

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Аналіз сучасного стану розробки та використання просторових
мультиплексерів і багатозв'язних світловодів для надвисокошвидкісних
систем оптичного зв'язку»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-22

Орищенко Дмитрій Валерійович _____

Керівник:

Професор, д.т.н, с.н.с Трубін О. О. _____

Рецензент:

кандидат техн. наук, доцент, доцент каф.

Трубаров І. В. _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАКАРЕНКО

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Орищенко Дмитрію Валерійовичу

1. Тема роботи «Аналіз сучасного стану розробки та використання просторових мультиплексерів і багато зв'язних світловодів для надвисокошвидкісних систем оптичного зв'язку», керівник роботи Професор, д.т.н, с.н.с Трубін О. О., затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-С

2. Термін подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи:

- Матеріали наукових статей, оглядів та періодичних видань за тематикою просторового мультиплексування (SDM) у волоконно-оптичних системах зв'язку, багатосерцевинних (MCF) та маломодових (FMF) світловодів, а також модових мультиплексорів (фотонні ліхтарі, MPLC, 3D-хвилеводи).
- Інформаційні ресурси мережі Інтернет, включно з технічною документацією на оптичні компоненти (фотонні ліхтарі, просторові модулятори світла, кремнієві фотонні інтегральні схеми), бази даних наукових публікацій (IEEE Xplore, Scopus, OSA Publishing, Nature Photonics) та відкриті звіти дослідницьких установ (NICT, Bell Labs, Nokia).
- Нормативно-технічні документи міжнародних організацій у сфері оптичних телекомунікацій (рекомендації ITU-T G.65x щодо одномодових і багатомодових волокон, проекти стандартів для MCF/FMF, специфікації IEC 60793-2-50), а також аналітичні огляди щодо «кризи пропускнуої здатності» (capacity crunch) та

перспектив впровадження SDM у магістральних мережах, центрах обробки даних та підводних кабелях.

- Навчально-методичні матеріали кафедри електронних комунікацій та інтернету речей КПІ ім. Ігоря Сікорського щодо виконання дипломних робіт, оформлення пояснювальної записки та презентаційних матеріалів.

- Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи, затверджений керівником та завідувачем кафедри.

4. Зміст роботи:

- Виконати огляд літератури за темою SDM, еволюції оптичних мереж та нелінійної межі Шеннона.

- Дослідити фізичні принципи SDM та класифікувати основні архітектури просторових мультиплексорів (фотонні ліхтарі, MPLC, 3D-хвилеводи, OAM) з порівняльним аналізом їх характеристик.

- Проаналізувати конструкції багатозв'язних світловодів (FMF, MCF, FM-MCF) та фізику перехресних завад ICXT на основі теорії зв'язаних мод.

- Виконати математичне моделювання ICXT за методом Кошиби–Сайто для трьох типів MCF з розрахунком рівнів завад та впливу на SNR.

- Провести кількісне порівняння пропускної здатності SSMF, гетерогенного MCF та CC-MCF для ділянки 100 км з визначенням виграшу та необхідності MIMO.

- Проаналізувати світові рекорди SDM-систем (22,9 Пбіт/с NICT 2023, 1,7 Пбіт/с).

- Оцінити перспективи впровадження SDM у різних сегментах мереж, бар'єри та прогноз комерціалізації до 2035 року.

- Сформулювати висновки щодо теоретичних засад, сучасного стану розробки та ефективності SDM-систем.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

6. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання, узгодження теми та структури дипломної роботи	15.04.26	Виконано
2	Аналіз сучасного стану оптичних мереж, дослідження нелінійної межі Шеннона, ефекту Керра та еволюції технологій мультиплексування (TDM, WDM, PDM)	16.04.26 – 30.04.26	Виконано
3	Дослідження фізичних принципів SDM, класифікація та порівняльний аналіз архітектур просторових мультиплексорів (фотонні ліхтарі, MPLC, 3D-хвилеводи, OAM)	01.05.26 – 20.05.26	Виконано
4	Аналіз конструкцій багатозв'язних світловодів (FMF, MCF, FM-MCF), вивчення фізики перехресних завад ICXT	01.05.26 – 20.05.26	Виконано

	та DGD		
5	Математичне моделювання ICXT за методом Кошиби–Сайто, кількісний розрахунок пропускної здатності для різних типів MCF, порівняння з SSMF	21.05.26 – 04.06.26	Виконано
6	Аналіз світових рекордів SDM-систем, оцінка перспектив впровадження, визначення бар'єрів та прогноз комерціалізації	21.05.26 – 04.06.26	Виконано
7	Підготовка ілюстративного матеріалу (рисуноків, таблиць, схем) та оформлення пояснювальної записки згідно з вимогами		
8	Формулювання загальних висновків, перевірка унікальності тексту, підготовка презентації та реферату		

Студент

Дмитрій ОРИЩЕНКО

Керівник роботи

Олександр ТРУБІН

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 82 арк., 11 таблиць, 6 рисунків та 38 використаних джерела.

Мета роботи – провести комплексний аналіз теоретичних засад просторового мультиплексування (SDM) у волоконно-оптичних системах зв'язку, дослідити сучасні архітектури просторових мультиплексерів та багатозв'язних світловодів, а також виконати кількісну оцінку пропускної здатності SDM-систем порівняно з традиційними одномодовими волокнами.

Актуальність теми зумовлена наближенням сучасних оптичних мереж до нелінійної межі Шеннона (близько 100 Тбіт/с для стандартного одномодового волокна), що створює загрозу «кризи пропускної здатності» (capacity crunch) на тлі експоненційного зростання глобального інтернет-трафіку. Технологія просторового мультиплексування, яка використовує раніше не задіяний просторовий вимір оптичного волокна (багатосерцевинні та маломодові структури), розглядається науковою спільнотою як єдиний перспективний шлях подальшого масштабування пропускної здатності магістральних мереж.

Об'єкт дослідження – процеси передачі багатоканальних оптичних сигналів у системах із просторовим мультиплексуванням, включаючи явища міжсерцевинних перехресних завад (ICXT) та диференційної групової затримки (DGD).

Предмет дослідження – теоретичні моделі (нелінійне рівняння Шредінгера, теорія зв'язаних мод, теорія зв'язаної потужності), архітектури просторових мультиплексерів (фотонні ліхтарі, багатоплощинне перетворення світла MPLC, 3D-хвилеводи), конструкції багатозв'язних світловодів (маломодові FMF, багатосерцевинні MCF, гібридні FM-MCF) та методи оцінки пропускної здатності на основі модифікованої формули Шеннона.

Методи дослідження – аналіз науково-технічної літератури, порівняльний аналіз технологій просторового мультиплексування, математичне моделювання перехресних завад з використанням аналітичних виразів Кошиби–Сайто,

кількісний розрахунок пропускної здатності для різних типів багатосерцевинних волокон (гетерогенні MCF, сильнозв'язані CC-MCF), а також аналіз світових експериментальних рекордів (зокрема, передача 22,9 Пбіт/с NICT, 2023).

Ключові слова: просторове мультиплексування (SDM), нелінійна межа Шеннона, багатосерцевинні волокна (MCF), маломодові волокна (FMF), міжсерцевинні перехресні завади (ICXT), фотонний ліхтар, багатоплощинне перетворення світла (MPLC), кремнієва фотоніка, MIMO-обробка, пропускна здатність.

ABSTRACT

The thesis consists of 82 pages, 11 tables, 6 figures and 38 references.

Purpose of the work – to conduct a comprehensive analysis of the theoretical foundations of Space Division Multiplexing (SDM) in fiber-optic communication systems, to investigate modern architectures of spatial multiplexers and multi-filament optical waveguides, and to perform a quantitative assessment of the throughput capacity of SDM systems in comparison with conventional single-mode fibers.

Relevance of the topic is driven by the approaching of modern optical networks to the nonlinear Shannon limit (about 100 Tbit/s for standard single-mode fiber), which creates a threat of a “capacity crunch” against the background of exponential growth of global Internet traffic. Space Division Multiplexing technology, which utilizes the previously unused spatial dimension of the optical fiber (multi-core and few-mode structures), is recognized by the scientific community as the only promising way for further scalability of backbone network throughput.

Object of research – the processes of multi-channel optical signal transmission in Space Division Multiplexing systems, including inter-core crosstalk (ICXT) and differential group delay (DGD) phenomena.

Subject of research – theoretical models (nonlinear Schrödinger equation, coupled-mode theory, coupled-power theory), architectures of spatial multiplexers (photonic lanterns, Multi-Plane Light Conversion – MPLC, 3D waveguides), designs of multi-filament optical waveguides (few-mode fibers FMF, multi-core fibers MCF, hybrid FM-MCF), and methods for throughput estimation based on a modified Shannon formula.

Research methods – analysis of scientific and technical literature, comparative analysis of spatial multiplexing technologies, mathematical modeling of crosstalk using Koshihita–Saitoh analytical expressions, quantitative calculation of throughput for different types of multi-core fibers (heterogeneous MCF, strongly coupled CC-MCF), as well as analysis of world experimental records (e.g., 22.9 Pb/s transmission by NICT, 2023).

