

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

Іван ПРОЦЕНКО
15 липня 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня бакалавра

зі спеціальності 171 Електроніка освітньо-професійної програми «Електронні інформаційні системи» на тему: **ЕЛЕМЕНТИ ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ: РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВВЕДЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО**

Здобувача групи ЕП – 91 Кабилецького Кирила Сергійовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Кирил КАБИЛЕЦЬКИЙ

Керівник доцент кафедри електроніки,
загальної та прикладної фізики,
к.ф.-м.н., доцент

Ірина ПАЗУХА

Суми – 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю.Проценко

«29» травня 2023 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА
Кабилецього Кирила Сергійовича

1. Тема роботи: Елементи оптичного зв'язку: розрахунок ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно
затверджена наказом по університету від «15» травня 2023 р., № 0499-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 09 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

До основних характеристик елементів зв'язку між джерелом лазерного випромінювання та оптичним волокном відносяться ефективність введення та мода вибірковість. Ефективність введення лазерного випромінювання характеризують коефіцієнтом ефективності, який залежить від: взаємного розміщення випромінювача й волокна; площі поверхні випромінення та внутрішнього діаметра волокна; відбиття випромінення від торців світловода; прозорості оптичних елементів системи.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у вивченні практичних методів, що застосовуються для збільшення ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно та розробці лабораторного стенд, який дозволяє проводити вимірювання зміни оптичної потужності джерела лазерного випромінювання (наприклад, напівпровідникового лазеру), внаслідок безпосереднього введення лазерного випромінювання в оптоволокно.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Оптичний зв'язок: основні поняття та принципи.
2. Методи узгодження світловода з джерелом випромінювання.
3. Методика експериментального вимірювання ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно.
4. Експериментальні результати.
5. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 Слайди № 1-2 – Загальна інформація
 Слайди № 3-6 – Волоконно-оптичні лінії зв'язку: основні поняття та принципи побудови
 Слайди № 7-9 – Методи узгодження світловода з джерелом випромінювання
 Слайди № 10 – Методика експерименту
 Слайди № 11-13 – Експериментальні результати
 Слайд № 14 – Висновки

6. Дата видачі завдання 30.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 02.06.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 06.06.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 09.06.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	12.06.2023 р., 10 ⁰⁵ (дистанційно)	<i>вик.</i>
5.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	20-23.06.2023 р., 10 ⁰⁵ (дистанційно)	<i>вик.</i>

Здобувач вищої освіти

К.С. Кабилецький

Керівник роботи

І.М. Пазуха

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 38 сторінках, зокрема, містить 18 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 21 найменувань.

Розробка та впровадження технології оптичного мультиплексування дозволило реалізувати принципово нові концепції при побудові мереж зв'язку на різних рівнях (локальному, регіональному та глобальному), а саме створити оптичні мережі, для яких характерним є використання не оптоелектронних, а оптичних технологій. Широке практичне використання та розвиток оптичних мереж зумовлює необхідність підвищення їхньої ефективності та надійності. Правильний розрахунок ефективності лазерного випромінювання, що надходить в оптичне волокно, дає змогу оптимізувати параметри системи зв'язку, забезпечуючи максимальну передачу сигналу без зайвих втрат. Це має велике значення для різних галузей, де надійне передавання інформації має вирішальне значення, таких як телекомунікації, медицина та промисловість.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у вивченні практичних методів, що застосовуються для збільшення ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно та розробці лабораторного стенд, який дозволяє проводити вимірювання зміни оптичної потужності джерела лазерного випромінювання (наприклад, напівпровідникового лазера), внаслідок безпосереднього введення лазерного випромінювання в оптоволокно.

У ході виконання роботи було розроблено лабораторний стенд, який дозволяє проводити вимірювання зміни оптичної потужності джерела лазерного випромінювання (наприклад, напівпровідникового лазера), внаслідок безпосереднього введення лазерного випромінювання в оптоволокно. Показано, що відносна ефективність введення лазерного випромінювання напряму залежить від типу та потужності випромінювання лазера та технологічних характеристик оптоволоконна.

Ключові слова: ОПТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЕФЕКТИВНОСТІ ВВЕДЕННЯ, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ПІДСИЛЮВАЧ.

ЗМІСТ

с.

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ОПТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК: ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ	7
1.1 Волоконно-оптичні лінії зв'язку.....	7
1.1.1 Структурна схема лазерної лінії зв'язку.....	9
1.1.2 Лазерні передавачі – джерело оптичного сигналу	9
1.2 Елементи оптичного зв'язку та їх функції	12
1.3 Актуальні проблеми волоконно-оптичних ліній зв'язку.....	14
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ УЗГОДЖЕННЯ СВІТЛОВОДА З ДЖЕРЕЛОМ ВИПРОМІНЮВАННЯ	18
2.1 Оцінка ефективності прямого стикування джерела і світловода.....	18
2.2 Введення випромінювання у світловод комбінаціями лінз	20
2.3 Розрахунок ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно	22
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВВЕДЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО	26
3.1 Методика експериментального вимірювання ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно	26
3.2 Експериментальні результати	29
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

ВСТУП

У сучасному суспільстві, що швидко розвивається, необхідні надійні та ефективні засоби передавання інформації з широкою смугою пропускання і мінімальними втратами сигналу. У цьому контексті оптичний зв'язок виявляється однією з найперспективніших технологій для передачі даних на великі відстані з високою швидкістю та мінімальними втратами.

Одним із найважливіших елементів оптичного зв'язку є введення лазерного променя в оптичне волокно. Ефективність цього процесу залежить від низки чинників, включно з положенням джерела світла, фокусуванням променя і властивостями волокна. Розрахунок ефективності лазерного опромінення оптичного волокна є важливим завданням для поліпшення якості передавання сигналу та забезпечення оптимальних умов роботи оптичних систем зв'язку.

Актуальність цієї теми зумовлена постійним розвитком оптичних мереж і необхідністю підвищення їхньої ефективності та надійності. Правильний розрахунок ефективності лазерного випромінювання, що надходить в оптичне волокно, дає змогу оптимізувати параметри системи зв'язку, забезпечуючи максимальну передачу сигналу без зайвих втрат. Це має велике значення для різних галузей, де надійне передавання інформації має вирішальне значення, таких як телекомунікації, медицина та промисловість.

Мета даної роботи полягає у вивченні практичних методів, що застосовуються для збільшення ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно та розробці лабораторного стенд, який дозволяє проводити вимірювання зміни оптичної потужності джерела лазерного випромінювання (наприклад, напівпровідникового лазера), внаслідок безпосереднього введення лазерного випромінювання в оптоволокно.

Результати даної роботи були представлені на Міжнародній науковій конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ :: 2023» (м. Суми, 2023).

РОЗДІЛ 1 ОПТИЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК: ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ

1.1 Волоконно-оптичні лінії зв'язку

Волоконно-оптичні лінії зв'язку є ключовою інфраструктурою сучасних телекомунікаційних систем. Вони використовують волоконно-оптичний кабель для передачі інформації у вигляді світлових сигналів. Ця технологія дозволяє передавати велику кількість даних на великі відстані з високою швидкістю і мінімальними втратами сигналу (рис. 1.1).

Спрощену блок-схему волоконно-оптичної системи зв'язку показано на рис. 1.3. Сигнал, що передається, надходить через імпульсно-кодовий модулятор (ІКМ-лінія) і перетворювач коду (ПК) на оптичний передавач за допомогою електрооптичного перетворювача (ЕОП), який являє собою напівпровідниковий лазер; ІКМ-лінія та перетворювач коду створюють послідовність кодових імпульсів, а пристрій, що погоджує, (ПП) узгоджує ЕОП і оптичний кабель (ОК) для узгодження. У приймачі оптоелектронний перетворювач (ОЕП) перетворює оптичний сигнал в електричний; в ОЕП використовується напівпровідниковий фотодіод, і електричний сигнал збуджується світловим потоком, що проходить через СК; з ОЕП цей сигнал направляєється через ПК на демодулятор імпульсного коду (лінія PDC) [6].

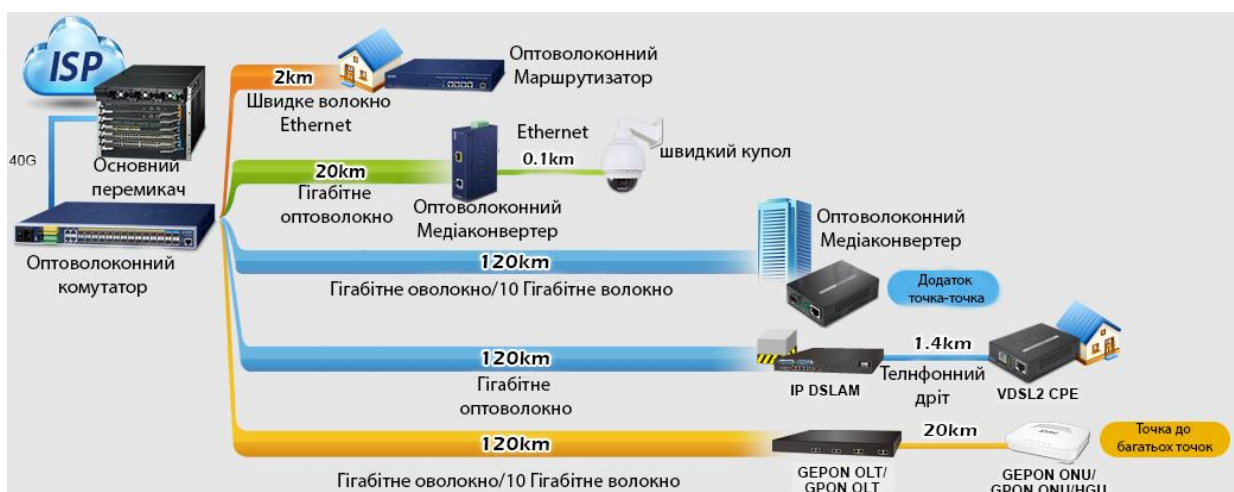


Рисунок 1.1 – Схема волоконно-оптичних ліній зв'язку [6]

