂-лазера, також хороша передача випромінювання через кварцове волокно;
- висока пікова потужність (більше 4 кВт) за рахунок імпульсного режиму призводить до сильного випаровування (абляції) біоткани. Мала глибина проникнення одного імпульсу (0,4 мм), звідси – низька поразка навколишніх тканин в порівнянні з неодимовим лазером, у якого глибина проникнення 4 – 7 мм, також відсутні карбонізація та опік тканини;
- розсічення тканин в контакті і коагуляція в безконтактному режимі роботи. Немає нагріву та пригорання кінчика волокна, спостерігається його самоочищення під дією випромінювання 2,09 мкм. Гемостаз виникає за рахунок скручування капілярів, що зменшує ймовірність утворення і відриву великих тромбів;
- практично відсутнє рубцювання тканини при загоєнні лазерної рани;
- безпека для зору обслуговуючого персоналу.

В таблиці 1.1 приведена порівняльна оцінка хірургічних лазерів.

Типові вихідні параметри гольмієвого лазера: середня вихідна потужність 5 – 100 Вт, максимальна енергія випромінювання – до 6 Дж, частота повторення імпульсів – до 40 Гц, тривалість імпульсу – близько 500 мкс.

Таблиця 1.1 – Порівняльна оцінка хірургічних лазерів за характером і можливостями впливу їх випромінювання на біотканини

Характеристики	Тип лазера		
	1	2	3
	Nd:YAG 1,06 мкм	CO ₂ 10,6 мкм	Ho ³⁺
Поглинання в біотканині, см ⁻¹	0,5	700	50
Глибина проникнення для невазуляризованої тканини, мм	40	0,1	0,4
Глибина проникнення для васкуляризованої тканини, мм	25	0,1	0,4
Ширина області термічної дії, мм	> 25	0,6 – 1,2	0,4 – 0,6
Карбонізація тканини	немає	Так	немає
Коагуляція судин, зупинення кровотечі (гемостаз)	Так (крупні тромби)	Так (крупні тромби)	Так (крупні тромби)
Можливість вторинної післяопераційної кровотечі	Так	Так	Так
Післяопераційний опікове рубцювання	Так	Так	Так
Можливість передачі випромінювання по світловолокну	Так	Ні	Так
Стійкість волокна при контакті с біотканиною	Немає	–	Так
Час післяопераційного заживлення рани, (дні)	> 10	7 – 10	3 – 5
Небезпека для очей обслуговуючого персоналу	Дуже висока	Низька	Низька

Випромінювання гольмієвого лазера добре коагулює судини розміром до 0,5 мм, що цілком достатньо для більшості хірургічних втручань. Двохмікронне випромінювання до того ж цілком безпечно для очей. Поєднання фізичних параметрів випромінювання Ho:YAG-лазера виявилось оптимальним для цілей хірургії, що дозволило йому знайти численні застосування в найрізноманітніших областях медицини.

Можна стверджувати, що гольмієвий лазер поєднує в собі переваги неодимового і CO₂-лазерів, і в той же час він вільний від їх недоліків, тому основну увагу серед хірургічних лазерів приділяється саме йому.

1.3 Довжина хвилі та режим роботи гольмієвого лазера

Довжина хвилі випромінювання гольмієвого лазера дорівнює 2,09 мкм, а коефіцієнт поглинання у воді становить 40 см^{-1} . Лазерне випромінювання проникає в м'які біотканини на глибину близько 0,4 мм, причому мало залежить від васкуляризації тканини. Це означає, що вплив на прилеглі тканини буде незначним і не слід побоюватися небажаних великих супутніх опіків та сильного некрозу навколо лазерної рани.

Кварцове скло прозоре на довжині хвилі випромінювання гольмієвого лазера, що дає можливість використовувати тонке гнучке кварцове оптичне волокно для доставки випромінювання лазера до об'єкта впливу.

Режим роботи гольмієвого лазера імпульсний, тривалість цього імпульсу становить 300 – 600 мкс. Частота повторення імпульсів може змінюватися в діапазоні від 1 Гц до 20 Гц. Енергія імпульсу варіюється до 3 Дж при середній потужності вихідного випромінювання 20 – 30 Вт.

Імпульсний режим значно зменшує час нагрівання біотканини, і, отже, опікову реакцію організму. При цьому пікова потужність випромінювання у 5 – 10 кВт дає можливість швидко випаровувати тканину практично без фази повільного нагріву. У фізиці такий процес називається адіабатичним, тобто без теплообміну з оточуючими тілами.

Яскраво виражені вапоризуючі властивості гольмієвого лазера дозволяють використовувати його для випаровування новоутворень різної локалізації, а також для інцизії і ексцизії біотканини. Продуктивність залежить від частоти повторення та енергії імпульсу лазерного випромінювання.

Зупинка кровотечі гольмієвим лазером за рахунок коагуляції біотканини має ряд переваг. Зазвичай механізм коагуляції різними хірургічними апаратами містить у своїй основі термічний принцип [7] – сильний нагрів біотканини призводить до скипання крові і утворення мікротромбів в капілярах. Випромінювання гольмієвого лазера в основному

випаровує кров, а судини скручуються без помітного утворення тромбів, що знижує вірогідність вторинної кровотечі із-за їх механічного відриву. Проте, оскільки глибина проникнення лазерного випромінювання обмежена 0,5 мм, то і діаметр судин, що коагулюються, теж обмежений 0,5 мм.

1.4 Технічні характеристики гольмієвих лазерів

В таблиці 1.2 приведені порівняльні технічні характеристики двох гольмієвих лазерів серій «TRIPLE» і «Contact».

Таблиця 1.2 – Порівняльні технічні характеристики лазерів

Характеристики	Установки	
	1	2
	«TRIPLE»	«Contact»
Тип лазера	Но: YAG - твердотільний гольмієвий	Но: YAG - твердотільний гольмієвий
Довжина хвилі, мкм	2,09	2,09
Режим роботи, мкс	Імпульсний, 600	Імпульсний, 600
Вихідна потужність, Вт	20 або 40	до 15
Енергія імпульсу, Дж	до 3	до 3
Частота повторення імпульсів, Гц	до 20	до 17
Керування	Мікропроцесорне	Мікропроцесорне
Наведення променя	Пілотний КТР - лазер (контрастного зеленого спектру випромінювання)	Пілотний КТР - лазер (контрастного зеленого спектру випромінювання)
Виведення випромінювання	Гнучкий світлопровід 400, 600 мкм, довжина 3 м SMA - роз'єм	Гнучкий світлопровід 400, 600 мкм, довжина 3 м SMA - роз'єм
Охолодження	Замкнутий контур вода-повітря	Замкнутий контур вода-повітря
Живлення	220 В, 50 Гц, 16 А	220 В, 50 Гц, 16 А
Габарити	694 × 925 × 374	76 × 51 × 23
Вага, кг	60	35

Наприклад, гольмієвий лазер з довжиною хвилі 2,09 мкм має деякі відмітні характеристики для застосування його в хірургії: ефективно різання і

коагуляція біотканини за відсутності опіків і карбонізуючої тканини; передача випромінювання по оптичному волокну; проведення ендоскопічних і лапароскопічних операцій; відсутність післяопераційного рубцювання; двохмікронне випромінювання гольмієвого лазера безпечно для очей; висока імпульсна потужність випромінювання; низькі експлуатаційні витрати; компактна і мобільна конструкція.

Отже з таблиці видно, що дещо менші за потужністю характеристики гольмієвого лазера «Сонтраст» в порівнянні з лазером «TRIPLE», дозволяють з успіхом використати його в хірургії: літотрипсія, ЛОР-хірургія, дерматологія та ін. На рисунку 1.2 показаний загальний вигляд лазерів «TRIPLE» і «Contact».



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд гольмієвих лазерів

Унікальні характеристики двохмікронного випромінювання гольмієвого лазера є найкращим вибором для хірурга, завдяки чому гольмієвий лазер з успіхом знаходить застосування в різних областях хірургії.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

2.1 Специфіка створення волоконних лазерів

Удосконалення волоконно-оптичної техніки призвело до створення нового типу пристроїв: оптичних підсилювачів та лазерів на так званих активних волокнах, тобто волокнах, легованих рідкоземельними елементами.

Перші волоконні лазери були створені на кварцових волокнах, легованих іонами неодиму. В даний час генерація може бути отримана у кварцових волокнах легованих неодимом, ербієм, ітербієм, тулієм, празеодимом. Волоконний лазер конструктивно принципово відрізняється від класичних лазерів. Активним елементом цього лазера є кварцове оптичне волокно, яке в нашому випадку леговане іонами гольмію Ho^{+3} [8].

2.2 Елементи волоконного лазера

На рисунку 2.1. приведена найпростіша конфігурація волоконного лазера з торцевим накачуванням: 1 – напівпровідниковий випромінювач, 2 – точка зварювання, 3 – активне волокно, 4 – бреггівські решітки, 5 – вихід випромінювання. Вхідна бреггівська решітка зазвичай має коефіцієнт відбиття, близький до одиниці на довжині хвилі генерації, а необхідний коефіцієнт відображення вихідної решітки визначається величиною посилення і оптичних втрат випромінювання в активному волокні.

Бреггівські решітки можуть бути записані як безпосередньо в активному волокні, так і у відрізках фоточутливого волокна, які приварюються до активного.

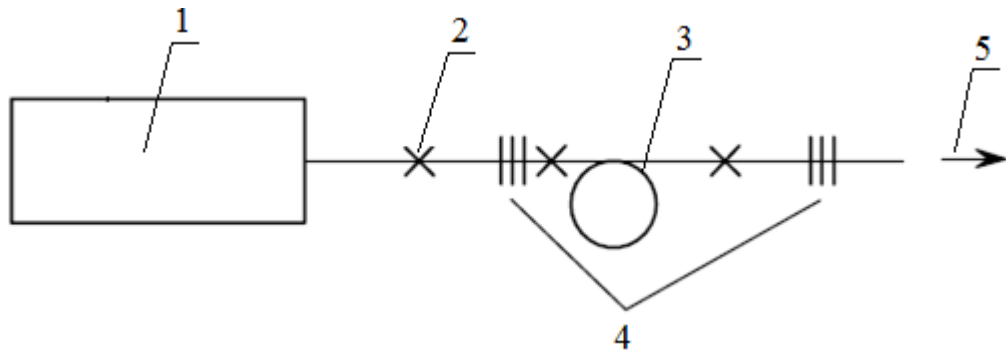


Рисунок 2.1 – Найпростіша конфігурація лінійного волоконного лазера

2.3 Активні добавки для оптичних волокон

Так само як і у твердотільних лазерних джерелах випромінювання, найбільшого поширення у якості активних легуючих добавок для волокон отримали іони лантанодів, або рідкісноземельних елементів. Специфічні оптичні властивості даних елементів визначаються тим, що для них характерна добудова внутрішньої f-оболонки, коли вже заповнилися зовнішні оболонки. Наявність незаповненої внутрішньої оболонки призводить до появи яскраво вираженої дискретної структури електронних переходів, яка і обумовлює застосування іонів рідкоземельних елементів в якості активних домішок [9].

Застосування активного іона для легування волокон на основі кварцового скла визначається наступними факторами: по-перше, активний іон повинен мати радіаційний перехід в ближній ІЧ області спектра, де кварцове скло найбільш прозоре; по-друге, у ньому енергія фононів становить від 400 см^{-1} до 1100 см^{-1} [10], тому наявність енергетичних рівнів з малим енергетичним зазором всередині оптичного переходу призводить до безвипромінювальної релаксації, перешкоджаючи появі люмінесценції. Тому в якості активних домішок для волокон на основі кварцового скла найбільше

поширення знайшов ряд елементів, наведених в таблиці 2.1, де також показані дані про область люмінесценції цих активних іонів.

Слід зазначити, що у волокнах на основі скла іншого складу, зокрема флюорідних та халькогенідних, можливе отримання лазерної генерації з використанням й інших активних іонів, наприклад празеодиму. Схеми енергетичних рівнів елементів та використовувані оптичні переходи представлені на рисунку 2.2.

Таблиця 2.1 – Рідкоземельні елементи, що використовуються для створення активних волокон, і спектральні області їх люмінесценції

Характеристики	Активний іон				
	1	2	3	4	5
	Nd ³⁺	Ho ³⁺	Er ³⁺	Tm ³⁺	Yb ³⁺
Область люмінесценції, мкм	0,92 – 0,94; 1,05 – 1,1; 1,34	1,9 – 2,1	1,53 – 1,6	1,7 – 1,9	0,98 – 1,16

Енергетична схема гольмію має лазерний перехід ${}^5J_7 \rightarrow {}^5J_8$ з відповідною довжиною хвилі випромінювання в області 2 мкм. Час життя на збудженому рівні складає близько 0,5 мс. При цьому гольмієвий лазер повинен працювати за трирівневою схемою, оскільки на тій же довжині хвилі існує поглинання з основного стану. Тому для таких лазерів для досягнення інверсії необхідною є накачування в інтенсивній смузі поглинання. З цієї причини найбільшого поширення знайшли твердотільні гольмієві лазери з ламповим накачуванням в смузі поглинання, розташованій у видимій частині спектру. Використання смуги поглинання в області 0,9 мкм, що відповідає переходу ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_5$, для накачування напівпровідникових джерелом не отримало застосування внаслідок слабкої інтенсивності зазначеної смуги. У той же час наявність інтенсивної смуги поглинання в області 1,15 мкм, що відповідає переходу ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_6$ дозволяє розраховувати на істотне поліпшення характеристик гольмієвого волоконного лазера при накачуванні в цю смугу.

Це було здійснено при використанні в якості джерела накачування ітербієвого волоконного лазера.