Keywords: Space Division Multiplexing (SDM), nonlinear Shannon limit, multi-core fibers (MCF), few-mode fibers (FMF), inter-core crosstalk (ICXT), photonic lantern, Multi-Plane Light Conversion (MPLC), silicon photonics, MIMO processing, throughput capacity.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП	15
1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОСТОРОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В ОПТИЧНОМУ ЗВ'ЯЗКУ	18
1.1 Еволюція оптичних мереж та межі пропускної здатності традиційних одномодових волокон	18
1.1.1 Історичний розвиток технологій мультиплексування (TDM, WDM, PDM).....	18
1.1.2 Нелінійна межа Шеннона та оптичний ефект Керра	19
1.1.3 Математичне моделювання нелінійних спотворень (рівняння Шредінгера).....	20
1.1.4 Криза пропускної здатності (capacity crunch) та необхідність просторового мультиплексування	21
1.2 Фізичні принципи технології просторового мультиплексування (SDM). 22	
1.2.1 Загальна концепція просторового мультиплексування	22
1.2.2 Фотонні ліхтарі (Photonic Lanterns): принцип дії та характеристики 23	
1.2.3 Багатоплощинне перетворення світла (MPLC)	25
1.2.4 Інтегральні 3D-хвильоводи та інші технології	25
1.2.5 Роль MIMO-обробки та модозалежних втрат (MDL)	26
1.3 Класифікація багатозв'язних світловодів: багатосерцевинні (MCF) та маломодові (FMF) оптичні волокна.....	27
1.3.1 Маломодові волокна (FMF): фізичні принципи та проблеми DGD ...	27
1.3.2 Багатосерцевинні волокна (MCF): гомогенні та гетерогенні структури	31
1.3.3 Гібридні волокна (FM-MCF) та інноваційні топології	32
1.4 Аналіз пропускної здатності багатозв'язних світловодів	33
1.4.1 Теорія зв'язаних мод (CMT) та теорія зв'язаної потужності (CPT)	33
1.4.2 Вплив макровигинів та мікрозбурень на перехресні завади	36
1.4.3 Експериментальне підтвердження: світові рекорди пропускної здатності.....	36
1.5 Висновки до розділу 1.....	38

2 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБКИ ПРОСТОРОВИХ МУЛЬТИПЛЕКСЕРІВ ТА ОБЛАДНАННЯ	40
2.1 Класифікація та архітектура сучасних просторових мультиплексерів	41
2.1.1 Вимоги до просторових мультиплексерів у системах SDM	41
2.1.2 Фотонні ліхтарі як основний тип волоконних мультиплексерів	42
2.1.2 Фотонні ліхтарі як основний тип волоконних мультиплексерів	43
2.1.3 MPLC-пристрої: принципи та досягнення	44
2.1.4 3D-хвилеводи та OAM-системи	47
2.1.5 Порівняльний аналіз технологій	47
2.2 Інтегрально-оптичні та фотонно-кристалічні компоненти для систем SDM.....	48
2.2.1 Кремнієва фотоніка як платформа для SDM-компонентів	48
2.2.2 Ультраткомпактні мультиплексери мод на базі SOI	49
2.2.3 Реконфігуровані SDM-комутатори та ROADM	50
2.2.4 Оптичні процесори унітарних перетворень.....	51
2.2.5 Мікромасштабні фотонні ліхтарі з 3D-нанодруку	52
2.3 Аналіз передових світових досягнень у надвисокошвидкісних мережах	53
2.3.1 Фізика міжсерцевинних перехресних завад (ICXT)	54
2.3.2 Оптимізація профілів показника заломлення для ультранизких завад	54
2.3.3 Рекорд пропускної здатності 22,9 Пбіт/с	56
2.3.4 Рекорд для стандартного діаметра оболонки: 1,7 Пбіт/с (2025).....	57
2.4 Висновки до розділу 2.....	58
3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ SDM-СИСТЕМ	61
3.1 Аналіз впливу перехресних завад на якість передачі сигналу в багатосерцевинних волокнах	61
3.1.1 Математична модель для розрахунку перехресних завад.....	61
3.1.3 Результати розрахунку та їх інтерпретація	63
3.1.4 Вплив перехресних завад на якість сигналу	64
3.2 Порівняльний розрахунок пропускної здатності базової ВОЛЗ (традиційна архітектура проти SDM).....	65
3.2.1 Вихідні параметри	66

3.2.2 Розрахунок сумарної пропускної здатності	67
3.2.3 Аналіз результатів	68
3.3 Перспективи використання багатозв'язних світловодів у мережах наступного покоління.....	69
3.3.1 Центри обробки даних (ЦОД) як первинний драйвер впровадження SDM.....	70
3.3.2 Магістральні та підводні лінії зв'язку.....	70
3.3.3 Доступні мережі (FTTH) та міські з'єднання.....	71
3.3.4 Ключові бар'єри та шляхи їх подолання	72
3.3.5 Прогноз впровадження SDM.....	73
3.4 Висновки до розділу 3.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

5G, 6G	покоління мобільного зв'язку (п'яте, шосте)
AWGN	адитивний білий гаусовий шум (Additive White Gaussian Noise)
BER	коефіцієнт бітових помилок (Bit Error Rate)
CC-MCF	волокно зі зв'язаними серцевинами (Coupled-Core Multi-Core Fiber)
CMT	теорія зв'язаних мод (Coupled Mode Theory)
CPT	теорія зв'язаної потужності (Coupled Power Theory)
DGD	диференційна групова затримка (Differential Group Delay)
DSP	цифрова обробка сигналів (Digital Signal Processing)
EDFA	підсилювач на основі легованого ербієм волокна (Erbium-Doped Fiber Amplifier)
FEC	пряма корекція помилок (Forward Error Correction)
FIR	фільтр зі скінченною імпульсною характеристикою (Finite Impulse Response)
FMF	маломодове волокно (Few-Mode Fiber)
FM-MCF	маломодове багатосерцевинне волокно (Few-Mode Multi-Core Fiber)
FTTH	оптичне волокно до дому (Fiber to the Home)
FWM	чотирьоххвильове змішування (Four-Wave Mixing)
ICXT	міжсерцевинні перехресні завади (Inter-Core Crosstalk)
IEC	Міжнародна електротехнічна комісія (International

Electrotechnical Commission)

IoT	Інтернет речей (Internet of Things)
ITU-T	Міжнародний союз електрозв'язку – сектор стандартизації
LCoS	рідкокристалічний просторовий модулятор світла (Liquid Crystal on Silicon)
LP	лінійно поляризована мода (Linearly Polarized mode)
MCF	багатосерцевинне волокно (Multi-Core Fiber)
MDL	модозалежні втрати (Mode-Dependent Loss)
MIMO	багатоканальний вхід / багатоканальний вихід (Multiple-Input Multiple-Output)
MPLC	багатоплощинне перетворення світла (Multi-Plane Light Conversion)
MZI	інтерферометр Маха–Цендера (Mach–Zehnder Interferometer)
NICT	Національний інститут інформаційних та комунікаційних технологій (Японія)
NLSE	нелінійне рівняння Шредінгера (Nonlinear Schrödinger Equation)
OAM	орбітальний кутовий момент (Orbital Angular Momentum)
OFDM	мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PDM	поляризаційне мультиплексування (Polarization Division Multiplexing)
PL	фотонний ліхтар (Photonic Lantern)

PON	пасивна оптична мережа (Passive Optical Network)
PSWGC	поляризаційно-розділювальна дифракційна ґратка-відгалужувач (Polarization-Splitting Waveguide Grating Coupler)
QAM	квадратурна амплітудна модуляція (Quadrature Amplitude Modulation)
ROADM	реконфігурований мультиплексор введення/виведення (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)
SDM	просторове мультиплексування (Space Division Multiplexing)
SLM	просторовий модулятор світла (Spatial Light Modulator)
SNR	відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio)
SOI	кремній-на-ізоляторі (Silicon-on-Insulator)
SPM	фазова саомодуляція (Self-Phase Modulation)
SSMF	стандартне одномодове волокно (Standard Single-Mode Fiber)
TDM	часове мультиплексування (Time Division Multiplexing)
WDM	мультиплексування за довжиною хвилі (Wavelength Division Multiplexing)
XPM	перехресна фазова модуляція (Cross-Phase Modulation)
ВОЛЗ	волоконно-оптична лінія зв'язку
ЦОД	центр обробки даних (data center)

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімке зростання обсягів глобального інтернет-трафіку, зумовлене розвитком хмарних обчислень, систем штучного інтелекту, мереж 5G/6G та потокового відео надвисокої роздільної здатності, створює безпрецедентне навантаження на волоконно-оптичні магістралі. Традиційні системи на базі стандартних одномодових волокон (SSMF) з часовим (TDM), хвильовим (WDM) та поляризаційним (PDM) мультиплексуванням наближаються до фундаментальної нелінійної межі Шеннона (близько 100 Тбіт/с), подолання якої неможливе через ефект Керра та інші нелінійні спотворення. Це явище, відоме як «криза пропускної здатності» (capacity crunch), вимагає пошуку нових фізичних вимірів для передачі інформації. Найперспективнішим напрямом визнано технологію просторового мультиплексування (Space Division Multiplexing, SDM), яка використовує раніше не задіяний просторовий вимір оптичного волокна – багатосерцевинні (MCF) та маломодові (FMF) структури. Однак ефективне впровадження SDM неможливе без глибокого аналізу архітектур просторових мультиплексерів (фотонні ліхтарі, MPLC, 3D-хвилеводи) та багатозв'язних світловодів, а також кількісної оцінки впливу перехресних завад (ICXT) та диференційної групової затримки (DGD) на пропускну здатність. Тому тема роботи, присвячена комплексному аналізу сучасного стану розробки та використання просторових мультиплексерів і багатозв'язних світловодів, є актуальною та має важливе науково-прикладне значення.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є проведення комплексного аналізу теоретичних засад, сучасних архітектур та перспектив впровадження просторових мультиплексерів і багатозв'язних світловодів у надвисокошвидкісних системах оптичного зв'язку. Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- дослідити еволюцію оптичних мереж, нелінійну межу Шеннона та обґрунтувати необхідність SDM;

- класифікувати та порівняти основні архітектури просторових мультиплексорів (фотонні ліхтарі, MPLC, 3D-хвилеводи, OAM) за параметрами внесених втрат, MDL та масштабованості;
- проаналізувати конструкції багатозв'язних світловодів (FMF, MCF, FM-MCF) та фізику деградаційних явищ DGD та ICXT;
- виконати математичне моделювання міжсерцевинних перехресних завад за аналітичними виразами Кошиби–Сайто для трьох типів MCF;
- провести кількісне порівняння пропускної здатності традиційного SSMF, гетерогенного MCF та сильнозв'язаного CC-MCF на ділянці 100 км;
- оцінити перспективи впровадження SDM у різних сегментах мереж (центри обробки даних, магістральні та підводні лінії, доступні мережі) та визначити ключові бар'єри комерціалізації.

Об'єкт дослідження – процеси передачі багатоканальних оптичних сигналів у системах із просторовим мультиплексуванням, включаючи явища міжсерцевинних перехресних завад та диференційної групової затримки.

Предмет дослідження – теоретичні моделі (нелінійне рівняння Шредінгера, теорія зв'язаних мод, теорія зв'язаної потужності), архітектури просторових мультиплексорів, конструкції багатозв'язних світловодів та методи оцінки пропускної здатності на основі модифікованої формули Шеннона.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу науково-технічної літератури, порівняльного аналізу технологій SDM, математичного моделювання перехресних завад з використанням аналітичних виразів Кошиби–Сайто, кількісного розрахунку пропускної здатності, а також аналізу світових експериментальних рекордів.