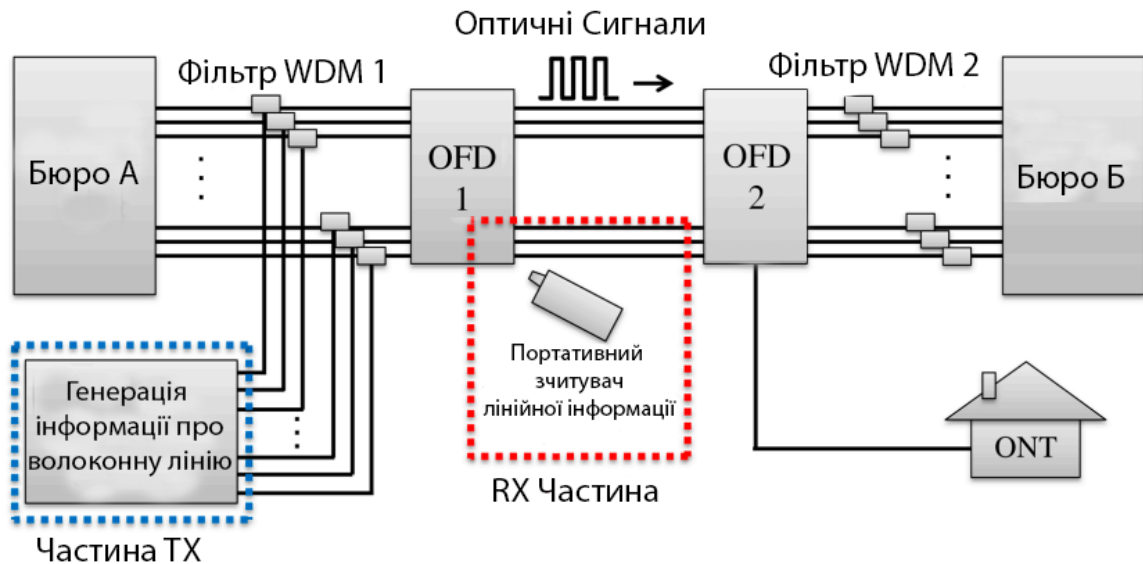


Рисунок 1.2 – Схема розробленої системи моніторингу та управління оптоволоконними лініями зв'язку. OFD: розподіл оптичних волокон, ONT: термінація оптичної мережі, WDM: мультиплексування за довжиною хвилі, TX: передавач, RX: прийом [2]

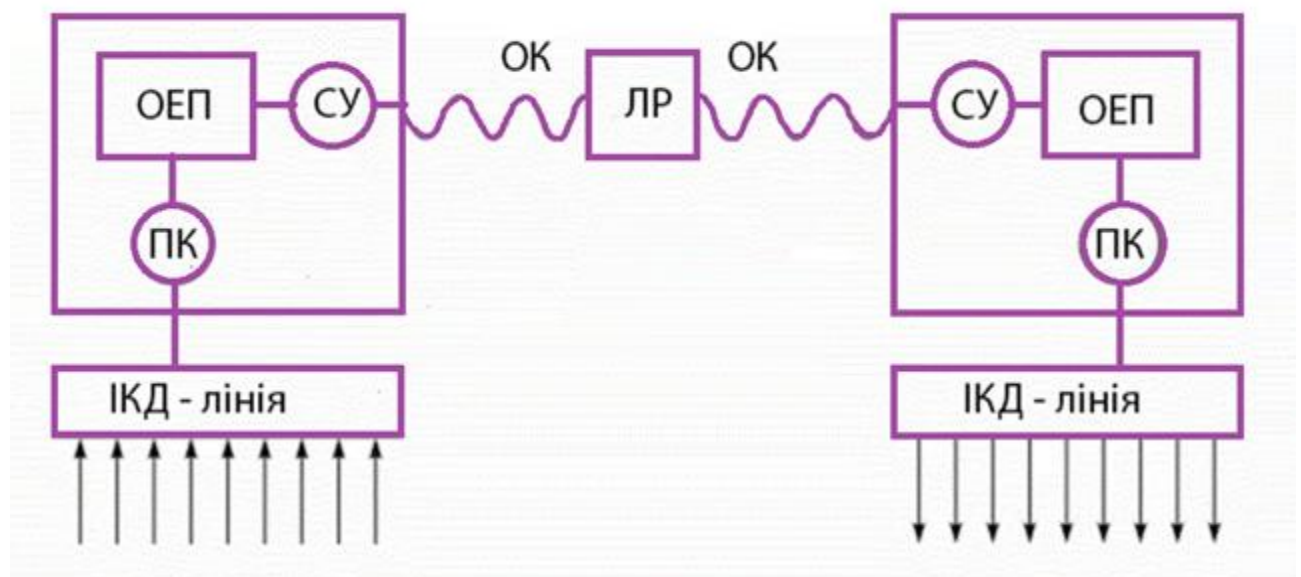


Рисунок 1.3 – Спрощена структурна схема волоконно-оптичної системи зв'язку, ПК - перетворювач коду, ЕОП - електрооптичний перетворювач, ОК - оптичний кабель, ІКД - імпульсно-кодова модуляція, СУ- система управління [2]

1.1.1 Вільнопросторові оптичні лінії зв'язку

Вільнопросторові оптичні лінії зв'язку, також відомі як оптичні вільнопросторові комунікаційні системи, представляють собою технологію передачі даних, що використовує просторовий аспект світла для комунікації. Замість того, щоб передавати сигнали через традиційні оптоволоконні кабелі, вони використовують лазери або світлодіоди для випромінювання променів світла, які передаються у вільний простір.

Оптичні вільнопросторові комунікаційні системи здатні до високошвидкісної передачі даних на великі відстані. Вони використовують різноманітні технології, такі як масивні оптичні системи, що складаються зі спрямованих світлових променів, оптичні системи з використанням лінз та інші просторові розділювачі світла, щоб забезпечити передачу даних [2].

Оптичні вільнопросторові комунікаційні системи мають деякі переваги порівняно з традиційними оптоволоконними системами, такими як більша швидкість передачі даних, відсутність необхідності в кабелях та можливість передачі даних на великі відстані без погіршення сигналу. Вони можуть знайти застосування у бездротовій комунікації, мобільних мережах, безпілотних літальних апаратах та інших сферах.

1.1.2 Структурна схема лазерної лінії зв'язку

На рисунку 1.4 показано схему лазерної системи зв'язку між приймачем-передавачем на землі (приймально-передавальна станція) і приймачем-передавачем на літаку або космічному кораблі (електричні з'єднання між пристроями показано тонкими лініями, а оптичні з'єднання - товстими лініями). Оскільки лазерний випромінювач є джерелом оптичного сигналу, він має відповідати таким умовам: випромінювана потужність до 10 Вт; максимальна частота модуляції має бути вищою за 10 ГГц; довжина хвилі випромінювання повинна знаходитися в межах прозорого вікна "оптичного диска"; і спектра, який

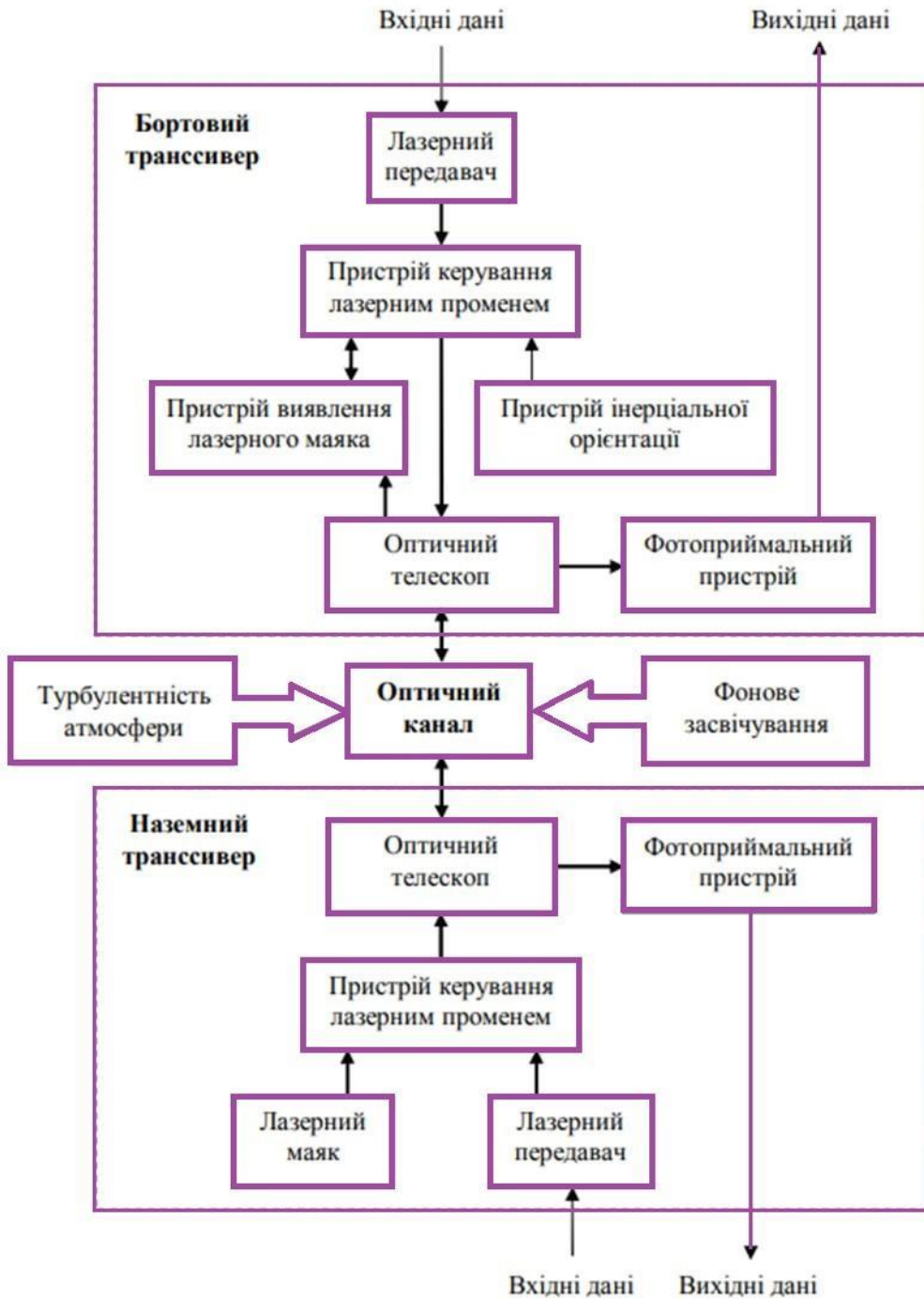


Рисунок 1.4 – Структурна схема системи лазерного зв'язку між наземним трансивером та трансивером авіаційного або космічного базування [1]

знаходиться за межами діапазону чутливості ока; - повинні мати термін служби не менше 10 років.