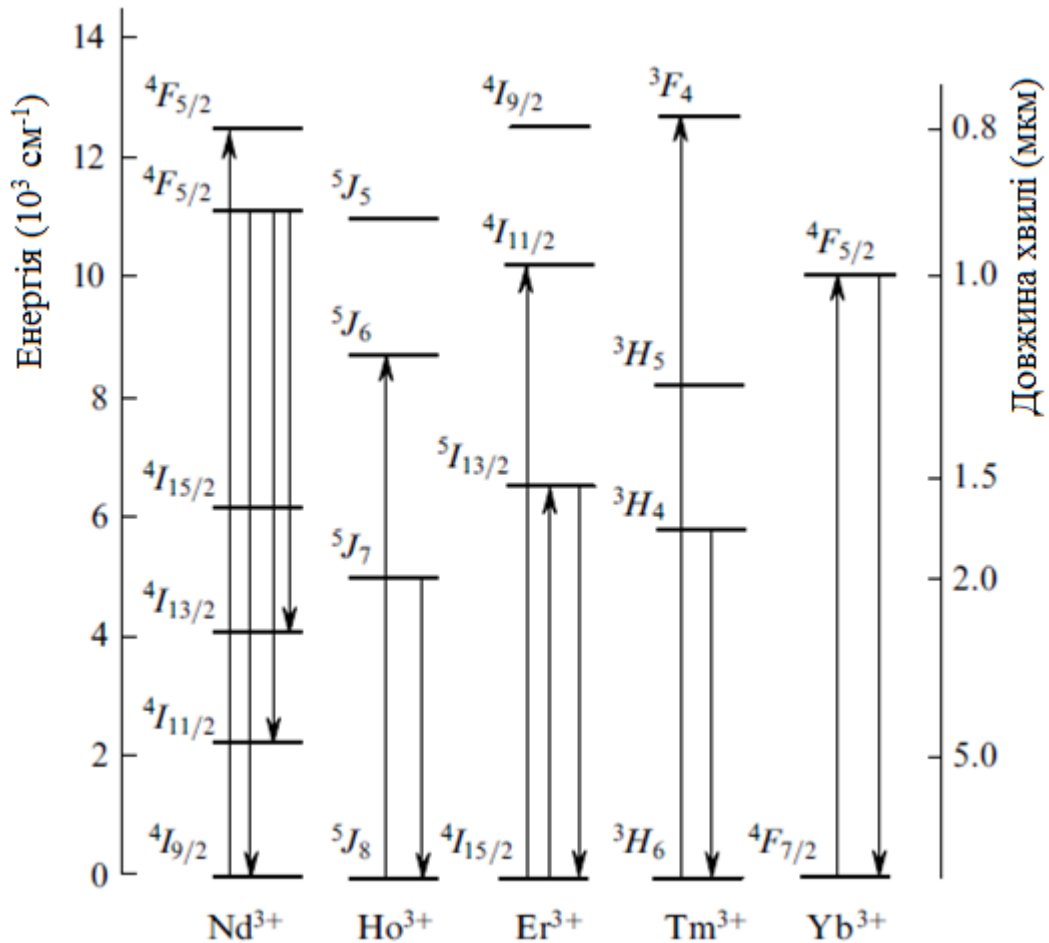


Рисунок 2.2 – Схема енергетичних рівнів іонів ряду рідкоземельних елементів

На рисунку 2.3 представлений спектр люмінесценції волокна, легованого іонами Ho³⁺, при порушенні випромінюванням криптонового лазера на довжині хвилі 676 нм. Дана довжина хвилі відповідає переходу ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_4$. Постійна часу люмінесценції склала 0,5 мс.

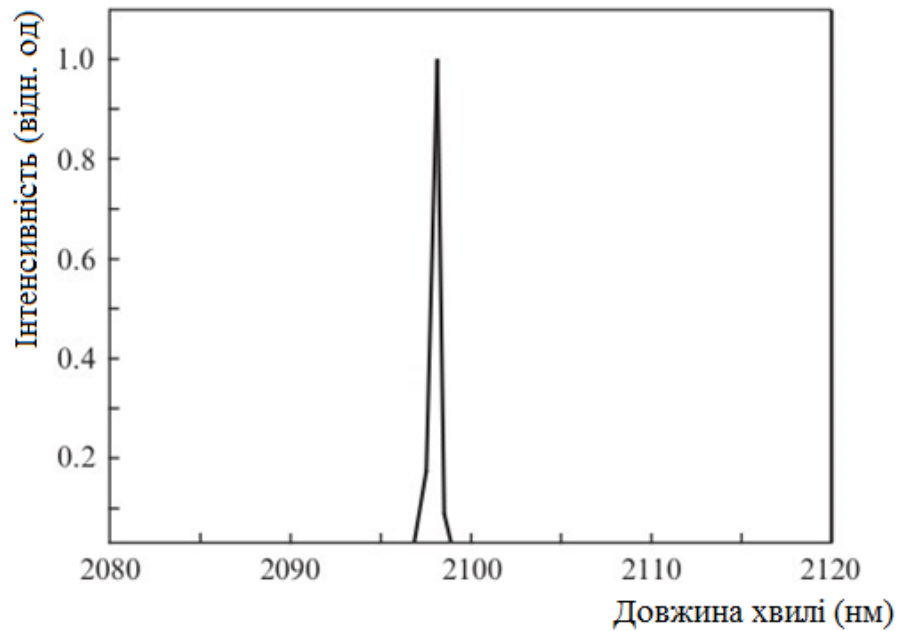


Рисунок 2.3 – Спектр люмінесценції волокна легованого іонами Ho^{3+}

Для створення волоконного лазера було використане активне волокно з серцевиною на основі алюмогерманосилікатного скла, а введення активного іона здійснювалося методом просочення. За оцінкою концентрація активної домішки склала $1,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Різниця показників заломлення серцевини та облонки волокна була близько до 0,08, довжина хвилі відсічення першої вищої моди лежала в області 1,5 мкм.

На рисунку 2.4 показаний спектр оптичних втрат виготовленого волокна. Оскільки гольмієві волоконні лазери працюють за трирівневою схемою, то для отримання інверсії населеності потрібне ефективне поглинання накачування. Найбільш сильні смуги поглинання знаходяться у видимій області, тому в першому продемонстрованому гольмієвому лазері накачування здійснювалося аргонним лазером з $\lambda = 457,9 \text{ нм}$. Волоконний лазер мав відносно низьку диференціальну ефективність (1,7 %) і максимальну вихідну потужність (0,67 мВт) при поглиненій потужності накачування 85 мВт. Очевидно, що ефективне практичне застосування

гольмієвих волоконних лазерів вимагає використання напівпровідникових лазерів для накачування. Проте існуючі потужні джерела випромінювання працюють на довжинах хвиль більше 750 нм і не можуть бути використані для накачування в смуги поглинання гольмію у видимому діапазоні. В той же час використання смуги поглинання, локалізований в області 900 нм, видається малоперспективним внаслідок слабого поглинання.

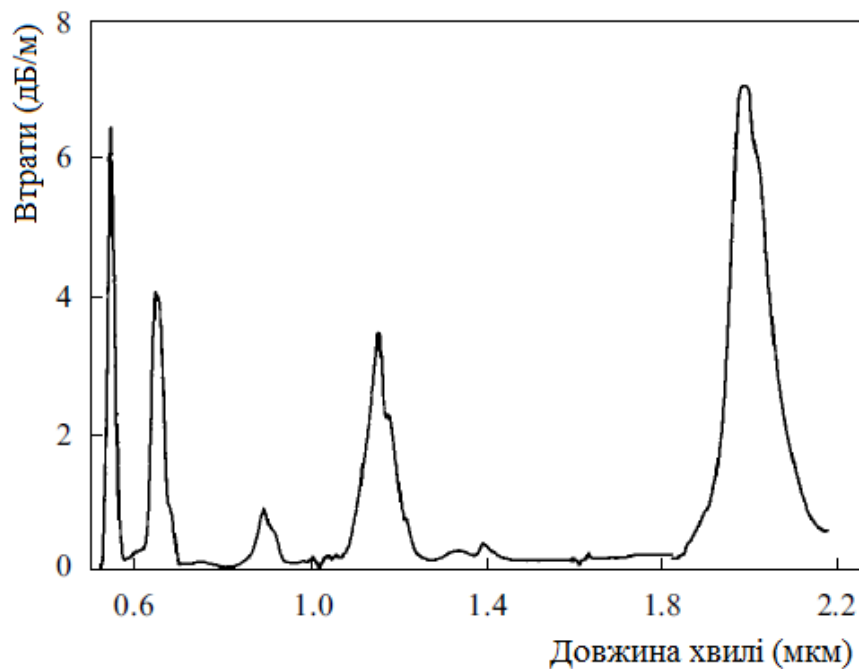


Рисунок 2.4 – Спектр поглинання волокна, легованого іонами гольмію

Використання потужних ітербієвих лазерів з діодним накачуванням в оболонку дозволило створити ефективний гольмієвий волоконний лазер, в якому накачка проводиться у сильну смугу поглинання на 1,15 мкм, яка відповідає переходу ${}^5J_8 \rightarrow {}^5J_6$. Схема реалізованого досліджуваного лазера показана на рисунку 2.5, на якому: 1 – лазер з діодним накачуванням потужністю 10 Вт з довжиною хвилі $\lambda = 976$ нм; 2 – волоконна бреггівська решітка (ВБР) з коефіцієнтом відбиття $R = 100$ % на довжині хвилі $\lambda = 1,12$ мкм; 3 – волоконна бреггівська решітка з коефіцієнтом відбиття

$R = 40\%$ на довжині хвилі $\lambda = 1,12$ мкм; 4 – волоконна брегівська решітка з коефіцієнтом відбиття $R = 100\%$ на довжині хвилі $\lambda = 2$ мкм; 5 – волоконна брегівська решітка з коефіцієнтом відбиття $R = 10\%$ на довжині хвилі $\lambda = 2$ мкм; 6 – ітербієве волокно; 7 – гольмієве волокно; 8 – вихід.

В якості активного середовища використовувалося леговане іонами гольмію волокно з параметрами, зазначеними вище. Бреговська решітка мала резонансну довжину хвилі 2,1 мкм з шириною лінії 1 нм та коефіцієнт відображення більше 99%. Для накачування гольмієвого волоконного лазера в серцевину використовувався ітербієвий волоконний лазер з довжиною хвилі $\lambda = 1150$ нм і максимальною вихідною потужністю 3 Вт.

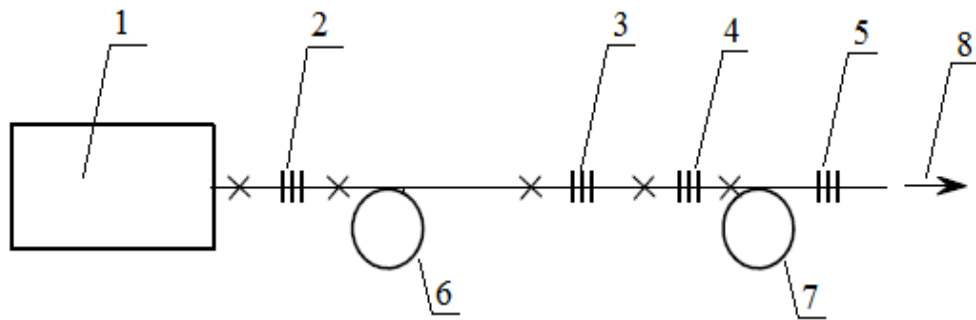


Рисунок 2.5 – Схема гольмієвого волоконного лазера

На рисунку 2.6 проілюстрована залежність вихідної потужності гольмієвого лазера від поглиненої потужності накачування ітербієвого лазера для довжини резонатора 4,5 м. Максимальна вихідна потужність 280 мВт була досягнута при поглинутій потужності накачування 2 Вт, диференціальна ефективність склала 20%, також показаний вихідний спектр випромінювання гольмієвого лазера, що вимірюється з розширенням 0,2 нм. Довжина хвилі генерації визначалася резонансною довжиною хвилі брегівських решіток, ширина лінії випромінювання лазера була близько 0,4 нм.

Ефективність генерації досліджуваного гольмієвого лазера істотно знизили високі додаткові оптичні втрати в активному волокні (0,65 дБ/м

на $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$) [11]. Якщо, наприклад, використовувати зразки з оптичними втратами близько $0,01 \text{ дБ/м}$, то в цьому випадку диференціальна ефективність генерації могла бути збільшена приблизно до 25% . Можна відзначити, що наразі потужність напівпровідникових джерел накачування, які мають волоконний вихід з діаметром серцевини 100 мкм , досягає 20 Вт .

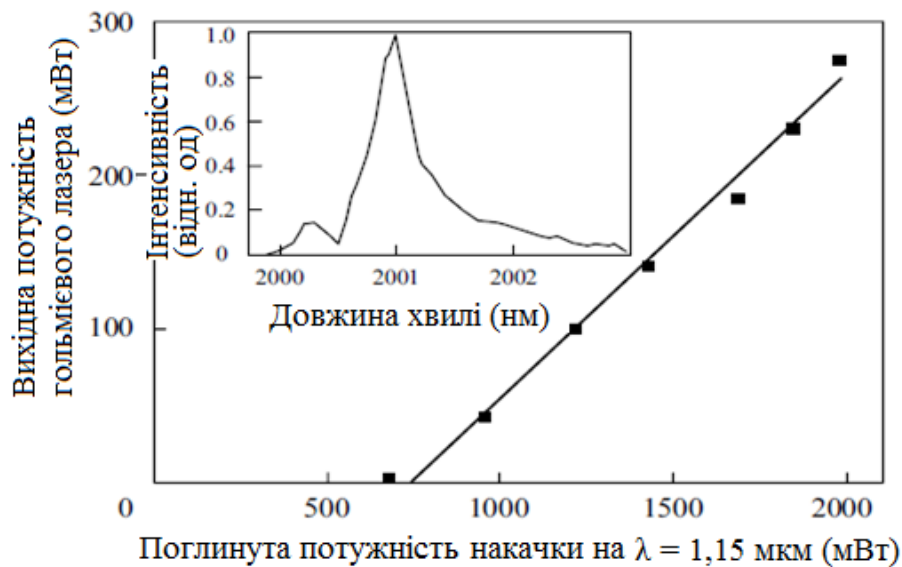


Рисунок 2.6 – Залежність вихідної потужності гольмієвого волоконного лазера в області 2 мкм від поглинутої потужності накачування

В останні кілька років були реалізовані та досліджені гольмієві лазери з використанням додатковим легуванням іонами тулія та ітербію.