У дипломній роботі я розрахував рівні перехресних завад для трьох типів багатосерцевинних волокон. Для гетерогенного MCF з траншейною ізоляцією вийшло $-60,9$ дБ/100 км, для гомогенного MCF зі слабким зв'язком $-46,1$ дБ/100 км, а для сильнозв'язаного CC-MCF $-14,0$ дБ/100 км. Потім за формулою Шеннона я порівняв пропускну здатність на відстані 100 км. Звичайне одномодове волокно дає приблизно 70 Тбіт/с. Семисерцевинне гетерогенне MCF

– вже 0,47 Пбіт/с, тобто в 6,7 рази більше. А дев'ятнадцятисерцевинне SS-MCF – 8,3 Пбіт/с, це аж у 120 разів більше. З цих розрахунків видно, що гетерогенні MCF можна використовувати без складної MIMO-обробки, бо завади дуже малі. А SS-MCF дає набагато більше каналів, але для нього обов'язково потрібен потужний цифровий процесор. Отже, я підтвердив, що просторове мультиплексування справді допомагає обійти нелінійну межу Шеннона і є хорошим рішенням для майбутніх надшвидкісних оптичних мереж.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОСТОРОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В ОПТИЧНОМУ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Еволюція оптичних мереж та межі пропускної здатності традиційних одномодових волокон

Сучасна парадигма розвитку глобальних інформаційно-комунікаційних систем характеризується безперервним, експоненційним зростанням обсягів даних, що передаються магістральними мережами. Цей процес зумовлений стрімким розвитком хмарних обчислень, мультимедійних сервісів високої роздільної здатності, розподілених систем штучного інтелекту, а також розгортанням мереж мобільного зв'язку п'ятого (5G) та в перспективі шостого (6G) поколінь.

1.1.1 Історичний розвиток технологій мультиплексування (TDM, WDM, PDM)

За останні два десятиліття пропускна здатність оптичних мереж збільшилася у понад сто разів, демонструючи стабільний середньорічний темп зростання на рівні 40% [1]. Історично цей безпрецедентний розвиток транспортних систем забезпечувався шляхом послідовного залучення та експлуатації нових фізичних вимірів для передачі інформації. Початкова еволюція базувалася на використанні часового мультиплексування (Time Division Multiplexing, TDM), де дані різних каналів розділялися у часі. Згодом відбувся фундаментальний перехід до технології мультиплексування за довжиною хвилі (Wavelength Division Multiplexing, WDM), яка дозволила одночасно передавати множину незалежних інформаційних потоків на різних оптичних несучих по одному стандартному оптичному волокну [3].

Подальше нарощування швидкості передачі даних стало можливим завдяки впровадженню технологій когерентного детектування, які, на відміну від прямого детектування, дозволили вилучати інформацію не лише з амплітуди, але й з фази

та поляризації оптичної хвилі. Це відкрило шлях до застосування поляризаційного мультиплексування (Polarization Division Multiplexing, PDM) у комбінації з високорівневими форматами квадратурної амплітудної модуляції (M-QAM) та мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM) [3]. Впровадження цих інновацій наблизило сучасні телекомунікаційні системи до теоретичної межі їх інформаційної ємності. Наприклад, в лабораторних умовах було продемонстровано передачу даних зі швидкістю 101.7 Тбіт/с (за допомогою форматів PDM-128QAM-OFDM) на відстань до 165 км через стандартне одномодове волокно (Standard Single-Mode Fiber, SSMF) з використанням С- та L-діапазонів [4].

1.1.2 Нелінійна межа Шеннона та оптичний ефект Керра

Незважаючи на такі видатні інженерні досягнення, комбінація TDM, WDM та PDM у сучасних великомасштабних транспортних системах стрімко наближає інформаційну ємність стандартних одномодових волокон до фундаментальної фізичної межі, подолання якої неможливе в рамках традиційних підходів [3]. Згідно з класичною теоремою Шеннона-Гартлі, розробленою для лінійних каналів зв'язку, пропускна здатність каналу зв'язку з адитивним білим гаусовим шумом (AWGN) логарифмічно залежить від смуги пропускання та відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму (Signal-to-Noise Ratio, SNR). У контексті волоконно-оптичних ліній зв'язку ця межа набуває істотно модифікованого вигляду через іманентно притаманні кварцовому склу нелінійні оптичні ефекти, що виявляються при високих рівнях оптичної потужності [2].

Ця специфічна для оптичних систем фундаментальна межа отримала назву "нелінійна межа Шеннона" (nonlinear Shannon limit) [1]. Її походження тісно пов'язане з оптичним ефектом Керра – фізичним явищем, що полягає у залежності показника заломлення середовища від інтенсивності оптичного випромінювання. Математично динаміка поширення електромагнітної хвилі в нелінійному диспергуючому середовищі з високою точністю описується нелінійним рівнянням

Шредінгера (Nonlinear Schrödinger Equation, NLSE). У спрощеному вигляді, за умови нехтування лінійною дисперсією та загасанням для ізольованого аналізу суто нелінійного фазового зсуву, це рівняння можна записати наступним чином:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = i\gamma|E|^2E$$

Де $E(z, t)$ — комплексна огибаюча амплітуди електричного поля оптичної хвилі, z — поздовжня координата поширення вздовж волокна, а γ — нелінійний коефіцієнт волокна, який залежить від нелінійного показника заломлення матеріалу та ефективної площі моди [6]. Аналітичне рішення цього диференціального рівняння має вигляд $E(z, t) = E(0, t)e^{i\gamma|E(z, t)|^2z}$ і безпосередньо демонструє виникнення фазового зсуву, пропорційного квадрату амплітуди (тобто інтенсивності) сигналу.⁷ У багатоканальних системах (WDM) цей ефект призводить не лише до фазової самомодуляції (Self-Phase Modulation, SPM), але й до перехресної фазової модуляції (Cross-Phase Modulation, XPM) та чотирьоххвильового змішування (Four-Wave Mixing, FWM).

1.1.3 Математичне моделювання нелінійних спотворень (рівняння Шредінгера)

Теоретичні розрахунки нижньої межі пропускної здатності для нелінійного оптичного каналу з пам'яттю, який зводиться до еквівалентної моделі каналу AWGN без пам'яті, демонструють нелінійну поведінку при високих значеннях відношення сигнал/шум. Для двох станів поляризації пропускна здатність наближається до формули $C = 2 \log_2(1 + SNR)$, проте в реальному нелінійному каналі ефективне відношення сигнал/шум погіршується при збільшенні потужності через генерацію нелінійного шуму [7]. Аналіз спільних комплексно-значних циркулярно-симетричних гаусових (CSCG) розподілів випадкових величин для опису фазових зсувів у нелінійному середовищі показує, що

щільність імовірності розподілу сигналів на виході нелінійного волокна зазнає сильних флуктуацій.

Внаслідок дії ефекту Керра виникає фундаментальний парадокс оптичного зв'язку: для збільшення пропускної здатності необхідно підвищувати відношення сигнал/шум, що традиційно досягається шляхом збільшення потужності оптичного сигналу, що вводиться у волокно. Проте нелінійні спотворення (SPM, XPM, FWM) є наслідком кубічної залежності нелінійної інтерференції від потужності сигналу. Після досягнення певного критичного рівня потужності подальше її збільшення призводить до того, що нелінійні завади зростають значно швидше, ніж потужність корисного сигналу. Як наслідок, ефективне відношення сигнал/шум стрімко падає, спричиняючи незворотне погіршення спектральної ефективності та зменшення пропускної здатності [8].

За поточними оцінками, потенційна пропускна здатність стандартного одномодового волокна обмежується значенням приблизно у 100 Тбіт/с (при збереженні сучасних рівнів дисперсії та параметрів підсилювачів на основі легованого ербієм волокна, EDFA) [4]. Враховуючи, що найновіші мережеві рішення вже забезпечують спектральну ефективність на рівні близько 3.2 рад/ТГц/поляризацію, галузь постала перед реальною загрозою так званої "кризи пропускної здатності" (capacity crunch) [1]. Подальше екстраполювання існуючих тенденцій (які нагадують дію закону Мура для кремнієвих інтегральних схем) вимагатиме від оптичних систем передачі швидкостей на рівні 40 петабіт на секунду на одне волокно протягом наступних 25 років, що є абсолютно недосяжним для існуючої інфраструктури на базі одномодових волокон [2].

1.1.4 Криза пропускної здатності (capacity crunch) та необхідність просторового мультиплексування

Для подолання цього фізичного бар'єру необхідно розширити рівняння Шеннона новим параметром. Формулу пропускної здатності можна модифікувати для багатовимірного каналу як $C \sim M \times B \times P \times \log_2(1 + SNR)$, де M — кількість

просторових шляхів, B — частотна смуга пропускання, P — кількість станів поляризації, і SNR — відношення сигнал/шум [2]. Оскільки параметри B (спектральна смуга), P (дві ортогональні поляризації) та SNR майже вичерпали свої межі масштабування у рамках SSMF, збільшення параметра M розглядається науковою спільнотою як єдиний перспективний шлях. Саме цей підхід лежить в основі концепції просторового мультиплексування (Space Division Multiplexing, SDM), яка експлуатує раніше не задіяний просторовий вимір оптичного середовища і є найбільш багатообіцяючим кандидатом для забезпечення подальшого масштабування комунікаційних мереж у найближчі десятиліття [3].

1.2 Фізичні принципи технології просторового мультиплексування (SDM)

Просторове мультиплексування (SDM) є новітньою архітектурною парадигмою в оптичному зв'язку, сутність якої полягає у забезпеченні одночасної та незалежної передачі множини інформаційних потоків через окремі просторові канали в межах єдиної оптичної структури [9]. Ця технологія дозволяє масштабувати пропускну здатність лінії зв'язку прямо пропорційно кількості введених просторових каналів, уникаючи при цьому обмежень нелінійної межі Шеннона, властивих одномодовим системам [3]. Впровадження систем SDM вимагає глибокої технологічної трансформації не лише самих оптичних волокон, але й усієї супутньої компонентної бази, зокрема оптичних підсилювачів, трансиверів та модових мультиплексорів/демультиплексорів [9].