Лазери діоди на основі InGaAsP з довжиною хвилі $\lambda = 1550$ нм (рис. 1.5), що використовуються у волоконно-оптичних лініях зв'язку, довели свою придатність і для лазерного зв'язку. Випромінювання цих лазерів безпечніше для очей, ніж короткохвильові лазери на неодимі (1064 нм) і арсеніді галію (850 нм), оскільки вони перебувають у прозорому вікні в атмосфері. Ці лазери генерують малопотужне (до 50 мВт) одномодове випромінювання, яке посилюється за допомогою волоконно-оптичних підсилювачів [1].

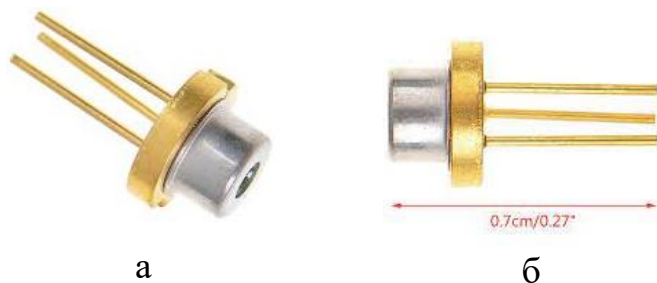


Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд лазерного діода на основі InGaAsP (а) та вид з боку (б) [3]

Для космічного лазерного зв'язку неодимовий лазер дозволяє випромінюванню $\lambda = 1,06$ мкм проникати через прозоре вікно атмосфери. Імпульси, що випускаються лазером з енергією 20 мДж і тривалістю 5 нс. На практиці, під час передавання цифрових сигналів, пропускна здатність каналу зв'язку значно нижча. Щоб збільшити смугу пропускання, намагаються збільшити f_{\max} . В експериментах частота внутрішньої модуляції лазерного діода досягала 30 ГГц (контролюючи струм інжекції), але за допомогою зовнішнього електрооптичного модулятора це значення можна збільшити до 70 ГГц.

В оптичній області передача сигналу включає в себе модуляція сигналу: частота випромінювання (близько 100 ТГц) використовується як несуча, що називається оптичною передачею несучої (частоти); коливання дуже високих частот і модуляція цим коливанням. Така передача називається передачею НВЧ-піднесучої (в діапазоні 0,1-10 ГГц).

Лазерні передавачі є ключовим компонентом лазерних ліній зв'язку і використовуються як джерело оптичного сигналу. Вони генерують монохроматичне світло в ультрафіолетовому, видимому або інфрачервоному діапазонах за допомогою ефекту стимульованої емісії. Лазерний промінь має високу напрямленість, вузьку ширину спектра і високу інтенсивність, що дозволяє передавати сигнали на великі відстані без значних втрат сигналу [3].

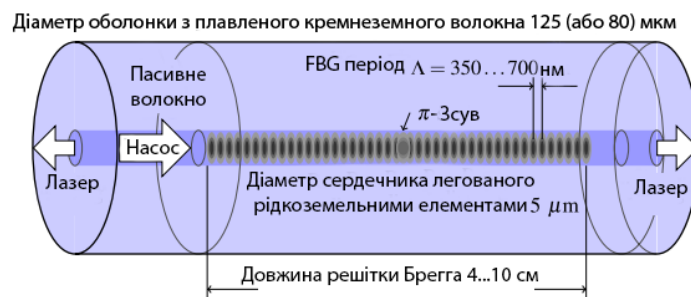
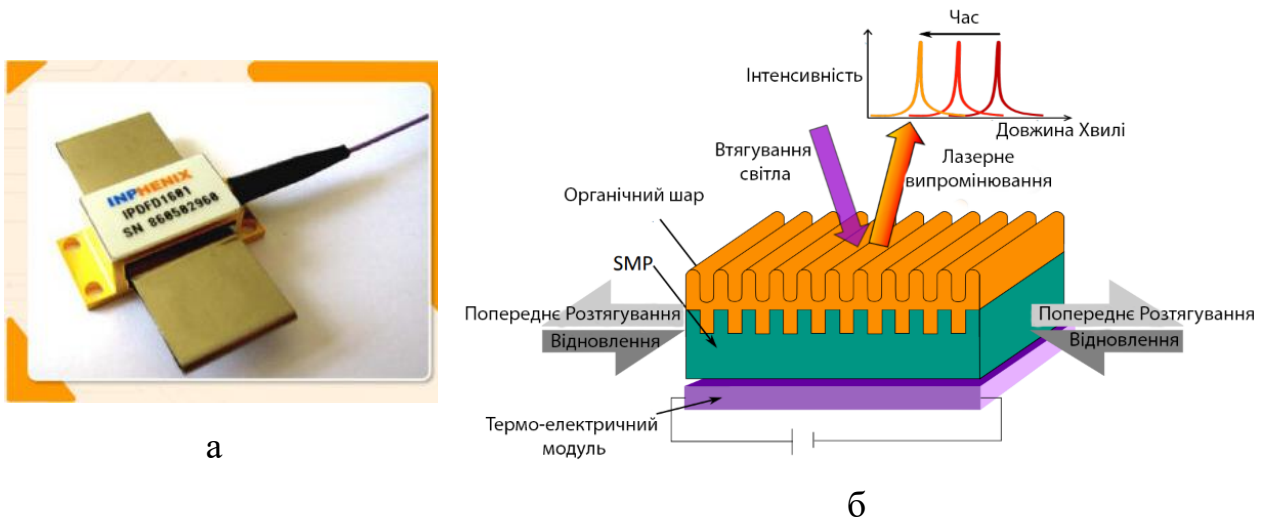
Одним з найбільш поширених типів лазерних передавачів є DFB-лазери (Distributed Feedback Lasers). Вони мають вбудовану решітку Брэгга, яка дозволяє забезпечувати стабільну одномодову генерацію світла і дозволяє їм працювати на великих швидкостях передачі даних (рис. 1.6).

Загалом, лазерні передавачі дозволяють передавати оптичні сигнали на великі відстані з високою швидкістю та мінімальними втратами сигналу, що робить їх важливим компонентом в оптичних системах зв'язку. Лазерні передавачі мають деякі особливості, які роблять їх ефективними джерелами оптичного сигналу: високі монокогерентність, напрямленість, стабільність, швидкість передачі даних, ефективність: Лазерні передавачі зазвичай мають високу ефективність перетворення електричної енергії на оптичну, що дозволяє забезпечувати економічну та енергоефективну передачу сигналу.

1.2 Елементи оптичного зв'язку та їх функції

Оптичний зв'язок використовує світло як носій інформації для передачі сигналів від одного пристрою до іншого. Основні елементи оптичного зв'язку:

- 1) волоконно-оптичний кабель (основний носій інформації в оптичній системі зв'язку) (рис. 1.7) – для передачі світлового сигналу на великі відстані без істотних втрат сигналу;
- 2) оптичний передавач – для перетворення електричного сигналу на світловий для передачі його через волоконно-оптичний кабель;
- 3) оптичний приймач - отримує світловий сигнал, що проходить через волоконно-оптичний кабель, і перетворює його на електричний сигнал;



В

Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд DFB лазера [8] (а) та оптична схема [9] (б) та структура оптичного волокна [10] (в) напівпровідникового лазера з розподіленим зворотним зв'язком

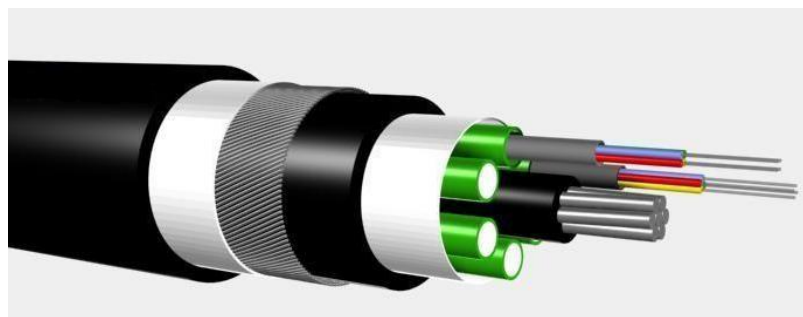


Рисунок 1.7 – Багатоволоконний оптичний кабель [5]

4) оптичні з'єднувачі - механічні або фізичні пристрої, які використовуються для з'єднання волоконно-оптичних кабелів;

5) розгалужувачі (спліттери) – для розгалужування світлового сигналу на кілька напрямків або об'єднання;

6) оптичні підсилювачі - для підсилення слабкого оптичного сигналу, який слабшає під час передачі по волоконно-оптичному кабелю.

7) оптичні мультиплексори та демультимплексори – для одночасної передачі і приймання кількох світлових сигналів різних довжин хвиль по одному волоконно-оптичному кабелю;

8) оптичні комутатори – для переключання оптичний сигнал з одного волоконного кабелю на інший;

9) оптичні фільтри - для вибіркового фільтрування світлових сигналів за хвильовою довжиною. Вони можуть бути використані для розділення різних хвильових довжин волоконного кабелю або для фільтрації небажаних сигналів [4].