Накачування здійснювалася в смуги поглинання даних елементів з передачею збудження іонів гольмію, що дозволило використовувати накачування в оболонку активного волокна.

Для системи Tm:Ho вихідна потужність дорівнювала 5 Вт на довжині хвилі випромінювання близько $2,1 \text{ мкм}$ при потужності накачування 20 Вт . Для системи $\text{U}^{\text{b}}:\text{Ho}$ вихідна потужність складала $0,85 \text{ Вт}$ при потужності накачування 11 Вт .

2.4 Схеми накачування активних волокон

Для накачування активного волокна з подвійною оболонкою було запропоновано кілька способів. Найбільш простим з них є випадок торцевого накачування, коли випромінювання напівпровідникового джерела вводиться в активне волокно через торець. Найбільшою перевагою такого способу є можливість його використання для всіх описаних вище типів волокон з подвійною оболонкою. Недоліками цього способу є: можливість використання лише одного джерела накачування (лазерного діода або його зборки), тому що потужність яка вводиться у волокно обмежена теперішніми можливостями напівпровідникових технологій [12].

Інші існуючі схеми накачування використовують принцип розподілення введеного випромінювання накачування по довжині активного волокна. У першому випадку для введення накачування пропонується використовувати набір V-образних канавок, виготовлених на бічній поверхні волокна. Принцип введення накачування показаний на рисунку 2.7, на якому: 1 – активована серцевина, 2 – V-образна канавка, 3 – внутрішня оболонка, 4 – мікролінза, 5 – діодний лазер. Безсумнівною перевагою такого способу є можливість додавання джерел по довжині активного волокна в міру виснаження потужності від попереднього джерела, а до недоліків слід віднести необхідність фіксації напівпровідникового лазера відносно активного волокна і захисту області введення від зовнішніх впливів.

Особливістю іншого способу накачування є використання спеціального подвійного волокна, що представляє собою два волоконних світловода із загальним полімерним покриттям, що має понижений в порівнянні з кварцовим склом показник заломлення (GTW-волокно).

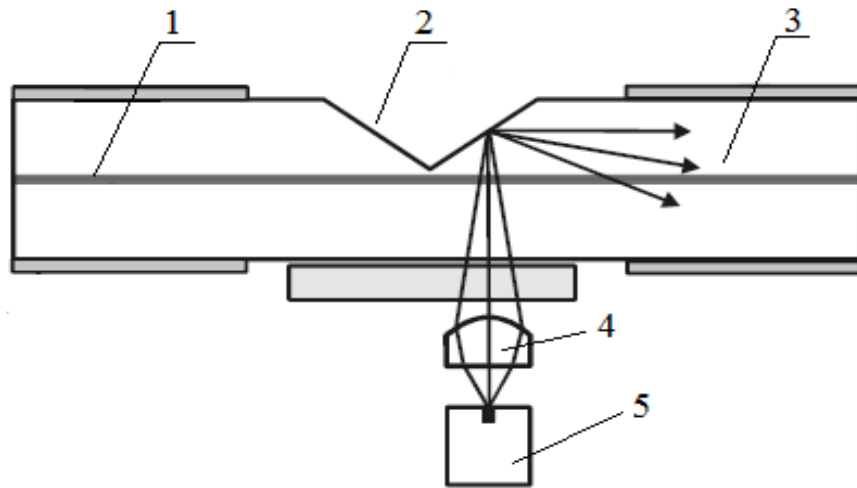


Рисунок 2.7 – Схема накачки через V-образну канавку

Одне з волокон (активне) має серцевину, леговану іонами ітербію, а друге (пасивне) – являє собою волокно з високочистого кварцового скла. На рисунку 2.8 зображена схема накачування, для якої використовується така конфігурація: 1 – накачування, 2 – активне волокно, 3 – пасивне волокно, 4 – накачування.

Випромінювання накачування від напівпровідникового випромінювача вводиться в пасивне волокно. В області контакту волокон відбувається перерозподіл потужності накачування, введеної в пасивне волокно, по двом волокнам, при цьому відношення потужностей накачування в обох волокнах визначається відношенням площ їх оболонок. При розподіленні по активному волокну поглинання частини накачування в його серцевині компенсується додатковим перекачуванням випромінювання з пасивного волокна, що необхідна для підтримки постійного відносини потужностей накачування в активному та пасивному волокнах. Таким чином, відбувається розподілене накачування по всій довжині активного волокна. У даній схемі можливе використання двох джерел накачування, випромінювання яких вводиться з протилежних кінців пасивного волокна, а також розрив

пасивного волокна в області виснаження потужності накачування і додавання наступного джерела.

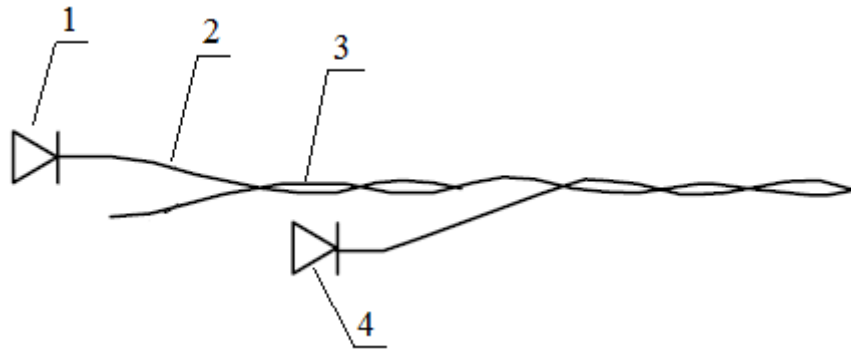


Рисунок 2.8 – Схема накачки з використанням подвійного волокна

Крім того, можна збільшити число пасивних волокон у збірці, що дозволить, в свою чергу, збільшити кількість джерел накачування [13].

Однією з основних проблем створення гольмієвих волоконних лазерів є вибір джерела накачування з довжиною хвилі випромінювання, що відповідає інтенсивній смузі поглинання. Очевидно, що ефективно практичне застосування гольмієвих волоконних лазерів вимагає використання напівпровідникових лазерів для накачування. Однак існуючі лінійки потужних лазерних діодів працюють на довжинах хвиль більше 750 нм, і не можуть бути використані для накачування смуги поглинання гольмію у видимому діапазоні. У той же час, використання смуги поглинання, локалізованої в області 900 нм, є малоперспективним внаслідок малої величини поглинання, тому діодне накачування також використовувалося для волокон з подвійним легуванням (Тт – Но) зі збудженням іонів тулію на довжині хвилі від 790 нм до 800 нм. Накачування здійснювалася в оболонку активного волокна, що дозволило досягти рівня вихідної потужності в кілька ват. Подальший розвиток цих робіт призвело до створення лазера з вихідною потужністю 83 Вт.

На рисунку 2.9 представлена схема реалізованого лазера на якій: 1 – лазер з довжиною хвилі $\lambda = 793$ нм та потужністю 150 Вт; 2 – дзеркало з високим коефіцієнтом відбиття для довжини хвилі 2,1 мкм; 3 – волокно діаметром 300 мкм з подвійним легуванням Tm^{3+}/Ho^{3+} ; 4 – дзеркало з високим коефіцієнтом пропускання для довжини хвилі 790 нм; 5 – волоконні затискачі з водяним охолодженням; 6 – лазер з довжиною хвилі $\lambda = 793$ нм та потужністю 150 Вт; 7 – вихід. Незважаючи на високу вихідну потужність, вона має низку недоліків.

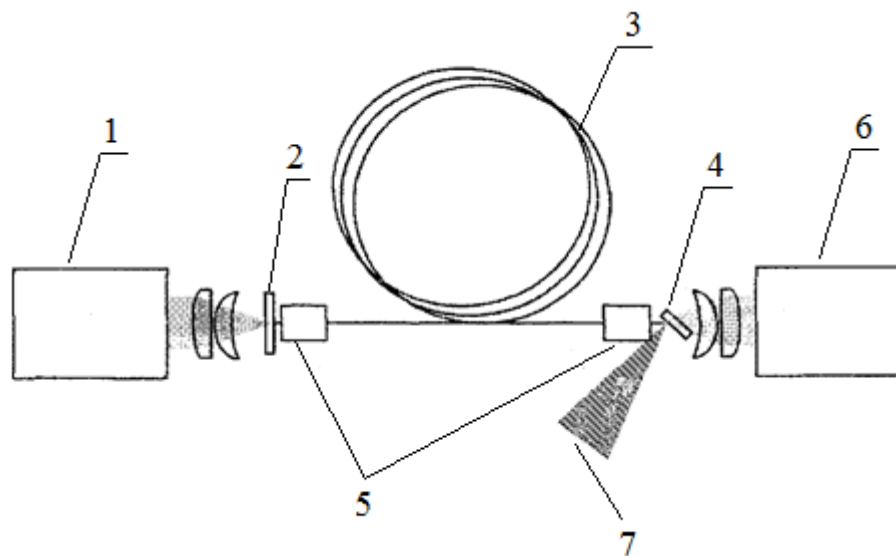


Рисунок 2.9 – Схема гольмієвого лазера с дзеркалами

Використовувані лазерні діоди мають відносно невисоку яскравість, отже потребують використання волокон з діаметром оболонки 300 мкм, що ускладнює використання звичайних технологій зварювання волокна, а також використання брегівських решіток як відбивачів. Тому, практичне застосування даної схеми є дуже складним. Крім того, виготовлення волокон з подвійним легуванням є досить складним технологічним процесом, так як вимагає вибору матриці скла і концентрацій активних іонів, що забезпечують ефективну передачу енергії від іона Tm до іона Ho [14].

Інший тип схем гольмієвих волоконних лазерів заснований на використанні тулієвих лазерів, що випромінюють в області 1,9 мкм, для накачування гольмієвого волокна у серцевину, при цьому збудження проводиться безпосередньо на енергетичний рівень 5J_7 . В свою чергу тулієвий лазер може накачуватися в оболонку лазерними діодами. Тому можна зазначити що, таким варіантам схем притаманні недоліки, які викладені вище. Повністю волоконний варіант схеми лазера передбачає накачування Тm-лазера ербієвим волоконним лазером, а головний недолік такої схеми полягає у необхідності триразового спектрального перетворення (напівпровідниковий діод → ербієвий лазер → тулієвий лазер → гольмієвий лазер). В схемі такого типу максимально досягнута потужність склала 4,7 Вт, що дозволяє розглядати, її як придатну для практичних застосувань.

Ітербієві волоконні лазери є найбільш поширеним типом волоконних випромінювачів. Вихідна потужність цих пристроїв досягає кіловатного рівня, а спектр генерації простягається від 0,98 мкм до 1,2 мкм. Для накачування цих лазерів використовуються надійні комерційно доступні напівпровідникові джерела, що випромінюють в області від 0,9 мкм до 0,98 мкм. Їх максимальна вихідна потужність склала 280 мВт на довжині хвилі 2 мкм при двох ватах поглиненої потужності накачування. Використання такого способу накачування дозволило досягти вихідної потужності, яка перевищувала 2 Вт. Слід зазначити, що диференціальна ефективність реалізованих лазерів не перевищувала 20 %. Однією з причин цього було те, що параметри гольмієвих лазерів, зокрема, концентрація активних іонів у волокні, не були оптимальними.

Продемонстрована генерація при накачуванні у смугу поглинання в області 1,15 мкм дала можливість запропонувати використання напівпровідникових лазерних діодів, що випромінюють в такій області, для безпосереднього накачування гольмієвого лазера. За такою схемою накачування в роботі досліджувався гольмієвий лазер з накачуванням у серцевину. Максимальна вихідна потужність склала 55 мВт на довжині хвилі

2,1 мкм. Невисока вихідна потужність лазера була пов'язана обмеженнями по потужності доданих лазерів з малим розміром випромінюючої смужки. Однак використання накачування в оболонку дозволило збільшити потужність накачування до 10 Вт, а вихідну потужність – до 2,2 Вт [15], так як використані лазерні діоди не мали волоконних виходів, схема містила об'ємні елементи. Багато в чому це пов'язано з малою розробленістю напівпровідникових лазерів даного діапазону, потужність яких невелика, а доступність вельми обмежена. Таким чином, подальший розвиток гольмієвих волоконних лазерів з прямим діодним накачуванням безпосередньо залежить від прогресу в розробці діодних лазерів, що випромінюють в області 1,15 мкм.

На підставі проведеного огляду можна стверджувати, що гольмієвий волоконний лазер з накачуванням ітербієвим лазером є перспективним типом випромінювачів з довжиною хвилі більше 2 мкм. При цьому в даній конфігурації можливе створення повністю волоконних компактних лазерів з високою вихідною потужністю. Однак принциповою є оптимізація параметрів активного волокна з метою досягнення високої ефективності. До інших невирішених задач слід віднести дослідження спектральної ефективності гольмієвих волоконних лазерів, оскільки більшість лазерних схем були реалізовані на широкосмугових відбивачах, за допомогою яких було важко ставити довжину хвилі генерації.

3 ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ АКТИВНИХ ІОНІВ НА ДИНАМІКУ ГЕНЕРАЦІЇ ГОЛЬМІЄВИХ ВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ

3.1 Концепція впливу на генерацію волоконного гольмієвого лазера

В останні роки були реалізовані та продемонстровані гольмієві волоконні лазери з вихідною середньою потужністю до 10 Вт на довжинах хвиль від 2,05 мкм до 2,1 мкм з накачуванням волоконним ітербієвим лазером. В якості активного середовища таких лазерів використовувалися волокна, які мають високу концентрацію активних іонів (більше 10^{20} см⁻³), при цьому диференціальна ефективність щодо потужності накачування досягала 34 %. При таких концентраціях має місце кластеризація активних іонів, що приводить до того, що значна їх частина безвипромінювально релаксує на основному рівні, впливаючи на ефективність генерації. Іони, які релаксують на основному рівні, можуть грати роль насичуючого поглинача, що призводить до появи імпульсного режиму генерації. У роботі при дослідженні виявлено, що гольмієвий лазер на основі волокна з концентрацією активних іонів $1,9 \times 10^{20}$ см⁻³ також генерує в імпульсному режимі.

