

Власник документу:  
Бевза Олег Миколайович

ID перевірки:  
1000777253

Дата перевірки:  
15.12.2019 14:21:41 GMT+0

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
15.12.2019 14:37:10 GMT+0

ID користувача:  
90740

Назва документу: 2019\_Громов Василь\_ Волоконні лазери\_fch

ID файлу: 1000787926 Кількість сторінок: 40 Кількість слів: 18868 Кількість символів: 146463 Розмір файлу: 145.91 KB

## 16.5% Схожість

Найбільша схожість: 4.26% з джерело [http://www.8ref.com/18/referat\\_188996.html](http://www.8ref.com/18/referat_188996.html)

16.1% Схожість з Інтернет джерелами 63 ..... Page 42

5.62% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту 31 ..... Page 44

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

## 0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

## Підміна символів

Заміна символів 47

«Волоконні лазери в системах передачі інформації»

Громов Василь Валерійович

**Ключові слова:** ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку, ВС – волоконний світловод, волоконний лазер, вісмутувий світловод, волоконний підсилювач.

**Короткий зміст дисертації:** Дана магістерська дисертація присвячена дослідженню волоконних лазерів в системах передачі інформації, в ній представлено результати інженерних, експериментально отриманих параметрів та характеристик волоконних лазерів та світловодів, використовуваних при передачі інформації.

У вступі викладено етапи розвитку волоконно-оптичних ліній зв'язку, а також актуальність розробки волоконних лазерів. В огляді науково-технічної літератури представлено інформацію про складові частини волоконно-оптичних ліній зв'язку їх основні параметри та характеристики; підтверджена перспективність їх розробки. В теоретичній частині приведені основні розрахунки для волоконних світловодів, волоконних лазерів та принципи їх роботи, а також опис експериментального дослідження вихідної потужності волоконного лазера. В розділі: «Моделювання вихідних характеристик волоконного лазера» проведено моделювання параметрів ітербієвого лазера. В розділі про виготовлення світловодів описані основні методи виготовлення, а також наведені приклади установок по виготовленню оптоволокна. В останніх двох розділах висвітлюються перспективні напрямки використання волоконних лазерів, і запропонований стартап проект.

#### АНОТАЦІЯ

Дана магістерська дисертація присвячена дослідженню волоконних лазерів в системах передачі інформації, в ній представлені результати інженерно-практичних досліджень та розрахунків основних параметрів та характеристик волоконних лазерів і світловодів.

Робота складається із вступу, аналізу літератури, теоретичної частини, розрахунків, опису експерименту та висновків. У вступі викладено головну задачу роботи і вказано її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд науково-технічної інформації по волоконно-оптичним лініям зв'язку, її компонентів та параметрів. В теоретичній частині приведені основні існуючі види світловодів, волоконних лазерів, що використовуються при передачі інформації, принципи їх роботи. В експериментальному розділі приведений детальний опис практичних досліджень та результати аналізу досліджуваних параметрів та характеристик системи.

#### ВСТУП

У своєму розвитку ВОЛЗ пройшли кілька етапів, вирішувалися фундаментальні проблеми, інтенсивно розвивалася наука і технології. Велика частина проблем і одночасно основні досягнення та можливості ВОЛЗ пов'язані з двома елементами систем: волоконними світловодами і лазерами.

В середині 70-х років ХХ століття з'явилися напівпровідникові лазери і волоконні світловоди з невеликим загасанням. Перші лазери для ВОЛЗ мали довжину хвилі випромінювання 0,85 мкм (перше вікно прозорості волокна) і невисоку ефективність; волоконні світловоди були багатомодовими і мали загасання в кілька дБ/км. Тому ВОЛЗ хоча і показали переваги перед системами на мідних проводах, але мали швидкості і відстані передачі далекими від очікуваних. Збільшенню швидкості передачі в перших ВОЛЗ заважала тимчасова дисперсія проходження оптичного сигналу по волоконному тракту. Перші волоконні світловоди (багатомодові із ступінчастим профілем показника заломлення) через велику міжмодову дисперсію мали смугу пропускання не більше 20 МГц x км. Ця проблема була досить швидко вирішена розробкою багатомодових волоконних світловодів з градієнтним профілем показника заломлення, які забезпечили збільшення смуги пропускання до 160 МГц x км.

Для збільшення дальності передачі інформації необхідно вирішити наступні задачі: - знизити величину загасання оптичного сигналу в волоконному тракті. Розробка прийнятно-передавальної апаратури, що працює в другому (1,3 мкм) спектральному

діапазоні (вікні), дозволила знизити загасання в багатомодових волокнах з 3 дБ/км (0,85 мкм) до 1 дБ/км (1,3 мкм). Одночасно у багатомодових волокон підвищилася і смуга пропускання до 500 МГц x км.

- розробити одномодові волокна, що дозволять значно підвищити швидкість передачі інформації за рахунок відсутності міжмодової дисперсії, а перехід до третього спектрального вікна (1,55 мкм) дозволить знизити втрати в одномодових волокнах з 0,35 дБ/км (1,31 мкм) до 0,2 дБ/км (1,55 мкм). Відкриті можливості по нарощуванню швидкості і дальності передачі інформації привели до значного прогресу цифрових систем передачі інформації. Потреба в розвитку таких систем була дуже високою, так як обсяг трафіку, що передається безперервно збільшувався, і це стимулювало роботи щодо подальшого вдосконалення ВОЛЗ. Було показано, що збільшення швидкості і дальності передачі інформації в одномодових системах перешкоджає хроматична дисперсія в волокнах. Ця проблема була успішно вирішена при розробці оптичних волокон з нульовою дисперсією в області довжин хвиль 1,31 мкм (волокна типу G.652) і зміщеною в області довжин хвиль 1,55 мкм нульової дисперсії (волокна типу G.653). Для збільшення дальності передачі інформації стали використовуватися регенератори сигналу, які перетворювали оптичний сигнал в електричний, відновлювали його форму, а потім формували оптичний сигнал для подальшого проходження по волоконному тракту.

- використання оптичних підсилювачів (ОП), дозволило ефективно збільшити дальність передачі. ВОЛЗ з оптичними підсилювачами і волокном G.653 забезпечували передачу інформації зі швидкостями до 40 Гбіт/с на відстань понад сто кілометрів. Розроблені ОП відкрили найважливіший етап в розвитку волоконно-оптичного зв'язку - з'явилися системи зі спектральним ущільненням. У них використовується така властивість волоконних систем, як можливість незалежної передачі інформації на різних довжинах хвиль, в різних каналах.

Подальший розвиток ВОЛЗ йшло як по шляху збільшення числа порівняно "низькошвидкісних" (декілька Гбіт/с) каналів в DWDM- і HDWDM-системах, так і по шляху подальшого збільшення швидкості передачі інформації в інформаційному оптичному каналі. В даний час серійно випускаються системи зі швидкістю передачі 40 Гбіт/с, ведуться експерименти на 100 Гбіт/с. Однак вже на швидкостях понад 10 Гбіт/с з'являються обмеження, пов'язані ще з одним видом тимчасової дисперсії - поляризаційно-модової дисперсії (PMD). Вирішення цієї проблеми вимагає проведення фундаментальних досліджень і значного просування в області технології виготовлення волоконних світловодів і оптичних кабелів, монтажу лінії і контролю параметрів тракту.

Останнім часом особлива увага приділяється не тільки високошвидкісним магістральним ВОЛЗ, а й локальним системам. Масові локальні волоконно-оптичні системи передачі повинні забезпечити завантаженість регіональних і магістральних ВОЛЗ, підвищити ефективність волоконно-оптичних мереж зв'язку. При цьому доцільно використовувати багатомодові волоконні світловоди. Поява нових високоефективних лазерів для локальних мереж дозволяє значно підвищити швидкість і дальність передачі інформації в ВОЛЗ на основі багатомодових волокон. Однак при цьому з'являється проблема "центрального провалу" в багатомодових волокнах, пов'язана з недосконалістю технології виготовлення заготовок для цих світловодів. Значні відхилення профілю показника заломлення від оптимального в центрі волокна викликали різке збільшення дисперсії в разі використання сучасних лазерів. Ця проблема багатомодового волокна була вирішена, що відкрило нові можливості в розвитку локальних ВОЛЗ і волоконно-оптичних систем в цілому.

Рішення фундаментальних проблем було підкріплено розвитком супутніх технологій, які і забезпечили просування ВОЛЗ до споживачів. Найбільш істотні успіхи спостерігалися в технології виробництва волоконних світловодів та кабелів. Сучасні технології монтажу і вимірювання параметрів волоконного тракту повністю відповідають високому рівню сучасних ВОЛЗ. Завдяки цьому, а також розвитку високих технологій виробництва

оптичних передавачів та приймачів, мережних технологій та технологій спектрального ущільнення і забезпечені високі темпи розвитку ВОЛЗ.

Розвиток волоконно-оптичних систем зв'язку з високою швидкістю передачі інформації зажадало створення ефективних волоконних лазерів і підсилювачів потужності випромінювання, сумісних з такими системами.

Розроблено ефективні волоконні лазери на основі рідкоземельних елементів - неодиму, європію, гольмію і тулію, які генерують в ближній інфрачервоній області спектра. Спектральні області лазерної генерації існуючих ефективних рідкоземельних волоконних лазерів не перекривають діапазону довжин хвиль інфрачервоного випромінювання 1150-1500 нм, перспективного, зокрема, для волоконно-оптичних систем зв'язку. Легування скла різними рідкоземельними домішками дає випромінювання в різних інтервалах довжин хвиль спектральної області. При цьому найбільшу ширину спектральної області мають вісмутові волоконні лазери на основі алюмосилікатного скла.

Прорив в лазерній фізиці ознаменувало появу волоконних лазерів, вихідна потужність безперервного випромінювання яких за останні 10 років була збільшена з декількох сотень ват до декількох десятків кіловат (таблиця 1).

Таблиця 1

### **Зростання максимальної вихідної потужності волоконних лазерів за останні роки**

Такий швидкий прогрес в зростанні вихідної потужності пояснюється, перш за все, розробкою покращеної структури активних волоконних світловодів і успіхами у створенні систем накачки на основі лазерних діодів.

Волоконні лазери виявилися ідеальними не тільки для використання в оптичних системах телекомунікації, а й дозволили створити потужні лазерні системи для промислового застосування. В наш час вихідна потужність одномодового лазера на основі волокон, активованих ербієм (довжина хвилі з діапазону 1,53 ... 1,6 мкм) і тулієм (довжина хвилі з діапазону 1,8 ... 2,1 мкм), доведена до рівня 10 кВт з ККД «від розетки» понад 23% [1]. Підсумовування вихідного випромінювання одномодових лазерів в волоконних об'єднувачах дозволяє збільшувати вихідну потужність випромінювання. Розбіжність вихідного випромінювання при цьому збільшується, але залишається цілком прийнятною для більшості практичних застосувань.

Найбільш потужними комерційними моделями є багатомодові волоконні лазери з вихідною потужністю випромінювання 30 і 50 кВт. Ефективність передачі лазерного випромінювання потужністю 5 кВт по транспортному волокну оцінюється втратами, що не перевищують 13% на відстань 1 км.

В останні роки активні дослідження проводяться в області створення потужних волоконних лазерів з використанням волоконних світловодів з подвійною оболонкою. Значний прогрес в цьому напрямку обумовлений, перш за все, розробкою потужних і надійних напівпровідникових джерел накачки, а також якісних світловодів з подвійною оболонкою.

Транспортування енергії в оптичному волокні в вигляді потоку інфрачервоного випромінювання, яке концентрується в волоконному лазері, є яскравим досягненням квантової електроніки. Для потужності волоконного лазера 75 кВт при діаметрі волокна 100 мкм щільність енергії, що передається оцінюється значенням  $\sim 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>. Електрична енергія такої ж потужності відповідно до існуючого технічного регламенту може бути передана по мідному провіднику діаметром  $\sim 7$  мм, щільність енергії, яка переноситься при цьому на два порядки нижче і становить  $\sim 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>.

Прогресуючі темпи розвитку оптоволоконної техніки можуть привести до того, що перетворення і перенесення енергії у вигляді потоку інфрачервоного випромінювання (фотонів) можуть виявитися в деяких випадках економічно більш вигідними порівняно з перенесенням електроенергії. Такими випадками можуть бути перехід до висвітлення об'єктів економічними фотодіодами та ін. Стає актуальною розробка двигунів, різних перетворювачів, що трансформують енергію фотонів.

## 1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ПО ВОЛОКОННИМ 2. ЛАЗЕРАМ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Структуру волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) показано на рисунку 1.1.

Рисунок 1.1. Структура ВОСП

Рисунок 1.2. Узагальнена схема волоконно-оптичної лінії зв'язку

EDFA – волоконний підсилювач, легований іонами ербію;

MWDM - пристрій для об'єднання накачування і сигналу;

EDF - волокно, леговане ербієм;

F-ROPA - підсилювач з віддаленим накачуванням, що доставляється в прямому напрямку

B-ROPA - підсилювач з віддаленим накачуванням, що доставляється в зустрічному напрямку.

У ВОЛЗ використовуються системи передачі інформації по волоконних світловодах. Серед переваг оптичних волокон можна вказати наступне:

1. Широка смуга пропускання - обумовлена надзвичайно високою частотою несучої - близько  $10^{14}$ Гц, яка забезпечує потенційну можливість передачі по одному оптичному волокну потоку інформації в кілька терабіт в секунду. Велика смуга пропускання - одне з найбільш важливих переваг оптичного волокна над мідним або іншим середовищем передачі інформації.

2. Мале загасання оптичного сигналу в волокну. Випускаються в даний час вітчизняні і зарубіжні оптичні волокна, які мають згасання 0,2-0,3 дБ на довжині хвилі 1,55 мкм в розрахунку на один кілометр. Мале загасання і невелика дисперсія дозволяють будувати ділянки ліній без ретрансляції протяжністю понад 100 км.

3. Низький рівень шумів у волоконно-оптичному кабелі дозволяє збільшити смугу пропускання за рахунок використання різних способів модуляції сигналів при малій надмірності їх кодування.

4. Висока перешкодозахищеність. Оскільки волокно виготовлено з діелектричного матеріалу, то воно несприйнятливим до електромагнітних перешкод з боку оточуючих мідних кабельних систем і електричного обладнання, здатного індукувати електромагнітне випромінювання (лінії електропередач, електродвигунні установки і т.д.).

5. Мала вага і об'єм. Волоконно-оптичні кабелі мають меншу вагу і об'єм в порівнянні з мідними кабелями в розрахунку на одну і ту ж пропускну здатність.

6. Висока захищеність від несанкціонованого доступу. Оскільки волоконно-оптичні кабелі практично не випромінюють в радіодіапазоні, то передану по ньому інформацію важко підслухати, не порушуючи прийому-передачі.

7. Гальванічна розв'язка. Ця перевага оптичного волокна полягає в його ізолюючій властивості.

8. Вибухо-пожежна безпека. Через відсутність іскроутворення оптичне волокно підвищує безпеку мереж зв'язку на хімічних, нафтопереробних підприємствах, при обслуговуванні технологічних процесів підвищеного ризику.

### 1.1. Передавальні оптоелектронні модулі

Для організації передачі оптичних сигналів не досить мати тільки джерело випромінювання. У будь-якої конструкції ПОМ є спеціальний тримач (housing), який дозволяє закріпити і захистити складові елементи передавача; джерело випромінювання, вузол електричного інтерфейсу і місце сполучення з волокном. Інколи потрібні додаткові внутрішні елементи для оптимального під'єднання волокна. Важливим елементом лазерних діодів є ланцюг струму накачки, і система контролю температури. Для складних лазерних систем додають ще вихідний моніторинг оптичного сигналу. Загальна схема конструкції оптичного передавача, в якій не всі елементи є обов'язковими, показана на рис. 1.3.

Рис.1.3. Складові елементи передавального оптоелектронного модуля (ПОМ)

Передавальні оптоелектронні модулі (ПОМ), що застосовуються в волоконно-оптичних системах, призначені для перетворення електричних сигналів в оптичні. Останні повинні

бути введені в волокно з мінімальними втратами. Виробляються вельми різноманітні ПОМ, що відрізняються по конструкції, а також за типом джерела випромінювання. Одні працюють на телефонних швидкостях з максимальною відстанню до декількох метрів, інші передають сотні і навіть тисячі гігабіт в секунду на відстані в кілька сотень кілометрів.

Типи і характеристики джерел випромінювання

Головним елементом ПОМ є джерело випромінювання. Перелічимо основні вимоги, які повинно задовольняти джерело випромінювання, яке застосовується в ВОЛЗ:

- випромінювання має вестися на довжині хвилі одного з вікон прозорості волокна. У традиційних оптичних волокнах існує три вікна, в яких досягаються менші втрати світла при поширенні: 850, 1300, 1550 нм;

- джерело випромінювання повинно витримувати необхідну частоту модуляції для забезпечення передачі інформації на необхідній швидкості;

- джерело випромінювання повинно бути ефективним, в тому сенсі, що велика частина випромінювання джерела повинна потрапляти в волокно з мінімальними втратами;

- джерело випромінювання повинно мати достатньо велику потужність, щоб сигнал можна було передавати на великі відстані, але і не на стільки, щоб випромінювання призводило до нелінійних ефектів або могло пошкодити волокно або оптичний приймач;

- температурні варіації не повинні позначатися на функціонуванні джерела випромінювання;

- вартість виробництва джерела випромінювання повинна бути відносно невисокою.

Два основних типи джерел випромінювання, що задовольняють перерахованим вимогам використовуються в даний час - світлодіоди (LED) і напівпровідникові лазерні, (LD). Головна відмінна риса між світлодіодами та лазерними діодами - це ширина спектра випромінювання. Світловипромінюючі діоди мають широкий спектр випромінювання, в той час діоди мають значно вужчий спектр, рис.1.4. Обидва типи пристроїв досить компактні і добре сполучаються зі стандартними електронними ланцюгами.

Рис.1.4. Спектри випромінювання світлодіодів і лазерних діодів

**Світловипромінюючі діоди**

Завдяки своїй простоті і низькій вартості, світлодіоди поширені значно ширше, ніж лазерні діоди.

Принцип роботи світлодіода заснований на випромінювальній рекомбінації носіїв заряду в активній області гетерогенної структури при пропущенні через неї струму, рис. 1.5 а. Носії заряду - електрони і дірки - проникають в активний шар (гетероперехід) з прилеглих пасивних шарів (р- і п- шару) внаслідок подання напруги на р-п структуру і потім піддаються спонтанній рекомбінації, що супроводжується випромінюванням світла.

Довжина хвилі випромінювання  $\lambda$  (мкм) пов'язана з шириною забороненої зони активного шару  $E_g$  (eV) законом збереження енергії  $\lambda = 1,24 / E_g$ , рис. 1.5 б.

Показник заломлення активного шару вище показника заломлення обмежувальних пасивних шарів, завдяки чому рекомбінаційне випромінювання може поширюватися в межах активного шару, відчуваючи багаторазове відбивання, що значно підвищує ККД джерела випромінювання.

Рис.1.5. Подвійна гетероструктура: а) гетероструктура,

б) енергетична діаграма при прямому зміщенні

Гетерогенні структури можуть створюватися на основі різних напівпровідникових матеріалів. Зазвичай в якості підкладки використовуються GaAs і Inp. Відповідний композиційний склад активного матеріалу обирається в залежності від довжини хвилі випромінювання і створюється за допомогою напilenня на підкладку, табл. 1.2.

Довжину хвилі випромінювання  $\lambda_0$  визначають як значення, яке відповідає максимуму спектрального розподілу потужності, а ширину спектра випромінювання  $\Delta\lambda_{0,5}$  - інтервал довжин хвиль, в якому спектральна щільність потужності становить половину максимальної.