1.3 Актуальні проблеми волоконно-оптичних ліній зв'язку

До актуальних проблеми волоконно-оптичних ліній зв'язку слід віднести наступні. По-перше, підвищення пропускної здатності. Зі зростанням обсягу переданих даних, потреба в більш високій пропускній здатності стає все більш актуальною. Дослідження зосереджені на розробці нових методів модуляції, розширенні спектральної пропускної здатності та вдосконаленні технологій мультиплексування. По-друге, збільшення дальності передачі. Одним з викликів є збільшення дальності передачі без значного погіршення сигналу. Дослідження спрямовані на зниження втрат сигналу від дисперсії, розробку підсилювачів зв'язку та використання волокон зі зменшеним показником заломлення. По-третє, забезпечення надійності. Волоконно-оптичні лінії зв'язку повинні бути стійкими до різноманітних зовнішніх впливів, таких як температурні коливання, механічні напруги та вплив середовища. Дослідження фокусуються на розробці захисних покриттів, механічної стійкості волокон та методів моніторингу стану ліній зв'язку. І в четвертих, зниження вартості. Волоконно-оптичний зв'язок має потенціал стати більш доступним і ефективним за умови зниження вартості

інфраструктури. Дослідження спрямовані на оптимізацію процесів виробництва волоконно-оптичних кабелів, вдосконалення технологій з'єднання та монтажу, а також розробку більш економічних методів підтримки та обслуговування ліній зв'язку [10].

Закордонні та вітчизняні вчені присвячують значну увагу дослідженням у галузі волоконно-оптичних ліній зв'язку. Основні способи і методи досягнення результатів досліджень включають:

1. Моделювання та симуляція. Для аналізу та вдосконалення волоконно-оптичних систем використовуються різні математичні моделі та комп'ютерні симуляції. Це дозволяє вивчати різні аспекти передачі сигналу, виявляти проблеми та розробляти оптимальні рішення.

2. Експериментальні дослідження (рис. 1.8). Вчені проводять реальні експерименти на волоконно-оптичних системах з метою оцінки їхньої продуктивності, дальності передачі, швидкості передачі даних та інших параметрів. Ці дослідження дозволяють перевірити теоретичні моделі і впроваджувати практичні рішення.

3. Розробка нових матеріалів і технологій. Для покращення ефективності волоконно-оптичних ліній зв'язку проводяться дослідження з розробки нових матеріалів для волокон, покриттів та кабелів. Також розробляються нові методи з'єднання та монтажу, що дозволяють забезпечити більшу надійність і менші втрати сигналу.

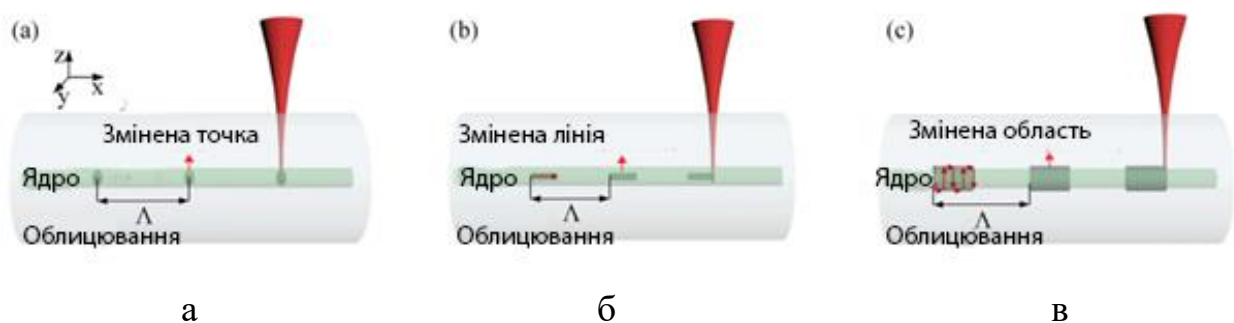


Рисунок 1.8 – Схеми індукованих fs-лазером LPFG: (а) точкова експозиція, (б) лінійне сканування, (в) сканування траєкторії [9]

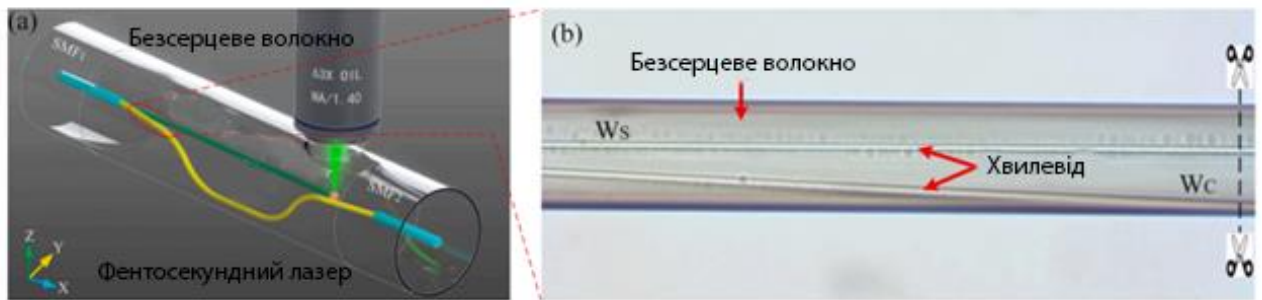


Рисунок 1.9 – Схема внутрішньоволоконного MZI в NCF (a) [12] та (б) [9]
мікроскопічне зображення структури опто-волоконних хвилеводів

4. Вдосконалення технологій передачі та модуляції: Вчені досліджують нові методи модуляції сигналу, такі як використання квадратурної амплітудної модуляції (QAM) і фазової модуляції (PSK), для підвищення пропускної здатності і ефективності передачі. Вони також працюють над розробкою алгоритмів корекції помилок та підвищення якості сигналу.

5. Розширення спектральної пропускної здатності: Дослідження спрямовані на розробку методів, які дозволяють використовувати більше спектральне діапазону для передачі даних, наприклад, використання мультиплексування по довжині хвилі (WDM) і просторового мультиплексування (SDM).

6. Розвиток підсилювачів зв'язку: Для забезпечення передачі сигналу на великі відстані використовуються підсилювачі зв'язку. Вчені працюють над розробкою нових типів підсилювачів, таких як ербієві волоконні підсилювачі (EDFA) і рідкокристалічні підсилювачі, які забезпечують високу підсилювання сигналу і мінімальні шуми [11].

7. Моніторинг та керування волоконно-оптичними лініями зв'язку: Для забезпечення ефективної роботи ліній зв'язку вчені досліджують методи моніторингу стану системи, виявлення і усунення несправностей, а також автоматизовані системи керування та оптимізації мережі.

Усі ці дослідження та досягнення в галузі волоконно-оптичних ліній зв'язку є результатом колективних зусиль вчених як за кордоном, так і

вітчизняних. Існує значна кількість наукових праць і публікацій, які присвячені волоконно-оптичним лініям зв'язку.

Закордонні вчені займаються розробкою новітніх технологій і методів у галузі волоконно-оптичних ліній зв'язку. Дослідницькі групи з країн, таких як США, Японія, Німеччина, Китай та багато інших, активно вивчають проблеми, пов'язані з пропускною здатністю, дальністю передачі, надійністю та економічністю систем [11].

В українській науці також проводяться дослідження з волоконно-оптичних ліній зв'язку. Наукові установи, університети та компанії активно займаються розробкою нових технологій, впровадженням і вдосконаленням існуючих систем зв'язку. Вітчизняні учені вивчають проблеми ефективності передачі сигналу, зниження втрат, розробляють нові методи модуляції і підсилювачів зв'язку, а також займаються аспектами надійності та безпеки волоконно-оптичних мереж.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ УЗГОДЖЕННЯ СВІТЛОВОДА З ДЖЕРЕЛОМ ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1 Оцінка ефективності прямого стикування джерела і світловода

Оцінка ефективності прямого стикування джерела і світловода залежить від багатьох факторів, таких як тип джерела світла, властивості світловода, якість поверхонь, що стикаються, та умови експлуатації. У загальному випадку, пряме стикування джерела і світловода є ефективним методом передачі світла. Однак, при деяких умовах ефективність може бути знижена. Наприклад, якщо поверхні стикаються не достатньо рівні або забруднені, то відбивання світла може спричинити втрати. Також, якщо світловід має високі втрати при згинанні, то ефективність прямого стикування може бути нижчою, ніж використання інших методів передачі світла, таких як оптичні волокна. Тому, перед використанням прямого стикування джерела і світловода, важливо провести детальний аналіз умов і параметрів, що впливають на ефективність передачі світла [12].

На ефективність прямого стикування джерела і світловода можуть впливати: властивості джерела світла, властивості світловода, якість поверхонь, умови експлуатації, точність і методи з'єднання.

Методика розрахунку втрат для багатомодового світловода включає:

- 1) визначення розмірів перетяжки лазерного пучка по осях ХУ:

$$r_{nx} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta_x} \quad \text{та} \quad r_{ny} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta_y}, \quad (2.1)$$

де θ_x, θ_y - кутові розміри індикатриси випромінювання лазера в горизонтальній і вертикальній площинах; λ - довжина хвилі випромінювання.

- 2) визначення коефіцієнта геометричного він'єтування:

$$\gamma_x = \frac{r_c}{r_{nx}} \quad \text{та} \quad \gamma_y = \frac{r_c}{r_{ny}}, \quad (2.2)$$

де r_c - радіус осердя світловода.