1.2.1 Загальна концепція просторового мультиплексування

Оптичні мультиплексори у системах SDM виконують критично важливу функцію: вони забезпечують ефективне поєднання кількох незалежних одномодових сигналів (що генеруються стандартними лазерними передавачами) у єдине багатомодове або багатосерцевинне оптичне волокно з мінімальними втратами та перехресними завадами [10]. Від якості роботи мультиплексора

залежить загальний енергетичний бюджет лінії зв'язку та рівень модозалежних втрат (Mode-Dependent Loss, MDL), які суттєво впливають на подальшу цифрову обробку сигналу [12].

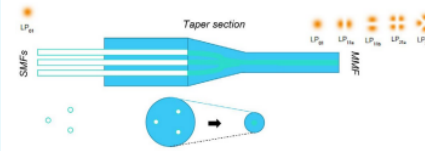
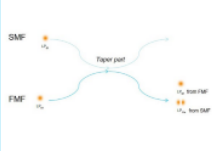
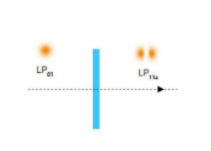
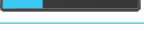
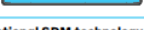
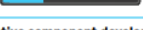
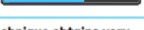
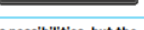
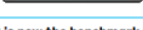
TECHNOLOGY	PHOTONIC LANTERN		EVANESCENT WAVE COUPLING	PHASE PLATE DEVICES	
Subfamily	Non-mode selective ¹	Mode selective ²	Fiber coupler ³	Free space unit converters (Spatial Light Modulator, Binary Phase Plate, Metamaterials, etc.) ⁴	Multi-Plane Light Conversion ⁵
Component					
Principle	Technique which merges several single-mode cores into a single multimode core using a conical waveguide, allowing the lower modes of a multimode (MMF) or few-mode (FMF) fiber to be excited. Different manufacturing techniques exist on the market. For example, a photonic lantern can be made from multi-core fibers, from a single-mode fiber bundle or by etching in a glass block.		For this technology, which consists of exploiting an evanescent wave to achieve index matching between two modes in an SMF and an FMF, the fundamental mode of the SMF is converted into the mode with same effective index in the FMF. Using a cascade architecture based on multiple SMFs and a single FMF, it is then possible to build a mode multiplexer.	This category brings together a number of technologies that enable unit conversion from the fundamental mode to a given mode using a phase mask. These multiplexers then need to be coupled into the fiber by means of successive reflections on separator and mirror plates in order to inject all the modes generated into a single optical fiber.	The MPLC simultaneously converts each single-mode input into a given mode in an MMF/FMF using successive reflections on a single phase plate and a mirror at a specific propagation distance.
Potential number of modes					
Crosstalk performance					
Insertion loss performance					
Industrialization capability					
Caillabs' opinion	Conventional SDM technology that has delivered promising performance, but is now too limited by its zero or partial selectivity.	A selective component developed in recent years in the laboratory which allows the modes to be excited separately, but it is still too complex to be manufactured and too fragile to be industrialized.	This technique obtains very good performances, especially in terms of crosstalk and 3-way insertion loss, but it has a limited number of modes due to its architecture.	Various possibilities, but the configurations are complicated to implement due to the coupling in the fiber, which makes this technology difficult to industrialize.	MPLC is now the benchmark for SDM, with the largest number of multiplexed modes in an industrialized product, while offering unmatched insertion loss (IL) and crosstalk (XT) performance.

Рисунок 1.1 - Класифікація технологій просторових мультиплексорів та принцип багатоплощинного перетворення світла (MPLC) [13]

На сьогоднішній день розроблено декілька фундаментально різних технологій створення просторових мультиплексорів, кожна з яких має специфічні переваги та фізичні обмеження. До трьох найпоширеніших категорій належать повністю волоконні фотонні ліхтарі, пристрої багатоплощинного перетворення світла (MPLC) та інтегральні 3D-хвилеводи [13].

1.2.2 Фотонні ліхтарі (Photonic Lanterns): принцип дії та характеристики

Фотонні ліхтарі (Photonic Lanterns, PL) є одним з найбільш успішних та інженерно зрілих підходів до мультиплексування просторових мод. Вони

представляють собою повністю волоконні пристрої, здатні здійснювати перетворення з низькими втратами набору з дискретної кількості одномодових входів у просторові моди єдиного маломодового або багатомодового виходу (і навпаки) [10]. Процес виготовлення традиційного фотонного ліхтаря базується на фізичному ефекті адіабатичного звуження. Масив незалежних одномодових волокон щільно пакується всередині скляної капілярної трубки, показник заломлення якої є нижчим за показник заломлення оболонок цих волокон. Отримана структура нагрівається у спеціальній печі та плавно розтягується (tapering). У зоні звуження діаметр одномодових серцевин стає настільки малим, що вони втрачають здатність утримувати фундаментальну моду. Електромагнітне поле витісняється з оригінальних серцевин у навколишнє середовище, і тепер сама капілярна трубка починає виконувати функцію нової, об'єднаної серцевини [14].

Якщо зміна геометричних розмірів уздовж осі поширення є достатньо плавною (дотримується критерій адіабатичності), переходи енергії між модами та випромінювання у навколишнє середовище зводяться до мінімуму, згідно з теоремою про локальні моди. Фотонні ліхтарі дозволяють досягти надзвичайно низьких внесених втрат (часто суб-децибельних рівнів) і мають широкий робочий спектральний діапазон (більше 100 нм) [10]. Їхня перевага також полягає у можливості прямого зварювання з лінійними маломодовими волокнами, що мінімізує втрати на оптичних інтерфейсах.¹⁹ У серії знакових експериментів фотонні ліхтарі на 3, 6, 10 та 15 мод були успішно застосовані в транспортних лініях з пропускною здатністю понад 100 Тбіт/с [10].

Однак, масштабування повністю волоконних фотонних ліхтарів до значно більшої кількості мод є надзвичайно складним завданням через технологічні труднощі контролю мікрогеометрії структури з десятками волокон катá процесу витягування [15].

1.2.3 Багатоплощинне перетворення світла (MPLC)

Багатоплощинне перетворення світла (Multi-Plane Light Conversion, MPLC) — це альтернативний підхід вільного простору (free-space technique), що забезпечує гнучке створення складних модових розподілів. MPLC базується на математичному принципі того, що будь-яке унітарне просторове перетворення (наприклад, перехід від сітки з N гаусових пучків від лазерних діодів до набору з N ортогональних мод Лагерра-Гауса або Ерміта-Гауса) може бути апроксимоване серією послідовних фазових модуляцій, які розділені вільним простором [13]. Відомо, що поширення світла у вільному просторі (в наближенні Френеля) діє як оптичне перетворення Фур'є. MPLC використовує каскад зі спеціально розрахованих фазових пластин (або програмованих просторових модуляторів світла — LCoS SLM) [10]. Промінь проходить через першу фазову маску, поширюється у просторі, зазнає дифракції, потрапляє на другу фазову маску і так далі. Технологія MPLC має виняткову масштабованість: за її допомогою успішно створено модоселективні мультиплексори на 45 і більше просторових мод [15]. Проте пристрої MPLC можуть мати вищі внесені втрати через багаторазові відображення/проходження та потребують прецизійного оптичного юстирування порівняно з цілісними волоконними пристроями [11].

1.2.4 Інтегральні 3D-хвильоводи та інші технології

Окрім цього, активно розвивається технологія інтегральних 3D-хвильоводів, які формуються у скляному монолітному блоці за допомогою фемтосекундного лазерного запису [10]. Короткі надпотужні імпульси лазера локально змінюють показник заломлення скла, що дозволяє "малювати" тривимірні хвильовідні структури довільної складності. Такі пристрої поєднують переваги інтегральної оптики з можливістю просторового маршрутизування світла, забезпечуючи плавний перехід від двовимірних масивів лазерних джерел до тривимірної структури багатосерцевинного волокна.

У таблиці 1.1 наведено порівняльний аналіз основних параметрів розглянутих технологій просторових мультиплексорів.

Таблиця 1.1 Порівняння технічних характеристик технологій просторового мультиплексування [9]

Тип мультиплекса ора	Фізичний принцип дії	Внесені втрати (IL)	Модозалежн і втрати (MDL)	Масштабова ність	Можливість інтеграції у лінію
Фотонний ліхтар (PL)	Адіабатичне звуження масиву SMF волокон (злиття серцевин)	Дуже низькі (< 1 дБ)	Низькі до середніх	Обмежена (практична межа ~ 15 мод)	Висока (пряме зварювання з оптичним волоконном)
MPLC (Multi-Plane Light Conversion)	Дифракція у вільному просторі та каскад фазових пластин	Середні (накопичуют ься з кількістю пластин)	Дуже низькі	Висока (доведено для > 45 мод)	Потребує юстируванн я та лінзових систем для з'єднання
Інтегральні 3D- хвилеводи	Локальна зміна показника заломлення скла фемтосекунд ним лазером	Низькі до середніх	Середні	Середня	Висока для платформ інтегральної фотоніки

1.2.5 Роль MIMO-обробки та модозалежних втрат (MDL)

Вирішальним фактором при проектуванні SDM-систем, особливо на базі маломодових волокон, є інтеграція оптичної підсистеми з потужними алгоритмами цифрової обробки сигналів на приймачі (Digital Signal Processing, DSP). Оскільки ідеального оптичного середовища не існує, мікроскопічні вигини, деформації та недоліки зрощування волокон неминуче призводять до явища перекачування енергії між модами (mode coupling або crosstalk) катá поширення сигналу [12]. Для розділення просторових каналів використовується технологія Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) [17].

Особливе місце в аналізі SDM систем посідають модозалежні втрати (MDL) — явище, при якому різні просторові моди зазнають різного ступеня оптичного загасання при проходженні через волокно, зварні шви або мультиплексори. Наявність сильного MDL призводить до того, що матриця передачі оптичного каналу стає неунітарною. Лінійна матрична еквалізація MIMO, хоч і здатна ефективно скасовувати лінійні перехресні завади шляхом інвертування каналної матриці, виявляється неспроможною повністю відновити початковий сигнал за умов селективного завмирання, зумовленого високим MDL. Це призводить до катастрофічного зростання частоти бітових помилок (BER) [12]. Парадоксально, але для систем з використанням MIMO-алгоритмів оптичний пристрій (наприклад, фотонний ліхтар) з низькою модовою селективністю, але вкрай низьким рівнем MDL виявляється більш ефективним, ніж пристрій з високою селективністю та значним MDL [9].