Таблиця 1.2

**Композиційні матеріали, які використовуються для виробництва джерел випромінювання різних довжин хвиль****Лазерні діоди**

Дві головні конструктивні відмінності є у лазерного діода в порівнянні з світлодіодом. Перше, лазерний діод має вбудований оптичний резонатор. Друге, лазерний діод працює при значно більших значеннях струмів накачування, ніж світлодіод, що дозволяє при перевищенні деякого порогового значення отримати режим індукованого випромінювання. Саме таке випромінювання характеризується високою когерентністю, завдяки чому лазерні діоди мають значно менше ширину спектра випромінювання (1-2 нм) проти 30-50 нм у світлодіодів, рис.1.4. Залежність потужності випромінювання від струму накачування описується ВАХ лазерного діода. При малих струмах накачування лазер, працює у режимі спонтанного випромінювання як малоефективний світлодіод. При перевищенні деякого порогового значення струму накачування  $I_{thres}$ , випромінювання стає індукованим, що призводить до різкого зростання потужності випромінювання і його когерентності, рис.1.6. Рис.1.6. ВАХ: 1 – лазерного діода; 2 – світлодіода

Потужність вихідного випромінювання  $P_{out}$  чи вихідна потужність випромінювання світлодіода (output power) відображає потужність випромінювання, що вводиться в волокно. Поряд з традиційною одиницею виміру Вт вона може вимірюватися в дБм. Потужності  $P_{out}$  виміряної в мВт ( $10^{-3}$  Вт), буде відповідати потужність  $p_{out} = 10 \lg P_{out}$  (дБм). Використання одиниці виміру дБм спрощує енергетичний розрахунок бюджету лінії. Потужність випромінювання, що приводиться в характеристиках оптичного передавача, може варіюватися в деякому діапазоні. У таких випадках вказують діапазон потужності випромінювання. Наприклад, -19/-14 дБм означає, що  $p_{out min} = -19$  дБм, а  $p_{out max} = -14$  дБм.

В магістральних ВОЛЗ використовуються два вікна 1,3 і 1,55 мкм. Оскільки найменше загасання у волокні досягається у вікні 1,55 мкм, на найбільш протяжних безретрансляційних ділянках ( $L = 100$  км) ефективніше використовувати оптичні передавачі тільки на цій довжині хвилі.

Лазерні діоди з розподіленим зворотним зв'язком (DFB лазер) і з розподіленим брегівським відбиванням (DBR лазер). Резонатори у цих двох досить схожих типів представляють собою модифікацію плоского резонатора Фабрі-Перо, в якій додана періодична просторова модуляційна структура. У DFB лазерах періодична структура поєднана з активною областю (рис.1.7 а), а в DBR лазерах періодична структура винесена за межі активної області (рис.1.7 б). Періодична структура впливає на умови поширення і характеристики випромінювання. Так, перевагами DFB і DBR лазерів в порівнянні з FP лазером є: зменшення залежності довжини хвилі лазера струму інжекції і температури, висока стабільність одномодовості і практично 10 процентна глибина модуляції. Температурний коефіцієнт  $\Delta\lambda/T$  для FP лазера порядку 0,5-1 нм/°C, в той час як для DFB лазера порядку 0,07-0,09 нм/°C. Основним недоліком DFB і DBR лазерів є складна технологія виготовлення і, як наслідок, більш висока ціна.

Рис.1.7. Три основних типи лазерних діодів: а) лазер з розподіленим зворотнім зв'язком, DFB лазер; б) лазер з розподіленим брегівським відбиванням, DBR лазер; в) лазер з одним зовнішнім резонатором, ЕС лазер.

Лазерний діод з зовнішнім резонатором (ЕС лазер). В ЕС лазерах один або обидва торці покриваються спеціальним шаром, який зменшує відбивання, і відповідно, одне або два дзеркала ставляться навколо активної області напівпровідникової структури. На рис.1.7 в) показаний приклад ЕС лазера з одним зовнішнім резонатором. Антивідбивне покриття зменшує коефіцієнт відбивання приблизно на чотири порядки, в той час як інший торець активного шару відбиває до 30% світлового потоку завдяки френелівському відбиванню. Дзеркало, як правило, поєднує функції дифракційної решітки. Для поліпшення зворотнього зв'язку між дзеркалом і активним елементом встановлюється лінза.



Збільшуючи або зменшуючи відстань до дзеркала, а також одночасно розгортаючи дзеркало-решітку - це еквівалентно зміни кроку решітки - можна плавно змінювати довжину хвилі випромінювання, причому діапазон настройки досягає 30 м. В силу цього, ЕС лазери є незамінними при розробці апаратури хвильового ущільнення і виміральної апаратури для ВОЛЗ. По характеристикам вони схожі DFB і DBR лазерам.

#### Напівпровідникові світлодіоди

Рис.1.8. Конструкція лазерного світлодіода з резонатором Фарбі-Перро:

1 – відполірований торець; 2 і 3 – області p- і n-GaAs-переходу; 4 – електроди для підведення струму; 5 – молибденова пластина-основа, покрита золотом; 6 – активна область переходу.

Характеристики. У ВОЛЗ невеликої (0.1-1.0 км) протяжності, а також в низькошвидкісних (не більш 10 Мбіт/с) ВОЛЗ в якості джерел світла нерідко використовуються напівпровідникові світлодіоди, що відрізняються порівняно малою потужністю випромінювання (до 0.5 мВт) і великою (близько 20-30 нм) шириною спектра випромінювання. В основі дії світловипромінювальних напівпровідникових діодів лежить спонтанна рекомбінація електронно-діркових пар в активній області гетеро- або квантово-розмірно напівпровідникової структури. Діапазон робочих довжин хвиль сучасних світловипромінювальних діодів досить широкий - від 0.4 до 1.6 мкм. Вони активно використовуються і в техніці систем індикації, в освітлювальній та сигнальній техніці; розроблені діоди з потужністю випромінювання до 30 мВт в діапазонах довжин хвиль близько 690, 590, 470 нм, а також різні типи світловипромінювальних діодів білого світіння. Ступінь поляризації вихідного випромінювання таких діодів близька до нуля.

Особливості застосування. Світловипромінювальні діоди зазвичай використовуються в лініях передачі сигналів на основі багатомодових волоконних світловодів з великим (десятки-сотні мкм) діаметром серцевини, в тому числі виготовлених з недорогих полімерних матеріалів. Зручно застосування дані діоди і в відкритих системах зв'язку з дальністю дії в межах 100 м, використовуваних на промислових об'єктах і будівельних майданчиках. Характерна їх особливість, що застосовуються в системах зв'язку, - лінійна ват-амперна характеристика в широкому діапазоні струмів накачування, що робить їх дуже зручними в аналогових оптоелектронних системах передачі та обробки сигналів. Основні переваги світловипромінювальних діодів - мала споживана електрична потужність, дешевизна і значна довговічність (близько 105 годин).

Рисунок 1.9. а) біконічний розгалужувач; б) розгалужувач з розгалуженою структурою: 1 - вхідний волоконний світловод, 2 і 3 - вихідні волоконні світловоди

Волоконно-оптичні системи зв'язку нерідко містять безліч оптичних з'єднань, що забезпечують необхідну структуру («топологію») мереж зв'язку.

**Оптичні нероз'ємні з'єднувачі** зварного типу (рис. 1.9) характеризуються рекордно малими оптичними втратами, менше ніж 0,1 дБ. Такі з'єднувачі застосовуються при монтажі як об'єктових, так і протяжних (магістральних) ліній зв'язку. В останньому випадку, на довжині регенераційної ділянки, наприклад, від 30 до 60 км потрібно до 20-30 з'єднань (будівельна довжина оптичного кабелю зазвичай становить 2-3 км). Сучасна технологічна апаратура зварювання оптичних волокон автоматизована і дозволяє ефективно, в польових умовах, з'єднувати оптоволокно з будь-якими характеристиками.

**Оптичні мультиплексори і демультиплексори** (МДМ) застосовуються в оптичних системах зв'язку зі спектральним ущільненням каналів (з одночасною передачею по оптоволокну сигналів з різними довжинами хвиль - WDM-systems) і їх можна віднести до категорії спектрально-селективних оптичних розгалужувачів. Мультиплексори виконують функції об'єднання оптичних несучих з різними довжинами хвиль (зазвичай вони мають кілька входів і один вихід), демультиплексори - зворотна процедура поділу оптичних несучих за довжинами хвиль (один вхід, кілька виходів). Основні характеристики МДМ - тип (одномодовий або багатомодовий), число робочих спектральних каналів, оптичні втрати в кожному каналі, величина перехідного загасання, рівень зворотного розсіювання,



рівень внесених поляризаційних спотворень. Діапазон робочих довжин хвиль і величина розносу спектральних несучих також є важливими параметрами МДМ. У найбільш освоєних сьогодні WDM-системах число робочих каналів зазвичай становить 2, 4 або 6, рознос довжин хвиль несучих - кілька одиниць нм, оптичні втрати в каналах 0.5 - 2 дБ (відзначимо, що теоретично втрати в спектрально-селективних розгалужувачах, на відміну від широкопasmових, можуть наблизитися до нуля).

Конструктивно мульти-демультиплексори нерідко виконані на основі об'ємних мікро-оптичних елементів (мікролінз, граданов) і містять спектрально-селективні пристрої - відбивну увігнуту або плоску дифракційну решітку, інтерференційний фільтр, об'ємну голограму, дисперсійну призму і ін. Хвилеводні МДМ, наприклад, на основі інтегрально-оптичних хвилеводів, часто являють собою аналоги класичних інтерферометрів - Фабрі-Перо, Маха-Цендера, ешелону Майкельсона і ін. Останнім часом увагу розробників МДМ привертають волоконні решітки Брегга (FBG), що є, по суті, об'ємними відбивними голограмами, сформованими в серцевині оптоволокна.

Далі представлені способи формування мультиплексорів і їх компоненти.

Рисунок 1.10. Основні способи формування мультиплексорів:

а - з дифракційною решіткою; б - з інтерференційним фільтром; в - з призмою;

г - з поглинаючим фільтром; Компоненти мультиплексорів:

1 - градієнтна циліндрична лінза; 2 - дифракційна решітка; 3 - хроматичний фільтр;

4 - призма; 5 - покриття, що відбиває; 6 - селективний фотодетектор.

Демультиплексори розкладають світловий пучок на складові його довжини хвиль за допомогою дифракційної решітки.

**Оптичні комутатори** (перемикачі) застосовуються в системах оптичного зв'язку для перемикання сигналів в оптичних мережах. Основні характеристики оптичних комутаторів (ОК) - ємність (число входів і виходів), швидкодія (швидкість перемикання), оптичні втрати в каналі передачі сигналу (коефіцієнт ослаблення в положенні «ввімкнено») і перехідні перешкоди (перехідне загасання - коефіцієнт ослаблення в положенні «вимкнено»). У високоякісних ОК зазначені оптичні характеристики розглядаються з урахуванням довжини хвилі і поляризації випромінювання. Найбільш поширені сьогодні оптичні перемикачі, керовані електричними сигналами. У перспективних системах оптичного зв'язку і в розроблюваних оптичних комп'ютерах передбачається використання оптично керованих ОК.

Оптичні комутатори, в залежності від принципу дії, поділяються на вісім типів: механічні ОК, електрооптичні, термооптичні, інтегрально-оптичні, напівпровідникові, ОК на фотонних кристалах і ОК на багаточастотних рідкокристалічних матрицях.

Рисунок 1.11. Оптичний ізолятор: 1 – поляризатор, 2 – комірка Фарадея,

3 – аналізатор

**Оптичні ізолятори (ОІ)** це пристрої, що мають великий коефіцієнт пропускання оптичного випромінювання в прямому напрямку і вельми малий - в зворотному. Такі пристрої зазвичай застосовуються в високошвидкісних ВОЛЗ для усунення впливу на напівпровідниковий випромінювач світла, розсіяного в оптичній лінії передачі сигналів, на розніжних з'єднувачах, ділянках зварювання волокна, розгалужувачах і на неоднорідностях матеріалу безпосередньо в волоконно-оптичному кабелі. Зворотно-розсіяне випромінювання, діючи на активне середовище напівпровідникового випромінювача, викликає шуми і флуктуації потужності випромінювання ЛД. Оптичні ізолятори використовуються в звичайних і когерентних оптичних системах зв'язку, а також є складовою частиною високочутливих оптичних вимірювальних пристроїв, наприклад, волоконних гіроскопів.

Дія оптичних ізоляторів завжди заснована на магнітооптичному ефекті Фарадея - обертанні площини поляризації світла в зразку, вміщеному в магнітному полі, силові лінії якого орієнтовані уздовж світлового променя. Характерно, що поворот площини поляризації при ефекті Фарадея не залежить від напрямку поширення світлового променя

в зразку і при багаторазовому проходженні променя світла в такому зразку повний кут повороту площини поляризації збільшується. Конструктивно ОІ містить два лінійних поляризатора (вхідного і вихідного) з осями пропускання, розташованими під кутом 45 градусів, і магніто-оптичного кристалу з великим значенням константи Верде, наприклад залізо-ітербієвого граната, поміщеного в постійне магнітне поле.

У кращих зразках ОІ оптичні втрати в прямому напрямку рівні близько 1.0-1.5 дБ, величина розв'язки - до 30-40 дБ. Оптичні ізолятори зазвичай діють в порівняно вузькій (30-80 нм) смузі спектра робочих довжин хвиль і узгоджені з вхідним і вихідним світловодами, виготовленими з оптоволокна зі збереженням поляризації випромінювання. [2]

## 1.2. Оптичні підсилювачі

Рисунок 1.12. Принципова схема волоконно-оптичного підсилювача. 1 - джерело накачки (потужний напівпровідниковий лазер з довжиною хвилі випромінювання 980 нм або 1480 нм), 2 - мультиплексор, 3 - ербієве оптоволокно, 4 - смуговий оптичний фільтр з пропущенням на довжині хвилі підсилюється сигналу 1550 нм.

Років 10-15 тому для того, щоб забезпечити передачу сигналу по волокну на великі відстані, будували спеціальні ретрансляційні пункти. Ретранслятор - це послідовно з'єднані оптичний приймач, формувач сигналів і оптичний передавач. Відстань між ретрансляторами вибиралася виходячи із забезпечення мінімуму помилок на його виході з урахуванням енергетичного потенціалу пари передавач-приймач і смуги сигналу. Теорія передачі інформації показує, що ефективніше замість ретрансляторів використовувати оптичні підсилювачі. При цьому відстань між регенераторами можна буде збільшити в кілька разів. Оптичний підсилювач - це той же лазер: резонатор, активна речовина, система накачування, але у нього рівень накачування такий, що стимульоване випромінювання не виникає. (В іншому випадку почнеться самозбудження підсилювача, і він буде працювати як генератор. Тобто в підсилювачі умова позитивного зворотного зв'язку за амплітудою до надходження інформаційного сигналу не виконується.) Оптичні підсилювачі досить давно використовуються в локаторах. Для того щоб застосувати їх в волоконній техніці, необхідно було знайти робочу речовину, у якій довжина хвилі випромінювальних переходів (випромінювальні переходи - це переходи між рівнями енергії валентних електронів, в результаті яких атом випускає квант світла, який потім викликає лавину стимульованого випромінювання в робочій речовині) збігалася б з робочою довжиною хвилі лазерів, що використовуються в ВОЛЗ. Перші зразки підсилювачів, що використовуються в лініях кінця 1980-х рр., були напівпровідникові. Потім в кінці 1980-х-початку 1990-х рр. були розроблені і освоєні волоконні підсилювачі на основі кварцу, легованого рідкоземельними елементами - ербієм і ніобієм. Вони отримали найбільш широке поширення.

Оптичний підсилювач (ОП) збільшує потужність оптичних сигналів в ВОСП без їх проміжного перетворення в електронні сигнали. Такий спосіб посилення особливо зручний в ВОСП зі спектральним ущільненням, завдяки можливості одночасного посилення декількох інформаційних сигналів з різними довжинами хвиль. Найбільш поширені два типи оптичних підсилювачів - напівпровідниковий квантовий підсилювач і волоконно-оптичний (наприклад, ербієвий) підсилювач.

У напівпровідниковому квантовому підсилювачі підсилювальним світло середовищем є тонкий «активний» хвилеводний шар на кордоні напівпровідників р- і n-типів, через який проходить електричний струм накачування. Конструкція н/п квантового підсилювача подібна до конструкції звичайного напівпровідникового лазера, коефіцієнт відбиття дзеркал резонатора у якого близький до нуля. Посилюване випромінювання зазвичай вводиться в активний хвилевід н/п квантового підсилювача при його прямому узгодженні (стикуванні) з напругою, що підводиться оптичним волокном; схожим чином посилене випромінювання виводиться з активного хвилеводу.

У волоконно-оптичному підсилювачі також використовується лазерний принцип посилення, при цьому світло проходить через оптичне інверсне середовище, в якому населеність верхніх електронних станів вище, ніж нижніх, що забезпечується завдяки оптичному накачуванню.

#### Схеми накачки ербієвого підсилювача

Характеристики, якість і надійність роботи волоконно-оптичних підсилювачів у високому ступені залежать від методів і елементів, що входять до складу реальних пристроїв ВОП. Перш за все, це відноситься до схеми і пристроїв накачування. В даний час випромінювання накачування активного волокна вводиться в один з його торців або навіть в обидва торці. На рис. 1.13 представлені найбільш поширені схеми накачування ербієвого волокна ВОП.

На рис. 1.13а показаний варіант, в якому випромінювання накачування від джерела 3 вводиться у вхідний торець ЕОВ 7 через оптичний двоканальний мультиплексор 2. На другий вхід мультиплексора подається оптичний сигнал. Якщо цими пристроями обмежитися, то внаслідок відображення від торців ЕОВ утворюється позитивний оптичний зворотній зв'язок, через який підсилювач може перетворитися в генератор. Для того щоб це виключити, в схему підсилювача введені елементи 1 і 4, що представляють собою односпрямовані пристрої - оптичні вентилялі. За сталою термінологією вони отримали назву оптичних ізоляторів (ОІ). Недолік такої схеми полягає в тому, що разом з корисним сигналом на вихід підсилювача проходить і випромінювання накачування. Ця схема застосовується для збільшення введеної в лінійне ОВ оптичної потужності на передавальній стороні.

Рис.1.13. Варіанти схеми накачки волоконних підсилювачів

Якщо в підсилювачі випромінювання накачування здійснюється на  $\lambda = 980$  нм, то при поширенні в лінійному ОВ воно швидко згасає. Однак якщо цього недостатньо, то на виході передавального ВОП включається загороджувальний оптичний фільтр з центральною частотою, що відповідає частоті накачки. Відзначимо, що крім своєї основної функції оптичні ізолятори значно зменшують відбиття від торців.

У схемі рис. 1.13б випромінювання накачування вводиться через вихідний торець ЕОВ за допомогою мультиплексора 3 від джерела накачування 4, елементи 1 і 3 - оптичні ізолятори - оптичні вентилялі, які в волоконно-оптичного зв'язку прийнято називати оптичними ізоляторами (надалі під терміном «оптичний ізолятор» слід розуміти оптичний венти́ль). Така схема застосовується найчастіше в зовнішніх підсилювачах на приймальній стороні.

Для підвищення потужності вихідного випромінювання ВОП потрібно підвищити потужність випромінювання накачування. Це здійснюється шляхом введення цього випромінювання в обидва торця ЕОВ за схемою, представленої на рис. 1.13в, де 1 і 7 - оптичні ізолятори, 2 і 5 - оптичні мультиплексори, 3 і 6 - джерела випромінювання накачування.

Висновки. В розділі описуються основні компоненти ВОЛЗ: випромінювачі, фотоприймачі оптичні підсилювачі, з'єднувачі й розгалужувачі, мультиплексори й демультіплексори, оптичні комутатори, ізолятори. Їх характеристики: смуга пропускання каналу, максимальні втрати, каналний інтервал, загасання сигналу, спектральні діапазони, частота модуляції, швидкість передачі, діаметр вихідного пучка, граничний струм і т.д. Наводяться типові конструкції пристроїв. Вказані основні переваги оптичних волокон: широка смуга пропускання, мале загасання, низький рівень шумів, висока перешкодозахищеність, мала вага і об'єм, висока захищеність від несанкціонованого доступу.

## 2. ВОЛОКОННІ СВІТЛОВОДИ

Зростаюча потреба сучасного суспільства в інформації зажадала безперервного розвитку волоконно-оптичного зв'язку, перш за все за рахунок збільшення швидкості передачі інформації по волоконним світловодам (ВС) на основі нових принципів передачі інформації і завдяки створенню нової елементної бази систем зв'язку. Волоконно-

оптичний зв'язок став потужним стимулом розвитку волоконної оптики, в результаті чого розроблені нові типи ВС з новими можливостями. Серед найважливіших застосувань ВС слід, перш за все, відзначити волоконні лазери і підсилювачі, які являються одними з основних елементів волоконно-оптичних систем зв'язку, а також волоконно-оптичні датчики.

На сьогодні область волоконно-оптичного зв'язку характеризується наступними основними показниками:

- Швидкість передачі інформації по одному ВС в комерційних системах зв'язку досягла 10 Тбіт/с, а в експериментальних системах вона доходить до 100 Тбіт/с.

- У світі до 2010 р в системах зв'язку використовувався 1 млрд кілометрів ВС, до 2015 р їх число подвоїлося.

- Потреба розвинених країн в інформації росте на 30% - 40% в рік. Через 10 років необхідно буде передавати інформацію по ВС з петабітними швидкостями.