3) визначення числової апертури світловода:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_n^2} . \quad (2.3)$$

4) визначення коефіцієнта кутового він`єтування:

$$\gamma_{\omega x} = \frac{NA}{\theta_x} \quad \text{та} \quad \gamma_{\omega y} = \frac{NA}{\theta_y} , \quad (2.4)$$

5) визначення за допомогою номограми коефіцієнтів пропускання при відомих значеннях коефіцієнтів геометричного і кутового він`єтування з співвідношення:

$$\tau = \tau_{\gamma x} \cdot \tau_{\gamma y} \cdot \tau_{\gamma \omega x} \cdot \tau_{\gamma \omega y} . \quad (2.5)$$

У випадку одномодового світловода необхідно враховувати, що оскільки розмір світловода сорозмірний з довжиною хвилі, частина електромагнітної енергії розповсюджується за межами осердя. Тому вводять поняття ефективного радіуса одномодового світловода, що завжди більше реального [13].

Для визначення цього радіуса використовується наступне співвідношення:

$$\frac{2r_{e\phi}}{d_c} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6} \quad (2.9)$$

де d_c – діаметр осердя світловода; V – нормована частота.

6) визначення коефіцієнта лінійного він`єтування з урахуванням ефективного радіуса:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_{e\phi}}{r_{nx}} \quad \text{та} \quad \gamma_{ry} = \frac{r_{e\phi}}{r_{ny}} , \quad (2.4)$$

7) визначення коефіцієнта пропускання при лінійному він`єтуванні:

$$\tau_l = \left(\frac{2}{\gamma_x + \frac{1}{\gamma_x}} \right) \cdot \left(\frac{2}{\gamma_y + \frac{1}{\gamma_y}} \right) \quad (2.12)$$

8) визначення по номограмі коефіцієнтів $\tau_{\omega x}$ і $\tau_{\omega y}$;

9) визначення коефіцієнта пропускання пристрою вводу випромінювання:

$$\tau = \tau_l \cdot \tau_{\omega x} \cdot \tau_{\omega y} \quad (2.13)$$

2.2 Введення випромінювання у світловод комбінаціями лінз

Схеми застосування комбінації лінз для вводу випромінювання у світловод та схема використання двох сферичних лінз для вводу випромінювання у світловод показана на рисунках 2.1 та 2.2 відповідно. Втрати в пристрої вводу багато в чому залежать від децентрування торця світловода 5, який сприймає випромінювання від джерела [14].

Допустима величина децентрування по двох вісях для одномодового світловода визначається співвідношеннями:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{r_{\text{сф}}^2 + r_{\text{nx}}^2}{2}} \quad \text{та} \quad \delta_y = \sqrt{\frac{r_{\text{сф}}^2 + r_{\text{ny}}^2}{2}} \quad (2.15)$$

Зміна конструкції торця світловода робиться методом фотолітографії. Сферична або близька до неї поверхня виготовляється на плоскому торці одномодового світловода. Технологія одержання таких елементів полягає в тому, що після видалення захисного покриття торець одномодового світловода травлять у кислоті. Потім протравлену ділянку містять у фокус лазера з імпульсною потужністю 25 Вт. Під дією випромінювання, що поглинається, торець світловода оплавляється і, внаслідок поверхневого натягу, утворюється лінза [15].

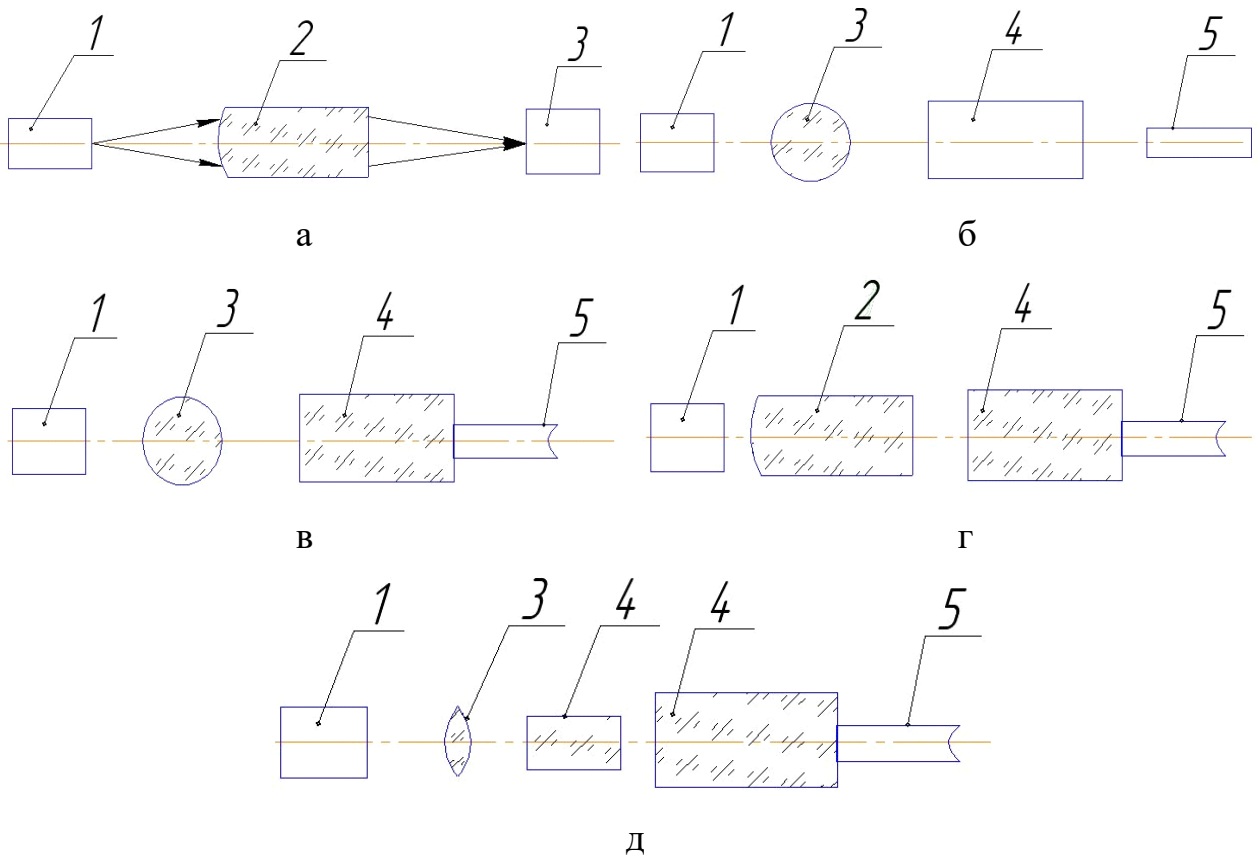


Рисунок 2.1 – Застосування комбінацій лінз для вводу випромінювання: 1 - джерело випромінювання; 2 - градієнтна лінза або селфок; 3 - сферична мікролінза; 4 - селфок; 5 - одномодовий світловод

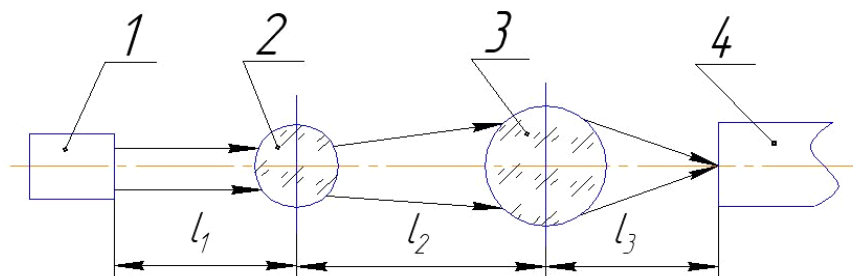


Рисунок 2.2 – Схема використання сферичних лінз: 1-лазер; 2- сферична лінза 1; 3 - сферична лінза 2; 4 - світловод

2.3 Розрахунок ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно

Розрахунок ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно включає кілька ключових кроків:

Визначення характеристик лазерного джерела, потрібно врахувати властивості лазерного проміння, такі як довжина хвилі, потужність, просторовий профіль та поляризація. Ці параметри впливають на спосіб введення проміння в оптичне волокно. Аналіз характеристик оптичного волокна, для ефективного введення проміння потрібно врахувати властивості волокна, такі як внутрішній діаметр, числова апертура, модова структура та збуджені моди. Ці параметри визначають максимальну ефективність передачі сигналу через волокно.

Вибір методу введення проміння, існують різні методи введення проміння в оптичне волокно, включаючи пряме з'єднання, використання лінз або волоконних затримуючих пристроїв. Вибір методу залежить від конкретних вимог і обмежень системи. Моделювання процесу введення, за допомогою математичних моделей можна розрахувати передачу проміння через інтерфейс між лазером і волокном, враховуючи втрати, відбиття та розсіювання. Моделі можуть використовувати різні методи, включаючи розподіл Гаусса, чисельне моделювання та інші [16].

Оцінка ефективності введення, після моделювання можна визначити ефективність введення лазерного проміння в оптичне волокно, що характеризується коефіцієнтом передачі, втратами потужності та ефективною швидкістю передачі сигналу. Аналіз результатів та оптимізація, після отримання результатів розрахунків, необхідно їх аналізувати. Виявлення факторів, що впливають на ефективність введення лазерного випромінювання, допоможе зрозуміти, як впливати на ці параметри для покращення процесу. Застосування оптимізаційних методів, таких як вибір оптимального кута нахилу, довжини фокусування лінзи або використання спеціальних затримуючих пристроїв, може допомогти підвищити ефективність введення проміння.

Валідація результатів, для підтвердження точності розрахунків і моделей необхідно провести експериментальні вимірювання. Це може включати порівняння експериментальних даних з результатами моделювання або зворотний розрахунок параметрів на основі вимірювань.

Висновки та рекомендації, на основі отриманих результатів можна зробити висновки про ефективність введення лазерного випромінювання в оптичне волокно. Розробка рекомендацій щодо оптимізації процесу введення, враховуючи вимоги та обмеження системи оптичного зв'язку, є важливим кроком.

В цілому, розрахунок ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно є складним завданням, яке вимагає знань з оптики, оптичних волокон, лазерної технології та математичного моделювання. Результати такої роботи можуть бути використані для вдосконалення систем оптичного зв'язку та покращення передачі даних через оптичні волокна [17].