1.3 Класифікація багатозв'язних світловодів: багатосерцевинні (MCF) та маломодові (FMF) оптичні волокна

Апаратна реалізація систем просторового мультиплексування вимагає радикального перегляду конструкції оптичних волокон. Для забезпечення передачі безлічі просторових каналів було розроблено нові архітектури світловодів, які за своєю топологією та фізикою поширення світла класифікуються на три основні категорії: маломодові волокна (Few-Mode Fibers, FMF), багатосерцевинні волокна (Multi-Core Fibers, MCF) та найскладнішу гібридну структуру – маломодові багатосерцевинні волокна (Few-Mode Multi-Core Fibers, FM-MCF) [3].

1.3.1 Маломодові волокна (FMF): фізичні принципи та проблеми DGD

Маломодові оптичні волокна розробляються з метою забезпечення контрольованого поширення дискретної та чітко визначеної кількості

просторових мод (найчастіше від 2 до 15) всередині однієї розширеної серцевини [3]. Головною фізичною перевагою FMF, окрім самого факту розширення пропускної здатності, є суттєве збільшення ефективної площі поперечного перерізу (A_{eff}). Як згадувалося у підрозділі 1.1, нелінійні спотворення (зокрема ефект Керра) безпосередньо залежать від інтенсивності світла, яка визначається як оптична потужність, поділена на площу перерізу. Оскільки розширена серцевина FMF має значно більшу площу порівняно з типовими одномодовими волокнами (де діаметр серцевини складає близько 8-9 мкм), інтенсивність світла всередині FMF при рівній потужності передавача виявляється істотно нижчою. Це знижує нелінійний зсув фаз та відсуває нелінійну межу Шеннона, дозволяючи вводити вищу потужність та покращувати SNR без генерації надмірних нелінійних завад [5].

Теоретичний аналіз поширення електромагнітних хвиль у маломодових волокнах базується на розв'язанні рівнянь Максвелла. Оскільки різниця показників заломлення між серцевиною (n_{co}) та оболонкою (n_{cl}) у типових волокнах є дуже малою ($\Delta = \frac{n_{co}-n_{cl}}{n_{co}} \ll 1$), застосовується наближення слабого спрямування (weakly guiding approximation). У цьому наближенні можна вважати, що поляризація хвилі зберігається під час поширення (якби показники заломлення були абсолютно однаковими, хвиля поширювалася б як плоска у вільному просторі) [18]. Це дозволяє перейти від векторного хвильового рівняння до спрощеного скалярного рівняння Гельмгольца для поперечних компонент електричного поля:

$$\nabla^2 E_x - (\beta^2 - k^2)E_x = 0$$

$$\nabla^2 E_y - (\beta^2 - k^2)E_y = 0$$

де β — стала поширення відповідної моди вздовж осі z , $k = \frac{2\pi}{\lambda}n$ — хвильове число у середовищі. Розв'язок цих рівнянь у циліндричній системі координат дає

набір лінійно поляризованих (LP) мод. Індекс "mn" у позначенні LP_{mn} визначає просторову структуру поля: m — кількість азимутальних вузлових ліній (половин періоду варіації інтенсивності по колу), а n — кількість радіальних вузлів (максимумів інтенсивності вздовж радіуса).

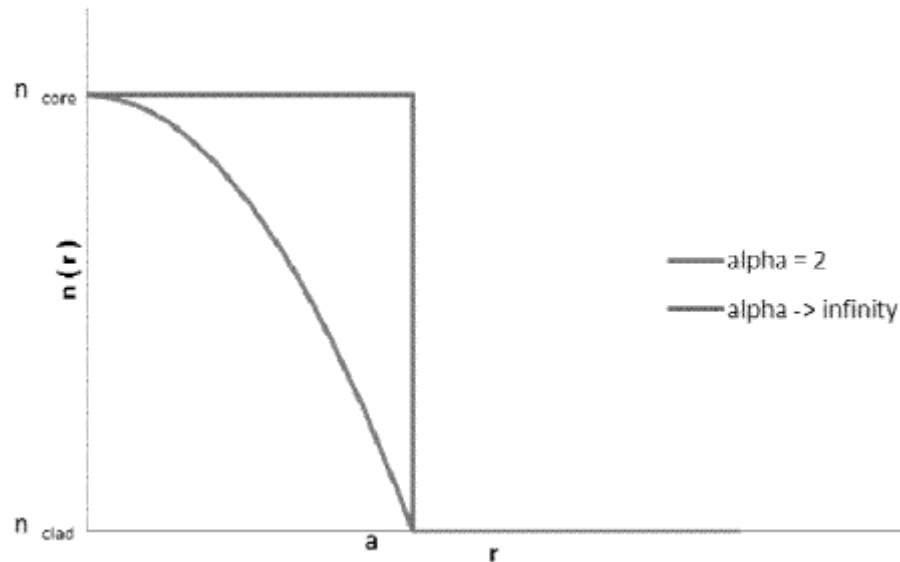


Рисунок 1.2 - Профіль показника заломлення маломодових волокон: вплив ступінчастого та градієнтного дизайну на сталі поширення [19]

Однією з найсерйозніших проблем FMF є диференційна групова затримка (Differential Group Delay, DGD). Кожна LP мода поширюється зі своєю унікальною груповою швидкістю ($v_g = \frac{d\omega}{d\beta}$). Внаслідок цього імпульси, що несуть дані і відправлені одночасно різними модами, прибувають до приймача у різний час [18]. Аналітично різниця в часі затримки на одиницю довжини волокна (ΔT) для різних мод може бути оцінена за допомогою спостереження за інтерференційними мінімумами у частотній області:

$$\Delta T = \frac{\lambda_c^2}{cL\Delta\lambda}$$

де λ_c — центральна довжина хвилі між сусідніми мінімумами, $\Delta\lambda$ — спектральна відстань між ними, L — довжина волокна, c — швидкість світла у

вакуумі [20]. Наявність значної DGD викликає сильне розширення імпульсів (модову дисперсію) та вимагає застосування потужних цифрових фільтрів з нескінченною імпульсною характеристикою (FIR) у MIMO-процесорі для часової еквалізації. Обчислювальна складність (C_F) такої еквалізації у частотній області безпосередньо масштабується з ростом DGD:

$$C_F = (4 + 2N) \log_2(R_s \Delta\tau LB) + 4N$$

де N — кількість мод, R_s — частота дискретизації, $\Delta\tau$ — значення диференційної групової затримки (DGD) на одиницю довжини, а B — символна швидкість передачі даних [18]. Зростання C_F прямо веде до надмірного енергоспоживання приймача.

Для мінімізації DGD інженери маніпулюють профілем показника заломлення волокна [19]. Волокна зі ступінчастим профілем (step-index) характеризуються дуже великою DGD і придатні лише для коротких ліній зв'язку. Натомість використання градієнтного профілю показника заломлення (graded-index), де показник плавно спадає за параболічним законом від центру до оболонки, дозволяє вирівняти час прольоту різних мод. Моді вищих порядків поширюються по довшій синусоїдальній траєкторії, але їх шлях частково пролягає через зовнішні шари серцевини з нижчим показником заломлення, де швидкість світла вища [21]. Окрім параболічних профілів, застосовуються структури з депресованою оболонкою ("траншеєю") та кільцевими підвищеннями індексу, які дозволяють досягти DGD на рівні менше 50 пс/км [22].

У таблиці 1.2 наведено типову експериментальну матрицю перехресних завад для фотонного ліхтаря, який генерує 6 просторових мод (фундаментальну LP_{01} , та вищі LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} , LP_{02}). Видимі значення (на рівні від -14 до -28 дБ) підтверджують необхідність застосування MIMO для компенсації модового перемішування.

Таблиця 1.2 - Матриця модових перехресних завад фотонного ліхтаря для генерації 6 мод, дБ [23]

Мода	LP01	LP11a	LP11b	LP21a	LP21b	LP02
LP_{01}	-	-17.18	-16.36	-22.73	-23.81	-23.38
LP_{11a}	-19.09	-	-15.64	-16.67	-19.32	-20.74
LP_{11b}	-18.61	-14.38	-	-17.58	-18.13	-19.70
LP_{21a}	-27.67	-16.43	-16.92	-	-15.14	-19.18
LP_{21b}	-28.15	-17.62	-17.75	-14.96	-	-18.41
LP_{02}	-24.94	-19.23	-18.78	-22.34	-19.27	-

1.3.2 Багатосерцевинні волокна (MCF): гомогенні та гетерогенні структури

Багатосерцевинні волокна (MCF) використовують абсолютно інший підхід просторового мультиплексування: вони інтегрують масив фізично ізольованих серцевин у межах однієї зовнішньої оболонки (яка може мати як стандартний діаметр 125 мкм, так і розширений до 200-250 мкм) [3]. Кожна з цих серцевин функціонує як незалежний одномодовий (або маломодовий, у випадку FM-MCF) хвилевід. Найскладнішим інженерним викликом при проектуванні MCF є вибір правильного кроку (pitch) між серцевинами. Зменшення відстані максимізує кількість каналів у заданому перерізі, але одночасно призводить до експоненційного зростання міжсерцевинних перехресних завад (Inter-Core Crosstalk, ICXT). Це явище зумовлене проникненням згасаючих електромагнітних полів за межі однієї серцевини та їх захопленням сусідньою.

Залежно від структури серцевин, MCF поділяються на дві великі категорії:

1. Гомогенні (однорідні) MCF: Всі серцевини виготовляються ідентичними за розміром та профілем показника заломлення. В результаті їхні сталі поширення (β) є однаковими, що забезпечує ідеальну фазову узгодженість ($\Delta\beta \approx 0$). З погляду квантової механіки та теорії зв'язаних мод, це створює умови для резонансного перекачування енергії між серцевинами, що призводить до дуже високого рівня ХТ. Такі волокна (їх ще називають coupled-core MCF) спеціально розробляються для систем, що використовують жорстку масову МІМО-обробку для спільного декодування

всіх серцевин.

2. Гетерогенні (неоднорідні) MCF: Для кардинального придушення ІСХТ кожна сусідня серцевина проектується з навмисно зміненим профілем або діаметром [24]. Ця навмисна асиметрія породжує розбіжність в ефективних показниках заломлення (наприклад, $\Delta n_{eff} \geq 2.0 \times 10^{-3}$) та значну фазову неузгодженість ($\Delta\beta \neq 0$) [25]. В умовах порушеного фазового синхронізму перетікання енергії блокується, і перехресні завади можуть бути знижені до рівня -40...-50 дБ/100 км, що дозволяє декодувати канали кожної серцевини незалежно (uncoupled MCF), уникаючи необхідності складного масового МІМО.