Однак передавати інформацію з такими швидкостями по сучасним однододовим ВС неможливо через два головних обмеження: оптичної нелінійності скляних ВС і вузькою спектральної смуги передачі інформації, яка визначається шириною смуги посилення ербієвого волоконного підсилювача [3, 4].

В даний час максимальна швидкість передачі інформації по одному ВС досягнута в системах зі спектральним ущільненням каналів, в яких по світловоду передаються ~ 100 незалежних каналів з різними довжинами хвиль несучого випромінювання, що лежать в межах смуги посилення оптичного підсилювача. Повна швидкість передачі інформації

$V = nb$ , де  $b$  - швидкість передачі по одному спектральному каналу, а  $n$  - число спектральних каналів. Підвищення швидкості передачі інформації може бути досягнуто збільшенням як кількості каналів, так і швидкості передачі інформації по каналу до 400 Гбіт/с і більше. Однак через зазначених вище фізичних обмежень підвищення повної швидкості передачі інформації цим шляхом можливо лише до рівня ~ 100 Тбіт/с. У зв'язку з цим в останні роки інтенсивно досліджуються нові типи ВС, використання яких могло б зняти відмічені обмеження зростання передачі інформації по одному світловоду.

### 2.1. Принцип роботи та основні параметри ВС

На рис. 2.1 представлена структура оптоволоконна. Зазвичай світловод включає в себе внутрішню область - сердцевину, з високим показником заломлення ( $n_1$ ), однорідну в напрямку поширення випромінювання, а також зовнішню оболонку з меншим показником заломлення ( $n_2 < n_1$ ). По сердцевині і поширюється випромінювання. Перерізи світловодів бувають різними, найбільш часто зустрічається тип перерізу - круглий. Світло, що поширюється по світловоду, являє собою електромагнітну хвилю, тому для проведення суворого аналізу необхідно вирішувати хвильове рівняння, що впливає з рівнянь Максвелла. Ми ж обмежимося уявленнями геометричної оптики.

Рисунок 2.1. Структура оптоволоконна

Відомо, що в різних середовищах промінь світла поширюється з різною швидкістю. Потрапляючи на кордон двох прозорих середовищ, промінь світла частково відбивається, частково заломлюється (рис. 2.2). Кут відбитого променя дорівнює куту падає, а кут переломленого променя залежить від співвідношення показників заломлення середовищ. Відповідно до закону Снелліуса, синус кута падаючого і зломленого променів на відповідні показники заломлення середовищ рівні.

Рисунок 2.2. Проходження світла через кордон розділу двох середовищ

Поставимо умову, щоб переломлений промінь не проникав у друге середовище (рис. 2.2 б), а рухався уздовж кордону розділу. Так як при цьому  $\gamma = 90^\circ$ , то неважко обчислити так званий критичний кут:

Світло передається через сердцевину волокна, відбиваючись від стінок оболонки за принципом повного внутрішнього відбивання, дозволяючи волокну бути в якості світловода. Оскільки оболонка не поглинає світло, що виходить з сердцевини, сигнали можуть поширюватися на великі відстані з невеликими втратами, що відбуваються через

домішки в склі. Залежно від товщини, випромінювання може поширюватися тільки по одному шляху (одномодове волокно) або мати кілька шляхів поширення (багатомодове ВОЛОКНО).

Розглянемо проходження випромінювання по плоскому світловоду (рис.2.3). Оптичний промінь, проходячи по світловоду багаторазово відбивається від кордону розділу «серцевина - оболонка». Однак якщо кут падіння  $Q$  стає більше критичного значення, повного відбивання не відбувається і випромінювання проникає в оболонку.

Рисунок 2.3. Поширення світла, що падає на світловод, по оптоволокну:

1 - кут прийому променів  $2Q_{max}$ , 2 - світло, яке не передається по світловоду ( $Q > Q_c$ ), 3 - оболонка з ПЗ  $n_2$ , 4 - серцевина з ПЗ  $n_1$ , 5 – випромінювання, що розповсюджується, 6 - фазовий зсув при відбиванні.

Максимальний (критичний) кут, при якому відбувається повне відбивання, визначається формулою:

Параметр називається питомою різницею показників заломлення і визначається через показники заломлення серцевини і оболонки:

Промінь світла, який поширюється в світловоді, відбиваючись від кордону розділу під максимальним кутом  $Q_c$ , при введенні в світловод, згідно із законами заломлення, падає на його торець під ще більшим кутом  $Q_{max} > Q_c$ :

Цей кут є максимальним кутом, при якому можливо ввести і вивести випромінювання із світловоду. Величина називається числовою апертурою світловода.

Загасання і спотворення сигналів при передачі по оптоволокну

Важливими параметрами оптичного волокна є загасання і дисперсія. На рис. 2.4 представлені спектральні характеристики втрат в кварцовому світловоді. Найменші втрати при поширенні, пов'язані з поглинанням випромінювання, перебувають з області 1,3-1,6 мкм. Очевидно, що основні втрати пов'язані з поглинанням випромінювання домішками, позбутися від яких повністю не вдається. Мінімальні значення втрат, реалізовані сьогодні, складають менше 0,2 дБ/км. Тобто на ділянці 100 км оптоволоконного кабелю вихідне випромінювання ослабне в 100 разів. Характерне для волокна довжиною  $L$  пропускання  $T$  може бути описано на основі експоненційної функції:

де  $P_0$  - вхідна потужність,  $P$  - вихідна потужність,  $\alpha$  - коефіцієнт загасання. В волоконній техніці застосовують шкалу в децибелах. Тому втрати знаходять за такою формулою:

Тоді затухання  $D$  в волокні буде виглядати так:

Рисунок 2.4. Спектральна характеристика втрат і дисперсія матеріалу в кварцовому оптоволокну

Дисперсія – це розсіяння з часом спектральних і модових компонент оптичного сигналу. Є три типи дисперсії:

дисперсія мод – характерна для багатомодового волокна і обумовлена наявністю більшого числа мод, час поширення яких відрізняється;

Дисперсія матеріалу – обумовлена залежністю показника заломлення від довжини хвилі; хвильоводна дисперсія – обумовлена процесами всередині моди і характеризується залежністю швидкості поширення моди від довжини хвилі.

Загасання і дисперсія в різних типів оптичних волокон різні. Для передачі сигналів використовуються два види волокна: одномодове і багатомодове. Назву волокна отримали від способу поширення випромінювання в них.

Багатомодове оптичне волокно (типів розміри серцевина / оболонка 50/125 мкм і 62,5 / 125 мкм) дозволяє передавати одночасно кілька сотень світлових мод, що вводяться в оптоволокну під різними кутами (рис. 2.5, а). Усі дозволені моди мають різні траєкторії поширення і, відповідно, різний час поширення через оптичне волокно. Тому головний недолік багатомодового оптоволокну - велика величина модової дисперсії, що обмежує смугу пропускання, і відповідно, дальність передачі сигналів. Смуга пропускання у багатомодових волокон досягає 800 МГц · км, що прийнятно для локальних мереж зв'язку. Таке оптоволокну використовується в ВОЛЗ для передачі на відстань 4-5 км. Багатомодові

волокна зручні при монтажі, так як в них розмір світловодної жили в кілька разів більше, ніж в одномодових волокнах. Такий волоконний кабель простіше закріпити оптичними роз'ємами з малими втратами (до 0,3 дБ) в стику. На багатомодове волокно розраховані випромінювачі на довжину хвилі 0,85 мкм - найдоступніші й дешеві випромінювачі, що випускаються в дуже широкому асортименті.

Рисунок 2.5а. Багатомодове волокно зі ступінчастим профілем заломлення

Для зменшення модової дисперсії і збереження широкої смуги пропускання, на практиці застосовують оптичні волокна серцевини кабелю. На відміну від стандартних багатомодових оптичних волокон, що мають постійний профіль заломлення матеріалу ядра, таке оптоволокно має показник заломлення  $N$ , який плавно зменшується від центру до оболонки (рис. 2.5б).

Рисунок 2.5б. Багатомодове волокно з градієнтним профілем показника заломлення

Рисунок 2.5в. Одномодове волокно

Одномодове оптичне волокно (типовий розмір 8/125 мкм для довжин хвиль 1,3-1,55 мкм) сконструйоване таким чином, що в ядрі оптоволокна може поширюватися тільки одна, основна мода (рис. 2.5в). Якщо при поширенні світла по багатомодовому волокну, як правило, переважає модова дисперсія, то одномодовому волокну притаманні лише два останні типи дисперсії. Це забезпечує найвищу пропускну здатність. Тому такі оптичні волокна застосовуються при будівництві магістральних ВОЛЗ. Основні переваги одномодових оптичних волокон - мале загасання 0,25 дБ/км, мінімальна величина модової дисперсії і широка смуга пропускання. Однак, одномодові джерела випромінювання в кілька разів дорожче багатомодових. У одномодовому волокні важче ввести випромінювання через малі розміри світловодної жили, з цієї причини одномодові волокна складно зрощувати з малими втратами.

Розглянемо три типи ВС, дослідження яких показали потенційну можливість їх використання для вирішення зазначеної проблеми.

1. Активні ВС, леговані вісмутом, перспективніші для створених волоконних лазерів та оптичних підсилювачів для спектральних областей 1200 - 1500 і 1600 - 1800 нм, в які не потрапляють смуги люмінесценції ефективних рідкоземельних аналогів [5].
2. Багатосерцевинні ВС (одномодові і маломодові) для волоконно-оптичних систем просторового ущільнення каналів [6].
3. Мікроструктуровані порожнисті ВС з низькою нелінійністю і з потенційно меншими оптичними втратами, ніж у світловодів на основі кварцового скла [7].

## 2.2. Багатосерцевинні волоконні світловоди

Ідея полягає в тому, що в ВС може бути не одна, а кілька серцевин, виникла більше 30 років тому незабаром після появи одномодових світловодів. У таких світловодів діаметр світлонесучої серцевини виявляється менше 10 мкм, що дозволяє навіть в стандартній зовнішньої скляній оболонці діаметром 125 мкм розташувати кілька серцевин (рис.2.6). У розроблених багатомодових світловодів діаметр серцевини становив 50 мкм і більш, що виключало таку можливість.

Рисунок 2.6. Поперечні перерізи і розподіли ефективних показників заломлення ( $n_{\text{eff}}$ ) одномодового односерцевинного (зліва) і багатосерцевинного (праворуч) ВС.

Довгий час ця ідея не отримувала розвитку, так як основна увага була сфокусована на вдосконаленні властивостей односерцевинних ВС, на розширенні спектрального діапазону і спектральному ущільненні каналів, а також на збільшенні швидкості передачі інформації в кожному спектральному каналі. Про неї згадали стосовно оптичного зв'язку, коли в 2009 - 2010 рр. стали з'являтися публікації про наближення моменту припинення подальшого зростання швидкості обсягу інформації, що передається по одному світловоду [16-17]. За аналогією зі спектральним ущільненням каналів (wavelength-division-multiplexing - WDM) з'явився термін «просторове ущільнення каналів» (space-division-multiplexing - SDM). Високу активність в цих дослідженнях виявляють світові лідери по виготовленню телекомунікаційних світловодів і створення устаткування для ліній зв'язку на ВС і



пов'язані з ними дослідні лабораторії і центри. В результаті за останні п'ять років в науковій літературі з'явилось, щонайменше, кілька сотень публікацій по темі «багатосерцевинні волоконні світловоди», присвячених як різноманітних варіантів конструкції таких світловодів і створення їх експериментальних зразків, так і різних аспектів їх застосування в волоконно-оптичних лініях зв'язку та експериментального дослідження їх реальної роботи в макетах ліній зв'язку.

Конструкції багатосерцевинних світловодів можна розділити на три групи: багатосерцевинні одномодові світловоди з непов'язаними сердцевинами; багатосерцевинні маломодові світловоди; багатосерцевинні світловоди із пов'язаними сердцевинами. Розглянемо їх властивості більш докладно.

Багатосерцевинні одномодові світловоди з непов'язаними сердцевинами - це саме ті «класичні» світлопроводи, які спочатку пропонувалися для просторового ущільнення каналів. Передбачається, що кожна сердцевина є аналогом стандартного одномодового світловода, що дозволяє використовувати для неї всі досягнення по швидкості передачі інформації по одніє волокну. З цієї причини основною вимогою є мінімізація рівня перекачування сигналу з однієї сердцевины в іншу (бажано до менш - 25 дБ).

Щоб виконати цю умову для світловода з тими ж параметрами сердцевины, що і у стандартного телекомунікаційного світловода (діаметр поля моди для довжини хвилі 1550 нм складає ~ 9 мкм, довжина хвилі відсічення ~ 1250 нм), потрібно забезпечити відстань між сердцевинами не менше 45 мкм. В результаті при найщільнішій гексагональній упаковці діаметр одержуваного світловода повинен становити близько 200 або 280 мкм для 7 і 19 сердцевины відповідно (рис.2.7). Однак суттєве збільшення діаметра світловода вкрай небажано з точки зору механічної надійності при експлуатації: товщий світловод піддається великим механічним напруженням при тих же незначних випадкових вигинах, які неминуче виникають в оптичних кабелях.

Існують три способи зменшення відстані між осередками при збереженні низького рівня перекачування сигналу, які можна використовувати в різних комбінаціях.

1. Зменшення діаметра поля моди шляхом підвищення показника заломлення (ПЗ) сердцевины і відповідного зменшення її діаметра. Однак помітне зменшення діаметра поля моди може призводити до проблем при зварюванні таких світловодів і при їх стикуванні з пристроями введення-виведення, а збільшення ПЗ призводить до підвищених оптичних втрат. Тому цей спосіб найменш популярний.

2. Створення різниці постійних поширення мод (ефективних ПЗ) в сусідніх осередках за рахунок невеликої відмінності в ПЗ і / або в діаметрах сердцевины (рис.2.8). Такі світлопроводи називаються «гетерогенними», на відміну від «гомогенних» світловодів з однаковими сердцевинами. Істотна частина світловодів з групи одномодових багатосерцевинних світловодів відноситься до «гетерогенним».

3. Створення між осередками додаткових бар'єрів на шляху зменшення перекачування сигналів з шарів зі знизеним (в порівнянні з кварцовим склом оболонки) ПЗ (кварцове скло, леговане фтором) або навіть з поздовжніх повітряних отворів. Цей спосіб додає технологічні труднощі при  $D = 280$  мкм. виготовленні світловода, але не створює додаткових проблем при його використанні, тому він найбільш привабливий.[18]

Рисунок 2.7. Поперечний переріз багатосерцевинного ВС з сімома (зліва) і з дев'ятнадцятьма (праворуч) сердцевинами (цифри - відстані між осередками в мкм).

Рисунок 2.8. Профілі ефективного ПЗ двох сусідніх сердцевины (1 і 2) «гетерогенного» багатосерцевинного світловода.

Прикладом комбінації вищенаведених способів є 12-серцевинний «гетерогенний» світловод з додатковими шарами зі скла з пониженим ПЗ, сердцевины якого розташовані по кільцю (рис.2.9). Така структура мінімізує кількість сусідів у кожній сердцевины. В даному випадку сусідніх сердцевины лише дві, тому можна використовувати сердцевины тільки двох типів. На такому світловоді була реалізована передача зі швидкістю 1.01 Пбіт/с на відстань 52 км.



Прикладом найбільш щільної упаковки сердцевин може служити «гетерогенний» світловод, в якому 30 сердцевин чотирьох типів вдалося розмістити в волокні діаметром 230 мкм (рис.2.10).

При практичному використанні одномодових багатосерцевинних світловодів з високою щільністю упаковки може виникати проблема впливу випадкових вигинів по довжині світловода на величину перекачування сигналу між осередками.

Рисунок 2.9. Зображення торця 12-серцевинного ВС. Світлі плями - сердцевини з кварцового скла, легованого оксидом германію, темні кільцеві області - кварцове скло, леговане фтором.

Рисунок 2.10. Схема розташування сердцевин різних типів (1 - 4) та зображення торця 30-серцевинного світловода

Позбутися від цього небажаного ефекту в «гетерогенному» світловоді можна, мабуть, лише зробивши світловод прямокутним і розташували сердцевини в лінію уздовж широкої грані.

Багатосерцевинні маломодові світловоди - це наступний крок у розвитку багатосерцевинних світловодів. Спочатку пошук можливостей збільшення швидкості передачі інформації привів до ідеї використовувати для передачі різні моди багатомодового світловода. Це в певному сенсі також є варіантом просторового ущільнення каналів.

Стандартні багатомодові світловоди з діаметром сердцевини 50 мкм і більше не дуже підходять для цієї мети - при великій кількості мод їх постійні поширення занадто близькі один до одного, тому сигнали швидко перемішуються. З цієї причини в основному використовуються так звані маломодові світловоди, в яких можливе поширення тільки декількох мод.

Проблемою в цьому випадку є диференціальна модова затримка: сигнали, переносяться різними модами сердцевини із ступінчастим профілем ПЗ, розходяться в часі на одному кілометрі шляху більш ніж на кілька наносекунд, що унеможливує успішну обробку сигналу на відстанях більше 10 км. Використання градієнтного профілю дозволяє знизити затримку до рівня ~ 50 пс/км, що дозволяє здійснювати передачу на сотні кілометрів.

Оскільки діаметр маломодової сердцевини трохи більше, ніж у одномодового світловода, стає можливим їх використання в багатосерцевинних ВС, хоча і з дещо більшими відстанями між осередками. У таких світловодах кількість каналів передачі інформації визначається множенням числа сердцевин на число мод.

**Багатосерцевинні світловоди із пов'язаними сердцевинами.** В цьому випадку, в основному, одномодові сердцевини спеціально зближуються для збільшення зв'язку між ними. В результаті світло поширюється відразу по всій сердцевині у вигляді супермод з максимумом інтенсивності, розташованим на одній або на декількох осередках. Кількість таких мод залежить від структури світловода. В цілому картина виявляється схожою з випадком маломодового односерцевинного світловода. Діаметр світловода при цьому можна зробити менше, ніж у інших типів багатосерцевинних світловодів.

Розробки в області багатосерцевинних світловодів тривають. Останні досягнення такі: отримана швидкість передачі інформації 2.05 Пбіт/с при використанні 19-серцевинного шестимодового світловода довжиною 9.8 км, а також 2.15 Пбіт/с при використанні 22-серцевинного одномодового гомогенного світловода довжиною 31 км.

В цілому слід зазначити, що багатосерцевинні світловоди показали свою перспективність і що наближається час їх практичного використання. Однак цьому перешкоджає відсутність надійного і дешевого пристрою введення-виведення, а також ефективних волоконних багатосерцевинних підсилювачів.

Пристрої введення-виведення випромінювання. У найпростішому випадку одномодових багатосерцевинних світловодів потрібно з'єднання кожної сердцевини з окремим одномодовим світловодом для введення випромінювання від відповідного джерела або для подальшої обробки сигналу, який пройшов по сердцевині. У разі маломодових

багатосерцевинних світловодів завдання ускладнюється тим, що кожен сердцевинний світловод потрібно з'єднати з багатомодовим світловодом не порушивши розподілу сигналів по різних модах, а потім випромінювання різних мод вивести з сердцевин окремих маломодових світловодів. Простих, зручних і дешевих рішень тут поки не знайдено. В даний час триває пошук оптимальних конструкцій світловодів з просторовим ущільненням каналів.

**Висновки.** Аналіз результатів досліджень ВС нового покоління, дозволяє зробити наступні **ВИСНОВКИ.**

- Розробка легованих вісмутом ВС на основі кварцового скла і їх використання в якості активного середовища дозволило створити сімейство досить ефективних волоконних лазерів, що працюють в спектральному діапазоні 1140 - 1775 нм. Отримані результати показують також можливість створення ефективних оптичних підсилювачів в діапазонах 1200 - 1500 і 1610 - 1775 нм, в яких відсутні ефективні рідкоземельні волоконні лазери і оптичні підсилювачі. Таким чином, створення нового активного середовища - легованих вісмутом ВС - дає реальну можливість використання всього спектрального діапазону 1300 - 1700 нм для передачі інформації.

- Багатосерцевинні ВС є перспективним середовищем для передачі інформації з петабітними швидкостями. Продемонстровано передачу інформації зі швидкостями 1 - 2 Пбіт/с на відстані в десятки кілометрів. Однак є ряд технологічних проблем, які повинні бути вирішені для реалізації передачі інформації з такими швидкостями на великі відстані.

- Створення і широкі дослідження ВС різних типів з порожнистою сердцевиною відкрили нові можливості їх застосування, зокрема для передачі інформації і в області нелінійної оптики газів, для створення нових волоконних датчиків, датчиків для виявлення метану і етану, продемонструвати газові лазери на таких світловодах. Однак поки не вирішена проблема створення порожнистих волоконних світловодів з більш низькими оптичними втратами, ніж у ВС на основі кварцового скла.