В даному розділі проводиться обзор дослідження впливу концентрації іонів гольмію в активних волокнах на динамічні властивості лазерів на їх основі та вибір концентрації активних іонів, що забезпечує отримання безперервного режиму генерації. Крім того, проводилося порівняння ефективності генерації для лазерів на основі волокон з високою і зниженою концентраціями іонів гольмію.

3.2 Суть експерименту та експериментальні зразки

В роботі досліджувалися три зразка активних волокон з наступними концентраціями іонів гольмію 9×10^{19} см⁻³ (№ 1), $5,4 \times 10^{19}$ см⁻³ (№ 2) та $1,6 \times 10^{19}$ см⁻³ (№3). Всі зразки були виготовлені за методом модифікованого

осадження із газової фази (MCVD) – технології з легуванням серцевини заготовки оксидами гольмію методом просочування і додатковим легуванням оксидом алюмінію. Концентрація іонів гольмію визначалася в заготовці зразка № 1 за допомогою рентгенівського мікроскопа, а в зразках № 2 і 3 із спектрів поглинання в області 1,15 мкм та 2 мкм з урахуванням розподілу поля в даних волокнах. Як джерело накачування використовувався ітербієвий волоконний лазер на основі GTWave волокна (волокно зі зниженим показником заломлення), що випромінює на довжині хвилі 1,125 мкм. Резонатор гольмієвого лазера був сформований високовідбиваючими бреггівськими ґратами з резонансною довжиною хвилі 2,1 мкм та вихідним торцем волокна. Для реєстрації динамічних характеристик лазерів використовувався фотодетектор на основі InGaAs, що має робочий спектральний діапазон від 1,2 мкм до 2,6 мкм та частотну смугу до 15 МГц.

В ході дослідження було виявлено, що лазер на основі зразка № 1 з максимальною концентрацією активних іонів стабільно генерує в імпульсному режимі в усьому діапазоні потужностей накачування (до 10 Вт). Характерна форма лазерного імпульсу представлена на рис. 3.1. Частота повторення та тривалість імпульсів залежали від потужності випромінювання накачування. Відповідні залежності показані на рис. 3.2, на якому видно, що з ростом потужності накачування частота повторення збільшується нелінійним образом, а тривалість імпульсу зменшується. Пікова потужність гольмієвого лазера також зростає, досягаючи 10 Вт при потужності накачування 10 Вт. При зменшенні довжини волокна в резонаторі від 1,8 м до 0,3 м імпульсний характер генерації зберігався аж до зриву її через малу довжину активного середовища.

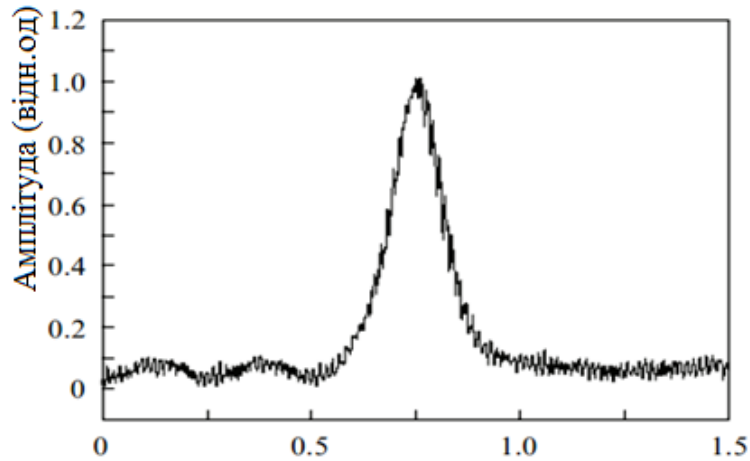


Рисунок 3.1 – Осцилограма імпульсу, що генерується лазером на основі зразка № 1

Для лазера на основі зразка № 2 довжиною близько 3,5 м з меншою концентрацією іонів гольмію при зміні потужності накачування спостерігалася зміна не тільки параметрів імпульсів, а й самого характеру генерації.

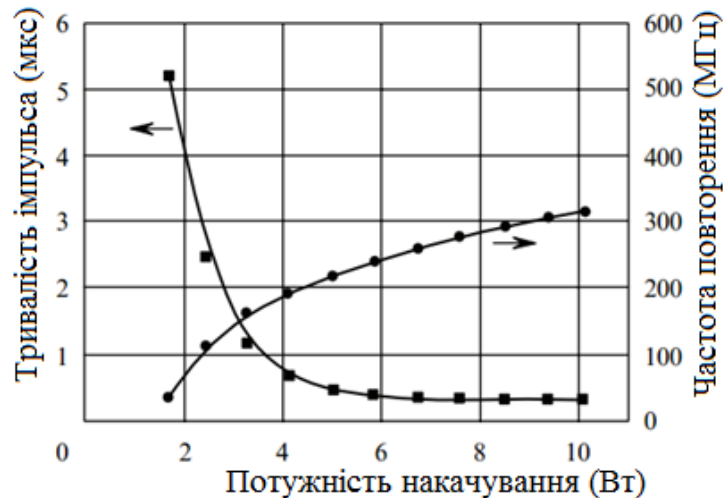


Рисунок 3.2 – Залежності частоти повторення і тривалості імпульсу від потужності накачування для лазера на основі зразка № 1

При потужностях накачування до 6 Вт мала місце імпульсна генерація з параметрами, близькими до параметрів генерації лазера на основі зразка № 1. Однак далі із ростом потужності накачування в тимчасовій картині випромінювання лазера з'являвся п'єдестал, який промодульований по інтенсивності, а при збільшенні потужності накачування генерація набувала риси безперервного режиму. Відповідні осцилограми вихідного випромінювання показані на рис. 3.3. Така поведінка гольмієвого лазера якісно збігається з поведінкою ербієвих волоконних лазерів.

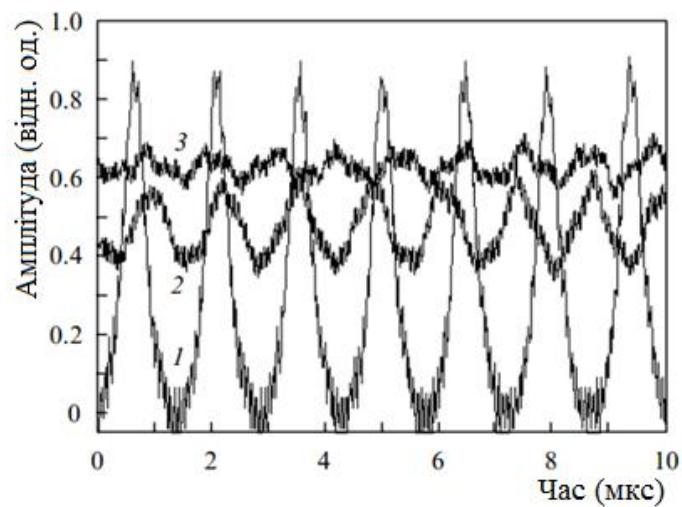


Рисунок 3.3 – Осцилограми вихідного випромінювання лазера на основі зразка № 2 при потужностях накачування 6 (1), 8 (2) і 10 Вт (3)

Очевидно, що для отримання безперервного режиму генерації в широкому діапазоні потужностей накачування необхідно подальше зменшення концентрації активних іонів і, відповідно, відносної концентрації їх пар, що беруть участь в процесі ап-конверсії. Дійсно, при використанні лазера на основі зразка № 3 із довжиною 13 м, була отримана безперервна генерація, починаючи з потужностей накачування, лише злегка перевищуючи поріг (осцилограма випромінювання представлена на рис. 3.4).

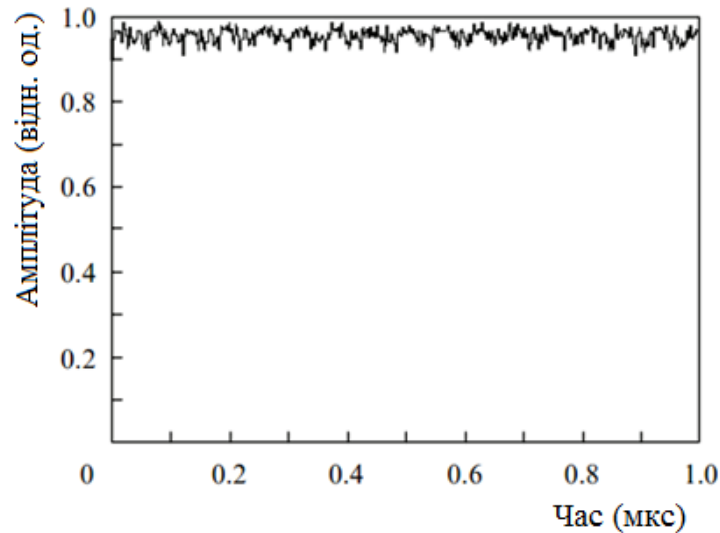


Рисунок 3.4 – Осцилограма вихідного випромінювання лазера на основі зразка № 3

Наведені результати дозволяють зробити висновок, що для отримання безперервного режиму генерації необхідно використовувати волокна, леговані іонами гольмію з концентрацією приблизно 10^{19} см^{-3} та нижче. Однак зниження концентрації призводить до суттєвого збільшення довжини волокна в резонаторі лазера, внаслідок чого можуть почати позначатися оптичні втрати, викликані краєм ІЧ смуги поглинання молекул SiO_2 , локалізованої в області 10 мкм. Для перевірки впливу збільшення довжини волокна лазерів на основі зразків № 2 і 3, для їх робочих характеристик, було проведено вимірювання ефективності генерації, а результати вимірювань представлені на рис. 3.5. Збільшення довжини активного волокна в резонаторі помітно зменшує ефективність генерації лазера, отже якщо лазер на основі зразка № 2 з довжиною близько 3,5 м мав диференціальну ефективність 34 %, то у лазера на основі зразка № 3 з довжиною близько 13 м вона була 27 %. Для зменшення довжини волокна в резонаторі при збереженні концентрації активних іонів можна запропонувати кілька способів. Зокрема, представляється перспективною оптимізація хвилеводної структури волокна і розподілу активних домішок у серцевині. Крім того, для

накачування перспективно використовувати випромінювання ітербієвого волоконного лазера з довжиною хвилі 1,15 мкм, що відповідає максимуму смуги поглинання іонів гольмію.

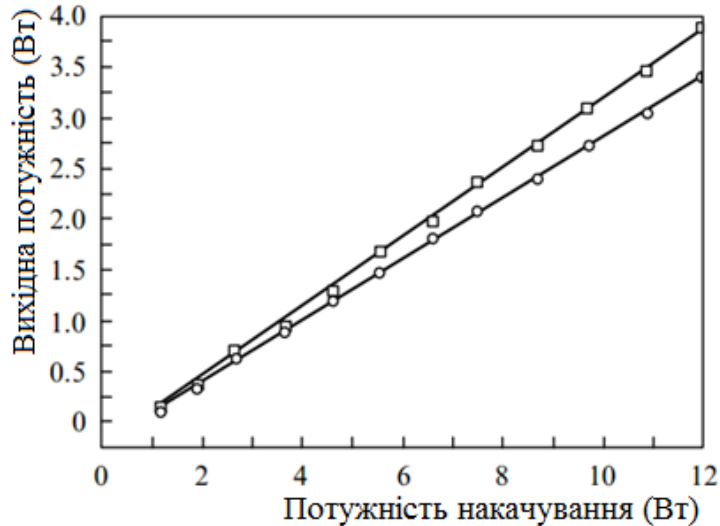


Рисунок 3.5 – Залежності вихідної потужності від потужності накачування для лазерів на основі зразків № 2 і № 3

Таким чином, виявлено, що динаміка генерації волоконного гольмієвого лазера залежить від концентрації активних іонів у серцевині волокна. При концентраціях близько та вище такого рівня, спостерігається імпульсний режим генерації. В лазері з концентрацією приблизно 5×10^{19} при збільшенні потужності накачування має місце перехід від імпульсної до безперервної генерації. При зменшенні концентрації до рівня безперервного режиму генерації лазера спостерігається у всьому діапазоні потужностей накачування. Така поведінка пояснюється тим, що у волокнах з високою концентрацією активних іонів зростає частка іонів, безвипромінювально релаксуючих на основному рівні також виконуючих роль насичуючого поглинача. Зменшення концентрації активних іонів і відповідне збільшення довжини волокна в резонаторі призводить до зменшення ефективності генерації.

3.3 Характеристики активних волокон

Як зазначалося вище, для накачування гольмієвого лазера перспективним є використання ітербієвого волоконного лазера. У даній роботі для створення ітербієвого лазера використовувалося GTWave волокно [16], або волокно з багатоелементною внутрішньою оболонкою. Волокно представляло собою об'єднання двох волокон, в загальному полімерному покритті, що мають знижений в порівнянні з кварцом показник заломлення. Одне з волокон (активне) мало серцевину, леговане іонами ітербію, а друге (пасивне) – представляло собою перетягнутий стрижень з високочистого кварцового скла. Випромінювання напівпровідникового джерела накачування вводилося в пасивне волокно. Це дозволяло оптично розв'язати активну волокно і напівпровідниковий лазер, оберігаючи його від можливого оптичного пошкодження. Крім того, наявність двох вхідних портів дозволяло збільшити число використовуваних джерел накачування.

Довжина волокна в резонаторі ітербієвого лазера визначалася довжиною хвилі випромінювання напівпровідникового джерела накачування, яка склала близько 910 нм, і величиною поглинання на цій довжині хвилі активного волокна.

У свою чергу, поглинання залежить від концентрації активних іонів і геометрії волокна – відношення площі серцевини і оболонки, а також складу матриці скла. Концентрація іонів ітербію склала близько $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, діаметр серцевини – 8 мкм, діаметри кварцової оболонки активного та пасивного волокон – 120 мкм.

Оскільки для накачування гольмієвого волокна необхідне отримання довгохвильової генерації ітербієвого лазера, використовувалося ітербієве волокно з серцевиною легованою оксидом алюмінію. Як зазначено в роботах, саме такий склад скла забезпечує люмінесценцію в довгохвильовій області спектра.