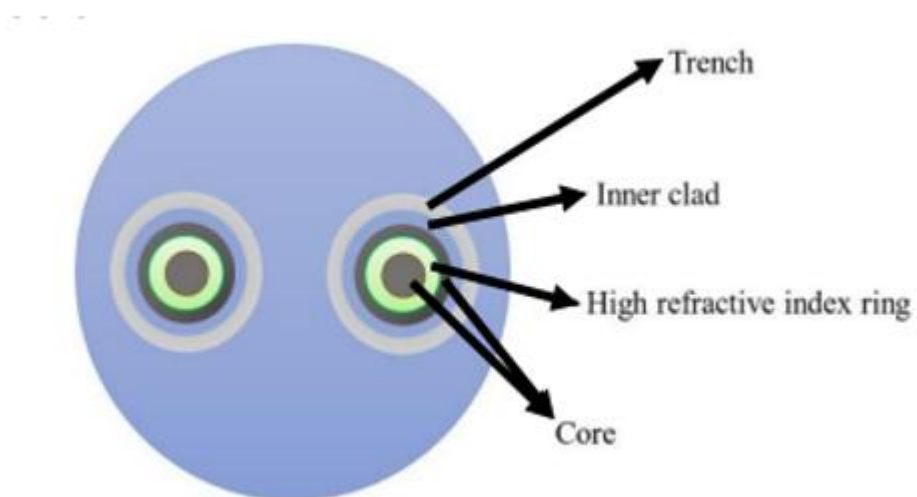


Рисунок 1.3 - Поперечний переріз багатосерцевинного маломодового волокна з траншейною ізоляцією, високорефракційним кільцем та внутрішньою оболонкою [26]

1.3.3 Гібридні волокна (FM-MCF) та інноваційні топології

Для подальшого зменшення ХТ без необхідності збільшення відстані між серцевинами активно впроваджуються такі інноваційні оптичні топології, як траншейно-допоміжні структури (trench-assisted) та багатосерцевинні волокна з

повітряними отворами (holey MCF). У траншейних структурах серцевина оточується кільцем з кварцу зі зниженим (депресованим) показником заломлення. Ця "траншея" виступає потужним оптичним бар'єром, який експоненційно пригнічує "хвіст" еванесцентного поля, не дозволяючи йому досягти сусідньої серцевини [26]. Волокна з повітряними отворами використовують ще більш екстремальний контраст показників заломлення (скло $n \approx 1.45$, повітря $n \approx 1$), що забезпечує безпрецедентну просторову ізоляцію каналів і дозволяє розташовувати їх з дуже високою щільністю, наприклад, розміщуючи до 38 серцевин у волокні зі збільшеною оболонкою [27].

1.4 Аналіз пропускної здатності багатозв'язних світловодів

Фундаментальне розуміння фізичних обмежень та максимальної пропускної здатності систем SDM вимагає точного математичного моделювання процесів обміну енергією між просторовими каналами. Центральним математичним апаратом для цього аналізу є теорія зв'язаних мод (Coupled Mode Theory, CMT) та похідна від неї теорія зв'язаної потужності (Coupled Power Theory, CPT) [28].

1.4.1 Теорія зв'язаних мод (CMT) та теорія зв'язаної потужності (CPT)

Відповідно до CMT, якщо два світловоди (або просторові моди) розташовані достатньо близько, їх електромагнітні поля перекриваються. Зміна комплексної амплітуди електричного поля E_m в m -й серцевині під впливом збурення від n -ї серцевини вздовж осі поширення z описується системою зв'язаних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dE_m}{dz} = j\beta_m E_m + j\kappa_{mn} E_n$$

де β_m — стала поширення m -ї моди, а κ_{mn} — коефіцієнт модового зв'язку (mode coupling coefficient). Цей коефіцієнт визначається через інтеграл перекриття електричних полів взаємодіючих серцевин, враховуючи просторовий розподіл діелектричної проникності середовища (різницю квадратів показників заломлення $\Delta n^2 = n_1^2 - n_2^2$). Його суворий математичний вираз для лінійно поляризованих мод LP_{mn} базується на інтегруванні полів у циліндричних координатах і записується як складна функція від функцій Бесселя (J_m, K_m) та параметрів волокна (хвильового параметра V , нормалізованих поперечних хвильових чисел U та W) [29].

Однак оптичне волокно у реальних телекомунікаційних системах ніколи не прокладається як ідеально пряма лінія. Воно піддається згинанням у кабельних каналах, скручуванням, температурним флуктуаціям та механічним напругам [29]. Тому перехресні завади (ICXT) слід розглядати як стохастичний процес, який залежить від радіуса макровигину (R_b), кореляційної довжини збурень (L_c) та дисперсії структурних параметрів. Вигин волокна кардинально змінює оптичний шлях для різних серцевин (ті, що знаходяться на зовнішньому радіусі вигину, змушені проходити більшу відстань) та викликає пружно-оптичний ефект, що змінює показник заломлення скла під натягом [28].

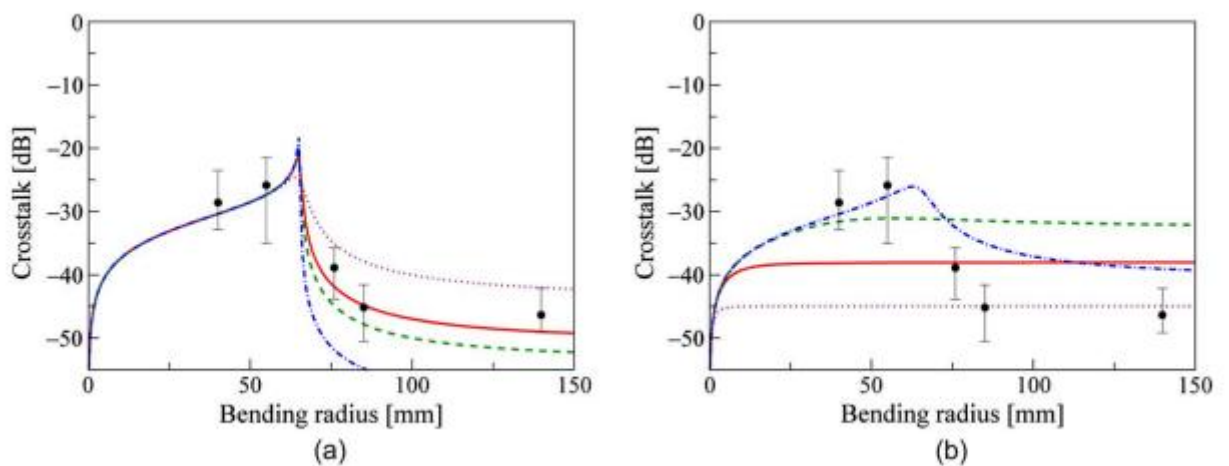


Рисунок 1.4 - Залежність міжсерцевинних перехресних завад від радіуса вигину у гетерогенних багатосерцевинних волокнах[31]

Математичний аналіз, наведений у літературі [32], дозволяє вивести аналітичні вирази для середнього рівня перехресних завад ($\bar{X}$). Для гетерогенних та гомогенних MCF в умовах, коли домінує фазова неузгодженість, індукована макровигинами (для відносно малих радіусів вигину R_b), середній ХТ лінійно залежить від радіуса вигину:

$$\bar{X} = \frac{2\kappa^2 R_b L}{\beta_0 D}$$

де κ — коефіцієнт зв'язку, R_b — радіус вигину, L — довжина ділянки волокна, β_0 — стала поширення, D — відстань між сердцевинами (pitch) [32]. Ця лінійна залежність ілюструє неінтуїтивний фізичний факт: при зменшенні радіуса вигину (сильнішому вигині) перехресні завади між сердцевинами зменшуються. Це відбувається тому, що геометрія вигину штучно створює асиметрію фазових швидкостей між симетричними сердцевинами, руйнуючи умови резонансного (синхронного) перекачування енергії [30].

Ця формула залишається чинною лише до моменту досягнення критичного радіуса вигину (R_c). Для гетерогенних MCF R_c обернено пропорційний власній фазовій неузгодженості між сердцевинами ($\Delta\beta_0$) і обчислюється як:

$$R_c = \frac{\beta_0}{\Delta\beta_0 D}$$

Якщо ж волокно має радіус вигину значно більший за критичний ($R_b \gg R_c$), тобто коли воно розгорнуте майже у пряму лінію, вплив макровигину нівелюється. У цьому режимі (режимі прямого волокна) перехресні завади визначаються мікрозбуреннями, зокрема кореляційною довжиною L_c . Для прямого гетерогенного MCF формула спрощується до оберненої залежності від квадрата фазової неузгодженості:

$$\bar{X} = 2\kappa^2 \Delta\beta_0^2 L L_c$$

Для прямого гомогенного MCF вираз для середнього значення перехресних завад набуває вигляду $\bar{X} = 2\kappa^2 L L_c$ [28].

1.4.2 Вплив макровигинів та мікрозбурень на перехресні завади

Загальний фазовий фактор взаємодії G , який враховує модовий зв'язок, вплив вигину та асиметрію серцевин, може описуватися формулою $G^2 = a^2 + b \cos \theta + c^2$. Залежно від нормалізованого стандартного відхилення збурень (мікродеформацій) Σ , статистичний розподіл перехресних завад поводитьсь по-різному: він може підкорятися функції розподілу Дірака (спричиняючи сильні осциляції ХТ у вигляді функції sinc), експоненційному розподілу (згладжуючи осциляції до плинного середнього значення) або гаусовому розподілу (виступаючи перехідним станом між ними) [32].

1.4.3 Експериментальне підтвердження: світові рекорди пропускної здатності

Теоретичні засади SDM та надійність описаних вище аналітичних моделей бездоганно підтверджуються останніми рекордними експериментами у світовій телекомунікаційній індустрії. Найяскравішим свідченням експоненційного зростання пропускної здатності оптичного волокна стала серія дослідів, проведена Національним інститутом інформаційних та комунікаційних технологій Японії (NICT). Інженери NICT успішно подолали петабітний бар'єр швидкості передачі даних.