### **3. ВОЛОКОННІ ЛАЗЕРИ**

Створення волоконних лазерів - одне з найбільш яскравих досягнень квантової електроніки. Перший волоконний лазер був створений Снітцером в 1963 р. В якості активного елементу використовувався скляний волоконний світловод, що містить іони неодиму. Однак в той час цей напрям лазерної фізики не отримав розвитку і зрозуміло чому. Створення сучасних високоефективних і компактних волоконних лазерів стало можливим тільки завдяки розробці на початку 70-х років скляних волоконних світловодів з низькими оптичними втратами (<1 дБ/км в ближній ІЧ-області) і подальшого бурхливого розвитку волоконно-оптичного зв'язку. Остання обставина стала вирішальним фактором у розробці і промислового виробництві довгоживучих і високояскравих лазерних діодів і цілого набору спеціальних волоконних світловодів. Серед них - світловоди, леговані рідкоземельними елементами, нелінійні, фоточутливі, інфрачервоні і ряд інших. Ця елементна база і стала основою для створення волоконних лазерів. Особливо слід відзначити розробку технології запису в фоточутливих світловодах брегівських решіток показника заломлення, що використовуються в якості розподілених відбивачів в волоконних лазерах.

Разом з тим, розвиток волоконно-оптичних систем зв'язку з високою швидкістю передачі інформації (більше 1 Гбіт/с) зажадало створення ефективних волоконних лазерів і підсилювачів, сумісних з такими системами. Цим пояснюються проведення широких досліджень і великі фінансові вкладення для вирішення даної проблеми.

Принципова перевага волоконних світловодів як лазерної середовища в порівнянні з об'ємними активними середовищами полягає в низьких оптичних втратах, великій довжині взаємодії і малому діаметрі світловедучої сердцевини (зазвичай 4-20 мкм), що забезпечує високу ефективність накачки випромінюванням лазерних діодів. Велике відношення площі поверхні волоконного світловода (діаметром ~ 100 мкм) до його об'єму радикально вирішує проблему тепловідведення, дозволяючи створювати волоконні лазери

з вихідною потужністю  $\sim 1$  кВт і повітряним охолодженням. Винятково важливим для багатьох застосувань є висока якість вихідного пучка волоконних лазерів. Використання всередині волокна брегівських решіток показника заломлення в якості розподілених відбивачів забезпечує компактність і високу стабільність волоконних лазерів. Зазначені обставини привели до розробки різноманітних волоконних лазерів, включаючи безперервні потужні лазери, піко- і фемтосекундні лазери, одночастотні лазери, ВКР-лазери і ряд інших.

Рисунок 3.1. Ріст вихідної потужності неперервних волоконних лазерів (SM – одномодовий режим)

### 3.1. Принцип роботи волоконного лазера

Конструкція будь-якого лазера включає в себе три основні елементи: активне середовище, в якій відбувається посилення світла, що проходить, резонатор, що забезпечує стійкий зворотний зв'язок для генерованого випромінювання, і накачування, за допомогою якої в середовищі створюється інверсна населеність.

Принцип посилення світла заснований на явищі вимушеного випромінювання вперше описаного Ейнштейном. Якщо фотон з певною енергією падає на збуджений атом, енергія збудження якого щодо будь-якого нижнього рівня дорівнює енергії падаючого фотона, то з певною ймовірністю збуджений атом випустить квант світла і перейде на цей нижчий рівень. При цьому випущений фотон буде ідентичний падаючому за всіма параметрами - енергії, поляризації, напрямку поширення. Використовуючи цей принцип можна домогтися таких умов в середовищі, при яких потужність проходить через неї випромінювання, буде посилюватися. Щоб добитися посилення в середовищі необхідно створити інверсну населеність на робочих рівнях, тобто ситуацію, коли на верхньому лазерному рівні (в збудженому стані) знаходиться більше число атомів, ніж на нижньому лазерному рівні. Саме в цьому випадку кількість актів вимушеного випромінювання буде перевищувати кількість актів поглинання, так як ймовірності цих процесів однакові. У звичайних умовах (без зовнішнього впливу) в середовищі розподіл атомів по енергіях підпорядковується статистиці Больцмана, що виключає інверсну населеність, а значить і посилення. Зазвичай середовище, в якому створена інверсна населеність, називається активною, а атоми і іони, які безпосередньо беруть участь в посиленні, називаються активними.

Щоб досягти інверсної населеності в середовищі необхідний зовнішній вплив, спрямований на переведення активних атомів в збуджений стан. Таким впливом може бути оптичне, електричне, хімічне і будь-який інший вплив дозволяє перевести атоми в потрібний збуджений стан. Зовнішній вплив називається накачуванням. У волоконних лазерах використовується оптичне накачування, тобто збудження активних атомів здійснюється за допомогою зовнішнього оптичного випромінювання. Інверсна населеність в середовищі може бути досягнута тільки при певній конфігурації енергетичних рівнів. Наприклад, в чисто дворівневому середовищі можна створити стаціонарну інверсію за допомогою оптичного накачування. Існують дві основні схеми рівнів атомів, що дозволяють отримати інверсію за допомогою оптичного накачування - трирівнева схема (рис.3.3) і чотирирівнева схема (рис.3.4). У першому випадку кванти накачування переводять активні атоми зі стану 1 в стан 3, потім за рахунок безвипромінювальної релаксації атом переходить в стан 2, звідки він під дією зовнішнього поля переходить назад в стан 1. Щоб досягти інверсії в такій схемі необхідне потужне випромінювання накачування, яке було б в змозі перевести більше половини атомів в збуджений стан. Якщо ж використовувати чотирирівневу схему вимоги до потужності накачування істотно послаблюються за рахунок того, що в даному випадку для досягнення інверсії між рівнями 1 і 2 досить накачування невеликої потужності, так як рівень 1 практично не заселений. Як правило, досягти генерації по чотирирівневій схемі значно простіше, ніж по трирівневій. В цьому відношенні для створення потужних лазерів найбільш привабливі іони неодиму,

що працюють по чотирирівневої схемі і іони ітербію (рис.3.3, а), що працюють по квазі-чотирирівневої схемою (рис.3.4, б).

Рисунок 3.2. Принципова схема волоконного лазера

Рисунок 3.3. Спрощена трирівнева структура рівнів енергії іонів ербію ( $\text{Er}^{3+}$ ) в кварцовому склі

Рисунок 3.4. Чотирирівнева структура неодиму (а) і квазі-чотирирівнева структура ітербію (б)

У волоконних лазерах в якості активного середовища використовується серцевина світловода, легована іонами  $\text{Yb}^{3+}$  або інших активних іонів ( $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  та ін.) в залежності від необхідної довжини хвилі генерації, а також кварц ( $\text{SiO}_2$ ).

Нижче розглянемо елементи, з яких складається волоконний лазер.

### 3.2. Активні волоконні світловоди

Висока прозорість кварцу - основного матеріалу для оптичних волокон - забезпечується насиченими станами енергетичних рівнів атомів. Домішки, що вносяться легуванням, перетворюють кварц в поглинаючу середу. Підібравши довжину хвилі і потужність випромінювання накачування, в такому середовищі можна створити інверсний стан населеності енергетичних рівнів. Як якості підсилюючого середовища використовуються світловоди на основі кварцового скла, леговані рідкісноземельними елементами (РЗЕ), такими як Nd, Yb, Er, Ho, Tm. Використання в якості активних легуючих добавок іонів лантаноїдів або рідкоземельних елементів обумовлено специфічними оптичними властивостями даних елементів, для яких характерна добудова внутрішньої оболонки, коли всі зовнішні оболонки вже заповнені. Наявність незаповненої внутрішньої оболонки призводить до появи яскраво вираженої дискретної структури електронних переходів, яка і обумовлює застосування іонів рідкоземельних елементів в якості активної домішки. Застосування активних іонів рідкісноземельних елементів для легування волоконних світловодів 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, і, по-друге, в кварцовому склі енергія фононів становить  $400\text{-}1100\text{ см}^{-1}$ .

Наявність енергетичних рівнів з малим енергетичним зазором всередині оптичного переходу призводить до безвипромінювальної рекомбінації, перешкоджаючи появі люмінесценції. У зв'язку з цим в якості активної домішки волоконних світловодів на основі кварцового скла найбільшого поширення набули наступні РЗЕ: Nd, Yb, Er, Але, Tm, люмінесцентні характеристики яких наведені нижче (таблиця 3.1):

Таблиця 3.1

#### Люмінесцентні характеристики РЗЕ

Активні іони РЗЕ вводяться як в серцевину кварцового ВС, так і в його відбиваючу оболонку, якщо в ній поширюється значна частина оптичної потужності каналного випромінювання.

У виробництві волоконних світловодів для активного середовища розроблений ряд технологічних процесів: MCVD (модифіковане хімічне осадження з газової фази), OVD (зовнішнє осадження з газової фази), VAD (аксіальне осадження з газової фази), осадження з використанням плазми PCVD і SPCVD. Для введення активної домішки в матеріал світловода найбільшого поширення знайшли метод просочення, коли непропалений пористий матеріал серцевини просочується розчином солі активної добавки, і легування з летючих сполук.

Слід зазначити, що максимальна концентрація активних іонів в матриці кварцового скла відносно невелика ( $\sim 10^{18} \div 10^{20}\text{ см}^{-3}$ ) і обмежується їх розчинністю, а також виникненням кооперативних ефектів. Оскільки довжина активного середовища волоконного лазера може досягати декількох десятків метрів, природною вимогою до активних волоконних світловодів є наявність досить низьких нерезонансних оптичних втрат. Прийнятне значення втрат, як правило, становить 5-20 дБ/км. На рис. 3.5 представлений приклад

спектра оптичних втрат для волоконного світловода, легованого іонами  $\text{Yb}^{3+}$  з концентрацією  $8 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Рисунок 3.5. Спектри поглинання ( $I_{\text{аб}}$ ) і люмінесценції ( $I_{\text{лм}}$ ) волоконного світловода, легованого іонами  $\text{Yb}^{3+}$

Створення волоконних лазерів задало розробки спеціальних волоконних світловодів з подвійною оболонкою (рис.3.6). В якості активного середовища волоконного лазера використовується одномодова кварцова сердцевина, легована активною рідкоземельною домішкою, а також домішками, що формують профіль показника заломлення. Дана сердцевина оточена внутрішньою оболонкою з кварцового скла і зовнішньою оболонкою з показником заломлення, зниженим відносно показника заломлення кварцового скла.

Внутрішня оболонка разом із зовнішньою утворюють багатомодовий світловод, через який поширюється випромінювання накачування. Оболонка має типовий розмір  $0,1 \div 1 \text{ мкм}$ . При поширенні по багатомодовому світловоду випромінювання накачування поглинається іонами рідкоземельної домішки, викликаючи люмінесценцію, яка при наявності позитивного зворотного зв'язку може розвинути в лазерну генерацію.

В якості джерел накачування волоконних лазерів використовуються як індивідуальні лазерні діоди, так і системи лазерних діодів (матриці і лінійки) з волоконним виходом. Ряд фірм виробляє лазерні модулі накачування з вихідною потужністю до декількох сотень ват. Вихідний волоконний світловод таких модулів має сердцевину діаметром  $\sim 200 \text{ мкм}$  і більше і числову апертуру близько 0,2.

Цілком очевидно, що ефективне введення випромінювання накачування в сердцевину активного світловода діаметром  $5 \div 20 \text{ мкм}$  і числовою апертурою  $\sim 0,1$  являє собою досить складну проблему і вимагає розробки спеціальної конструкції світловода. Тому для забезпечення ефективного зв'язку мод внутрішньої оболонки з активованою серцевиною необхідно використовувати волоконні світловоди з круглою формою внутрішньої оболонки - в іншому випадку велика частка потужності накачування поширюється в модах, що не перетинають область сердцевини.

На рис. 3.6а показана схема так званого волоконного світловода з подвійною оболонкою. Його сердцевина містить домішку РЗЕ і оточена некруглою першою оболонкою з чистого кварцового скла діаметром в декілька сотень мікрметрів.

Рисунок 3.6. Схеми збудження активного волоконного світловода потужними системами діодного накачування: а) 1 - сердцевина, що містить рідкоземельні елементи, 2 - перша оболонка, 3 - друга оболонка, 4 - захисна оболонка; б) 1 - активний світловод, 2 - пасивні світлопроводи накачування, 3 - загальна друга оболонка, 4 - захисна оболонка

Ця перша оболонка, в свою чергу, оточена другою оболонкою, зазвичай з полімерного матеріалу з показником заломлення нижчим, ніж у кварцового скла. Таким чином, перша оболонка є багатомодовим світловодом, який ефективно збуджується випромінюванням накачування завдяки великому поперечному розміру і високій числовій апертурі. При певних значеннях діаметрів сердцевини і першої оболонки, і довжини світловода випромінювання накачування ефективно збуджує іони рідкісноземельних елементів.

Для найбільш поширеного типу волоконних світловодів з подвійною оболонкою в якості матеріалу зовнішньої оболонки використовують силіконову гуму, що забезпечує числову апертуру багатомодового світловода  $\text{NA} = 0,38$ , і тефлон марки АФ, що дозволяє збільшити числову апертуру до значення 0,6.

До недоліків використання силіконового покриття слід віднести високий рівень оптичних втрат випромінювання накачування -  $50 \text{ дБ/км}$  і більше. Використання тефлону дозволяє отримувати світлопроводи з втратами в оболонці  $\sim 10 \text{ дБ/км}$ . Крім того, тефлон володіє високим пропусканням для УФ-випромінювання, що дає можливість записувати решітки показника заломлення без видалення полімеру. Однак це покриття має невелику товщину ( $\sim 10\text{-}20 \text{ мкм}$ ), що збільшує ймовірність механічного пошкодження світловода.

Дослідження впливу різних профілів перетину внутрішніх оболонок активного світловода на ефективність поглинання випромінювання накачування показали, що будь-яка некругла

форма внутрішньої оболонки дозволяє отримати ефективність поглинання накачування, близьку до 100%.

Такі конструкції волоконного світловода дають хороші результати при створенні волоконних лазерів середньої потужності (~ 100 Вт). Для потужних волоконних лазерів запропонована конструкція світловода, в якій випромінювання накачування поширюється по дискретним волоконним світловодів з кварцового скла, що знаходяться в оптичному контакті з активним світловодом. При цьому всі світловоди оточені єдиною оболонкою з полімерного матеріалу (рис. 3.6б). У такій структурі здійснюється розподілене накачування активного світловода через його бічну поверхню за рахунок еванесцентних хвиль, які проникають із світловода накачування в активний світловод. При цьому число пасивних світловодів, що передають випромінювання накачування, може бути значно більше трьох. Випромінювання накачування може вводитися через обидва торця пасивного світловода, тому число можливих точок введення випромінювання накачування дорівнює подвоєному числу пасивних світловодів. У літературі таку структуру позначають аббревіатурою GTW (Gradually Transferred Wave). Ще одним варіантом збільшення взаємодії випромінювання лазерних діодів з активним середовищем є використання активного світловода з мікроструктурованою оболонкою. Характерне значення числової апертури таких світловодів становить 0,5, що, на відміну від традиційних світловодів такого ж діаметру, дозволяє збільшити потужність накачування в кілька разів при використанні ідентичних джерел випромінювання.

Відомі й інші способи введення випромінювання накачування в активний волоконний світловод - наприклад, з використанням об'ємних елементів, таких як лінзи і дзеркала. Але в цьому випадку конструкція лазера не є волоконною.

### 3.3. Резонатори волоконних лазерів

Резонатори типу Фабрі-Перо. У перших волоконних лазерах для створення резонатора Фабрі-Перо застосовувалися діелектричні дзеркала (рис. 3.7 а). Використання дихроїчних дзеркал дозволяло робити їх практично прозорими на довжині хвилі накачування і при цьому зберігати високий коефіцієнт відбиття на довжині хвилі генерації. Спочатку активне волокно розміщували між дзеркалами резонатора, однак таку конструкцію було складно юстувати. Часткове вирішення проблеми полягало в нанесенні діелектричних дзеркал безпосередньо на торці волокна, що, однак, підвищувало ризик їх пошкодження потужним сфокусованим випромінюванням накачування і посилювали вимоги до обробки торців оптоволокна. Тому проблеми юстування і захисту дзеркал стали вирішувати застосуванням WDM-розгалужувачів (рис. 3.7 б).

Рисунок 3.7. Схема волоконного лазера з інтерферометром Фабрі-Перо (а) і дзеркало на основі петлі з волоконного світловода і WDM-розгалужувача (б)

Дзеркала резонатора волоконного лазера забезпечують багаторазове проходження випромінювання лазера через посилюючу середу (активний світловод), і якщо досягається поріг генерації (коефіцієнт посилення перевищує сумарні втрати при подвійному проході між дзеркалами), потужність випромінювання різко зростає. Проте потужність випромінювання не може рости до нескінченності, і її величина стабілізується на деякому стаціонарному рівні, визначеному ефектом насичення: коли посилення випромінювання стає рівним його втратам в резонаторі. Слід зазначити, що якщо дзеркала резонатора нанесені на торець активного світловода, то, на відміну від інших лазерних джерел випромінювання, в волоконному лазері відсутні дифракційні втрати потужності.

Кільцеві волоконні резонатори. У волоконних лазерах, найчастіше імпульсних, застосовують спеціальні конструкції волоконних кільцевих резонаторів (рис. 3.8). Найпростішою конструкцією кільцевого резонатора є з'єднання обох кінців WDM-розгалужувача з активним волокном (рис. 3.8а). Особливістю волоконних кільцевих резонаторів є пропускання світла лише в одному напрямку незалежно від частоти, за винятком деяких резонансних частот.



Звичай в кільцевих резонаторах також застосовуються додаткові елементи - ізолятори і поляризатори, що гарантують безпеку поляризації випромінювання і одно-спрямованість його поширення.

Для імпульсних волоконних лазерів з синхронізацією мод використовують так звані резонатори у формі вісімки (рис. 3.8б) (англ. Figure-of-eight lasers, названі так за форму з'єднання волокна). Обидві петлі такого резонатора служать в якості петель Саньяка. Активне волокно розміщується несиметрично стосовно петель резонатора, що створює нелінійну різницю фаз між зустрічними хвилями і забезпечує синхронізацію мод при перевищенні деякої граничної потужності накачування.

Рисунок 3.8. Схеми кільцевих волоконних резонаторів: а) звичайний кільцевої резонатор, вбудований в волоконний лазер: вхід - випромінювання накачування, вихід - вихідний випромінювання, 1 - активне волокно, 2 - поляризатор, 3 - оптичний ізолятор, 4 - WDM-розгалужувач; б) волоконний лазер з кільцевим резонатором у вигляді вісімки: вхід - випромінювання накачування; вихід - вихідний випромінювання, 1 - активне волокно, 2 - поляризатор, 3 - оптичний ізолятор, 4 - WDM-розгалужувач, 50:50 - дільник 50/50

Резонатор на основі волоконних брегівських решіток. Останнім часом у багатьох волоконних лазерах в якості дзеркал резонаторів використовують волоконні брегівські решітки (ВОБР), сформовані безпосередньо в активному світловоді або в нелегованому волоконному світловоді, звареному з активним світловодом.

На рис. 3.9 показана схема волоконного лазера з брегівськими дзеркалами. Резонатор всередині оптичного волокна створюється парами внутрішньоволоконних брегівських решіток - ділянок оптичного хвилеводу, в яких утворюється структура з модульованим показником заломлення.

Рисунок 3.9. Схема волоконного лазера з дзеркалами на основі ВОБР

Волоконна брегівська решітка є відрізок оптичного волокна, в серцевині якого за допомогою ультрафіолетового випромінювання створено періодичну зміну показника заломлення з амплітудою  $\sim 10^{-5} \div 10^{-3}$  зі штрихами, орієнтованими по нормалі до осі світловода, і періодом порядку довжини хвилі поширюється випромінювання. За своєю суттю ВОБР є одновимірний фотонний кристал, ефективно відображає випромінювання з довжиною хвилі, близької до брегівської довжини хвилі кристала. Основними характеристиками ВОБР є: період модуляції показника заломлення  $\Lambda$ , амплітуда наведеного зміни показника заломлення  $\delta n$ , число штрихів решітки  $Np$  і її довжина  $L$ .