Виходячи з наведених даних, волокно Ho^{3+} було вибрано довжиною від 25 м до 30 м, пасивне волокно зварювали з волоконним виходом напівпровідникового джерела, що має діаметр серцевини 110 мкм. Довжина хвилі випромінювання ітербієвого лазера задавалася довжиною хвилі відображення брегівських решіток, які формують резонатор. Вибір довжини хвилі визначався спектром поглинання гольмію, який визначається переходом ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_6$, а також спектральною залежністю ефективності ітербієвого лазера на волокні із заданою геометрією.

На довжинах хвиль більше 1,12 мкм спостерігається різке падіння ефективності генерації ітербієвих волоконних лазерів, тому, для більшості експериментів була обрана довжина хвилі 1,125 мкм, що забезпечує досить високу ефективність генерації та відзначається значним поглинанням іонами ітербію, що становить близько 40 % від максимального. У той же час, для експериментів, що вимагають мінімальної довжини гольмієвого волокна, використовувався також лазер, що випромінює на 1,15 мкм.

Зростання вихідної потужності від часу пов'язано з нагріванням волокна через тепловиділення, викликаного наявністю нерезонансних втрат і квантових дефектів між довжинами хвиль випромінювання і поглинання. Нагрівання волокна приводить до розширення смуги поглинання іонів ітербію і придушення посиленої спонтанної люмінесценції з максимумом в області від 1,08 мкм до 1,1 мкм, що полегшує умови генерації в довгохвильовій частині спектра генерації ітербієвого лазера [17].

Для реалізації гольмієвого волоконного лазера до виходу ітербієвого лазера приварюється брегівська решітка з довжиною хвилі відображення в області люмінесценції іонів гольмію. До виходу решітки приварювалися відрізки різних зразків волокон, легованих іонами Ho^{3+} . В якості вихідного відбивача гольмієвого лазера, як правило, використовується торець активного волокна, що забезпечує фрінелівське відображення на рівні 4 %. Для контролю вихідної потужності гольмієвого лазера на вході вимірювача потужності встановлювався фільтр, який забезпечує придушення

непоглиненої потужності накачування на рівні – 30 дБ. Таким чином, обрані компоненти і технології дозволили реалізувати повністю волоконну конструкцію гольмієвого лазера без використання об'ємних елементів.

3.4 Дослідження властивостей гольмієвих волоконних лазерів

Через вплив додаткових оптичних втрат для ефективності генерації довгохвильових лазерів істотне значення має довжина активного волокна в резонаторі. Тому для перших експериментів був обраний зразок активного волокна з високою концентрацією іонів гольмію $N = 12,5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. З використанням даного волокна було реалізовано шість лазерів з довжинами хвиль генерації від 2,02 мкм до 2,15 мкм [18]. Довжина хвилі генерації визначалася резонансною довжиною хвилі брегівської решітки, використовуваної в якості вхідного відбивача, коефіцієнт відображення решітки становив більше 99 %. Решітки записувалися на стандартному телекомунікаційному волокні SMF-28 і зварювалися з активним волокном. Перед записом волокна просочувалися воднем для підвищення фоточутливості. Діаметр поля моди на довжині хвилі 2,1 мкм в стандартному волокні може бути оцінений в 15 мкм, а для активного волокна – в 14 мкм. Таким чином, втрати на зварювання цих волокон були несуттєвими.

Реалізовані та досліджені лазери мали довжини хвиль генерації 2,02; 2,05; 2,07; 2,1; 2,13; 2,15 мкм. Оскільки гольмієвий лазер працює за трирівневою схемою, довжина волокна в резонаторі є критичною. Вона повинна забезпечити достатнє поглинання випромінювання накачування і посилення, з одного боку, а з іншого – не приводити до перепоглинення сигналу. Тому для кожного реалізованого лазера підбиралася оптимальна довжина активного волокна, відповідна максимальній потужності генерації при фіксованому рівні потужності накачування. На рис. 3.6 показана залежність вихідної потужності лазерів, що випромінюють на довжинах хвиль 2,02 мкм та 2,1 мкм, від довжини активного волокна. Потужність

накачування на довжині хвилі 1,125 мкм становила 12,2 Вт. З рисунка видно, що оптимальна довжина активного волокна істотно залежить від заданої довжини хвилі генерації, крім того, при зменшенні довжини хвилі генерації довжина волокна є більш критичною для ефективності генерації.

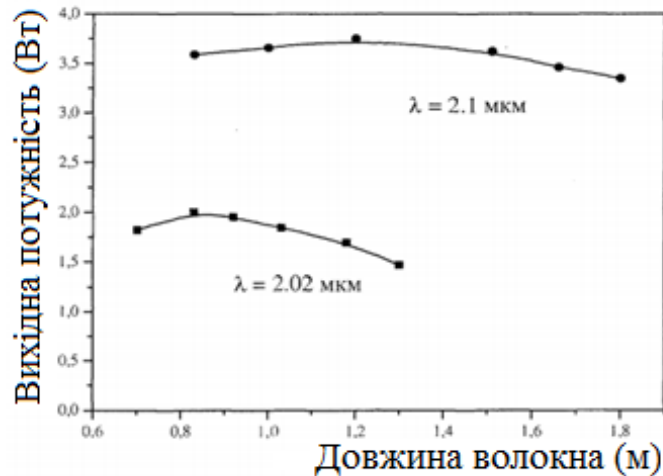


Рисунок 3.6 – Залежність вихідної потужності лазерів від довжини активного волокна

На рис. 3.7 представлена залежність оптимальної довжини активного волокна від обраної довжини хвилі генерації. З рисунка видно, що при збільшенні довжини хвилі генерації від 2,02 мкм до 2,15 мкм оптимальна довжина волокна зростає більш ніж в 2 рази. Це пов'язано зі зменшенням перетину люмінесценції при збільшенні довжини хвилі.

Отримана залежність надалі використовувалася для оцінки оптимальної довжини волокон з іншими концентраціями активних домішок.

Для кожного з лазерів була виміряна залежність вихідної потужності від потужності накачування при оптимальній довжині резонатора.

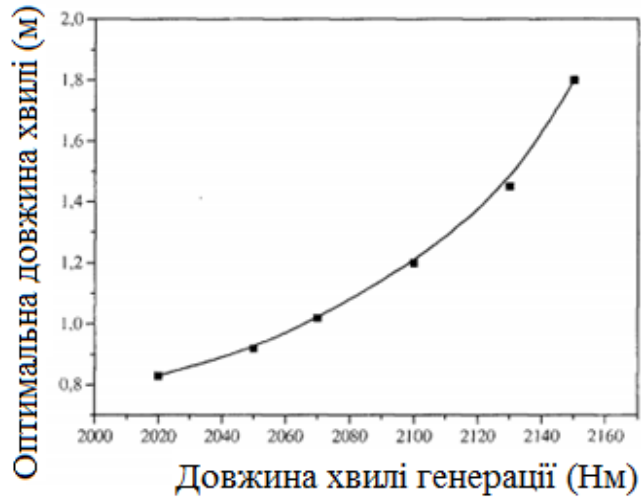


Рисунок 3.7 – Залежність оптимальної довжини активного волокна від довжини хвилі генерації

На рис. 3.8 представлені відповідні залежності для трьох лазерів, що випромінюють на довжині хвилі 2,05; 2,1 та 2,15 мкм, відповідно. Слід зазначити, що для лазера, що випромінює на довжині хвилі 2,15 мкм, спостерігалось зростання вихідної потужності від 1 Вт до 1,5 Вт протягом 6 хв., це може пояснюватися саморозігріванням активного середовища, при якому відбувається розширення смуги поглинання і знижується конкуренція з посиленою спонтанної люмінесценції в короткохвильовій області люмінесценції.

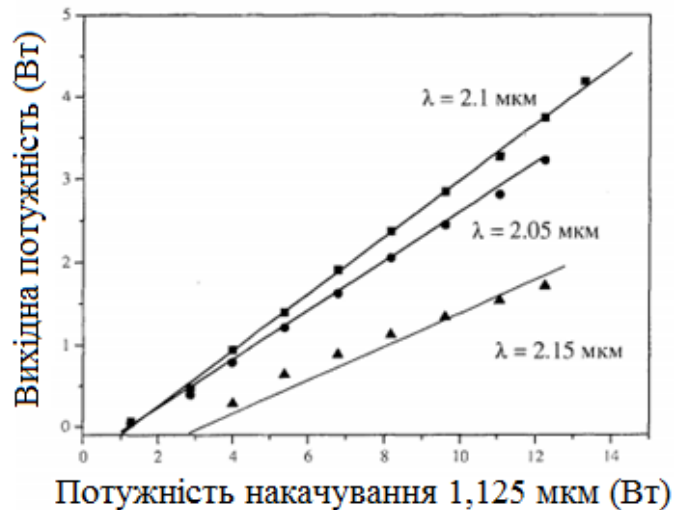


Рисунок 3.8 – Залежність вихідної потужності від потужності накачування при оптимальній довжині резонатора, виміряна для трьох лазерів, що випромінюють на 2,05, 2,1 і 2,15 мкм

Для вимірних залежностей визначалася диференціальна ефективність генерації для кожного реалізованого лазера. Це дозволило побудувати спектральну залежність повної і диференціальної ефективності генерації, представлену на рис. 3.9, з якого видно, що максимальна повна ефективність генерації становить близько 30 % і досягається на довжині хвилі 2,1 мкм. Максимальна диференціальна ефективність на тій же довжині хвилі становить 34 %.

Дана залежність для гольмієвих волоконних лазерів була отримана вперше. Для лазера, що випромінює на довжині хвилі 2,1 мкм, було проведено вимірювання спектра випромінювання. Для вимірювання використовувався монохроматор і фотоприймач на основі PbS.

На рис. 3.10 представлені спектри для двох рівнів вихідної потужності лазера. Зсув довжини хвилі генерації в довгохвильову область при збільшенні вихідної потужності може пояснюватися нагріванням решітки. Ширина лінії генерації склала 0,35 нм, що практично збігається зі спектральним дозволом монохроматора.

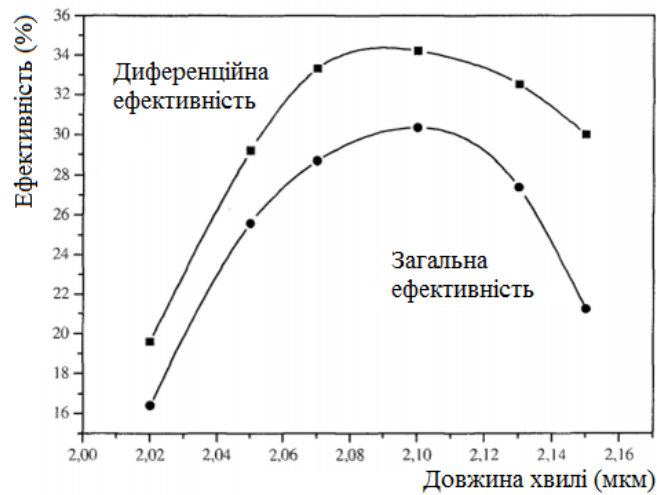


Рисунок 3.9 – Спектральна залежність повної та диференційної ефективності генерації гольмієвого лазера

Слід зазначити, що досліджений зразок активного волокна був згодом використаний для створення волоконного лазера з потужністю 10 Вт [19].

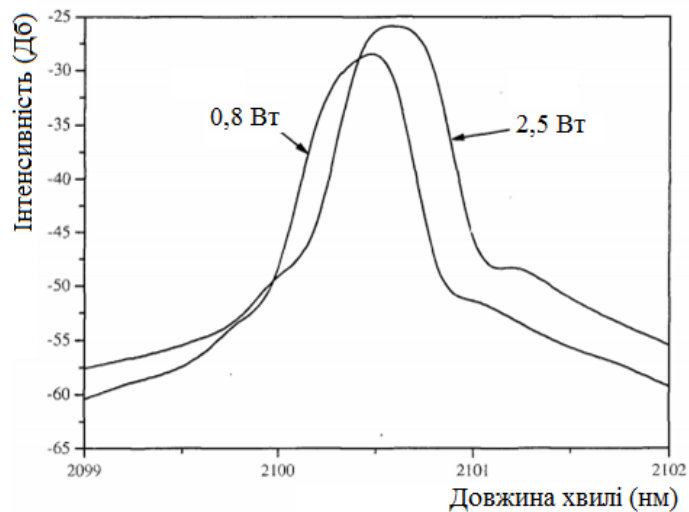


Рисунок 3.10 – Спектр генерації гольмієвого лазера, що випромінює на довжині хвилі 2,1 мкм

3.5 Дія випромінювання гольмієвого лазера на біологічну тканину

Для накачування гольмієвого волоконного лазера служив ітербієвий волоконний лазер із зустрічною діодною накачкою (довжина хвилі генерації 1,125 мкм, максимальна потужність 28,9 Вт), що здійснюється двома напівпровідниковими лазерними діодами (довжина хвилі 0,975 мкм, вихідна потужність до 26 Вт). В якості активного середовища лазера використовувалося оптичне волокно, леговане іонами гольмію. Концентрація активної домішки становила $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, різниця показників заломлення серцевини і оболонки – 0,01 мм, довжина хвилі відсічення першої вищої моди – близько 2 мкм.

Резонатор гольмієвого лазера був утворений двома волоконними брегівськими решітками, вхідний та вихідний, з резонансною довжиною хвилі 2,1 мкм і коефіцієнтами відображення 1 та 0,1 відповідно. Зібраний за такою оптичною схемою гольмієвий волоконний лазер працює в безперервному режимі. Його максимальна вихідна потужність досягла 8,25 Вт, а ефективність – 30 %.

В якості досліджуваного матеріалу були використані спеціально підготовлені зразки: десять зразків тканини твердої мозкової оболонки свинячого спинного мозку (розмір 2×1 см, товщина від 200 мкм до 500 мкм) (рис. 3.11), десять зразків жирової тканини (2×3 см, товщина 7 мм) (рис. 3.12) і десять зразків м'язової тканини (2×3 см, товщина 5 мм). Всі зразки знаходилися при кімнатній температурі; на час проведення експерименту вони поміщалися у водне середовище, що імітує природні умови.