Ефективність введення випромінювання в волокно залежить від: взаємного розташування випромінювача та волокна; числової апертури випромінювача та волокна; площі випромінюючої поверхні і діаметра серцевини волокна; відбиття випромінювання від торців світловоду; параметрів оптичних елементів, які використовуються при передачі випромінювання на волокно, їх просвітлення.

Визначити ефективність прямого стикування напівпровідникового лазера з одномодовим і багатомодовим світловодами при наступних вихідних даних: лазер - $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$, $Q_x = 0,15 \text{ рад}$, $Q_y = 0,5 \text{ рад}$; багатомодовий світловод - $d = 50 \text{ мкм}$, $n_c = 1,471$, $n_n = 1,457$; одномодовий світловод - $d = 12 \text{ мкм}$, $n_c = 1,459$, $n_n = 1,457$.

Скористаємося співвідношеннями (2.2-2.9).

Розміри перетяжки лазерного променя:

$$r_{nx} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \Theta_x} = \frac{1.3}{3.14 \cdot 0.15} = 2.76 \text{ мкм}$$

$$r_{ny} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \Theta_y} = \frac{1.3}{3.14 \cdot 0.5} = 0.83 \text{ мкм}$$

Лінійне він'єтування для багатомодового світловода:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_{cb}}{r_{nx}} = \frac{25}{2,76} = 9$$

$$\gamma_{ry} = \frac{r_{cb}}{r_{ny}} = \frac{25}{0,83} = 30$$

Числова апертура багатомодового світловода

$$NA = \sqrt{n_c^2 + n_n^2} = \sqrt{(1,471)^2 + (1,457)^2} = 0,202$$

Коефіцієнти кутового він'єтування:

$$\gamma_{\varpi x} = \frac{NA}{\Theta_x} = \frac{0,202}{0,15} = 1,35$$

$$\gamma_{\varpi y} = \frac{NA}{\Theta_y} = \frac{0,202}{0,5} = 0,404$$

Скориставшись номограмою, визначимо коефіцієнт втрат для цього випадку. $\tau_{\varpi y} = 0,696$

Загальний коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$\tau = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry} \cdot \tau_{\varpi x} \cdot \tau_{\varpi y} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,696 = 69,6\%$$

Визначимо аналогічні втрати для одномодового світловода, скориставшись формулами (2.10-2.14).

Ефективний радіус одномодового світловода визначається із співвідношень:

$$\frac{2r_{ef\phi}}{d_{cv}} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6},$$

де V -нормована частота.

$$V = \frac{3,14 \cdot 12}{1,3} \cdot \sqrt{(1,459)^2 - (1,457)^2} = 2,21$$

$$\frac{2r_{ef\phi}}{12} = 0,65 + \frac{1,619}{(2,21)^{3/2}} + \frac{2,879}{(2,21)^6}$$

$$r_{ef\phi} = 6,99 \text{ мкм}$$

Визначимо коефіцієнт лінійного він'єтування:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_{ef\phi}}{r_{nx}} = \frac{6,99}{2,76} = 2,55$$

$$\gamma_{ry} = \frac{r_{ef\phi}}{r_{ny}} = \frac{6,99}{0,83} = 8,42$$

Коефіцієнт пропускання при лінійному він'єтуванні дорівнює:

$$\tau_n = \left(\frac{2}{\gamma_{rx} + 1/\gamma_{rx}} \right) \cdot \left(\frac{2}{\gamma_{ry} + 1/\gamma_{ry}} \right) = 0,16 = 16\%$$

Числова апертура і коефіцієнти кутового він'єтування одномодового світловода дорівнюють:

$$NA = \sqrt{(1,459)^2 - (1,457)^2} = 0,076$$

$$\gamma_{\sigma x} = \frac{NA}{\Theta_x} = \frac{0,076}{0,15} = 0,51$$

$$\gamma_{\sigma y} = \frac{NA}{\Theta_y} = \frac{0,076}{0,5} = 0,15$$

Скориставшись номограмою, визначимо коефіцієнт втрат для цього випадку. $\tau_{\sigma x} = 0,803$ $\tau_{\sigma y} = 0,300$

Загальний коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$\tau = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry} \cdot \tau_{\sigma x} \cdot \tau_{\sigma y}$$

$$\tau_n = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry}$$

$$\tau = 0,16 \cdot 0,803 \cdot 0,301 = 0,04 = 4\%$$

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВВЕДЕННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО

3.1 Методика експериментального вимірювання ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно

Третій розділ дипломної роботи присвячений дослідженню ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно. Основною метою цього розділу є вивчення впливу різних факторів на ефективність передачі сигналу в оптичному волоконні та розроблення методики його розрахунку.

Волоконно-оптичні системи зв'язку є ключовою технологією для передачі великого обсягу даних на великі відстані з високою швидкістю та мінімальними втратами сигналу. Одним з важливих елементів цих систем є введення лазерного випромінювання в оптичне волокно. Ефективність цього процесу має прямий вплив на якість та надійність передачі сигналу.

Розглянемо основні фактори, що впливають на ефективність введення лазерного випромінювання, зокрема властивості волокна, довжина хвилі, потужність сигналу та методи зосередження випромінювання.

Представлений огляд методик та алгоритмів розрахунку ефективності введення лазерного випромінювання. Розглянемо різні підходи та практичні методи, які використовуються для визначення оптимальних умов введення сигналу в оптичне волокно. В межах дослідження враховані взаємозв'язки між різними факторами, а також їх вплив на коефіцієнт введення сигналу. Проведені експерименти та числові розрахунки для оцінки ефективності введення лазерного випромінювання при різних умовах, що враховують специфіку оптичного волокна та характеристики випромінювання.

Види лазерів які використовувались під час експериментальних вимірювань: гелій-неоновий лазер, (червоний, довжина хвилі 632.8 нм, He-Ne), напівпровідниковий лазер (червоний, довжина хвилі 640 нм, НП чер.), напівпровідниковий лазер (зелений, довжина хвилі 532 нм, НП зел.).

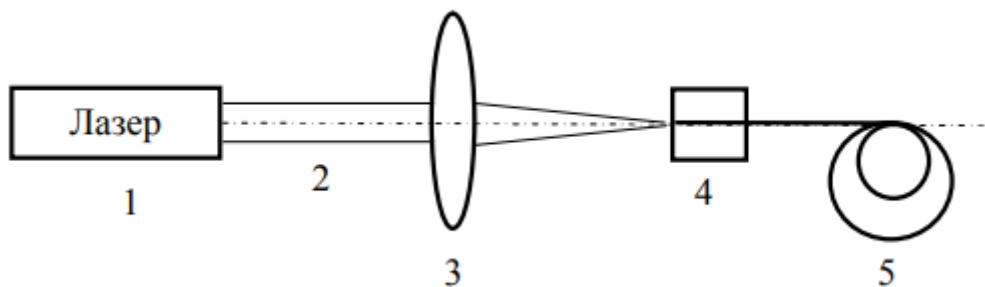


Рисунок 3.1- Схематичне зображення вводу лазерного випромінювання в оптичне волокно, 1 – лазер, 2 – пучок колімованого випромінювання, 3 – фокусує лінза, 4 – механічний юстувальний пристрій, 5 – оптичне волокно [20]

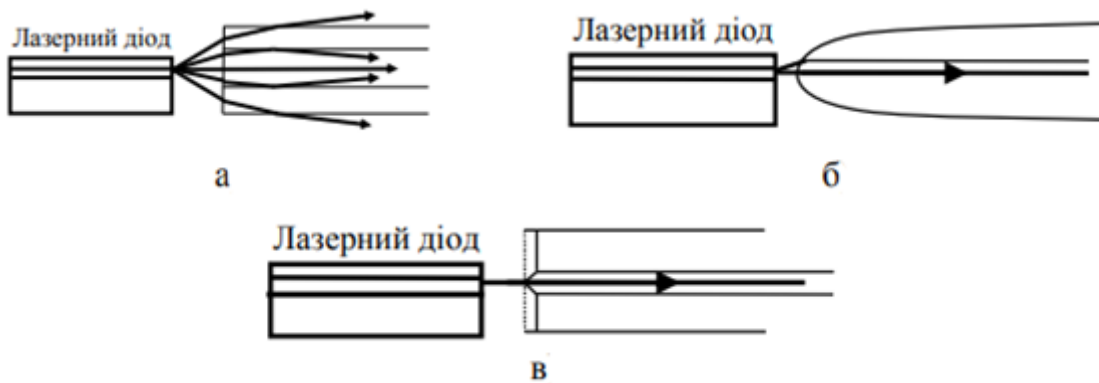


Рисунок 3.2 - Безпосереднє введення випромінювання лазерного діоду в оптичне волокно: а - багатомодовий світлодіод; б - одномодовий світлодіод; в - одномодовий світлодіод [19]

Таблиця 3.1 – Діаметр лазерного випромінювання

	He-Ne	НП чер.	НП зел.
D, мм	4	2,3	3

Експериментальні вимірювання проводилися за допомогою лабораторного стенда, схематичне зображення якого наведено на рисунку 3.3 При цьому були використані різні типи оптоволоконних кабелів, основні характеристики яких зведені у таблиці 3.2. Для підсилення сигналу були використані підсилювачі, основані на ербієвих волокнах (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA). EDFA є найпоширенішим типом оптичного підсилювача (рис. 3.4). Він використовує спеціальне ербієве домішку, що вводиться в сердцевину оптоволокна. Ербій-домішка здатна поглинати світло в певному діапазоні довжин хвиль і видавати його з більшою інтенсивністю. EDFA забезпечує посилення оптичного сигналу без необхідності конвертації в електричний сигнал, що дозволяє зберегти високу швидкість передачі даних та мінімізувати втрати.