На рис. 3.10 наведено експериментально вимірний спектр пропускання ВОБР з наступними параметрами:  $L = 5$  мм,  $\delta n = 8 \times 10^{-4}$ ,  $= 0,4$  мкм [19]. Як видно, ВОБР забезпечує коефіцієнт відбиття  $R \sim 0,99$  на довжині хвилі  $1,136$  мкм при ширині спектра відбиття  $\sim 0,4$  нм, що демонструє можливість застосування ВОБР в якості ефективних відбивачів для волоконних лазерів.

Рисунок 3.10. Спектр пропускання ВОБР

Таким чином, варіюючи параметри ВОБР, можна створювати повністю волоконні дзеркала з різною шириною спектра відбиття ( $0,05 \div 5$  нм) і різними коефіцієнтами відбиття ( $1 \div 99,9\%$ ), тим самим формувати повністю волоконний резонатор, розрахований на потрібну довжину хвилі і потрібної добротності. Тому з розвитком технології виробництва активних світловодів з подвійною оболонкою почали створювати потужні одномодові повністю волоконні лазери з накачуванням в першу оболонку за допомогою багатомодових лазерних діодів з волоконним виходом (рис. 3.11). Селективність по частоті брегівських решіток дозволяє отримати лазер, що працює на одній поздовжньої моді з вузькою частотною смугою генерації.

Рисунок 3.11. Схема повністю волоконного лазера з накачкою від масиву лазерних діодів Певну небезпеку для ВОБР показника заломлення представляє висока температура навколишнього середовища. Хоча в цілому температура руйнування решітки істотно залежить від методу її створення і матеріалу волокна, найчастіше критичні температури для експлуатації волоконних лазерів на основі ВОБР лежать в діапазоні  $300-600$  °С.



### 3.4. Неперервні волоконні лазери

Волоконні лазери на основі активних світловодів, легованих іонами РЗЕ. Останнім часом неперервні волоконні лазери починають знаходити широке застосування в різних областях науки і техніки, оскільки, на протипагу традиційно використовуваним твердотілим лазерам, вони виявляються більш компактними, надійними і температурно стабільними. Дійсно, що утворюється при оптичній накачуванні активного волокна тепловий потік виявляється розподіленим уздовж великої довжини світловода. Це дозволяє ефективно розсіювати тепло в навколишнє середовище і значно зменшити ризик, пов'язаний з тепловим пошкодженням, що особливо важливо при безперервній генерації випромінювання.

Використання в волоконних лазерах багатооболонкових конструкцій і одномодових активних світловодів дозволяє не тільки домогтися високої ефективності перетворення випромінювання накачування в лазерне випромінювання, але і забезпечити високу якість останнього. У ряді недавніх публікацій [11-13] повідомляється про створення лазерів з потужністю одномодового випромінювання понад 100 Вт і багатомодових лазерів потужністю ~ тисячі Вт. Досягнуто значних результатів по спектральній перебудові генерується волоконними лазерами випромінювання в областях 1, 1,5 і 2 мкм (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

#### Порівняльні характеристики перестроюваних волоконних лазерів

З таблиці видно, що волоконні лазери на основі активних світловодів, легованих Er-Yb і Tm, мають максимальний ККД і хорошу потужність випромінювання.

#### Багатоканальний волоконний лазер

Інтерес до лазерів, що генерують на декількох довжинах хвиль, пояснюється широкими можливостями їх застосування в різних областях науки і техніки. Багаточастотні лазери мають переваги перед одночастотними в інтерферометрії, дальнометрії, голографії, моніторингу навколишнього середовища, диференціальних методах вимірювань. На їх основі можуть бути створені високочутливі і прецизійні оптичні прилади та системи. Останнім часом розпочато дослідження можливості використання багатоканальних лазерів в радіофотоніці. Ще однією сферою застосування багатоканальних лазерів є волоконно-оптичний зв'язок (ВОЛЗ), де вони можуть використовуватися для тестування багатоканальних систем зв'язку зі спектральним мультиплексуванням (DWDM).

Історично першими були створені і досліджені багатоканальні газові лазери з огляду на те, що їх активне середовище має неоднорідне розширення і отримати стабільну багатоканальну генерацію досить просто. Наступним етапом стала заміна газової активного середовища на твердотільне, що дозволило істотно збільшити довговічність, надійність, економічність і технологічність багатоканальних лазерів.

Для ослаблення сильної конкурентної взаємодії між каналами генерації, обумовленої однорідним розширенням лінії посилення твердотільних лазерів, було запропоновано і досліджено ряд методів. Найбільш універсальний спосіб вирівнювання потужностей каналів генерації складається в автоматичного підстроювання втрат індивідуальних каналів. Цим методом були отримані високостабільні двонаправлені режими генерації в кільцевих твердотільних лазерах. Для ослаблення конкуренції мод було також запропоновано використовувати просторовий і поляризаційний поділ каналів в активному середовищі, а також нелінійно-оптичні методи стабілізації багатоканальної генерації. Для тестування сучасних високошвидкісних волоконно-оптичних систем зв'язку зі спектральним мультиплексуванням (DWDM-систем зв'язку) потрібно багатоканальне джерело випромінювання з перебудовою довжин хвиль каналів в діапазоні довжин хвиль 1530-1560 нм. Найбільш перспективним джерелом такого типу є ербієвий волоконний лазер (EDFL).[33]

Висновки. Успіхи в технологіях скляних волоконних світловодів та лазерних діодів привели до створення нового покоління твердотільних лазерів - волоконних лазерів. Незважаючи на величезні успіхи в створенні безперервних одномодових волоконних

лазерів з вихідною потужністю  $\sim 1$  кВт в спектральній області 1,06 - 1,1 мкм, очікується подальше збільшення вихідної потужності безперервного одноволоконного лазера до 10 кВт.

Однак для досягнення цього рівня вихідної потужності необхідно розробити нові структури волоконних світловодів з великим діаметром поля моди і низькою нелінійністю. Крім того очікується розширення спектральної області генерації потужних волоконних лазерів до 2 мкм за рахунок створення ербієвого ( $X = 1,55$  мкм) і тулієвого ( $X = 2$  мкм) лазерів.

Створення скляних волоконних світловодів з високою прозорістю в ІЧ-області спектра дозволить створити сімейство ВКР-волоконних лазерів для спектральної області 3 - 5 мкм.

#### 4. ВІСМУТОВІ ВОЛОКОННІ ЛАЗЕРИ

##### 4.1. Вісмутовий волоконний лазер, який випромінює в діапазоні 1625 – 1775 нм

З моменту створення першого вісмутового волоконного лазера в 2005 р. значна увага приділялася пошуку нових складів скла для серцевини вісмутових світловодів і дослідженню їх спектрально-люмінесцентних властивостей. Проведені дослідження показали, що волоконні світловоди, леговані вісмутом, є перспективною активним середовищем для створення лазерів і оптичних підсилювачів в спектральному діапазоні 1000 - 1800 нм.[21]

Однак до сих пір не існувало вісмутових волоконних лазерів і підсилювачів для спектральної області 1600 - 1800 нм. У той же час безсумнівно існує потреба в подібних пристроях, особливо для діапазону довжин хвиль 1620 - 1700 нм, в якому оптичні втрати волоконних світловодів на основі кварцового скла досить малі (не більше 0.4 дБ/км), що робить цей діапазон перспективним для передачі інформації по волоконних лініях зв'язку. Проблема використання даного спектрального діапазону для передачі інформації в даний час пов'язана з відсутністю елементної бази волоконно-оптичних систем зв'язку, перш за все волоконних лазерів та оптичних підсилювачів.

Розглянемо результати досліджень по розробці вісмутових волоконних світловодів, люмінуючих в спектральній області 1600 - 1800 нм, і волоконних лазерів на їх основі.

На рис. 4.1 показаний спектр повного оптичного посилення і відзначені довжини хвиль, на яких була отримана лазерна генерація. Ширина по напіввисоті смуги посилення розробленого волоконного германосилікатного світловода, легованого вісмутом, склала 150 нм.

Рисунок 4.1. Спектр повного оптичного підсилення ВГСС; стрілки і круги вказують довжини хвиль накачування і генерації відповідно [21]

Таким чином, створено легований вісмутом германосилікатний світловод, який має оптичне посилення в області 1560 - 1800 нм. Цей світловод є перспективним активним середовищем для лазерів і підсилювачів, що працюють у зазначеній області, що підтверджується вперше отриманими результатами по лазерній генерації на довжинах хвиль 1625, 1688, 1703, 1735, 1775 нм. Оптимізація параметрів активних світловодів і основних етапів технологічного процесу дозволить підвищити ефективність реалізованих вісмутових лазерів.

##### 4.2. Волоконний лазер в телекомунікаційному діапазоні

Розробка лазерів з синхронізацією мод з високою частотою проходження імпульсів (ЧПІ), яка перевищує 1 ГГц і досягає субтерагерцових значень, привертає велику увагу дослідників і потенційних користувачів таких лазерних систем. Інтерес обумовлений, в першу чергу, можливими застосуваннями даних лазерів в надшвидкодійних волоконно-оптичних телекомунікаційних системах, для синтезу частотних гребінок, обробки матеріалів, генерації і детектування терагерцового випромінювання. В цьому відношенні волоконні лазерні системи з високою ЧПІ є дуже перспективними в силу їх компактності і надійності, масштабованості по середньої потужності, широкого застосування в них стандартних волоконно-оптичних технологій і компонентів. Вивчення фізичних

механізмів генерації високочастотних послідовностей ультракоротких імпульсів (УКІ) є важливою науковою задачею. Істотний інтерес представляє також розробка методик вимірювання параметрів генеруються послідовностей імпульсів.

До теперішнього часу склалися декілька підходів до створення волоконних лазерів з високою ЧПІ. Один з підходів заснований на стандартних механізмах синхронізації мод на фундаментальній частоті обходу резонатора, довжина якого зменшується до гранично малих значень. Обмеження на мінімальну довжину волоконного резонатора, при якій досягається достатній для підтримки синхронізації мод коефіцієнт посилення, не дозволяє збільшити ЧПІ понад десятків ГГц.

Інші підходи засновані на використанні досить довгого резонатора, в якому порушується послідовність близько розташованих імпульсів. Серед них треба відзначити методи, засновані на синхронізації мод на високих гармоніках волоконного резонатора, на генерації послідовностей пов'язаних дисипативних солітонів (солітонних кристалів) і на синхронізації мод за рахунок дисипативної чотирьоххвильової взаємодії при наявності в схемі гребенчатого частотного фільтра. Також були запропоновані схеми лазерів з нелінійним петльовим дзеркалом в якості штучно насиченого поглинача, що працює в режимі синхронізації мод з декількома імпульсами усередині резонатора. Збільшення ЧПІ досягалося за рахунок додаткового короткого резонатора або оптичної петлі зворотного зв'язку, що повертає з затримкою деяку частку випромінювання, відбитого від нелінійного дзеркала, назад в основний резонатор. Нещодавно був продемонстрований волоконний лазер, заснований на синхронізації мод шляхом нелінійного обертання еліпса поляризації і збільшення ЧПІ за рахунок використання внутрішньо-резонаторного інтерферометра Маха - Цендера.

Запропонований новий варіант схеми волоконного лазера телекомунікаційного діапазону, здатного генерувати послідовності імпульсів з високою ЧПІ [18]. У запропонованій схемі синхронізація мод здійснюється нелінійним підсилювальним петльовим дзеркалом (NALM) з відрізком сильнелінійного волокна всередині, а стабілізація міжімпульсних відстаней в послідовності здійснюється за допомогою гребінчастого частотного фільтра. Відструкція даної схеми обумовлена такими міркуваннями.

1. Нелінійне підсилювальне петлеве дзеркало в якості штучно насичуваного поглинача дозволяє за допомогою стандартних телекомунікаційних компонентів створити повністю волоконну схему, а також володіє більшою стійкістю до зовнішніх впливів, ніж насичуваний поглинач на основі нелінійного обертання еліпса поляризації. Крім того, регулюючи коефіцієнт розгалуження волоконного подільника, а також довжину волокон, можна в значних межах змінювати величину нелінійного поглинання петлевого дзеркала, чого важко досягти при використанні реальних насичуваних поглиначів. Слід зазначити, що нелінійне петлеве дзеркало може бути виконано на волокнах, що зберігають поляризацію, що дозволяє розробити стабільне повністю волоконне джерело УКІ з високою ЧПІ на основі стандартних телекомунікаційних компонентів.

2. Введення відрізка сильнелінійного волокна дозволяє здійснити синхронізацію мод при дуже малій енергії імпульсу. Це особливо важливо для досягнення високих ЧПІ при збереженні середньої потужності на рівні, прийнятному для стандартних телекомунікаційних компонентів. Крім того, висока нелінійність дозволяє істотно розширити спектр генерації лазера.

3. Гребінчастий частотний фільтр сприяє генерації набору еквідистантних мод, різниця частот яких задає відстань між імпульсами  $T$  в послідовності:  $T = 1/\Delta f$ , де  $\Delta f$  - різниця частот сусідніх мод. В якості фільтра може використовуватися інтерферометр Маха - Цендера, еталон Фабрі - Перо, мікрорезонатори і спеціальні волоконні бреггівські решітки.

Досліджено дві реалізації запропонованої схеми - з інтерферометром Маха - Цендера і з низькодобротним еталоном Фабрі - Перо в якості фільтрів.[11]

#### 4.3. Прогрес в області розробки вісмутових волоконних лазерів і підсилювачів для спектральної області 1600-1800 нм

До теперішнього часу на основі вісмутових волоконних світловодів розроблені лазери безперервної і імпульсної дії, підсилювачі, суперлюмінесцентні джерела, що працюють в області 1100 - 1550 нм. Нещодавно показано, що вісмутіві світлопроводи можна використовувати в більш широкій області довжин хвиль 1100 - 1800 нм.

Нижче представлені результати в області розробки вісмутових світловодів і пристроїв (лазерів, підсилювачів) на їх основі, що працюють в новій спектральній області 1600 - 1800 нм. В якості активного середовища виступають леговані вісмутом світловоди з серцевиною з високогерманатного скла. Обумовлено це тим, що тільки в таких світловодах відбувається формування вісмутових активних центрів (ВАЦ-Ge) з лазерними переходами в області  $\sim 1700$  нм. Встановлено, що активні центри ВАЦ-Ge стійкі до ІЧ випромінювання, що дозволило створити лазери з потужністю понад 2 Вт. Були проведені детальні дослідження оптичних властивостей світловодів такого типу.

На рис. 4.2 представлені спектральні залежності оптичного поглинання ВАЦ (ВАЦ-Si і ВАЦ-Ge) і неактивних (непросвічуваних) втрат, зумовлених вісмутом, в таких світловодах. Високий рівень непросвічуваних втрат - одна з причин низького ККД (не більше  $\sim 30\%$ ). Необхідно відзначити, що даний тип волоконних світловодів має високу радіаційну стійкість, що важливо з практичної точки зору.

Рисунок 4.2. Спектр поглинання високогерманатного світловода, легованого вісмутом

Рисунок 4.3. Залежність вихідної потужності лазера від введеної потужності накачування

На основі вісмутових світловодів було також реалізовано сімейство волоконних лазерів, що генерують в області довжин хвиль від 1625 до 1775 нм. На рис. 4.3 представлена залежність вихідної потужності з вісмутного лазера, що генерує на довжині хвилі  $\sim 1700$  нм від введеної потужності накачування на 1568 нм. Видно, що ККД таких лазерів досягає  $\sim 30\%$ . Максимальна потужність вихідного випромінювання перевищує більше 2 Вт і обмежується доступною потужністю накачування. Про відсутність нелінійних ефектів в цьому випадку свідчить лінійна залежність вихідної потужності лазера від потужності накачування навіть при високих потужностях більше 7 Вт.

#### 4.4. Опис експериментального дослідження потужності вісмутного лазера

В останні два десятиліття були розроблені високоефективні волоконні лазери з рідкоземельними іонами  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  і  $\text{Tm}^{3+}$  активних центрів. Робочі смуги хвиль цих лазерів розташовані в області 0,9-2,1 мкм з великими спектральними розривами між ними. Взагалі кажучи, лазерні комбіновані волокна можуть використовуватися на довжинах хвиль, які не покриті рідкоземельними лазерами. Тим не менше, лазерні волоконно-оптичні волокна мають свої недоліки, пов'язані з неминучою високою нелінійністю активного волокна та обмеженнями в роботі імпульсного режиму. Таким чином, пошук та вивчення нових волоконних лазерних середовищ, що охоплюють інтервали між хвилями між лазерами рідкоземельних волокон, є цікавим.

Ефективні твердотільні (волоконні) лазерні джерела для спектральної області 1150-1500 нм стають зараз незамінними для численних застосувань. Прогноз оптичного волокна протягом наступних двох десятиліть передбачає, що для передачі буде використано весь спектральний діапазон від 1300 до 1700 нм. Проте немає ефективних волоконних лазерів та широкосмугових оптичних підсилювачів, що працюють між 1300 і 1500 нм, які необхідні для систем оптичного зв'язку. Тому такі пристрої повинні бути розроблені.

Нещодавно спостерігалася широкосмугова люмінесценція в області ближнього ІЧ-діапазону 1100-1700 нм у ряді дводольних окулярів (силікат, германат, алюмофосфат, барію-алюмоборта). Природа активного центру залишається неясною; це було віднесено до  $\text{Bi}^+$ , а також до  $\text{Bi}^{5+}$  або навіть до кластерів  $\text{Bi}$ , але мабуть, люмінесценція відбувається тільки в присутності Al або Ta. Для стислості, нижче, ці активні центри будуть називатися "Bi ions". У даній роботі будуть описані результати щодо розробки вісмутного

волоконного лазера із вихідною потужністю 10 Вт, а також подвоєння частоти вихідного випромінювання.

Схема експерименту показана на рис. 4.4. Як джерело випромінювання накачки, використовувався волокно Yb-лазера на основі фосфосилікатного волокна. Вихідна потужність цього лазера становила до 80 Вт на довжині хвилі 1070 нм. Одномодове двоопромінене волокно з довжиною хвилі 1,1 мкм використовували як активний носій. Волокно було витягнуте із заготовки, виготовленої за технологією MCVD. Діаметр поля режиму 1,1 мкм становив 6,8 мкм. Концентрація Ві у алюмосилікатному склі серцевини не перевищувала  $2 \times 10^{-2}$  ат. % (іншими словами, менше, ніж  $1,3 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>).

Спектр поглинання цього волокна в спектральній області 1000-1700 нм показаний на рис 4.5. Смуга поглинання з максимумом близько 1000 нм та довгою довжиною хвилі біля 1200 нм відповідає поглинанню Ві іонів.

Рисунок 4.4. Схема установки: FBG – брегівські решітки, Yb лазер – ітербієвий лазер, Ві-doped – вісмутове волокно

Рисунок 4.5. Спектр поглинання вісмутового волокна

Слід зазначити, що оптичні втрати в діапазоні довжин хвиль близько 1300 нм менше, ніж 10 дБ/км. Це означає, що фонові втрати в досліджуваному дводозному волокні не перевищують цю величину. Поглинання випромінювання накачки дорівнює 0,29 дБ/м для 1070 нм та 0,26 дБ/м для 1085 нм. З цієї причини довжина волокон  $L \approx 50-80$  м, що використовується в Ві-лазерних схемах, була достатньо довгою для ефективного поглинання випромінювання накачки.

Вихідні параметри лазерів вісмутового лазера. На виході лазерної схеми (рис.4.4) спостерігалось випромінювання біохімічного лазера та неабсорбованого випромінювання накачки. На рисунку 4.6 показані залежності потужності накачки  $P_{np}$  і потужності лазерного випромінювання  $P_{вi}$  від потужності накачки  $P_{in}$ , введеної у волокно для чотирьох лазерів Ві, довжини хвиль 1150, 1160, 1205 та 1215 нм. Довжина волокна в кожному випадку дорівнювала  $L \approx 80$  м.

Лазери на довжинах хвиль 1150 і 1160 нм демонстрували максимальну продуктивність відповідно 19% та 21%, і максимальну вихідну потужність - 13 і 15 Вт, відповідно.

Більша частина випромінювання накачки у всіх чотирьох лазерах була поглинута. Чим довша довжина хвилі генерації в області 1150-1205 нм, тим нижче ефективність лазера. До довжини хвилі 1205 нм залежність  $P_{вi}(P_{in})$  залишається близькою до лінійної. Але при  $s = 1215$  нм залежність  $P_{вi}(P_i)$  дуже різко змінюється; спостерігається насичення вихідної потужності лазера Ві (див. рис. 4.6 d). Одночасно відбувається збільшення потужності накачки без поглинання. Початкова ефективність шуму 1215 нм лазера  $P_{in}$  15 Вт вище, ніж лазер на 1205 нм. Крім того, генерація Raman Stokes розпочинається в Ві-fiber лазером  $s = 1215$  нм на насосі вище 60 Вт, що призводить до різкого зниження неабсорбованої потужності насоса та Ві-лазерного випромінювання.