Лазерний пучок спрямовувався на зразки тканин зверху вниз строго перпендикулярно. Відстань від торця випромінюючого волокна до зразка та потужність випромінювання і тривалість опромінення варіювалися (3,5 мм; 3,8 Вт; 10,60 с).



Рисунок 3.11 – Зразок твердої оболонки спинного мозку свині після лазерної дії

Після опромінення зразки заморожувалися для дослідження ушкоджень поверхні, потім у місці дії лазерного випромінювання робилися поперечні зрізи завтовшки 20 мкм, на поверхні яких за допомогою мікроскопа визначалися розміри зон карбонізації та коагуляційного некрозу. Перед початком кожного експерименту вихідний торець волокна перевіряли на наявність забруднення і порушення поверхні, при необхідності для забезпечення коректних умов експерименту його зачищали і сколювали.

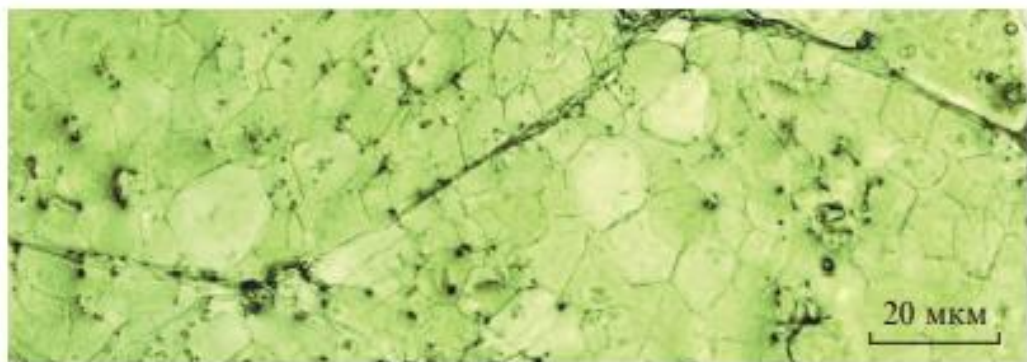


Рисунок 3.12 – Зразок жирової тканини у звичайному стані

Потужність лазерного випромінювання, що впливає на тверду оболонку спинного мозку, варіювалася від 5 Вт до 8 Вт. Відстань між вихідним торцем волокна і тканиною дорівнювала 3 мм. Після декількох секунд опромінення спостерігався ефект дії лазерного випромінювання – відбувалося плавлення, виразна деформація тканини і її обгорання. Після 20 с дії в зразках виникали наскрізні отвори (рис. 3.13). Сумарний час дії на зразки складав 25 с.

На рис. 3.13 представлені зразки твердої оболонки спинного мозку після дії лазерного випромінювання. Слід зазначити, що отвори, які вийшли після опромінення, мали переважно овальну форму і розмір 400 – 500 мкм. На рис. 3.13, а чорною лінією відмічена зона коагуляційного некрозу розміром 125 – 250 мкм, також простежується чорний контур на межі отвору – зона карбонізації, розміри якої в порівнянні із зоною коагуляційного некрозу невеликі і лежать в межах 10 мкм. На рис. 3.13, б показаний забарвлений зразок твердої мозкової оболонки з чіткішим контуром зони карбонізації. В середньому за зразками розмір зони коагуляційного некрозу складав 190 ± 50 мкм, а зони карбонізації – 15 ± 7 мкм.

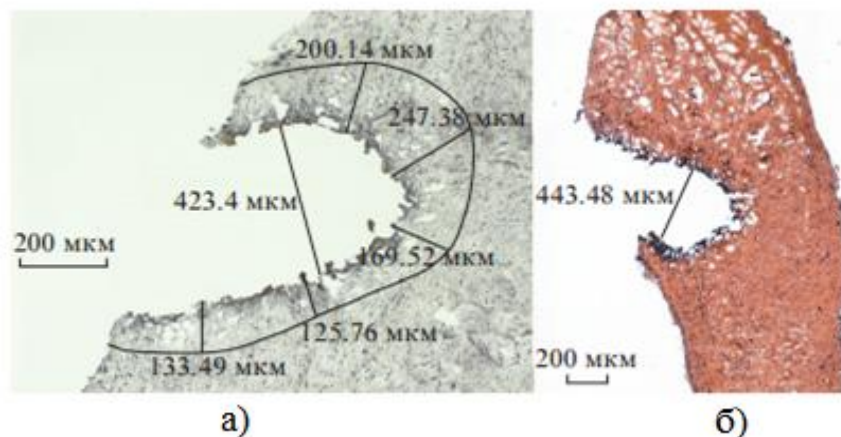


Рисунок 3.13 – Зразки твердої оболонки мозку після дії лазерного випромінювання товщиною 20 мкм

Зразки жирової тканини після дії лазерного випромінювання потужністю 3,5 – 5,5 Вт на відстані 5 мм показані на рис. 3.14. Результат дії помітний після перших 5 с проведення експерименту: поверхня зразків поступово змінюється, відбувається нагрівання, плавлення і руйнування жирової тканини. Сумарний час дії на зразки склав 50 с. Після опромінення зразків глибина руйнування жирової тканини складала 4,5 мм, діаметр отворів, що вийшли, дорівнював 3,4 мм. На обох рисунках виразно видно карбонізуючу область, розмір якої коливається від 20 мкм до 35 мкм. Якщо порівняти отриману структуру поверхні тканини з поверхнею жирової тканини в її звичайному стані (рис. 3.12), то видно, що після лазерної дії відбувається деформація (спікання) жирових клітин – коагуляційний некроз, який поширюється в глиб тканини на 800 – 1200 мкм. В середньому за зразками розмір зони коагуляційного некрозу складав 1000 ± 200 мкм, а карбонізуючої зони – 20 ± 10 мкм.

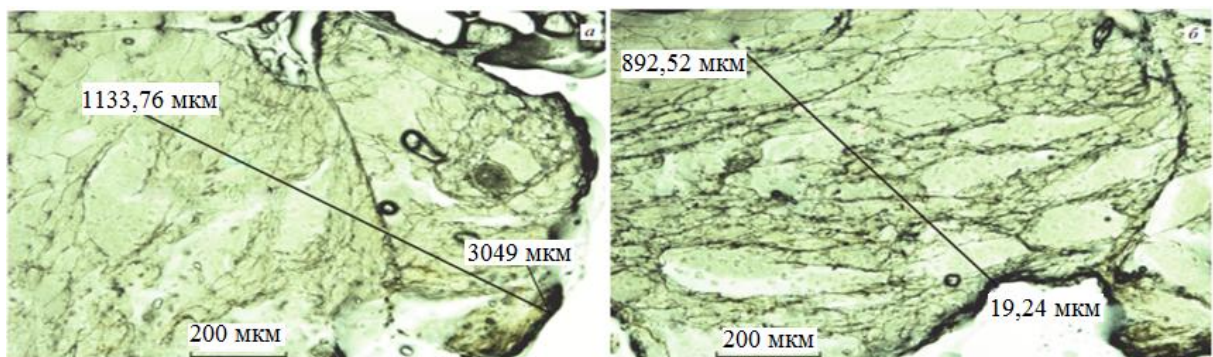


Рисунок 3.14 – Зразки жирової тканини товщиною 20 мкм після дії лазерного випромінювання

Також були проведені експерименти по безконтактній дії на жирову тканину безперервного випромінювання напівпровідникового лазерного діода з довжиною хвилі 0,91 мкм і потужністю 10 Вт. Конкретного ефекту від дії такого випромінювання не спостерігалось. За час опромінення (5 – 10 хв) поверхня тканини мінімально змінила свою структуру. На зразки м'язової

тканини впродовж 50 с впливали лазерним випромінюванням потужністю 3,5 Вт на відстані 5 мм (рис. 3.15). Після 20 с дії спостерігалася деформація поверхні тканини і її обгорання з виділенням диму. Досить яскраво були виражені обвуглені краї отвору, що вийшов, розмір карбонізуючої зони знаходиться в межах 50 – 80 мкм, що більше, ніж в жирових тканинах. Зона коагуляційного некрозу (порушення клітинної структури) дорівнює 150 – 370 мкм, що значно менше, ніж в жировій тканині. В середньому за зразками розмір зони коагуляційного некрозу складав 170 ± 40 мкм, а карбонізуючої зони – 60 ± 20 мкм.

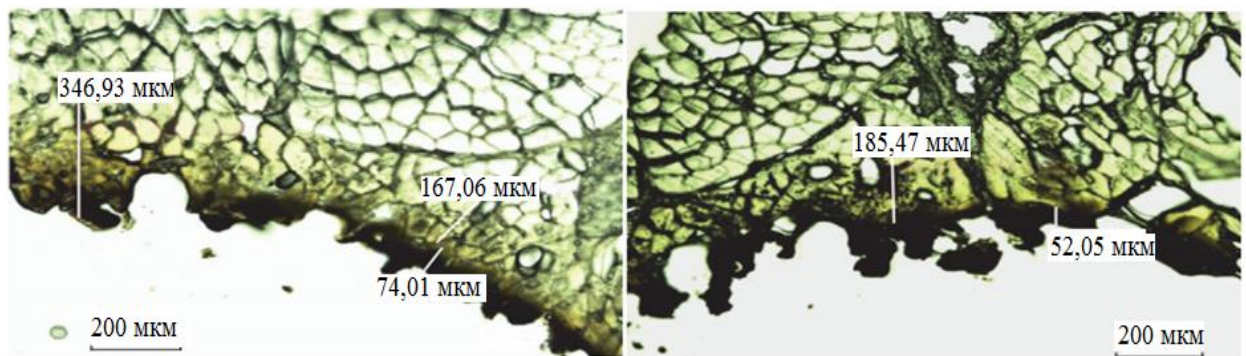


Рисунок 3.15 – Зразки м'язової тканини після дії лазерного випромінювання

Слід зазначити, що результат дії лазерного випромінювання на різні біологічні тканини залежить, передусім, від їх оптичних і термічних властивостей, а саме від коефіцієнтів поглинання та розсіювання, від щільності тканини і складових її компонентів, а також від вологонасиченості тканини. Так, наприклад, поглинання випромінювання в жировій тканині визначається поглинанням гемоглобіну, ліпідів і води ($10,9\% \pm 1,4\%$), а в м'язовій тканині – поглинанням гемоглобіну і води ($52,0\% \pm 0,3\%$ і $73\% \pm 0,5\%$). Цим і обумовлений різний характер руйнування тканин під дією лазерного випромінювання. Детальніше вивчення механізмів руйнування біологічних

тканин (процесів карбонізації і коагуляційного некрозу) під дією безперервного лазерного випромінювання буде продовжено [20].

Таким чином, експерименти показали, що зона карбонізації в жировій тканині незначна, але велика область порушення клітинної структури; у м'язовій тканині результат зворотний. При опроміненні тканини твердої оболонки спинного мозку розміри зони карбонізації і коагуляції невеликі. Попередні результати показали, що безперервний режим роботи лазера забезпечує клінічно прийнятний характер деструкції зразків тканин з мінімальною карбонізацією, отже можна стверджувати, що випромінювання гольмієвого волоконного лазера ефективно руйнує жирову тканину.

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

4.1 Розрахунок коефіцієнту перекриття

У попередніх роботах досліджувалися активні волокна, виготовлені по методу модифікування осадження з газової фази (MCVD - методу). Легування серцевини заготівлі здійснювалося по методу просочення з розчину, в якому проводилося осадження пористого шару серцевини. Як правило, в якості початкових з'єднань використовуються хлорид кремнію і хлорид германію. За рахунок пониження температури процесу на внутрішню поверхню кварцової трубки осідає порошок кварцового скла з добавкою оксиду германію. Температура пальника вибирається таким чином, щоб забезпечити приєднання порошку, що утворюється, до опорної трубки.

Для легування матеріалу серцевини активною добавкою використовується просочення пористого шару водним або спиртовим розчином солей рідкоземельних елементів. Концентрація добавки, введена в серцевину заготівлі, визначається, як параметрами пористого шару, так і концентрацією рідкоземельного елемента в розчині. На цьому ж етапі додатково може бути введена добавка алюмінію, використовуючи розчин, що містить як сіль активного елемента, так і сіль алюмінію. Як правило, в якості початкових солей використовуються нітрати і хлориди цих елементів. Після просочення робиться осушення пористого шару з використанням потоку кисню, що проходить через трубчасту заготівлю, при цьому відбувається видалення розчинника. Після осушення робиться спікання пористого шару при підвищеній температурі. Початкові з'єднання активних добавок алюмінію окислюються, і відповідні оксиди включаються у склад сітки скла серцевини. На останньому етапі відбувається згортання трубчатої заготівлі в суцільний стержень.

У роботі досліджувалися шість зразків активних волокон. В таблиці 4.1 приведені характеристики досліджених волокон.

Таблиця 4.1 – Параметри досліджуваних волокон

Номер зразка	Характеристики			
	1	2	3	4
	Δn	Al вага, %	λ_c	$N, 10^{19} \text{ см}^{-3}$
250	0,006	2,4	1,55	12,5
251	0,005	2	1,25	9
262	0,003	0,8	1,2	4,1
286	0,005	1,5	1,5	8
288	0,006	0,8	2,1	5,4
291	0,007	0,25	2,2	1,6
296	0,011	–	2,2	30

Для визначення концентрації легуючих елементів проводився рентгенівський мікроаналіз заготовок. Слід зазначити, що в процесі виконання атестаційної роботи не вдалося знайти в літературі дані по значенням перерізів поглинання і люмінесценції іонів гольмію в кварцовому склі, тому на підставі результатів мікроаналізу і виміру спектрів оптичних втрат був проведений розрахунок перерізу поглинання і люмінесценції. Для розрахунку перерізу поглинання необхідно враховувати зворотку розподілу потужності і концентрації іонів гольмію:

$$K = \frac{\int_0^a \frac{N(r)}{N_{\max}} E^2(r) r dr}{\int_0^{\infty} E^2(r) dr}, \quad (4.1)$$

де, $N(r)$ – радіальний розподіл концентрації;

N_{\max} – максимальне значення концентрації;

$E(r)$ – радіальний розподіл поля.