Таблиця 3.2 - Типи оптоволоконного кабелю [20]

№	Тип оптоволоконного кабелю	Стандартний підвісний з виносним силовим елементом – 1 ОВ	Стандартний в кабельну каналізацію – 12 ОВ	Легкий в ґрунт (ТОС) - 24 ОВ	Спеціальний в ґрунт зі сталевим модулем (ДОЛ) - 40 ОВ
1	Гнучкість	Гнучкий	Гнучкий	Напівжорсткий	Напівжорсткий
2	Тип ізоляції	Полімерна оболонка	Полімерна оболонка	Арамідна (кевларова) оболонка	Арамідна (кевларова) оболонка
3	Площа кабелю	50,3 мм ²	54,6 мм ²	60,6 мм ²	70,6 мм ²
4	Діаметр світловода	9 мкм	9,5 мкм	11,5 мкм	13,5 мкм
5	Тип світловода	Одномодовий	Одномодовий	Одномодовий	Багатомодовий

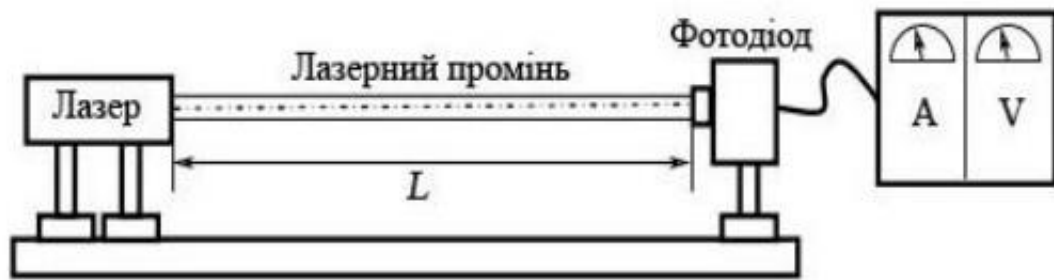


Рисунок 3.3 - Схема лабораторного стенду для вимірювання оптичної потужності лазера, що проходить через оптоволокну [21]



Рисинок 3.4 – Підсилювачі на основі ербієвих волокон (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) [19]

3.2 Експериментальні результати

На першому етапі експериментальної частини роботи було проведено вимірювання потужності лазерного випромінювання для трьох типів лазерів, описаних у попередньому пункті. Для цього на шляху лазерного випромінювання розташовувався фотодіод на такій відстані, щоб промінь не виходив за межі фотодіоду. Знімалися показники фотоструму та напруги за допомогою фотодіоду та вольтметра, також вимірювався струм за допомогою амперметра. Потужність лазерного випромінювання визначалася за співвідношенням: $P_{\max} = I \cdot U$, де I – фотострум; U – напруга на діоді. Результати вимірювань та розрахунків зведені у таблиці 3.3 та представлені у вигляді діаграми (рис. 3.5).

Таблиця 3.3 - Результати вимірювання потужності випромінювання світла

	He-Ne	НП чер.	НП зел.
I, мкА	280	60	200
U, мВ	47	12	45
P, мкВт	0,013	0,0072	0,09



Рисунок 3.5 - Діаграма потужності випромінювання, виміряна виході фотодіоду, що використовується як приймач лазерного випромінювання

Аналізуючи дані наведені в таблиці 3.3, слід зазначити, найпотужнішим серед обраних типів лазерів є напівпровідниковий із зеленим кольором світіння. Також слід відмітити, що величини струму та напруги на фотодіоді відповідають малому діапазону відносно шкали вимірювальних приладів, що зменшує точність аналізу ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно. У зв'язку з цим ефективність введення лазерного випромінювання більш доцільно визначати через освітленість. Для вимірювання освітленості був використаний люксметр сенсора смартфона. Спочатку були проведення вимірювання для трьох типів лазерів на пряму. Після чого на лазерне

випромінювання вводилося в оптоволоконні кабелі різних типів та повторно вимірювалася освітлюваність. Результати вимірювань зведені у таблиці 3.4.

Для оцінки ефективності введення, було використане співвідношенням для розрахунку коефіцієнту ефективності через фотострум:

$$\mathcal{G} = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{макс}}} \cdot 100\% ,$$

де $I_{\text{макс}}$ та $I_{\text{вих}}$ – величини фотострум до та після введення лазерного випромінювання в оптичне волокно.

Результати розрахунків коефіцієнту ефективності в залежності від типу лазера та типу оптичного волокна зведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.4 - Результати вимірювання освітленості

Тип кабелю	Освітленість E , люкс		
	He-Ne	НП чер.	НП зел.
відсутній	4000	36000	32768
1 ОВ	3,7	4,79	1,87
12 ОВ	3	3,79	16,5
24 ОВ	10	Не фіксуємо	9,
40 ОВ	8	4,82	13,56

Таблиця 3.5- Результати розрахунків ефективності введення лазерного проміння в оптичне волокно

Тип оптоволоконного кабелю	Ефективність \mathcal{G} , %		
	He-Ne	НП чер.	НП зел.
1 ОВ	0,92	0,13	0,05
12 ОВ	0,75	0,10	0,50
24 ОВ	2,30	-	0,28
40 ОВ	2,10	0,13	0,41

Аналізуючи результати проведених розрахунків слід зазначити наступне. По-перше, ефективність введення лазерного випромінювання суттєво залежить від технічних характеристик лазера. Незалежно, від обраного типу оптоволоконного кабелю, найбільш ефективність введення лазерного проміння в оптичне волокно була при введення випромінювання від He-Ne лазера. Величина \mathcal{E} від 1,5 разів до майже 18 разів (у випадку оптоволокна 1 ОВ) є вищою для He-Ne лазера у порівнянні з напівпровідниковими червоного та зеленого кольорів світіння. Аналізуючи дані, як впливає заміна оптичного волокна на величину \mathcal{E} , зазначимо, що ефективності введення лазерного проміння в оптичне волокно є найвищою для кабелю типу 40 ОВ, який серед всіх обраних оптоволокон є багатомодовим та має найбільший діаметр світловода (13,5 мкм).

Аналізуючи вцілому, всі дані наведені у таблиці 3.5 слід зазначити, що вибраний нами найпростіший метод прямого введення лазерного випромінювання є неефективним, оскільки найбільше значення $\mathcal{E} = 2,5 \%$.

Відносна ефективність введення лазерного випромінювання визначалася за співвідношенням:

$$\Theta = \frac{I_{вих}}{I_{макс}} \cdot \frac{d_{опт}^2}{d_{пром}^2} \cdot 100\%$$

де $d_{опт}$ – діаметр оптоволокна, $d_{пром}$ – діаметр поперечного перерізу лазерного променя.

Результати розрахунків зведені у таблиці 3.6 та на рисунку 3.7.

Порівнюючи дані розрахунків для відносної ефективності Θ з даними для \mathcal{E} можна зробити аналогічні висновки. Відносної ефективності Θ залежить від типу джерела лазерного випромінювання та типу оптоволоконного кабелю. Однак у даному випадку найбільше значення для відносної ефективності було отримано для НП лазера зеленого кольору світіння ($\Theta = 8,3 \%$). Це пояснюється різницею у діаметрах $d_{опт}$ оптоволокна та $d_{пром}$ поперечний переріз лазерного променя.

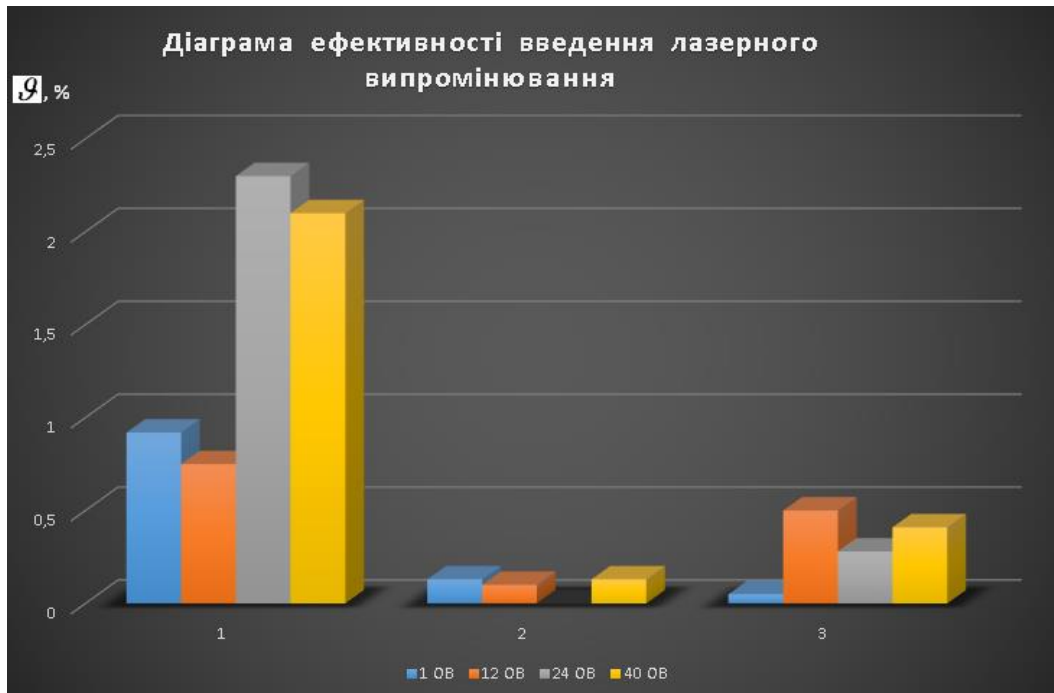


Рисунок 3.6 - Діаграма коефіцієнту ефективності введення лазерного випромінювання в залежності від типу оптоволоконного кабелю для трьох типів лазерів: He-Ne (1), НП червоного кольору світіння (2), НП зеленого кольору світіння