Рисунок 4.6. Залежності потужності накачки  $P_{np}$  і потужності лазерного випромінювання  $P_{вi}$  від потужності накачки  $P_{in}$ , введеної у волокно для чотирьох лазерів, довжин хвиль 1150, 1160, 1205 та 1215 нм [23]

Показано, що вісмутові лазери можуть генерувати випромінювання більше 15 Вт з оптичною ефективністю близько 22% в районі 1160 нм. Насиченість вихідної потужності волоконного лазера Ві на рівні  $\geq 5$  Вт спостерігалася на довжині хвилі 1215 нм. Виявлено ненасичені оптичні втрати в волокнах, що становить приблизно одну третину загальної Ві-індукованої абсорбції.

Висновки. Таким чином, вісмутові світлопроводи - нове лазерне середовище для спектральної області 1600 - 1800 нм. На основі такого типу світловодів можна створювати стабільно працюючі пристрої для вирішення прикладних і наукових завдань.

Таблиця 4.1

## 5. МОДЕЛЮВАННЯ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

В останнє десятиліття досягнуті значні успіхи в розробці волоконних лазерів, здатних працювати в безперервному режимі і з мультикіловатною вихідною потужністю. Такі результати були досягнуті в волоконних лазерах з використанням світловодів з подвійною оболонкою, легованих іонами ітербію. Конфігурація волоконного світловода з подвійною оболонкою дозволяє досягати значних потужностей генерації лазерного джерела за рахунок використання напівпровідникового накачування, що працює в багатомодовому режимі генерації. Крім того, активне середовище в даному випадку працює по 3-х рівневій або квазі-чотирьох рівневій схемі, що дозволяє досягати високих значень ККД і вихідних потужностей. Ітербієві волоконні лазери середньої потужності з подвійною оболонкою сьогодні широко використовуються в задачах медичної діагностики, лазерної хірургії, далекомірних системах бачення і т.д. Важливим етапом на шляху створення таких волоконних лазерів є чисельне моделювання процесів, що відбуваються в резонаторі і, як наслідок, оптимізація конструкції волоконного лазерного джерела. Проведення чисельних експериментів дозволяє оптимізувати такі параметри волоконного резонатора, як довжина активного волокна, коефіцієнти пропускання вихідних дзеркал, які в даному випадку є волоконні брегівські решітки, а також підібрати концентрацію активних іонів в кварцовому склі активного волоконного світловода. У даній роботі [25] наведено порівняння методів моделювання процесу стаціонарної генерації одномодового волоконного ітербієвого лазера середньої потужності, а також проводиться верифікація розробленої математичної моделі шляхом порівняння результатів розрахунку з комерційною програмою.

#### Методи моделювання вихідних характеристик ітербієвого волоконного лазера

На рис.5.1 представлена структурна схема типового волоконного лазера з подвійною оболонкою. Резонатор лазера складається з вхідної волоконної брегівської решітки 2 з коефіцієнтом відображення  $\sim 91\%$  і вихідної волоконної решітки 4 з коефіцієнтом відбивання  $\sim 4,6\%$  на довжині хвилі генерації. Накачування 1 являє собою багатомодовий лазерний діод, випромінювання якого вводиться в першу оболонку активного світловода 3 і в міру поширення поглинається в серцевині, легованій іонами ітербію, при цьому передбачається, що легування іонами ітербію в кварцовому склі однорідне по концентрації іонів по всій серцевині активного волоконного світловода.

Рис. 5.1. Структурна схема волоконного лазера з подвійною оболонкою. 1 - діод накачки; 2 - високовідбивна брегівська решітка; 3 - активності ітербієве волокно; 4 - напівпрозора вихідна брегівська решітка.

Для опису процесу генерації в волоконному лазері звернемося до системи рівнів іонів ітербію. На рис. 5.2 приведені перетину поглинання (лінія 1) і люмінесценції (лінія 2) для іона  $Yb^{3+}$  (перетини наведені для комерційно доступного активного волокна з подвійною оболонкою марки LIEKKI (<http://nlight.net>)), при цьому схема рівнів іона ітербію показана на вставці до рис.5.2. В області енергій відповідних довжинах хвиль в районі 1 мкм іон ітербію має тільки два енергетичних рівня, розщеплених на кілька Штарковських підрівнів. Відомо, що при такій конфігурації енергетичних рівнів іона ітербію відсутні ефекти, пов'язані з поглинанням із збудженого стану і крос-релаксації між рівнями, що зумовлює високу ефективність подібних лазерних джерел випромінювання. Число іонів, що знаходяться на нижньому і верхньому рівнях в одиниці об'єму позначимо як  $n_1$  і  $n_2$ , а повне число іонів в одиниці об'єму -  $n_0$ . Ймовірності вимушених переходів під дією випромінювання накачування і генерації визначаються перетинами вимушених переходів на відповідних довжинах хвиль:  $\sigma_{ap}$ ,  $\sigma_{ep}$  - перетину поглинання і люмінесценції для накачування, і  $\sigma_{as}$ ,  $\sigma_{es}$  - перетину поглинання і люмінесценції для генерації.

Рис.5.2. Спектральна залежність перетину поглинання  $\sigma_a$  (лінія 1) і люмінесценції  $\sigma_e$  (лінія 2) для іона  $Yb^{3+}$ . На вставці - схема енергетичних рівнів  $Yb^{3+}$

Для опису динаміки населеності рівнів  $n_1$  і  $n_2$  типово використовуються швидкісні рівняння виду:



де  $\tau$  - час життя іона на верхньому лазерному рівні,  $h$  - постійна Планка,  $c$  - швидкість світла у вакуумі,  $\lambda_p$  і  $\lambda_s$  - довжини хвиль накачування і генерації,  $A$  - площа серцевини.

Відзначимо, що частина потужності випромінювання накачування, яка перебивається з серцевинною, описується фактором перекриття  $\Gamma_p$ , типово при розрахунках приймається рівним відношенню площ серцевини і першої оболонки. Фактор перекриття для генерації  $\Gamma_s$  при розрахунках визначається часткою потужності лазерної генерації, що розповсюджується по серцевині, і в стандартних розрахунках приймається за одиницю.

Для моделювання розподілу потужності випромінювання накачування і генерації по довжині активного волоконного світловода,  $P_p^+$   $P_s^+$  записують систему рівнянь для зв'язаних хвиль у вигляді:

Де  $\alpha_p$  і  $\alpha_s$  – коефіцієнти сірих втрат для випромінювання накачки і генерації.

Таблиця 5.1

#### Основні параметри для моделювання лазерного джерела

Для рішення зв'язаних рівнянь необхідно додати граничні умови для випромінювання накачки і генерації:

де  $P_{\text{pump}}^+$  - введена потужність накачування,  $L$  - довжина активної середовища,  $R1$  і  $R2$  - ефективні коефіцієнти відбивання випромінювання на довжині хвилі генерації на лівому і правому кінцях резонатора відповідно.

Для вирішення зазначених рівнянь розроблено спеціальну програму в пакеті Wolfram Mathematica 10. Відзначимо, що система рівнянь вирішувалася методом Ерміта. Основні параметри для проведення моделювання лазерного джерела наведені в табл. 5.1.

#### Результати моделювання вихідних характеристик ітербієвого волоконного лазера

На рис.5.3 представлені результати чисельного моделювання розподілу потужності випромінювання накачування по довжині резонатора  $P_p^+(Wm)$ , розраховано за допомогою рівнянь (1) - (3) з типовим наближенням коефіцієнта  $\Gamma_s = 1$  без урахування радіального розподілу поля моди, і розраховано в програмі RP Fiber Power  $P_p^+(Rp)$  ([https:// www.rp-photonics.com](https://www.rp-photonics.com)). Очевидно, що результати розрахунку розподілу потужності накачування по довжині волокна збігаються.

Рис.5.3. Розподіл потужності)

На рис.5.4 представлено розподіл потужності випромінювання генерації по довжині резонатора в прямому) (лінія 1 (лінія 2), (лінія 5) і в зворотному напрямку) (лінія 3 (лінія 4). Відзначимо, що лінії розподілу потужності генерації не збігаються і відзначимо так само, що даний розрахунок проводився без урахування радіального розподілу поля моди. Використовуючи чисельні методи рішення рівнянь (1) - (3), при довжині волокна 10 м і введеної потужності накачування 10 Вт максимальна потужність генерації склала 8,5 Вт на довжині активного волокна 7,6 м. У програмі RP Fiber Power максимальна потужність генерації склала 9,2 Вт на довжині активного волокна 9 м. Таким чином, при проведенні розрахунку в стандартному наближенні  $\Gamma_s = 1$  при помилка розподілу потужності генерації лазерного джерела може досягати 6%.

Рис.5.4. Розподіл потужності в прямому  $P_s^+(Wm)$  (лінія 1),  $P_s^+(Rp)$  (лінія 2), (лінія 5) і в зворотному 3),4) напрямленні

Відмінності в результатах (лінія 1 і лінія 2) викликані тим, що в стандартній математичній моделі не враховується радіальний розподіл поля моди, яке впливає на фактор перекриття для генерації  $\Gamma_s$  і розраховується по формулі:

де  $r$  - радіус серцевини,  $I(r)$  - розподіл інтенсивності сигналу, розрахована за формулою:

де  $w$  - радіус поля моди, який можна розрахувати за формулою Маркуса:

де  $V$  - фазовий об'єм, розрахований за формулою:

де  $NA$  - числова апертура волокна.

З урахуванням розрахованого радіального розподілу поля моди отримуємо зіставні результати (див. лінія 5 і лінія 2). Таким чином, очевидно, що фактор перекриття для генерації істотно впливає на розподіл генерації по довжині світловода, але майже не впливає на розподіл накачування (див. рис.5.2 і 5.3).



При проектуванні лазера важливо оптимізувати довжину активного волокна для отримання максимальної ефективності генерації, яку можна розраховувати за формулою:

Рис.5.5. Залежність ККД лазера від довжини активного світловода

Для заданих параметрів волоконного світловода ефективність генерації лазера на довжині хвилі  $\lambda_s = 1,07$  мкм в залежності від довжини активного світловода представлена на рис.5.5. Очевидно, що ККД без урахування розподілу поля моди  $\eta(Wm)$  (лінія 1) не збігається з результатами розрахунку в програмі RP Fiber Power  $\eta(Rp)$  (лінія 2). Якщо при моделюванні враховувати розподіл поля моди, то отриманий результат  $\eta(Wm2)$  (лінія 3) збігається з розрахунками в комерційній програмі. При цьому відзначимо, що типова помилка без урахування розподілу поля моди може досягати 6% по ККД, і відповідно до 30% при оптимізації довжини активного світловода в складі резонатора волоконного лазера. Тобто задану ефективність генерації можна досягти на довжинах світловода до 30% менше в разі врахування радіального розподілу поля моди.

Висновки. В роботі наведено порівняння методів моделювання процесу стаціонарної генерації одномодового волоконного ітербієвого лазера з урахуванням радіального розподілу поля моди і без неї і проведена верифікація отриманих результатів шляхом їх порівняння з результатами розрахунку комерційної програми RP fiber power. Розроблена модель розрахунку безперервних волоконних лазерів, заснована на чисельному рішенні швидкісних рівнянь, показала співставні результати з комерційною програмою. При цьому отримано, що не врахування радіального розподілу поля моди в стандартній моделі, може призводити до помилки оптимізації ККД лазера до 6%, а в довжині активного волокна для отримання заданого ККД до 30%.

## 6. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СВІТЛОВОДІВ

### 6.1. Конструкторсько-технологічна частина

#### 6.1.1. Енергетичний розрахунок

Передача оптичного сигналу через волоконно-оптичну лінію зв'язку супроводжується втратою його потужності. Потужність сигналу на виході волоконно-оптичної системи визначається за рівнянням: [26]

де  $P_1$  - потужність що виходить з волокна оптичного імпульсу;

$P_{вх}$  - потужність випромінювання джерела, розташованого на початку лінії зв'язку;

$D$  - оптична щільність системи, яка визначається в Белах.

Якщо оптичні втрати розраховані в децибелах (дБ), то їх треба перевести в Бели, або скористатися формулою:

де  $D$  - оптична щільність системи в дБ.

Як потужності вихідного сигналу беремо потужність передавального модуля на основі лазера з введенням випромінювання в одномодове оптичне волокно моделі ПОМ-14-2к, виробництва вітчизняної компанії НОЛАТЕХ, рівній 2 мВт [27]. Цей модуль є оптоелектронним пристроєм, що забезпечує передачу оптичних імпульсів на довжині хвилі 1,3 мкм зі швидкістю до 2,5 Гбіт / с, що відповідає прийнятним технічним вимогам. Отже,

Підсумкові втрати потужності складаються з втрат на окремих ділянках ВОЛЗ. Вибираємо волокно Corning SMF-28, яке має прийнятне загасання на довжині хвилі нульової дисперсії (1,3 мкм), що становить 0,34 дБ / км [28, ст.210]. З огляду на задану в технічному завданні довжину ділянки - 50 км, отримуємо втрати в волокні

$D_{в} = 17$  дБ.

Відповідно до стандарту Ростелекома [28], враховуються такі розрахункові параметри втрат в роз'ємному з'єднанні - не більше 0,3 дБ [26]. З огляду на втрати в двох роз'ємах: з'єднанні джерела оптичного сигналу з волокном і роз'ємному з'єднанні волокна з проектованим пристроєм, отримуємо сумарні втрати в роз'ємних з'єднаннях

За формулою (6.2) отримуємо

Розглянемо ослаблення сигналу за рахунок відображення від поверхонь лінзи, фокусуєчим випромінюванням на оптичному підсилювачі, і відображення від поверхні оптичного підсилювача. Пропускання визначимо за рівняннями:

де  $P_1$  - надходить на лінзу потужність випромінювання;

$P_2$  - проходить через лінзу потужність випромінювання;

$\rho_c$  - коефіцієнт відбиття від кордонів повітря - скло;

$\rho_d$  - коефіцієнт відбиття сигналу від кордонів повітря - напівпровідник.

Відображення від кордону розділу двох середовищ, одна з яких повітря, складе

Як матеріал лінзи візьмемо скло К8 з лінійної хроматичної дисперсією [29, ст.646].

Показник заломлення на заданій довжині хвилі для прийнятної точності обчислення

становить близько  $n_c = 1,51$ . Таким чином коефіцієнт відображення оцінимо за формулою

Напівпровідниковий оптичний елемент виконується на основі складної сполуки групи АЗВ5 - InGaAsP, з показником заломлення  $n_d = 3,35$  [30, ст. 17].

Проведемо аналогічні розрахунки коефіцієнта відбиття для кордону повітря - напівпровідник, отримаємо більш значуще число

У підсумку, згідно з формулою (6.3), отримаємо потужність випромінювання, що проникає в підсилювач.

Типове значення посилення оптичного сигналу напівпровідникових елементом французької фірми Corning становить 25 дБ [31 ст. 214]. З огляду на це можна отримати розрахункове значення сигналу на виході підсилювача.

У цьому випадку сигнал відновлюється до рівня насичення, який визначається в довіднику величиною.

Це більше сигналу на виході передавального оптичного модуля. Тому, є запас по потужності, що забезпечує виконання умов технічного завдання по довжині безретрансляційного зв'язку.

Наявність п'яти проміжних оптичних підсилювачів дозволяє отримувати лінію зв'язку в

Беручи в якості вхідного сигналу для останньої ділянки потужність випромінювання напівпровідникового підсилювача, рівну 8 мВт, отримаємо сигнал на виході приймача випромінювання ВОЛЗ, рівний:

де  $P_{pi}$  - потужність, яка надходить на приймач випромінювання;

$P_{вих}$  - потужність, яку випромінює підсилювачем;

$D$  - сумарна оптична щільність волоконної лінії зв'язку;

$\rho_c$  - коефіцієнт відбиття від кордонів повітря - скло для лінзи приймача випромінювання.

Користуючись отриманими раніше результатами, по (6.5) отримуємо

Розглянемо в якості приймача р-і-п-фотодіод PD-1375-ir, що забезпечує основні критерії якості приймального пристрою: високі чутливість, швидкодія і низький рівень власних шумів. З цієї точки зору підходить моделі PD-1375-ir. Фотовідповідь знайдемо за відомою формулою:

де  $P_{pi}$  - надходить на фотоприймач потужність випромінювання;

$S_f$  - струмовий чутливість фотоприймача.

Беручи до уваги фоточутливість фотодіода при довжині хвилі 1,3 мкм, що дорівнює  $S_f = 0,9 \text{ А / Вт}$ , по (6.6), отримаємо Фотовідповідь:

Темновий струм дорівнює  $1 \text{ нА} = 10^{-9} \text{ А}$ .

Ставлення фототок / темного струму становить кілька порядків. Цей вид шумів можна не враховувати.

Внутрішній коефіцієнт шуму оптичного напівпровідникового підсилювача Corning становить 5,8 дБ [31 ст.214]. Шум послаблюється в тій же мірі, що і сигнал, відповідно до формулами (6.2) і (6.5). Тому рівень шуму на виході оптичного ділянки складе:

$P_{ш} = P_2 \cdot 100,58 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - \rho_c)^2 = 0,11 \text{ мВт} \cdot 3,8 \cdot 0,017 \cdot 0,92 = 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$ .

З огляду на рівень сигналу, визначений раніше як  $P_{pi} = 0,63 \text{ мВт}$ , визначаємо відношення сигнал / шум приблизно 100. Таким чином, вимоги по відношенню сигнал / шум, який повинен бути не менше 2, виконується з великим запасом.

### 6.1.2. Габаритний розрахунок

Проведемо розрахунок оптичної системи введення випромінювання з волокна в напівпровідниковий підсилюючий елемент і подальшого введення посиленого випромінювання в волокно продовження лінії зв'язку.

Обрано волокно Coming SMF-28 [28], воно має числову апертуру 0,14 і діаметр сердцевини волокна 10,4 мкм.

Напівпровідникові випромінюють елементи мають високу кутову розбіжність випромінювання, і, відповідно, кут прийому. Для характеристики її використовують два кута, що лежать у взаємно ортогональних площинах:

а) кутом  $\theta_1$  в напрямку, перпендикулярному поверхні p-n переходу випромінює лазерного діода;

б) кутом  $\theta_2$  в напрямку, паралельному поверхні p-n переходу.

Необхідно узгодити апертури волокна і оптичного підсилювача.

Зазвичай для фокусування випромінювання використовується двоопуклої лінза. Оптична схема показана на рис 6.1.

Рис. 6.1 – Оптична схема підсилювача

1,6 – оптоволокно, 2,5 – лінзи, 3,4 – оптичний підсилювач

В якості апертурного кута випромінювача береться більший з двох кутів розбіжності, рівний 34 градусам. Половина цього кута дорівнює

З огляду на, що числова апертура обраного волокна дорівнює  $NA = 0,14$ , кут відхилення від осі складе:

де  $d$  - числова апертура;

$\theta_m$  - апертурний кут.

За формулою (6.7) отримуємо:

Відносне збільшення лінзи визначимо формулою:

де  $\gamma$  - кутове збільшення;

$\alpha'$  - апертурний кут волокна;

$\alpha$  - апертурний кут приймає оптичного підсилювача.

Відповідно до формули (6.8) отримуємо:

Лінійне збільшення для оптичної системи, що знаходиться в середовищі з однорідним показником заломлення, в нашому випадку - повітрі, становить:

Визначимо осьові відстані

Прийнявши мм, отримаємо

Світловий діаметр лінзи становить

По формулі Гауса

Враховуючи рівність, перепишемо рівність у вигляді

звідки слідує

**Отримаємо**

Із відомої формули:

приймаємо, отримаємо

Використовуємо для матеріалу лінзи скло К8 [29, ст.646] з показником заломлення третьому для прийнятої точності обчислення - до трьох значущих цифр, рівним для заданої довжини хвилі, з урахуванням лінійного характеру дисперсії,

Взявши  $r_1 = -r_2 = 3$  мм. Підставами дані в формулу (6.14), отримаємо:

Товщина лінзи  $d = 3,5$  мм.

Задній фокальний відрізок розраховується за формулою:

Передній фокальний відрізок розраховується за аналогічною формулою:

Задня головна площина ( $H'$ ) визначається за формулою:

Передню головну площину ( $H$ ) визначаю за формулою:

Відстань між головними площинами  $H$  і  $H'$ :

З огляду на оборотності ходу променів, їх проходження від випромінюючої майданчики підсилювача до волокна продовження лінії зв'язку буде дзеркальним відображенням

розглянутого ходу променів. Це дозволяє прийняти розраховані раніше параметри для оптичної схеми введення променів в волокно.