Розглянемо розрахунок по зв'язанню розподілу потужності і концентрації іонів гольмію для вище приведених шести зразків. Для спрощення розрахунків приймалася розподіл гаусового поля:

$$E^2(r) = E_0 \exp(-r^2/w^2), \quad (4.2)$$

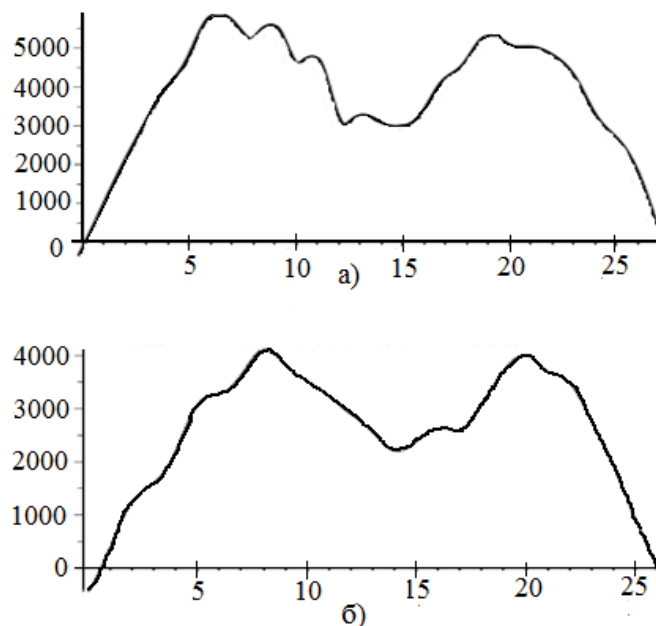
де, w – напівширина розподілення поля по рівню $1/e$.

Для цього визначення, у разі ступінчастого профілю показника заломлення, існує вираження апроксимації, що зв'язує радіус поля моди з радіусом серцевини a залежно від нормованої частоти:

$$w(V) = a(0,65 + 1,619/V^{3/2} + 2,879/V^6), \quad (4.3)$$

де, V – нормована частота.

Було зроблено вимір концентрацій легуючих домішок і їх розподілу по перерізу заготівель. З цією метою використовувався електронний мікроскоп з блоком мікроаналізу. Результати вимірювання представлені на рис. 4.1 – 4.3.



а) зразок № 250;

б) зразок № 251.

Рисунок 4.1 – Розподілення концентрації іонів гольмію по розрізу

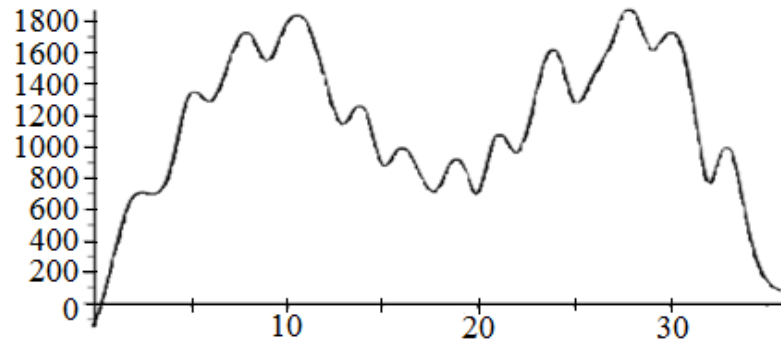
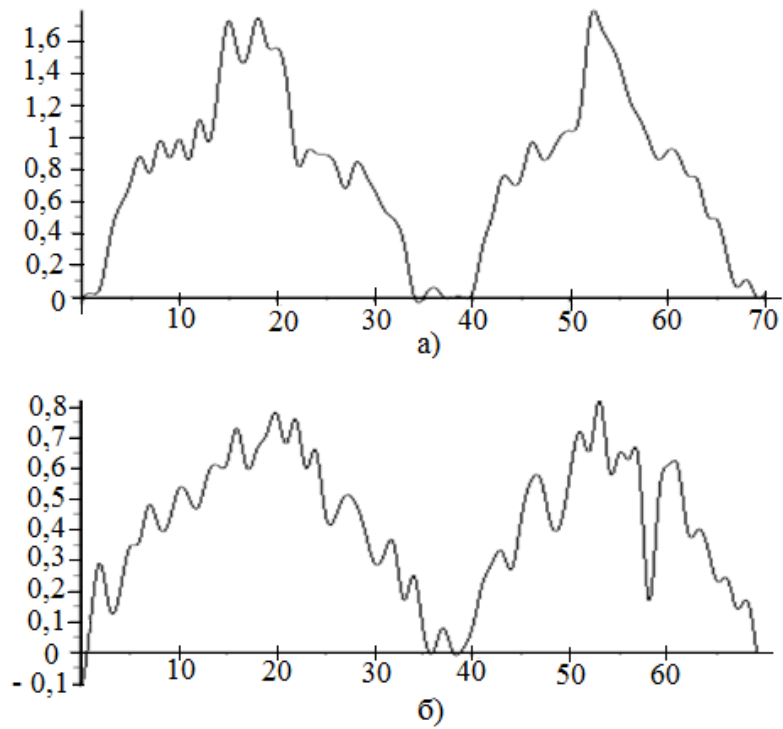


Рисунок 4.2 – Розподілення концентрації іонів гольмію по розрізу для зразка № 262



а) – зразок № 286;

б) – зразок № 288.

Рисунок 4.2 – Розподілення концентрації іонів гольмію по розрізу

Також були проведені розрахунки коефіцієнта для досліджуваних зразків в областях 1,15 мкм та 1,95 мкм з використанням чисельних методів обчислення інтеграла перекриття. В результаті були отримані наступні значення для коефіцієнтів перекриття досліджуваних зразків, які приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Коефіцієнти перекриття досліджуваних зразків

Номер зразка	Характеристики	
	1	2
	К на 1,15, мкм	К на 1,95, мкм
250	0,68	0,47
251	0,57	0,28
262	0,56	0,26
286	0,48	0,32
288	0,57	0,55
291	0,52	0,45

4.2 Розрахунок перерізу поглинання

Виходячи з розрахунків попередніх досліджень, можна розрахувати такі параметри, як переріз люмінесценції, поглинання та коефіцієнт посилення гольмієвого волоконного лазера. Для розрахунку перерізу поглинання σ знімалися спектри поглинання слабого сигналу для досліджуваних зразків і по отриманих коефіцієнтах поглинання α і зерткам K розраховувалися перерізи поглинання гольмію на довжинах хвиль 1,5 і 1,95 мкм по методу виміру перерізу поглинання по поглинанню слабого сигналу:

$$\sigma_{abs} = \frac{\alpha}{N_{max} K}, \quad (4.4)$$

По формулі (4.4) були підраховані перерізи поглинання для досліджуваних зразків на довжині хвилі 1,15 і 1,95 мкм. Результати розрахунків приведені в таблиці 4.3:

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків перерізу поглинання

Номер зразка	Характеристики	
	1	2
	$\sigma_{abs}, 1,15 \text{ мкм}$	$\sigma_{abs}, 1,95 \text{ мкм}$
250	1,55	5,1
251	1,63	–
262	1,59	–
286	1,27	–
288	1,53	–
291	1,47	–

4.3 Розрахунок перерізу люмінесценції для волоконних лазерів легованих іонами гольмію

Розрахунок перерізу люмінесценції проводився по отриманому спектру люмінесценції і часу життя. Час життя було розраховано таким чином:

$$\tau = A^{-1}, \quad (4.5)$$

де, A – вірогідність випромінювання з верхнього лазерного рівня, яку можна розрахувати по формулі:

$$A = \frac{8\pi c n^2}{n_0 \lambda^4} \cdot \frac{2J'+1}{2J+1} \cdot \int k(\lambda) d\lambda, \quad (4.6)$$

де, n_0 – концентрація Но;

$k \lambda$ – коефіцієнт поглинання;

J', J – квантові числа повних кутів моментів в основному і збудженому станах.

Розрахувавши по формулі (4.6) A , отримуємо наступний час життя:

$$\tau = 15 \cdot 10^{-3} \text{ с} \quad (4.7)$$

Для розрахунку перерізу люмінесценції окрім часу життя ще потрібне знання форми спектру люмінесценції. Спектр люмінесценції іонів Ho^{3+} , виміряний для зразка № 250, представлений на рис. 4.4.

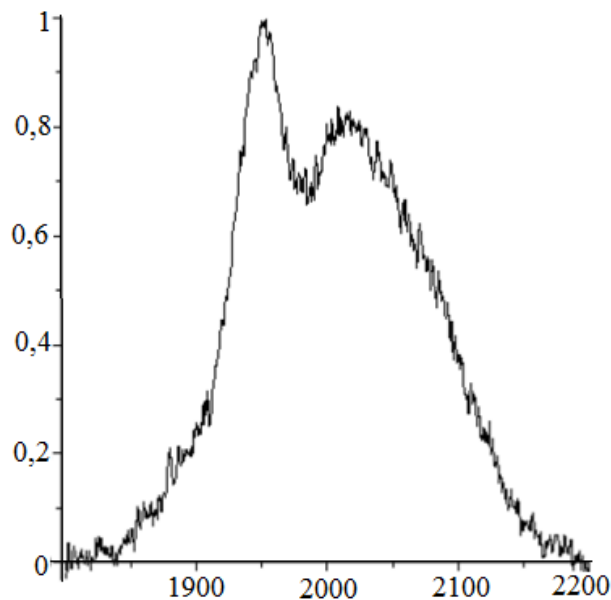


Рисунок 4.4 – Спектр люмінесценції іонів Ho^{3+} для зразка № 250

Тепер по спектру люмінесценції і часу життя іонів у збудженому стані можна розрахувати абсолютне значення перерізу вимушеного випромінювання. Перевагою цього способу визначення перерізу є те, що при розрахунках не потрібні які-небудь дані по концентрації іонів гольмію у волокні, і не використовується профіль розподілу інтенсивності випромінювання у волокні. Необхідними експериментальними даними для

розрахунків перерізу вимушеного випромінювання є час життя τ на верхньому лазерному рівні і форма спектру емісії.

Розглянемо просту теорію, ґрунтовану на чисто дворівневій схемі. Коефіцієнти Ейнштейна, зв'язуюча вірогідність вимушених і спонтанних переходів, пов'язані наступними відношеннями:

$$A_{21} = 16\pi^2 h \left(\frac{\omega}{2\pi c} \right)^3 B_{21}, \quad (4.8)$$

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21}, \quad (4.9)$$

де, A_{21} – вірогідність спонтанного переходу;

g_1 – коефіцієнт виродження i -го рівня

Вірогідність переходу з i -го на j -й рівень задається виразом:

$$B_{ij} \rho(\nu), \quad (4.10)$$

де, $\rho \nu$ – щільність енергії фотонів.

Аналогічні залежності можна отримати і для загальнішого випадку, коли енергетичні рівні розщеплені, і уся система має ненульову температуру. У такому наближенні, модель повинна добре описувати іони Ho^{3+} в кварцовому склі. Розглянемо таку систему, що знаходиться в тепловій рівновазі при температурі T . Позначимо через E_{1i} рівні енергії домішкових атомів в основному стані E_{2i} – в першому збудженому стані, де i – індекс, що пробігає по усіх підрівнях. Тоді в умовах теплової рівноваги вірогідність заселення кожного з підрівнів дорівнює:

$$\varpi_{mi} = \frac{\exp\left(-\frac{E_{mi}}{kT}\right)}{\sum_i \sum_b \exp\left(-\frac{E_{jb}}{kT}\right)}, \quad (4.11)$$

де, ϖ_{mi} – вірогідність заселення рівня E_{mi} ;

k – постійна Больцмана.

Розглянемо взаємодію такої системи з фотонами частоти ω . Вірогідність переходів з якого-небудь підрівня основного стану – $(1i)$ на певний підрівень збудженого стану – $(2j)$ описується матрицею з елементами $M_{1i,2j}$. Кожен елемент цієї матриці визначає вірогідність переходу з одного підрівня основного стану на певний підрівень збудженого стану. Причому для двох конкретних підрівнів вірогідності переходів зверху вниз і від низу до верху рівні:

$$|M_{2i,1i}|^2 = |M_{1i,2i}|^2. \quad (4.12)$$

Якщо позначити концентрації збуджених (на верхній рівень) і незбуджених іонів гольмію, як N_2 та N_1 відповідно, то згідно з визначеннями перерізів випромінювання і поглинання, можна записати як:

$$\frac{N_1 \sigma_a(k, \omega)_{12}}{N_2 \sigma_a(k, \omega)_{21}} = \frac{\sum_{i,j} \varpi_{1i} |M_{2j,1i}(k, \omega)|^2 \delta(E_{2j} - E_{1i} - \hbar\omega)}{\sum_{i,j} \varpi_{2j} |M_{1i,2j}(k, \omega)|^2 \delta(E_{2j} - E_{1i} - \hbar\omega)}, \quad (4.13)$$

де k – хвильовий вектор. Але при тепловій рівновазі:

$$\varpi_{1j} \delta(E_{2j} - E_{1i} - \hbar\omega) = \varpi_{2i} \exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) \delta(E_{2j} - E_{1i} - \hbar\omega), \quad (4.14)$$

Комбінуючи останні два вираження отримуємо наступний результат:

$$\sigma_e k, \omega_{21} = \sigma_a k, \omega_{12} \frac{N_1}{N_2} \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{kT}\right) = \sigma_a k, \omega_{12} \exp\left(\frac{\varepsilon - \hbar\omega}{kT}\right). \quad (4.15)$$

Таким чином, встановлюється однозначна відповідність між перерізом вимушеного випромінювання і перерізом поглинання для цієї довжини хвилі при цій температурі. Основним параметром, що визначає їх співвідношення, є фактор $\frac{N_1}{N_2}$ або ε . Причому, для відношення $\frac{N_1}{N_2}$ можна записати:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{\varepsilon}{kT}} = \frac{\sum_i \exp\left(-\frac{E_{1i}}{kT}\right)}{\sum_j \exp\left(-\frac{E_{2j}}{kT}\right)}, \quad (4.16)$$