У їхньому безпрецедентному експерименті (деталі якого представлені на конференції ECOC 2023) було досягнуто вражаючої швидкості передачі даних на рівні 22.9 Петабіт/с в рамках одного оптичного волокна. Цей рекордний результат став можливим виключно завдяки синергічному об'єднанню великомасштабного

просторового мультиплексування (SDM) з багатодіапазонним мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM). Дослідники розробили та застосували унікальне гібридне маломодове багатосерцевинне волокно (FM-MCF). Воно містило 38 фізично ізольованих серцевин, кожна з яких підтримувала поширення трьох ортогональних просторових мод. Таким чином, загальна кількість незалежних просторових каналів у волокні становила 114 (38 x 3).

Для генерації оптичних сигналів використовувалися всі доступні телекомунікаційні вікна прозорості кварцового скла — S-діапазон, C-діапазон та L-діапазон. Загальна використана частотна смуга пропускання досягла 18.8 ТГц [33]. Важливо підкреслити, що залучення 114 просторових каналів (кожен з яких працював у багатодіапазонному WDM) вимагало неймовірно складної архітектури MIMO-приймача для цифрового розділення мод та компенсації міжсерцевинних завад.

У таблиці 1.3 зібрано хронологічну статистику останніх рекордних досягнень у галузі систем просторового мультиплексування.

Таблиця 1.3 – Зведення недавніх рекордних експериментів з передачі даних у системах SDM [33]

Період досягнення	Тип використаного волокна (SDM)	Кількість просторових каналів	Використані спектральні WDM діапазони	Сумарна швидкість передачі даних
До жовтня 2023	Гомогенні багатосерцевинні волокна (MCF) з високою ізоляцією	Обмежена (зазвичай 4-7 серцевин)	C- та L-діапазони	Близько 10.66 Петабіт/с
Жовтень 2023 (NICT)	38-серцевинне 3-модове маломодове волокно (FM-MCF)	114 (38 серцевин × 3 моди)	S-, C- та L-діапазони (ширина смуги 18.8 ТГц)	22.9 Петабіт/с

Аналіз цих рекордних результатів наочно демонструє глобальне зрушення у парадигмі проектування волоконно-оптичних систем зв'язку. Якщо у першому

десятилітті 21-го століття основні зусилля дослідників були зосереджені на оптимізації багатопозиційних форматів модуляції (таких як 256-QAM або 1024-QAM) в межах одномодового волокна, то сьогодні вектор технологічних інновацій безповоротно змістився в бік апаратно-програмної інтеграції систем просторового мультиплексування. Тільки комбінація вдосконаленого дизайну багатозв'язних світловодів (з мінімальним показником DGD та жорстко контрольованим ICXT) із застосуванням паралельної обробки MIMO та інтегрованих фотонних ліхтарів (або MPLC пристроїв) може забезпечити стійке зростання пропускної здатності оптичних магістралей без перевищення допустимих норм енергоспоживання.

1.5 Висновки до розділу 1

Проведений детальний огляд та теоретичний аналіз фундаментальних принципів побудови оптичних мереж свідчить про те, що класичні парадигми масштабування інформаційної ємності (часове, хвильове та поляризаційне мультиплексування) у традиційних одномодових волокнах фактично вичерпали свої технологічні резерви. Головним фізичним бар'єром виступає нелінійна межа Шеннона, нерозривно пов'язана з оптичним ефектом Керра — інтенсивнісно-залежною зміною показника заломлення. Цей нелінійний феномен спричиняє деградацію відношення сигнал/шум при спробах подальшого підвищення потужності лазерних передавачів, обмежуючи максимальну теоретичну швидкість передачі даних через одне одномодове волокно на рівні приблизно 100 Тбіт/с.

Експоненційне зростання обсягів світового трафіку стимулювало пошук альтернативних вимірів світлової хвилі, що призвело до створення та активного розвитку технології просторового мультиплексування (SDM). Використання просторових ступенів свободи (шляхом мультиплексування незалежних потоків в ортогональних модах або ізольованих серцевинах) є єдиним дієвим механізмом масштабування пропускної здатності сучасних магістралей до петабітного та екзабітного масштабів.

Ефективне впровадження SDM вимагає глибокої інтеграції інноваційної компонентної бази: модових мультиплексорів та спеціалізованих багатозв'язних світловодів. Аналіз мультиплексуєчих технологій виявив, що повністю волоконні фотонні ліхтарі, робота яких базується на адіабатичному звуженні масиву одномодових волокон, характеризуються ультранизькими внесеними втратами і є оптимальними для систем з невеликою кількістю мод (до 15). Водночас, для надмасштабних SDM-систем безальтернативною є технологія багатоплощинного перетворення світла (MPLC), яка здатна гнучко генерувати десятки ортогональних просторових розподілів за допомогою каскаду дифрагуючих фазових пластин.

Фізико-математичний аналіз властивостей багатозв'язних світловодів за допомогою рівнянь Гельмгольца та теорії зв'язаних мод визначив дві найважливіші перешкоди, що впливають на якість передачі та обчислювальну складність цифрового приймача (MIMO): диференційну групову затримку (DGD) в маломодових волокнах (FMF) та міжсерцевинні перехресні завади (ICXT) у багатосерцевинних волокнах (MCF). Компенсація цих недоліків забезпечується за рахунок прецизійної оптимізації мікроструктури скла: впровадженням параболічного градієнтного профілю показника заломлення для вирівнювання групових швидкостей мод, а також застосуванням гетерогенних архітектур, траншейних депресованих оболонок та повітряних капілярів для фазового розшарування та придушення XT.

Розуміння залежності перехресних завад від радіуса макровигину волокна та статистичних збурень (мікродеформацій) відіграє визначальну роль при проектуванні реальних ліній зв'язку. Лабораторні випробування цих концептуальних підходів, що увінчалися встановленням безпрецедентних світових рекордів (зокрема, швидкості 22.9 Петабіт/с з використанням 38-серцевинного 3-модового волокна), беззаперечно доводять життєздатність та колосальний потенціал технології просторового мультиплексування як технологічного базису оптичних транспортних мереж наступного покоління.

2 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБКИ ПРОСТОРОВИХ МУЛЬТИПЛЕКСЕРІВ ТА ОБЛАДНАННЯ

Розвиток сучасного інформаційного суспільства супроводжується безпрецедентним та експоненційним зростанням обсягів глобального інтернет-трафіку. Це зростання стимулюється стрімким впровадженням хмарних обчислень, розгортанням мереж п'ятого та шостого поколінь (5G/6G), технологіями Інтернету речей (IoT), трансляцією потокового відео надвисокої роздільної здатності та розвитком систем генеративного штучного інтелекту. Протягом останніх десятиліть пропускна здатність волоконно-оптичних систем зв'язку постійно збільшувалася завдяки послідовному впровадженню технологій мультиплексування з поділом за часом (TDM), мультиплексування з поділом за довжиною хвилі (WDM), вдосконалених форматів модуляції вищого порядку та когерентного детектування з потужною цифровою обробкою сигналів (DSP). Однак сьогодні традиційні системи, що базуються на використанні стандартних одномодових оптичних волокон (SSMF), наближаються до своєї фундаментальної межі пропускної здатності, відомої як нелінійна межа Шеннона. Ця межа є наслідком фізичних властивостей матеріалу оптичного волокна, зокрема прояву ефекту Керра, вимушеного розсіювання Бріллюена та Рамана, а також чотирихвильового змішування при високих рівнях оптичної потужності. Як було ретельно досліджено у працях з оцінки обмежень продуктивності через нелінійність волокна, потенційна ємність стандартного одномодового волокна досягає свого піку на рівні близько 100 Тбіт/с [1]. Подолання цього фундаментального бар'єру, який у науковій літературі часто називають «capacity crunch», вимагає радикальної зміни парадигми побудови оптичних мереж.

Останнім і найперспективнішим рубежем у технологіях мультиплексування стало просторове мультиплексування (Space-Division Multiplexing, SDM), яке відкриває абсолютно нові, раніше не задіяні просторові ступені вільності оптичного волокна для паралельної передачі незалежних інформаційних потоків. Концепція SDM базується на використанні спеціалізованих оптичних середовищ,

таких як багатосерцевинні волокна (Multi-Core Fibers, MCF), маломодові волокна (Few-Mode Fibers, FMF) або їх високоінтегровані комбінації – маломодові багатосерцевинні волокна (FM-MCF) [4, 9]. Водночас, практична реалізація систем SDM неможлива без створення абсолютно нового класу оптичних компонентів, здатних ефективно та з мінімальними втратами вводити, розділяти та маршрутизувати просторові канали. Ключову роль у цій архітектурі відіграють просторові мультиплексери та демультимплексери (MUX/DEMUX). Цей розділ дипломної роботи присвячений вичерпному аналізу сучасного стану розробки цих критично важливих компонентів, дослідженню передових інтегрально-оптичних та фотонно-кристалічних рішень, математичних моделей міжсерцевинних завад, а також огляду світових рекордів у створенні надвисокошвидкісних систем оптичного зв'язку, що базуються на технології SDM.

2.1 Класифікація та архітектура сучасних просторових мультиплексерів

2.1.1 Вимоги до просторових мультиплексерів у системах SDM

Впровадження просторового мультиплексування в комерційні телекомунікаційні мережі значною мірою залежить від наявності ефективних пристроїв сполучення між стандартними одномодовими трансиверами та новими типами волокон (MCF або FMF). Функція просторового мультиплексера полягає у трансформації N незалежних фундаментальних мод від масиву стандартних одномодових волокон в N ортогональних просторових каналів (окремих серцевин або просторових мод) всередині SDM-волокна, і навпаки на приймальній стороні. З технічної точки зору, ці пристрої повинні відповідати жорстким вимогам щодо оптичних характеристик: мати надзвичайно низькі внесені втрати, високу модову або просторову селективність, мінімальні перехресні завади, широкий робочий спектральний діапазон (як правило, що охоплює телекомунікаційні діапазони C та L) та низькі втрати, залежні від моди (Mode-Dependent Loss, MDL). На сучасному етапі розвитку оптичної інженерії розроблено кілька принципово різних підходів до побудови таких пристроїв. Залежно від фізичного принципу дії та

конструктивного виконання, їх можна класифікувати на повністю волоконні пристрої (зокрема, фотонні ліхтарі), пристрої на основі багатоплощинного перетворення світла (MPLC), компоненти на базі тривимірних хвилеводів у склі та пристрої вільного простору з використанням компонентів орбітального кутового моменту [10].