#### **Проектування електричної схеми**

Для забезпечення струму накачування використовується схема джерела струму, керований напругою. Схема представлена на рис. 6.2.

Рис. 6.2 - Схема включення напівпровідникового оптичного підсилювача.

Величина необхідного струму задається напругою, що надходять на базу р-п-р транзистора **УТ1**.

Розрахуємо номінали резисторів для забезпечення необхідного струму накачування лазерного діода.

Струм через лазерний діод визначається у вигляді

де **Uп** - напруга, що подається на схему;

R - сумарний опір схеми.

Перепишемо рівняння у вигляді:

де **Iд** - струм, що протікає через діодну структуру;

напруга емітер - колектор, яке незначно;

R1 - опір резистора;

**Rд** - опір діодної структури.

Взявши необхідний струм накачування лазера, що забезпечує посилення оптичного сигналу, отримаємо значення опору навантаження:

Відповідно до проведених розрахунків виберемо геометричні розміри плівкового опору R1.

Взявши типове питомий поверхневий опір плівки 50 Ом, отримаємо необхідні відносні розміри: довжина x ширина рівні 24 x 10.

#### **Розрахунок надійності пристрою**

Параметри надійності пристрою оптичного підсилювача сигналів визначаються параметрами складових його елементів. Пристрій містить:

1. Інжекційний випромінюючий напівпровідниковий діод - 1 шт.
2. Транзистор - 1 шт.
3. Плівковий резистор - 1 шт.
4. Плата ГІС - 1 шт.
5. Електричні роз'єми - 4 шт.
6. Оптичні роз'єми - 2 шт.

Параметри надійності визначаються набором випадкових факторів. Імовірність роботи до відмови протягом часу t знаходиться за формулою:

де P (t) - ймовірність безвідмовної роботи;

л - інтенсивність відмов;

Підсумкова інтенсивність відмов системи буде дорівнює сумі складових інтенсивності відмов пристрою компонентів, з огляду на те, що показники ступенів при перемноженні функцій складаються

де **л<sub>i</sub>** - інтенсивність відмов - інтенсивність відмов елемента під номером i.

Ni - кількість елементів виду i.

Інтенсивність відмов пов'язана із середнім часом напрацювання

З огляду на типовий ресурс інжекційного напівпровідникового випромінювача

5 10<sup>5</sup> годин, отримуємо

Беручи типові значення інтенсивностей відмов елементів приймача, отримуємо зведену таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри надійності елементів пристрою

Визначимо інтенсивність відмов всього блоку:

Знаходимо середній час напрацювання на відмову:

Отже, середній час напрацювання на відмову близько 20 тисяч годин.

Імовірність безвідмовної роботи пристрою протягом 1000 годин складе:

Надійність пристрою і ймовірність безвідмовної роботи відповідають типовим параметрам елементів ВОЛЗ широкого призначення.

#### Способи створення напівпровідникових оптичних підсилювачів

В даній роботі розглянемо технологію виготовлення оптичних підсилювачів. Напівпровідникові оптичні підсилювачі створюються на основі напівпровідникових діодних гетероструктур з р-п-переходом, зміщується в прямому напрямі. Живлення приладу забезпечується інтегральною електричною схемою.

Залежно від того, чи випромінює СІД світло з поверхні, паралельній площині переходу, або з зрізу області переходу, структура лазерного діода (ЛД) може бути виготовлена двома способами, які демонструються рис. 6.3:

- а) у вигляді структури з випромінюючої поверхнею,
- б) у вигляді структури з випромінюють зрізом.

На рис. 6.3 показані ці варіанти.

Рисунок 6.3. Поперечний розріз структури лазерного діода, призначеного для посилення оптичного сигналу

- а) - з випромінюючої поверхнею
- б) - з випромінюють зрізом.

Обидва типи можуть бути сформовані шляхом використання або звичайного р-п-переходу, або гетероструктури, в якій активна область оточена шарами підкладки р- і п-типів.

Діод на основі гетероструктури володіє кращими характеристиками. Він забезпечує управління у всій області емісії і дозволяє усунути внутрішню абсорбцію, завдяки прозорості шарів підкладки.

Гетеропереходом називають контакт двох напівпровідників різного виду і різного типу провідності, наприклад, р-GaAlAs - n-GaAs. Відмінність звичайного р-п-переходу полягає в тому, що в звичайних р-п-переходах використовується один і той же вид напівпровідника, наприклад р-GaAs - n-GaAs.

Оскільки в гетероперехідах використовуються різні матеріали, необхідно, щоб у цих матеріалів з високою точністю збігалися два параметри: температурний коефіцієнт розширення (ТКР) і постійна решітки. З урахуванням сказаного кількість матеріалів для гетеропереходов обмежена. Найбільш поширеними з них є арсенід галію GaAs, фосфід індію InP, чотирьохкомпонентний розчин InGaAsP.

Перехід р-п-типу створюється шляхом легування напівпровідникового кристала спеціальними домішками.

Легування діодних лазерних структур відбувається безпосередньо в процесі епітаксії (пошарового нарощування) кристала.

Епітаксія - основний спосіб створення лазерних діодних структур, в тому числі і призначених для оптичного посилення сигналу ВОЛЗ. Термін «епітаксiальний» дослівно означає «розташований зверху». При епітаксiальні вирощуванні кристалічних шарів використовується спеціально підготовлена кристалічна підкладка, на яку пошарово наносяться шари напівпровідникового матеріалу з рідкою або з газової парообразной фази. Відповідно виділяють рідинну і газову епітаксії.

Останнім часом інтенсивно розвивається молекулярно-променева епітаксії, під час якої осадження шарів здійснюється за допомогою керованих молекулярних пучків в глибокому вакуумі (порядку 10<sup>-10</sup> атмосфер).

Технологічний маршрут виготовлення напівпровідникових структур, що використовуються в якості оптичних підсилювачів, включає типовий набір операцій, що застосовуються для створення напівпровідникових вивчають діодів.

Операції створення напівпровідникових оптичних підсилювачів наступні.

1. Хімічна обробка поверхні напівпровідникових пластин з метою її очищення від сторонніх хімічних елементів.
2. Напилювання металевої плівки, що служить електричним контактом.
3. Нанесення фоторезиста.

4. Фотолітографія.
5. Зняття експонованих ділянок фоторезиста.
6. Травлення малюнка контактів.
7. Контроль за допомогою мікроскопа.
8. Нанесення шару діелектрика.
9. Нанесення фоторезиста.
10. Фотолітографія по діелектрика.
11. Зняття експонованих ділянок фоторезиста.
12. Іонне травлення.
13. Контроль за допомогою мікроскопа.
14. Вибірковий контроль електрофізичних параметрів приладів на пластині.
15. Поділ пластини на кристали.
16. Збірка кристалів в корпусу.
17. Маркування приладів.
18. Підсумковий контроль параметрів приладів.

Розглянутий маршрут виготовлення напівпровідникових структур уточнюється стосовно конкретного технологічного устаткування, що є в розпорядженні підприємство виробник.

## 6.2. Методи отримання ОВ

Оптичне волокно (ОВ) протягом останніх 35 років міцно увійшло в наше життя. Це пов'язано в першу чергу тим, що несуча частота в оптичному діапазоні значно (в 106 ... 108 разів) перевершує частоти радіодіапазону, що дозволяє збільшити обсяг переданої інформації відповідно в більш ста раз. Стримуючим фактором розвитку волоконно-оптичних систем передачі інформації (ВОСПІ) тривалий час були високі втрати в оптичних світловодах. Розроблено методи модифікованого хімічного парофазного осадження (MCVD), що дозволило отримувати в подальшому ОВ з мінімальними втратами до  $\sim 0,2$  дБ/км на довжині хвилі 1,55 мкм. Це послужило початком масштабних робіт у всьому світі по розробці технології виготовлення та використання телекомунікаційних ОВ для волоконно-оптичних систем передачі інформації. В даний час метод модифікованого хімічного парофазного осадження (MCVD) ліг в основу виробництва ОВ.

### 6.2.1. Основні методи отримання заготовок оптичних волокон

В даний час для отримання кварцових заготовок як багатомодового, так і одномодового ОВ з гранично малими втратами ( $\sim 0,2$  дБ/км на  $\lambda = 1,55$  мкм) і широкою смугою пропускання ( $> 1$  ГГц  $\cdot$  км) у всіх промислово розвинених країнах світу найбільшого поширення набули парофазні методи, сутність яких полягає в окисненні або гідролізі парів чотирихлористого кремнію і галогенідів легуючих компонентів ( $\text{GeCl}_4$ ,  $\text{VBg}_3$ ,  $\text{POCl}_3$ ). Перевага методів полягає в можливості отримання чистого або легованого двоокису кремнію, що містить домішки «фарбувальних» металів (Fe, **Cu**, **Mn**, Co, **Cr**, Ni) на рівні  $< 10^{-7}$  мас.%, що практично виключає втрати, пов'язані з поглинанням світла цими домішками в діапазоні 0,63 ... 1,55 мкм. У табл. 6.2 наведені властивості вихідних матеріалів, найбільш часто використовуваних для отримання заготовок кварцових ОВ.

Таблиця 6.2

#### Властивості вихідних матеріалів, використовуваних для отримання заготовок кварцових ОВ

Парофазні методи отримання заготовок ОВ за характером утворення і осадження оксидів кремнію і легуючих компонентів діляться наступним чином:

- метод внутрішнього парофазного осадження (модифіковане хімічне парофазне осадження - MCVD - modified chemical vapor deposition - модифіковане хімічне осадження парів);
- метод зовнішнього парофазного осадження (OVD - outside vapor deposition - паростворююче осадження);
- метод парофазного осьового осадження (VAD - vapor axial deposition);



- плазмохімічні методи (PMCV, PCVD і т.д.).

Звідки оптичне волокно виготовляється в ході декількох технологічних операцій. На початку виготовляють заготовки для виробництва оптичного волокна. Вони являють собою скляні стрижні, що складаються з кварцового скла серцевини і скла оболонки. Далі з цих заготовок, при сильному нагріванні одного кінця, проводиться витяжка в волоконний світловідвід, при цьому одночасно наноситься первинне буферне покриття, що є його захисною оболонкою. Ці методи докладно описані в [32].

#### 6.2.2. Плазмохімічні методи (PMCV, PCVD)

Відмінною особливістю цих варіантів є заміна пальника, використовуваного в методах MCV, OVD і VAD для нагріву вихідних галогенідів і ініціювання реакцій їх окислення або гідролізу, на плазмотрон або магнетрон. Розрізняють два типи варіантів: з використанням ВЧ-плазми (тобто ізотермічної плазми атмосферного тиску) і НВЧ-плазми (тобто не ізотермічної плазми низького тиску). У першому випадку - це методи PMCV (plasma modified chemical vapor deposition) і POD (plasma outside deposition), а в другому - PCVD (plasma chemical vapor deposition) і його різновиди.

PMCV- і POD-методи. У PCVD-методі, вперше запропонованому і найбільш інтенсивно розвинутому фірмою «Philips», для активації процесу утворення і осадження використовується не ізотермічна плазма низького тиску  $\sim 10 \dots 20$  мбар (1 бар = 1,01 атм.), яка, по суті, є плазмою «тліючого» мікрохвильові розряду. Плазма утворюється за допомогою НВЧ-резонатора, який з'єднаний з магнетроном потужністю 0,2 ... 6 кВт, що випромінює НВЧ на частоті  $\sim 2,5$  ГГц. Суміш  $O_2$  і парів  $SiCl_4$  разом з парами галогенідів легуючих компонентів ( $GeCl_4$ ,  $C_2F_6$  і т.д.) прокачується через опорну трубку. Схема установки приведена на рис. 6.4. Утворення і осадження шарів чистим і легованим двоокисом кремнію здійснюються в опорній кварцовій трубці із зовнішнім діаметром 18 ... 26 мм, уздовж якої переміщається резонатор, а сама трубка разом з резонатором поміщена в піч, нагрівається до 1150 ... 1200 °С.

Рисунок 6.4. Парофазне осадження(PCVD), активоване мікрохвильовою плазмою:

1 – ввід ПГС, 2 – опорна трубка, 3 – піч, 4 – плазма, 5 – магнетрон, 6 – відкачка ПГС

SPCVD метод (surface plasma chemical vapor deposition). Схема установки для отримання заготовок цим методом наведено на рис. 6.5. В даному випадку довгий плазмовий стовп «тліючого» розряду збуджується в опорній трубці при локальному підводі до неї високочастотної електромагнітної енергії. Осадження оксидів відбувається на внутрішній поверхні опорної трубки в результаті реакцій в потоці хімічних реагентів, прокачується через трубку при тиску в кілька мегабар. Підтримка плазми далеко від місця докладання високочастотного поля здійснюється за рахунок перенесення електромагнітної енергії уздовж розряду поверхневими плазмовими хвилями. При прокачуванні газової суміші  $SiCl_4 + O_2$  через плазмову колону спочатку нейтральна суміш потрапляє в розряд з боку області відсічення плазмового хвилеводу. Саме в околиці цієї області відбуваються основні плазмо-хімічні процеси, які, як містилося вище, призводять до напрацювання в газовій фазі молекул  $SiO$ , дифундуючих до стінок трубки, що осідають на ній і доокислюються до  $SiO_2$ , формуючи таким чином зону осадження кварцового скла. Змінюючи місцеположення відсічення плазмового хвилеводу за рахунок зміни подається потужності, можна переміщати зону осадження уздовж труб без переміщення самої трубки, що забезпечує можливість пошарового осадження скла періодичною зміною НВЧ-потужності, що підводиться до плазми від зовнішнього джерела.

Рисунок 6.5. Структура технологічної установки осадження по методу SPCVD: 1 – зона осадження, 2 – опорна трубка, 3 – піч, 4 – збуджувач заряду, 5 – плазменна колонка, 6 – вихід до насоса, 7 – азотна пастка, 8 – магнетрон, 9 – фотодатчик, 10 – підкладка, 11 – інтерфейс

Таблиця 6.3

**Основні парофазні методи отримання заготовок кварцового ОВ і їх характеристики**

Також дуже часто для отримання заготовок ОВ використовують комбінації указаних методів.

Висновки: в цій частині спроектовано пристрій напівпровідникового підсилювача оптичного сигналу ВОЛЗ, що працює на довжині хвилі нульової хроматичної дисперсії кварцових волокон - 1,3 мкм. Пристрій забезпечує збільшення відстані, на яке передається оптичний сигнал від джерела до приймача випромінювання. Напівпровідникові підсилювачі оптичного сигналу будуються на принципах посилення потужності надходить на них випромінювання за рахунок механізмів, схожих на ті, які відбуваються в інжекційних лазерах на основі напівпровідникових гетероструктур. Новизна проекту полягає в розробці ВОЛЗ з посиленням оптичного сигналу в спектральному діапазоні 1.3 мкм, що характеризуються нульовою хроматичною дисперсією, де використання інших видів оптичного посилення проблематично. Практична значимість спроектованого пристрою полягає в можливості її використання для міжміського, міжрегіональної та міждержавної зв'язку, в тому числі, в якості магістральної підводного лінії (при відповідному проектуванні кабелю). Також виконані необхідні обґрунтування і розрахунки технічних параметрів пристрою. Розроблено заходи щодо безпеки життєдіяльності та охорони навколишнього середовища.

#### 7. ЗАСТОСУВАННЯ ВОЛОКОННИХ ЛАЗЕРІВ

Відмітна риса однопрогонових оптичних ліній зв'язку - відсутність необхідності в підводі електроживлення до проміжних точках лінії. Така конструкція дозволяє істотно знизити вартість будівництва і експлуатації лінії в складних зовнішніх умовах. Зокрема, однопрогонові лінії зв'язку широко використовуються для організації зв'язку між островами, віддаленими прибережними містами, узбережжям і нафтовими платформами на шельфі, а також для створення відводів від підводних магістральних ліній зв'язку (рис. 7.1).[34]

Рис. 7.1. Однопролітні лінії зв'язку: а - між островами; б - для з'єднання прибережних міст; в - для з'єднання з буровими платформами; г - для з'єднання міст, розділених пустелею; д - для прокладки по дну річок; е - для прокладки в малонаселених районах

Рекордна дальність однопролітної лінії на сьогоднішній день складає більше 500 км і досягається при використанні оптичних підсилювачів з віддаленої накачуванням (remote optically pumped amplifier, ROPA) і спеціального оптичного волокна з низькими втратами. Максимальна швидкість передачі інформації на відстань більше 500 км складає 1 Тбіт / с (10 каналів по 100 Гбіт / с) [34].

На практиці більш поширене завдання будівництва однопрогонових ліній зв'язку максимальної дальності з використанням існуючого (стандартного) волокна і без модернізації кабельної інфраструктури (тобто без установки ROPA).

Для організації однопрогонових ліній зв'язку великої протяжності можуть застосовуватися різні схеми. Крім ербієвих підсилювачів на вході в лінію (бустер) і перед приймачем (попередній) в однопрогонових лініях великої протяжності також можуть використовуватися різні додаткові способи посилення сигналу:

- ербієві підсилювачі з віддаленої накачуванням;
- розподілене раманівське посилення в телекомунікаційному волокні.

Накачування підсилювачів може здійснюватися як в попутному (з боку передавача), так і в зустрічному (з боку приймача) напрямку. Для доставки випромінювання накачування може використовуватися як телекомунікаційне волокно, в якому поширюється сигнал, так і додаткове волокно або волокна.

Таким чином, можуть бути реалізовані десятки різних схем з різними комбінаціями підсилювачів, кожна з яких має свої особливості.

Найбільший інтерес для операторів зв'язку представляють схеми, які дозволяють організувати однопролітну лінію максимальної дальності з використанням двох волокон (по одному волокну в кожному напрямку). Типові схеми для організації таких ліній представлені на рис. 7.2 в порядку зростання складності.

#### Рис. 7.2. Типові схеми однопролітних ліній без ROPA

Дорожчі і складніші рішення, як правило, забезпечують більшу дальність передачі сигналу. У той же час в складних рішеннях може бути обмежена кількість DWDM-каналів. Підбір і розрахунок оптимальної схеми повинні виконуватися фахівцями з урахуванням специфіки кожного конкретного завдання.

Найпростіший варіант організації однопролітної лінії вимагає використання двох ербієвих підсилювачів: на вході в лінію (бустер) і перед приймачем (попередній) (рис. 7.2, а). Додаткове посилення сигналу можна забезпечити за рахунок раманівського посилення в телекомунікаційному волокні. Для цього в зустрічному напрямку в лінію вводиться випромінювання накачування (наприклад, на довжині хвилі 1450 нм) (рис. 7.2, б). Ще більшого посилення можна домогтися за рахунок введення випромінювання накачування і в попутному напрямку (рис. 7.2, в).

Для подальшого збільшення довжини прольоту необхідно використовувати ербієві підсилювачі з віддаленим накачуванням (ROPA).

У найпростішому випадку лінія ділиться на дві ділянки, між якими встановлюється відрізок волокна, легованого ербієм. Цей відрізок волокна використовується як ербієвий підсилювач з віддаленої накачуванням. Накачування для цього ербієвого підсилювача вводиться в волокно на довжині хвилі 1480 нм в зустрічному напрямку. Крім того, завдяки накачуванню на довжині хвилі 1480 нм, в цій схемі виникає також додаткове посилення сигналу за рахунок раманівського посилення в телекомунікаційному волокні.

Лінія може бути поділена не на дві, а на три ділянки, між якими встановлюються два ербієвих підсилювача з віддаленим накачуванням. Накачування для підсилювача, розташованого ближче до приймача (B-ROPA), вводиться в волокно на довжині хвилі 1480 нм в зустрічному напрямку, а для підсилювача, розташованого ближче до передавача (F-ROPA), - в попутному напрямку. Для більшої ефективності накачування її можна доставляти до ROPA з використанням додаткових волокон, які з'єднуються з телекомунікаційним волокном сплітерами.

Використання додаткового ROPA з накачуванням в попутному напрямку (F-ROPA) може дати істотний вигреш в відстані, але тільки для невеликого числа каналів (1-3) і для високих швидкостей передачі в каналі (тобто для 2,5 Гбіт / с вигреш невеликий).

Висновок. Максимальна довжина однопролітних ліній зв'язку зі швидкістю 100 Гбіт / с становить на сьогоднішній день близько 560 км [34] і зменшується при збільшенні пропускну здатності. Максимальна довжина лінії з пропускну здатністю 1 Тбіт / с (10 каналів по 100 Гбіт / с) становить понад 500 км [34]. Однак для досягнення рекордної дальності передачі в одному прольоті потрібно використовувати спеціальне волокно з наднизьким загасанням і ербієві підсилювачі з віддаленим накачуванням по додаткових волокнах.