З іншого боку, так само як і співвідношення Ейнштейна для дворівневої системи, встановлений зв'язок між часом життя на верхньому рівні τ та перерізом емісії σ_e . При повній термодинамічній рівновазі (тобто коли речовина знаходиться в тепловій рівновазі з випромінюванням), число вимушених переходів з нижнього рівня у верхній стан повинне дорівнювати сумі вимушених і спонтанних переходів зверху вниз. Виходячи з цього факту, було знайдено співвідношення між часом життя у збудженому стані і перерізом вимушеного випромінювання:

$$\frac{1}{\tau_{21}} = 8\pi c n^2 \int_0^\infty \frac{\sigma_e \lambda}{\lambda^4} d\lambda, \quad (4.17)$$

Знаючи час життя і форму перерізу вимушеного випромінювання (наприклад, із спектру емісії) легко отримати абсолютне значення перерізу люмінесценції:

$$\sigma_e \lambda = \frac{\lambda^5}{8\pi c n^2 \tau} \cdot \frac{I_{lum} \lambda}{\int_0^\infty \lambda I_{lum} \lambda d\lambda}, \quad (4.18)$$

де, $I_{lum} \lambda$ – інтенсивність спонтанної люмінесценції

Підставивши у формулу (4.16) час життя для гольмію і спектр люмінесценції, знятий для зразка №250 та роблячи чисельну інтеграцію в програмі отримаємо наступний переріз люмінесценції іонів гольмію на довжині хвилі 1,95 мкм:

$$\sigma_e = 3,28 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2, \quad (4.19)$$

4.4 Моделювання коефіцієнта підсилення

Для отримання лазерної генерації коефіцієнт посилення сигналу в активному волокні повинен перевищувати сумарні втрати в резонаторі лазера. Активні оптичні волокна, як підсилювальне середовище мають ряд особливостей в порівнянні з лазерними кристалами та склом. Так, хвилеводний характер поширення випромінювання накачування і сигналу, як правило, виключає втрати на їх випромінювання через бічні поверхні середовища. Випромінювальні втрати можуть виникати тільки при неправильному виборі параметрів волокна, або за наявності його вигину з малим радіусом.

Хвилеводні властивості обумовлюють безперечну перевагу волоконних лазерів в порівнянні із звичайними твердотільними лазерами. З іншого боку, у волоконних лазерах характерна довжина активного середовища складає одиниці і десятки метрів. Тому, при аналізі ефективності волоконних лазерів істотним є облік нерезонансних оптичних втрат, як для випромінювання накачування, так і для випромінювання сигналу. Інші особливості

волоконних лазерів обумовлені тим, що в активному середовищі випромінювання поширюється не лише в серцевині, але і у відбиваючій оболонці. При цьому долі потужності в серцевині і оболонці можуть виявитися порівнянними. Крім того, активна домішка може вводитися не в усю серцевину, а лише в її частину, або може легуватися частина оболонки волокна. Також, є можливим легування різних областей волокна різними активними домішками, при цьому взаємодія іонів в загальноприйнятому сенсі відсутня, а є лише їх оптичний зв'язок. Тому класичні вирази посилення у разі активних волокон мають бути модифіковані.

Приведемо співвідношення для еволюції потужності накачування та сигналу в трирівневій схемі посилення, по якій працюють більшість реалізованих волоконних лазерів. Припускаючи для простоти однорідний розподіл легуючої добавки і розподілу поля по перерізу серцевини волокна, посилення в трирівневій схемі може бути описане таким чином:

$$\begin{aligned}
 dN_2 / dz &= W_p - W_s - N_2 / \tau_{21} \\
 dP_p / dz &= -P_p \sigma_p [N - N_2] \\
 dP_s / dz &= -P_s \gamma \\
 dP_{f^\pm} / dz &= [1 + \alpha N_2 - \alpha N] h\nu v + \gamma P_{f^\pm} \\
 \gamma &= \eta_s \sigma_{21} [1 + \alpha N_2 - \alpha N],
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

де, z – координата по довжині волокна;

N і N_2 – населеність метастабільного рівня та загальна концентрація іонів ербію, відповідно;

α – відношення перерізів поглинання та емісії на тій же довжині хвилі;

τ_{21} – час життя на метастабільному рівні;

P_p, P_s, P_f – потужності накачування, сигнал та посиленна спонтанна люмінесценція, відповідно;

σ_p – переріз поглинання накачування;

$h\nu$ та $\Delta\nu$ – енергія фотону та ширина смуги випромінювання для посиленої спонтанної люмінесценції, відповідно;

η_s – доля потужності сигналу в серцевині;

σ_{21} – переріз емісії на довжині хвилі посилюваного сигналу.

Змінна γz має сенс локального посилення. Для посиленої спонтанної люмінесценції знаки плюс і мінус означають напрям поширення. Для швидкостей накачування $W_p z$ і випромінювання $W_s z$ можна записати:

$$W_p z = \sigma_p \eta_p P_p z / h\nu_p S_c, \quad (4.21)$$

$$W_s z = \sigma_{21} \eta_s [P_s z + P_{f\pm} z] / h\nu_s S_c, \quad (4.22)$$

де, η_p – доля потужності накачування в серцевині;

S_c – площа серцевини.

У стаціонарному стані $dN_2 z / dt = 0$, коли для населеності метастабільного рівня можна записати:

$$N_2 z = N [W_p z + \alpha W_s z] / [W_p z + 1 + \alpha W_s z + 1/\tau_{21}]. \quad (4.23)$$

Рішення системи диференціальних рівнянь для випадку гольмієвого підсилювача сигналу робилося чисельним методом Рунге-кута третього порядку апроксимації в програмі MatCad. В результаті був отриманий наступний результат: при накачуванні в серцевину сигналом потужністю 10 Вт з довжиною хвилі 1,95 мкм, що відповідає максимуму поглинання гольмію та початковому сигналі 0,001 Вт з довжиною хвилі 1,15 мкм, на виході отримали максимальний коефіцієнт посилення сигналу 37 Дб, що

реалізується на довжині волокна 25 см. Нижче приведений графік залежності потужності вхідного сигналу P_s з та потужності накачування P_p з від довжини волокна (рис. 4.5).

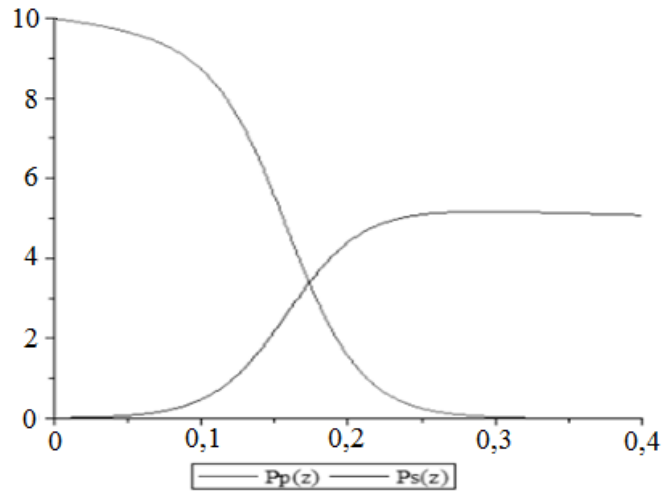


Рисунок 4.5 – Графік залежності потужності вхідного сигналу P_s з та потужності накачування P_p з від довжини волокна

ВИСНОВКИ

Однією з основних тенденцій розвитку волоконних лазерів є розширення спектральних діапазонів їх генерації, у тому числі і в двохлакронному діапазоні, де розташовані лінії поглинання ряду газів (наприклад, CO_2) та пари води. Серед волоконних лазерів на основі плавленого кварцу найбільш довгохвильовими є лазери, активне середовище яких леговане іонами гольмію.

У роботі була продемонстрована генерація в діапазоні 2,02 мкм – 2,15 мкм, а також отримана ефективність генерації 0,45 відносно потужності накачування на 1,15 мкм. Слід зазначити, що раніше була досягнута максимальна довжина хвилі генерації (2,193 мкм) для лазерів на основі кварцових волокон, де використовувався ВКР-лазер на волокні з кварцевою оболонкою. Метою даної роботи було отримання як можна більш довгохвильової генерації в гольмієвому волоконному лазері. Довжина хвилі генерації була вибрана в області 2,2 мкм, де інтенсивність люмінесценції гольмію не перевищує 0,01 від її максимального значення на довжині хвилі 1,95 мкм.

На підставі результатів виконаної роботи можна зробити наступні висновки: проведений огляд літератури по темі атестаційної роботи; розглянуті проведені експерименти по дії лазерного випромінювання гольмієвого волоконного лазера на зразки різні біологічних тканин; виконано моделювання волоконного гольмієвого лазера, в якому розглядалися активні волокна та на основі попередніх робіт, де розраховувався коефіцієнт перекриття, були проведені розрахунки перерізу поглинання та розрахунок перерізу люмінесценції, що у свою чергу дозволило змодельовати коефіцієнт посилення гольмієвого лазера.

При розрахунках були отримані такі результати: переріз поглинання для довжини хвилі $\lambda = 1,95$ мкм дорівнює 5,1; переріз люмінесценції іонів гольмію на довжині хвилі 1,95 мкм рівний $3,28 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$.

При накачуванні в серцевину сигналом потужністю 10 Вт з довжиною хвилі 1,95 мкм, що відповідає максимуму поглинання гольмію та початковому сигналі 0,001 Вт з довжиною хвилі 1,15 мкм, на виході отримали максимальний коефіцієнт посилення сигналу 37 Дб, що реалізується на довжині волокна 25 см. Таким чином, створений гольмієвий волоконний лазер з рекордною, для лазера на основі кварцового волокна, довжиною хвилі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Широкополосный источник излучения на основе волоконного световода, легированного ионами гольмия: II Российский семинар по волоконным лазерам, 1 - 4 апреля 2008 г. Саратов / редкол.: А. С. Курков. Саратов, 2008. 65 с.
2. Гольмиевый волоконный лазер с рекордной квантовой эффективностью: материалы Всероссийской конференции по волоконной оптике, 12-14 октября 2011 г. Пермь / редкол.: А.С. Курков. Пермь: Фотон - Экспресс, 2011. 205 с.
3. Минаев В.П. Современные лазерные аппараты для хирургии и силовой терапии на основе полупроводниковых и волоконных лазеров / В.П. Минаев // Журн. Квантовая электроника. 2009. №33. с. 48.
4. Курков А. С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства / А. С. Курков // Журн. Квантовая электроника. 2007. Т. 37, №12. с. 1146 - 1148.
5. Эффективные гольмиевые волоконные лазеры с мощностью до 10 Вт: материалы Всероссийской конференции по волоконной оптике, 8-9 октября 2009 г. Пермь / редкол.: А. В. Маракулин. Пермь: Фотон-Экспресс, 2009 – 78 с.
6. Васильев А. В. Оптическая и квантовая электроника / А. В. Васильев, М. Е. Игнатъев // Журн. Квантовая электроника. 2012. №65. с. 32.
7. Шолохов Е. М. Лазеры на основе оптических волокон, легированных ионами гольмия / Е.М. Шолохов. М.: ИНФРА-М, 2006. 129 с.
8. Курков А. С. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности / А. С. Курков, Е. М. Дианов // Журн. Квантовая электроника. 2004. №34. с. 881.
9. Мельтц Г. Волоконные лазеры и их применение / Г. Мельтц, В. В. Морей, В. Х. Гленн // Журн. Физические обзорные письма. 1989. №14. с. 823.

10. Доминик В. Лазеры и волоконная оптика / В. Доминик, С. Мак Кормак, Р. Ваартс и др. // Журн. Физические обзорные 1999. №35. с. 1158.
11. Вудс С. Волоконные лазеры средней мощности и их применение: учеб.пособие / С. Вудс, М. Дака, Г. Флин. Киев: Фотоника, 2008. 423 с.
12. Курков А. С. Разработка гольмиевых лазеров / А. С. Курков, Е. М. Дианов О. И. Медведков и др. // Журн. Электронные записки. 2000. №36. с. 115.
13. Кларксон А. Волоконные лазеры и их применение / А. Кларксон, Н. П. Барнс, П. В. Тернер и др. // Журн. Оптические записки. 1989. № 11. с. 127.
14. Белов А. В. Изгибные потери в одномодовых волоконных световодах / А. В Белов, А. Н. Гурьянов, Д. Д. Гусовский и др. // Журн. Квантовая электроника. 1985. №12. с.107.
15. Курков А. С. Широкополосный источник излучения в области 2 мкм на основе волоконного световода, легированного ионами Ho^{3+} / А. С. Курков Е.М. Шолохов, В.М. Парамонов и др. // Журн. Квантовая электроника. 2008. №38. с. 981.
16. Грух Д. А. Широкополосный источник излучения на основе иттербиевого волоконного световода с распределенной по длине накачкой / Д. А. Грух, В. А. Богатырев А. А. Сысолятин и др. // Журн. Квантовая Электроника. 2004. №34. с. 247.
17. Курков А. С. Влияние концентрации активных ионов на динамику генерации гольмиевых волоконных лазеров / А. С. Курков Е.М. Шолохов, А.В. Маракулин и др. // Журн. Квантовая электроника. 2010. №40. с. 85.
18. Васильев С. А. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С. А. Васильев О. И. Медведков, И. Г. Королев и др. // Журн. Квантовая Электроника. 2005. №34. с. 108.

19. Пул С. Б. Изготовление и характеристика оптических волокон с низкими потерями, содержащих редкоземельные ионы / С. Б. Пул, Д.Н. Пейн, М.Е. Ферманн // Журн. Технологии световой волны. 1986. №13. с.87.

20. Филатова С. А. Воздействие излучения гольмиевого волоконного лазера на ткань оболочки спинного мозга и жировую ткань / С. А. Филатова, В. А. Камынин, А. В. Рябова и др. // Журн. Квантовая электроника. 2015. №45. с. 781 - 786.