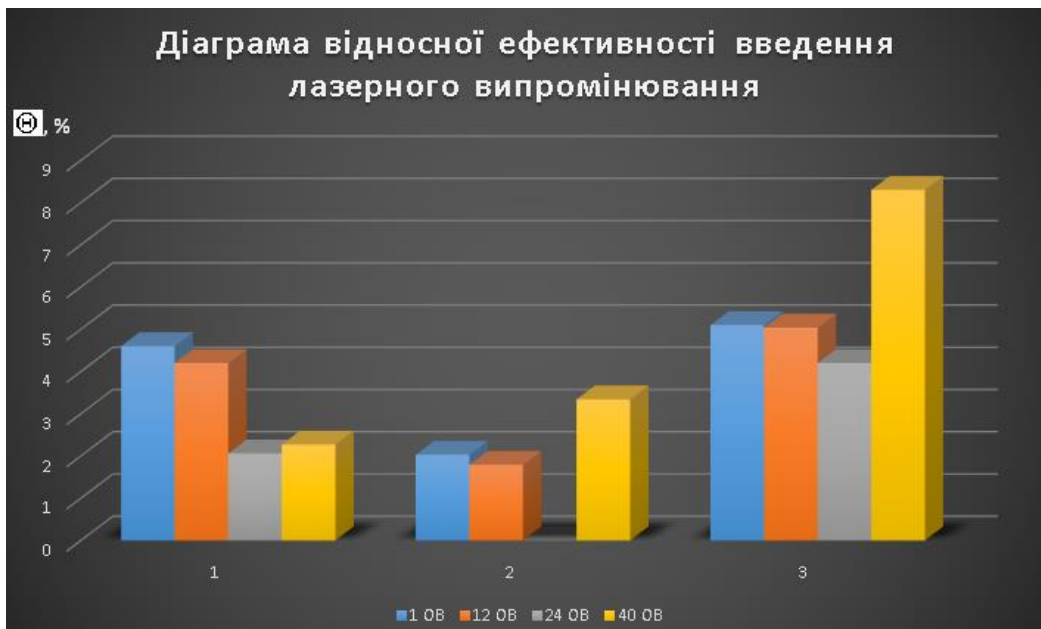


Рисунок 3.7 - Діаграма коефіцієнту відносної ефективності введення лазерного випромінювання в залежності від типу оптоволоконного кабелю для трьох типів лазерів: He-Ne (1), НП червоного кольору світіння (2), НП зеленого кольору світіння

Таблиця 3.6 - Результати розрахунків відносної ефективності введення лазерного проміння в оптичне волокно

Тип Оптоволоконного кабелю	Відносна ефективність Θ , %		
	He-Ne	НП чер.	НП зел.
1 ОВ	4,60	2,03	5,10
12 ОВ	4,20	1,79	5,04
24 ОВ	2,06	-	4,20
40 ОВ	2,27	3,34	8,30

Основною причиною неефективності прямого метода введення лазерного випромінювання у оптоволокно є те, що діаметр оптоволокна менший за діаметр поперечного перерізу лазерного променя. Для покращення ефективності можна застосовувати різні методики, одним з яких є застосування мікролінз, що розміщуються на шляху лазерного випромінювання перед введенням його у оптоволокно. Наприклад, це може бути мікролінза виготовлена методом травлення торця оптичного волокна. Це дозволяє збільшити інтервал перекриття поля випромінювання й поля хвильоподібної моди [19].

Слід зазначити, що варто виділити ще один фактор, який буде впливати на ефективність введення та на характеристики передачі сигналу по оптоволокну. Цим фактором є довжина оптоволоконного кабелю. При розповсюдженні оптичного випромінювання по оптоволокну, відбувається згасання сигналу і як наслідок зниження ефективності. Щоб цьому запобігти необхідно використовувати підсилювачі. Такими підсилювачами є підсилювачі основані на ербієвих волокнах (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA), в яких використовується ербій, для підсилення оптичних сигналів у волоконних оптичних системах.

Принцип роботи EDFA полягає в тому, що ербієві іони, впроваджені в оптичне волокно, можуть бути збуджені за допомогою зовнішнього світла. Коли вхідний оптичний сигнал проходить через волоконний підсилювач, ербієві іони

поглинають енергію цього сигналу і переходять на більш високі рівні енергії. При поверненні на основний рівень ербієві іони випромінюють світло, яке має більшу інтенсивність, ніж початковий вхідний сигнал. Таким чином, сигнал підсилюється, коли проходить через волокно з ербієвими іонами.

Середня відстань через яку потрібно встановлювати підсилювачі для оптоволоконних кабелів які ми використовували під час експериментального дослідження становить 50 - 100 км, згідно стандартів для підсилювачів на ербієвих волокнах.

ВИСНОВКИ

1. До актуальних проблеми волоконно-оптичних ліній зв'язку слід віднести: підвищення пропускної здатності, збільшення дальності передачі сигналу, забезпечення надійності та зниження собівартості.

2. При реалізації оптичного зв'язку введення лазерного випромінювання в оптичне волокно є критичним етапом, який визначає ефективність та надійність передачі даних, тому у процесі розробки елементів оптичного зв'язку, спрямованих на розрахунок ефективності введення лазерного випромінювання, ключовою задачею є забезпечення максимальної передачі потужності та мінімізація втрат сигналу.

3. В процесі виконання роботи було розроблено лабораторний стенд, який дозволяє проводити вимірювання зміни оптичної потужності джерела лазерного випромінювання (наприклад, напівпровідникового лазера), внаслідок безпосереднього введення лазерного випромінювання в оптоволокно.

4. Для розрахунок ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно були використані три типи лазерного джерела: гелій-неоновий лазер ($\lambda = 562$ нм), напівпровідниковий лазер ($\lambda = 640$ нм), напівпровідниковий лазер ($\lambda = 532$ нм), та чотири типи оптоволоконних кабелів 1ОВ (одномодовий з діаметром світловода 9 мкм), 12ОВ (одномодовий з діаметром світловода 9,5 мкм), 24ОВ (одномодовий з діаметром світловода 11,5 мкм) і 40ОВ (одномодовий з діаметром світловода 13,5 мкм).

5. Розрахунки ефективності введення лазерного випромінювання показали, що величина η від 1,5 разів до майже 18 разів (у випадку оптоволокна 1 ОВ) є вищою для He-Ne лазера у порівнянні з напівпровідниковими червоного та зеленого кольорів світіння, в той час як відносна ефективність, яка залежить від співвідношення між діаметрами оптоволокна та поперечний переріз лазерного променя, є найвищою НП лазера зеленого кольору світіння з $\lambda = 640$ нм ($\Theta = 8,3$ %).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019 р. - 336 с.
2. Jian Zhao, Yong Zhao, Yun Peng et all. Review of femtosecond laser direct writing fiber-optic structures based on refractive index modification and their applications // Optics and Laser Technology. - 2022. – V. 146. – P. 107473.
3. Кучеренко О.К. Волоконна та інтегральна оптика. - Київ, 2017. - 216 с.
4. Однодворець Л. В., Пазуха І. М., Лукавенко І. М. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині. – Суми: Сумський державний університет, 2022. - 127 с.
5. Волоконний оптичний кабель — [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ipcom.ua/uk/volokonno-optycheskyj-kabel%D1%8C-%D1%83uzhkabel%D1%8C-obgro-24a42h12-15> (Дата звернення 02.05.2023)
6. Волоконно-оптичні лінії зв'язку — [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.planet.com.tw/en/solutions/info/fiber-and-last-mile> (Дата звернення 03.05.2023)
7. Traub M. Efficient coupling of high-power laser diodes into single-mode fibers // Applied Optics». - 2016. - Vol. 55, No. 3. – P. 98.
8. DFB-лазери (Distributed Feedback Lasers) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.inphenix.com/en/dfb-laser-characteristics-working-and-applications/> (Дата звернення 03.05.2023)
9. Senta Schauer, Xin Liu, Matthias Worgull et. all Shape-memory polymers as flexible resonator substrates for continuously tunable organic DFB lasers. - Institute of Microstructure Technology (IMT): Germany, 2015, - 423 p.
10. Schneider N., Zeiger C., Kolew A. et all. Nanothermoforming of hierarchical optical components utilizing shape memory polymers as active molds // Opt. Mater. Express. – 2014. – Vol. 4. – P.367.
11. Alishahi F., Minoofar A., Fallahpour A., Experimental demonstration of remotely controlled tunable optical correlators of 10–50 Gbaud QPSK channels using linear

- and nonlinear components and laser-delivered powers // *Optic Letters*. - 2021. – Vol. 46. - P. 4589-4592.
12. Grivas C., *Optically pumped planar waveguide lasers. Part II: gain media, laser systems, and applications* // *Progress in Quantum Electronics*. – 2016. – Vol. 45-46. – P. 3-160.
 13. Berdin A., Rekola H., Sakhno O. et al. *Continuously tunable polymer membrane laser* // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27. – P. 25634-25646.
 14. Emmanuel C., Jeewantha J., Aravinthan T., *Shape memory polymer composite circular and square hollow members for deployable structures* // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - 2023. – Vol. 171 - P. 107559.
 15. Verbitskiy V., Voronko A., Verbitsky D. *Position-sensitive photodetector array for optical coordinator* // *Measer. Equipment and Metrology*. - 2021. - Vol. 82. - P. 5-8.
 16. Малик Б., Токарева О., Малик-Заворій С., Підвищення ефективності роботи оптоволоконних ліній зв'язку в умовах впливу зовнішніх факторів оточуючого середовища. – 2018. – Р. 111-115 с.
 17. Malyk V.O., Tokarieva O.V., Malyk Z., *Optical fiber structures performance enhancement under the conditions of ionizing radiation high power levels* // *Problems of Atomic Science and Technology*». – 2018. – P. 114.
 18. О. Манько, В. Бондар, Т. Бондаренко, *Високошвидкісні засоби оптичного та бездротового зв'язку*. - Київ, 2015. - 46 с.
 19. *Методичні вказівки до лабораторних робіт із курсу «Оптоелектронні системи та лазерні технології»* / укладачі: І. М. Пазуха, А. О. Степаненко, О. В. Пилипенко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 39 с.
 20. *Характеристики оптичного волокна* — [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://omnilink.ua/ru/vidy-opticheskogo-kabelya/> (Дата звернення 03.05.2023)
 21. Кабилецький К.С., Степаненко А.О., Пазуха І.М. *Розробка лабораторного стенду для визначення ефективності введення лазерного випромінювання в оптичне волокно* // *Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ :: 2023»*. – Суми: Сумський державний університет, Суми, 2023. – С. 51.