#### Перспективи в телекомунікації, медицині і мікроскопії

Хоча з моменту створення першого лазера пройшло більше півстоліття, ще й досі з'являються нові типи лазерів. Іноді новизна полягає в заміні старих компонент новими, що володіють кращими властивостями, а іноді - в використанні нових принципів дії. Саме таким є розроблений волоконний лазер, заснований на генерації нелінійно-пов'язаних дисипативних солітонів.

Лазер, названий «ДС / РДС лазером», заснований на досить складній концепції: він поєднує в собі високу енергію імпульсів і широкий спектр випромінювання - раніше недосяжне поєднання критичних лазерних параметрів. Висока енергія імпульсів необхідна для реалізації нелінійних оптичних експериментів, наприклад, для перетворення випромінювання в нові спектральні діапазони. Чим вище енергія імпульсів, тим ефективніше будуть генеруватися нові спектральні компоненти. Створений лазер дозволяє не тільки значно збільшити енергію імпульсу й розширити його спектр. Якщо об'єднати всі згенеровані лазері імпульси різних кольорів, то вони будуть виглядати на шкалі частот як «гребінка» рівновіддалених піків з ширинами, порівнянними з відстанями між ними.

Якщо заповнити «дірки» між піками, то вийшов суцільний сумарний спектр в ідеалі дав би короткий (десятки фемтосекунд) світловий імпульс високої енергії.

Перевага оптичної спектроскопії в порівнянні з застосовуваною зараз мас-спектрометрією - можливість швидкого і глобального порівняння спектрів поглинання біопроб досліджуваних груп пацієнтів з контрольними групами. Основна технічна проблема такої діагностики в даний час полягає в відсутності ширококуглових лазерів середнього інфрачервоного діапазону. А всі біопробі дуже сильно поглинають випромінювання якраз в цьому діапазоні. Через відсутність лазерів доводиться будувати спеціальні схеми для перетворення наявного випромінювання в цю область спектра. Такі схеми малоефективні, і тому, для того щоб отримати на виході впевнено детектований сигнал, вимагають на вході значної енергії інфрачервоного лазера.

Наявність дуже широкого безперервного спектра середнього інфрачервоного діапазону дозволяє здійснювати близькопольову мікроскопію біологічних об'єктів з просторовим розширенням в десятки нанометрів. Уже зараз такий підхід дозволяє досліджувати in vitro структуру кісток у хворих, які страждають на остеопороз, або зубів. Наприклад, виявлено, що зуби пронизані каналами незрозумілого призначення розміром менше мікрона. Нелінійна (лазерна) оптична мікроскопія дозволяє визначати просторові характеристики біологічних об'єктів с дозволом в мікрометри (що досить для візуалізації клітин), причому не тільки in vitro, але і in vivo. Як правило, цей вид мікроскопії вимагає маркерів, що потрапляють в пухлини і флюоресціюють в певному діапазоні спектра, детектованому в експерименті. Наявність широкого інфрачервоного спектра лазера дозволяє використовувати великий набір маркерів і оптимізувати при цьому пропускання тканин, також залежне від довжини хвилі. Розроблений ДС / РДС лазер [35] має хороші перспективи в обох видах мікроскопії.

#### **8. ПРОПОЗИЦІЇ ДО СТАРТАП ПРОЕКТУ**

Розвиток всього людства напряму залежить від рівня освіти кожної людини в у всьому світі. І ні для кого не секрет, що в деяких країнах , наприклад країни Африки, є удже великою проблемою отримання вищої освіти. Тому моя ідея стартапу полягає в тому, щоб допомогти покращити рівень освіти в країнах Африки, шляхом під'єднання їх до високошвидкісних мереж інтернет. Тоді кожна, проживаюча там людина, зможе безперешкодно навчатись онлайн, і нарешті вирішити достатньо велику кількість проблем, зв'язаних з недостатньою або неякісною освітою громадян.

Для реалізації цієї ідеї потрібно створити декілька основних магістральних мереж, від яких потім буде створено інші регіональні і локальні мережі.

На сьогодні карта магістральних мереж Африки виглядає так (рис. 8.1):

Рисунок 8.1. Карта магістральних мереж Африки 2019р.

Як бачимо на карті, магістральні лінії дуже неефективні. Швидкості з'єднання недостатні для 1,2 млрд. (населення Африки 2016р.) [36]. І це підтверджується статистичними даними [37]: менше 2 Мбіт/с середня швидкість інтернету, яку може підключити собі пересічний житель Африки, за умови, якщо в нього є на це достатня кількість коштів. Адже ціна за послугу з підключення і плата за тарифний план в декілька раз вище, ніж в інших країнах світу.

Також потрібно додати, що в деяких країнах: ЮАР, Єгипет, Марокко, Руанда, не все так критично з доступом до інтернету. В даних країнах є чимала кількість інтернет провайдерів, тому швидкість інтернету і ціна є достатньою для навчання в цілому.

Висновки. Як бачимо в Африці є велика кількість проблем з інтернетом, але в деяких країнах, все ж повільно, але рухаються до ери високошвидкісного інтернету. На мою думку, наше завдання – це допомогти їм в цьому.

#### **ВИСНОВКИ:**

У результаті виконання дипломної роботи «Волоконні лазери в системах передачі інформації» дійшли наступних висновків.

1. Проаналізувавши всю технологію волоконно-оптичної передачі інформації визначили, що останнім часом особлива увага приділяється не тільки високошвидкісним магістральним ВОЛЗ, а й локальним системам. Масові локальні волоконно-оптичні системи передачі повинні забезпечити завантаженість регіональних і магістральних ВОЛЗ, підвищити ефективність волоконно-оптичних мереж зв'язку.
2. Поява нових високоєфективних лазерів для локальних мереж дозволяє значно підвищити швидкість і дальність передачі інформації в ВОЛЗ на основі багатомодових волокон. Однак при цьому з'являється проблема «центрального провалу» в багатомодових волокнах, пов'язана з недосконалістю технології виготовлення заготовок для цих світловодів. Значні відхилення профілю показника заломлення від оптимального в центрі волокна викликали різке збільшення дисперсії в разі використання сучасних лазерів. Ця проблема багатомодового волокна була вирішена, що відкрило нові можливості в розвитку локальних ВОЛЗ і волоконно-оптичних систем в цілому.
3. Розглянуто три типи ВС:
  - а) активні ВС, леговані вісмутом, перспективніші для створення волоконних лазерів та оптичних підсилювачів для спектральних областей 1200 – 1500 і 1600 – 1800 нм, в які не потрапляють смуги люмінесценції ефективних РЗЕ;
  - б) багатосерцевинні ВС (одномодові і маломодові) для волоконно-оптичних систем просторового ущільнення каналів;
  - в) мікроструктурні порожнисті ВС з низькою нелінійністю і з потенційно меншими оптичними втратами, ніж у світловодів на основі кварцового скла;
4. Розробка легованих вісмутом ВС на основі кварцового скла і їх використання в якості активного середовища дозволило створити сімейство досить ефективних волоконних лазерів, що працюють в спектральній області 1140 – 1775 нм. Але є ряд проблем, які ще не вирішили:
  - а) не цілком ясна природа і структура вісмуткових активних центрів;
  - б) ефективна генерація вісмуткових волоконних лазерів реалізована лише при дуже низьких концентраціях вісмуту (~ 0,01 ат. %);
  - в) досягнута ефективність вісмуткових волоконних лазерів поки нижче ефективності рідкоземельних волоконних лазерів.
5. Стандартні багатомодові світловоди з діаметром серцевини 50 мкм і більше не дуже підходять для збільшення швидкості передачі, бо при великій кількості мод їх постійні поширення занадто близькі одна до одної, тому сигнали швидко перемішуються. З цієї причини в основному використовуються так звані маломодові світловоди, в яких можливе поширення тільки декількох мод.
6. Використання всередині волокна брегівських решіток показника заломлення в якості розподілених відбивачів забезпечує компактність і високу стабільність волоконних лазерів.
7. Дзеркала резонатора волоконного лазера забезпечують багаторазове проходження випромінювання лазера через посилюючу середу (активний світловод), і якщо досягається поріг генерації (коефіцієнт посилення перевищує сумарні втрати при подвійному проході між дзеркалами), потужність випромінювання різко зростає. Проте потужність випромінювання не може зростати до нескінченності, і її величина стабілізується на деякому стаціонарному рівні, визначеному ефектом насичення: коли посилення випромінювання стає рівним його втрагам в резонаторі. Слід зазначити, що якщо дзеркала резонатора нанесені на торець активного світловода, то, на відміну від інших лазерних джерел випромінювання, в волоконному лазері відсутні дифракційні втрати потужності.
8. Описано експеримент по дослідженню потужності вісмуткового волоконного лазера, в якому показано залежності потужності накачки і потужності лазерного випромінювання від потужності накачки введених у волокно для чотирьох лазерів, дожин хвиль випромінювання 1150, 1160, 1205 та 1215 нм. Довжина волокна в кожному випадку була 80 м. Лазери на довжинах хвиль 1150 і 1160 нм демонстрували максимальну продуктивність

відповідно 19% і 21%, і максимальну вихідну потужність 13 і 15 Вт, відповідно. Більша частина випромінювання накачки у всіх чотирьох лазерах була поглинута. Чим довша довжина хвилі генерації в області 1150 – 1205 нм, тим нижче ефективність лазера. Насиченість вихідної потужності волоконного лазера Ві на рівні 5 Вт спостерігалася на довжині хвилі 1215 нм. Виявлено ненасичені оптичні втрати в волокнах, що становить приблизно одну третину загальної Ві-індукованої абсорбції.

9. При моделюванні процесу стаціонарної генерації одномодового волоконного ітербієвого лазера, розроблена модель розрахунку безперервних волоконних лазерів, заснована на чисельному рішенні швидкісних рівнянь, показує співставні результати з комерційною програмою. При цьому отримано, що не врахування радіального розподілу поля моди, може призводити до помилки оптимізації ККД лазера до 6%.



## Схожість

Схожість із джерелами з Інтернету

63

1	<a href="http://www.8ref.com/18/referat_188996.html">http://www.8ref.com/18/referat_188996.html</a>	4.26%
2	<a href="https://knowledge.allbest.ru/radio/2c0b65635a3ad69b5d53a89521306d36_0.html">https://knowledge.allbest.ru/radio/2c0b65635a3ad69b5d53a89521306d36_0.html</a>	2 Джерело 4%
4	<a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/22968/1/Veremeienko_magistr.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/22968/1/Veremeienko_magistr.pdf</a>	3.91%
6	<a href="http://um.co.ua/2/2-9/2-91452.html">http://um.co.ua/2/2-9/2-91452.html</a>	2 Джерело 1.72%
7	<a href="https://ukrbukva.net/page,4,75042-Issledovanie-temperaturnogo-tusheniya-lyuminescencii-v-kristalle-aktivirovannom-ionami-...">https://ukrbukva.net/page,4,75042-Issledovanie-temperaturnogo-tusheniya-lyuminescencii-v-kristalle-aktivirovannom-ionami-...</a>	1.48%
8	<a href="http://ni.biz.ua/6/6_9/6_92018_sd---strukturnaya-shema-opticheskikh-sistem-peredachi-ponyatie-opticheskogo-lineynogo-trakta...">http://ni.biz.ua/6/6_9/6_92018_sd---strukturnaya-shema-opticheskikh-sistem-peredachi-ponyatie-opticheskogo-lineynogo-trakta...</a>	1.46%
9	<a href="https://ukrbukva.net/page,13,47269-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html">https://ukrbukva.net/page,13,47269-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html</a>	1.24%
10	<a href="http://4ua.co.ua/physics/xb2bc78a4d43b89521206c26_0.html">http://4ua.co.ua/physics/xb2bc78a4d43b89521206c26_0.html</a>	1.14%
11	<a href="http://bukvar.su/fizika/page,3,61725-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html">http://bukvar.su/fizika/page,3,61725-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html</a>	1.12%
12	<a href="http://ukrefs.com.ua/print:page,1,61725-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html">http://ukrefs.com.ua/print:page,1,61725-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html</a>	2 Джерело 1.03%
13	<a href="https://ukrbukva.net/page,9,9114-Sovremennoe-sostoyaniye-neftepererabotki-i-neftehimii.html">https://ukrbukva.net/page,9,9114-Sovremennoe-sostoyaniye-neftepererabotki-i-neftehimii.html</a>	2 Джерело 1.02%
14	<a href="http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/11221/2/Conf_2010v1_Diachuk_T-Rozvytok_optovolokonnykh_linii_37.pdf">http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/11221/2/Conf_2010v1_Diachuk_T-Rozvytok_optovolokonnykh_linii_37.pdf</a>	1.02%
15	<a href="https://ukrbukva.net/page,17,47269-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html">https://ukrbukva.net/page,17,47269-Volokonnaya-optika-i-ee-primeneniye.html</a>	0.85%
16	<a href="https://ukrbukva.net/page,13,75284-Issledovanie-parametrov-i-anomaliy-dlinnoy-opticheskoy-linii.html">https://ukrbukva.net/page,13,75284-Issledovanie-parametrov-i-anomaliy-dlinnoy-opticheskoy-linii.html</a>	0.76%
17	<a href="https://ukrbukva.net/page,6,57881-Osnovnye-harakteristiki-komponentov-voikonno-opticheskikh-sistem-peredachi.html">https://ukrbukva.net/page,6,57881-Osnovnye-harakteristiki-komponentov-voikonno-opticheskikh-sistem-peredachi.html</a>	0.7%
18	<a href="https://leksii.net/4-91113.html">https://leksii.net/4-91113.html</a>	0.66%
20	<a href="https://ua-referat.com/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D...">https://ua-referat.com/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D...</a>	0.58%
22	<a href="https://leksii.net/4-91100.html">https://leksii.net/4-91100.html</a>	2 Джерело 0.52%
24	<a href="http://uadoc.zavantag.com/text/11154/index-1.html">http://uadoc.zavantag.com/text/11154/index-1.html</a>	2 Джерело 0.48%
25	<a href="http://uk.x-pdf.ru/5raznoe/1358054-36-shanovni-naukovci-aspiranti-studenti-tret-tisyacholittya-znamenu-tsya-burhlivim-rozvitk..">http://uk.x-pdf.ru/5raznoe/1358054-36-shanovni-naukovci-aspiranti-studenti-tret-tisyacholittya-znamenu-tsya-burhlivim-rozvitk..</a>	0.47%

26	<a href="http://susolya-byk.narod.ru/vosp/9.htm">http://susolya-byk.narod.ru/vosp/9.htm</a>	0.47%
27	<a href="http://um.co.ua/4/4-10/4-105361.html">http://um.co.ua/4/4-10/4-105361.html</a>	0.46%
28	<a href="https://jak.koshachek.com/articles/referat-voлокonnij-lazer.html">https://jak.koshachek.com/articles/referat-voлокonnij-lazer.html</a>	2 Джерело 0.37%
30	<a href="https://docplayer.net/73111627-Poverhnevi-ta-kontaktни-yavishcha-v-napivprovodnikovih-strukturah.html">https://docplayer.net/73111627-Poverhnevi-ta-kontaktни-yavishcha-v-napivprovodnikovih-strukturah.html</a>	4 Джерело 0.32%
31	<a href="https://studopedia.su/11_59673_fizichni-osnovi-dzherel-viprominyuvannya.html">https://studopedia.su/11_59673_fizichni-osnovi-dzherel-viprominyuvannya.html</a>	0.31%
32	<a href="https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/20746/4319.pdf?sequence=3&amp;isAllowed=y">https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/20746/4319.pdf?sequence=3&amp;isAllowed=y</a>	2 Джерело 0.28%
33	<a href="https://ukrbukva.net/page,13,57881-Osnovnye-harakteristiki-komponentov-voлокono-opticheskikh-sistem-peredachi.html">https://ukrbukva.net/page,13,57881-Osnovnye-harakteristiki-komponentov-voлокono-opticheskikh-sistem-peredachi.html</a>	0.28%
35	<a href="http://um.co.ua/8/8-18/8-187956.html">http://um.co.ua/8/8-18/8-187956.html</a>	2 Джерело 0.26%
36	<a href="https://ukrbukva.net/page,5,75042-Issledovanie-temperaturnogo-tusheniya-lyuminescencii-v-kristalle-aktivirovannom-ionami-...">https://ukrbukva.net/page,5,75042-Issledovanie-temperaturnogo-tusheniya-lyuminescencii-v-kristalle-aktivirovannom-ionami-...</a>	0.26%
37	<a href="http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/9499/1/Afanasieva_FM_2.pdf">http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/9499/1/Afanasieva_FM_2.pdf</a>	0.24%
38	<a href="https://docplayer.net/50339319-Osnovi-fiziki-napivprovodnikov-i-napivprovodnikovih-priladiv.html">https://docplayer.net/50339319-Osnovi-fiziki-napivprovodnikov-i-napivprovodnikovih-priladiv.html</a>	0.22%
39	<a href="http://osadchuk_ov.vk.vntu.edu.ua/file/84e7806986f326148062270ee6b4d8e2.pdf">http://osadchuk_ov.vk.vntu.edu.ua/file/84e7806986f326148062270ee6b4d8e2.pdf</a>	2 Джерело 0.21%
40	<a href="https://studfile.net/preview/5206993/page:2">https://studfile.net/preview/5206993/page:2</a>	0.2%
42	<a href="https://studfile.net/preview/5461664/page:58">https://studfile.net/preview/5461664/page:58</a>	0.14%
45	<a href="https://leksii.com/1-128794.html">https://leksii.com/1-128794.html</a>	2 Джерело 0.08%
47	<a href="https://studopedia.su/9_71518_svitloviprominyuyuchi-diodi.html">https://studopedia.su/9_71518_svitloviprominyuyuchi-diodi.html</a>	0.07%
48	<a href="http://uadoc.zavantag.com/text/747/index-2.html">http://uadoc.zavantag.com/text/747/index-2.html</a>	2 Джерело 0.07%
49	<a href="http://uadoc.zavantag.com/text/29361/index-1.html">http://uadoc.zavantag.com/text/29361/index-1.html</a>	0.06%
51	<a href="https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28969/1/Stupak_bakalavr.pdf">https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28969/1/Stupak_bakalavr.pdf</a>	3 Джерело 0.05%
52	<a href="http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2008/conf_2008.pdf">http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2008/conf_2008.pdf</a>	0.04%
53	<a href="https://docplayer.net/84546610-Elektronniy-pidruchnik-z-grifom-zatverdzheno-mon-ukrayini-list-1-vid-r.html">https://docplayer.net/84546610-Elektronniy-pidruchnik-z-grifom-zatverdzheno-mon-ukrayini-list-1-vid-r.html</a>	0.04%
54	<a href="https://stud.com.ua/29434/etika_ta_estetika/problemi_funktsionuvannya_morali_suchasniy_rosiyi">https://stud.com.ua/29434/etika_ta_estetika/problemi_funktsionuvannya_morali_suchasniy_rosiyi</a>	0.04%

55 [http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/Mastertheses/2018/Bitov\\_M.pdf](http://ed.kpi.ua/wp-content/uploads/Mastertheses/2018/Bitov_M.pdf)

4 Джерело 0.04%

Схожість по Бібліотеці акаунту

31

3	Веремеєнко	ID файлу: 5444158	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Ins	2 Джерело	3.96%
5	Студентська робота	ID файлу: 3674780	Institution: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University		3.29%
19	Студентська робота	ID файлу: 1584560	Institution: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University		0.58%
21	Студентська робота	ID файлу: 1112343	Institution: Lviv Polytechnic National University		0.55%
23	Студентська робота	ID файлу: 110167	Institution: Lviv Polytechnic National University		0.51%
29	диплом Бреславский	ID файлу: 6019527	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic In...		0.37%
34	Студентська робота	ID файлу: 1059360	Institution: Lviv Polytechnic National University		0.28%
41	Студентська робота	ID файлу: 1000736965	Institution: Lviv Polytechnic National University		0.16%
43	2019_ Клименко Владислав_ Пезофототронний ефект в діодних ст	ID файлу: 1000786846	Institution: Nation...		0.12%
44	2019_ Чирук Василь_ Датчики зображення на КМОН_fch	ID файлу: 1000785151	Institution: National T	3 Джерело	0.09%
46	Студентська робота	ID файлу: 1000073751	Institution: Lviv Polytechnic National University		0.08%
50	ХП-51 Огеренко	ID файлу: 1000057151	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Insti...		0.05%
56	ЛОК_МЕТОД	ID файлу: 8373232	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Ins	9 Джерело	0.04%
57	Студентська робота	ID файлу: 3666037	Institution: Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University	7 Джерело	0.04%