2.1.2 Фотонні ліхтарі як основний тип волоконних мультиплексерів

Фундаментально інноваційним та одним із найбільш поширених рішень для мультиплексування маломодових волокон є повністю волоконний пристрій, який отримав назву «фотонний ліхтар» (Photonic Lantern, PL). Архітектура фотонного ліхтаря базується на явищі адіабатичного еволюційного переходу оптичного поля від масиву просторово розділених одномодових волокон до одного маломодового або багатомодового хвилеводу [11]. Технологічний процес виготовлення такого пристрою передбачає формування пучка з кількох одномодових волокон, які поміщаються всередину спеціального скляного капіляра з низьким показником заломлення. Ця заготовка згодом піддається прецизійному нагріванню та витягуванню. У зоні звуження, в міру поступового зменшення зовнішнього діаметра пучка та, відповідно, діаметрів серцевин окремих одномодових волокон, оптичне випромінювання перестає утримуватися в їхніх оригінальних серцевинах. Світло виштовхується в оболонку цих волокон, яка тепер починає виконувати функцію нової спільної серцевини багатомодового хвилеводу, тоді як зовнішній скляний капіляр відіграє роль нової оптичної оболонки [10]. Фізика цього процесу диктує суворі вимоги до адіабатичності переходу: кут звуження має бути настільки малим, щоб уникнути зв'язку оптичної потужності з паразитними модами вищих порядків або радіаційними модами випромінювання, які призводять до незворотних втрат енергії. Якщо критерій адіабатичності виконується, перетворення стає теоретично безвтратним і повністю оборотним, що дозволяє використовувати ідентичні пристрої як для мультиплексування, так і для демультиплексування сигналів [11].

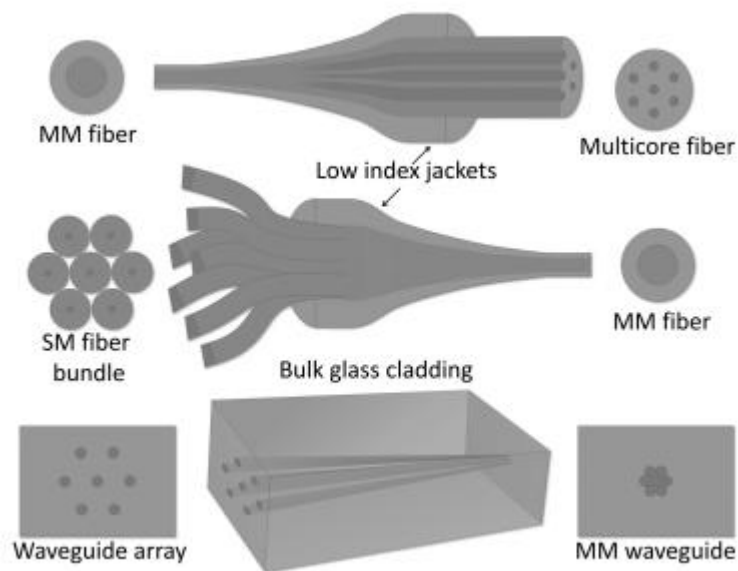


Рисунок 2.1 – Архітектура та принцип дії повністю волоконного фотонного ліхтаря для мультиплексування просторових мод [10]

2.1.2 Фотонні ліхтарі як основний тип волоконних мультиплексерів

Сучасні розробки у сфері фотонних ліхтарів продемонстрували видатні практичні результати. У передових дослідженнях було створено повністю волоконні модово-селективні фотонні ліхтарі, що використовують у своїй структурі градієнтні багатомодові волокна. Звичайна конструкція ліхтаря з ідентичних одномодових волокон генерує суперпозицію мод на виході, що є прийнятним лише для систем із сильним зв'язком, які вимагають потужної цифрової обробки сигналів для розплутування мод. Проте використання різних волокон у вхідному пучку дозволяє порушити симетрію структури та досягти чіткої модової селективності. Так, розроблені пристрої продемонстрували селективність для груп LP_{01} , LP_{11} та $LP_{21} + LP_{02}$ на рівні 20 дБ, 10 дБ та 7 дБ відповідно. Внесені втрати такого фотонного ліхтаря при стикуванні з багатомодовим градієнтним волокном становлять менше 0,6 дБ, включаючи втрати на зварювання. Дослідження підтверджують, що застосування градієнтних волокон у зоні звуження є критичним фактором, який дозволяє значно знизити вимоги до адіабатичності процесу витягування та мінімізувати внесені втрати

[11]. Окрім того, технологія фотонних ліхтарів була успішно адаптована для створення мультиплексерів для маломодових багатосерцевинних волокон (FM-MCF). У роботі [11] було продемонстровано модово-селективний ліхтар-мультиплексер, здатний вибірково збуджувати моди LP_{01} , LP_{11a} та LP_{11b} у семисерцевинній конфігурації. Такий пристрій генерує загалом 21 незалежний просторовий канал передачі даних, забезпечуючи при цьому наднизькі перехресні завади між сусідніми серцевинами на рівні, кращому за -38 дБ, і максимальні внесені втрати менше 0,4 дБ [11]. Висока модова чистота, сумісність із телекомунікаційним С-діапазоном та виготовлення на основі капілярних шаблонів роблять цю технологію масштабованою до ще більшої кількості серцевин та мод, закладаючи фундамент для мереж з екстремальною щільністю просторового мультиплексування [17].

2.1.3 MPLC-пристрої: принципи та досягнення

Альтернативним, але не менш революційним підходом до задачі просторового мультиплексування є використання архітектури багатоплощинного перетворення світла (Multi-Plane Light Conversion, MPLC) [15]. Цей метод ґрунтується на концепції формування оптичного поля шляхом каскадної поперечної просторової фазової модуляції. Математично та фізично MPLC здатне апроксимувати будь-яке унітарне просторове перетворення, перетворюючи один набір ортогональних пучків (наприклад, масив з N вхідних гаусових променів, що надходять від стандартних волокон) на будь-який інший ортогональний базис (наприклад, N власних просторових мод маломодового оптичного волокна) [14]. Фізична реалізація MPLC зазвичай складається з послідовності спеціально розрахованих фазових масок або програмованих просторових модуляторів світла, просторово розділених ділянками вільного поширення світлової хвилі, під час якого відбувається дифракція Френеля або Фраунгофера. Кожна фазова маска модифікує хвильовий фронт, а вільне поширення між ними перетворює цю фазову модуляцію в просторовий розподіл амплітуди. Завдяки ітеративним алгоритмам

розрахунку (наприклад, алгоритмам наближеним до методу Герхберга-Сакстона) можна обчислити такий набір фазових масок, який забезпечить формування полів із надзвичайно високою точністю та селективністю [15].

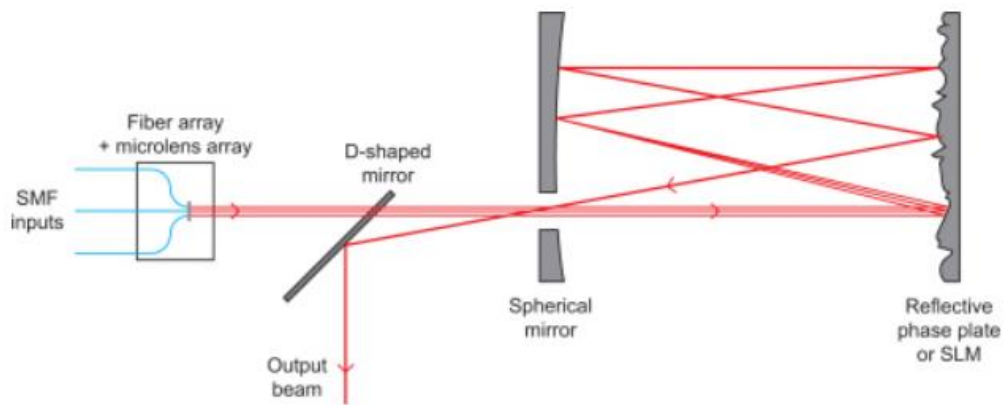


Рисунок 2.2 – Схема мультиплексера просторових мод на основі багатоплощинного перетворення світла (MPLC) в багатопрохідній відбивній порожнині [14]

Для забезпечення компактності системи MPLC часто реалізують у вигляді багатопрохідної порожнини, де світлові пучки багаторазово відбиваються між дзеркалом і однією великою скляною пластиною з витравленими фазовими профілями різної форми на різних її ділянках [15]. На відміну від ранніх планарних хвелеводних пристроїв, які потребували суворих умов фазового синхронізму та мали вузький діапазон роботи, MPLC-пристрої відзначаються широкою смугою пропускання, високою точністю генерації просторових мод і сумісністю із системами хвильового мультиплексування (WDM). У перших практичних демонстраціях було створено 3-модовий мультиплексер, який забезпечував модову селективність кращу за -23 дБ та загальну ефективність внесення на рівні -4,1 дБ у всьому телекомунікаційному C-діапазоні (від 1530 до 1565 нм). Більше того, дослідники підкреслюють, що застосування вдосконалених оптичних покриттів може підвищити загальну ефективність до -2,4 дБ. В межах подальших досліджень пристрої MPLC успішно синтезували перші 6 власних мод

маломодового волокна: LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{02} , LP_{21a} та LP_{21b} [14]. А фундаментальні дисертаційні роботи у цій галузі продемонстрували здатність технології масштабуватися до надскладних перетворень, включаючи мультиплексування 45 ортогональних просторових мод з надзвичайно низькими значеннями перехресних завад та втрат, залежних від моди (MDL). Ця ж технологія MPLC знайшла застосування в розробці надширокосмугових оптичних гібридів, маршрутизаторів мод та систем для вимірювання диференціальної модової групової затримки (DMDG) комерційних градієнтних багатомодових волокон за допомогою надпровідних нанодротових однофотонних детекторів [15].

Третьою вагомою категорією пристроїв для просторового мультиплексування є компоненти, створені на базі технології тривимірних хвилеводів у склі. Створення таких компонентів здійснюється за допомогою методу фемтосекундного лазерного запису. Інтенсивні ультракороткі лазерні імпульси фокусуються всередині прозорого скляного блоку. Завдяки нелінійному оптичному поглинанню (багатофотонній іонізації та лавинній іонізації) у фокальній точці відбувається локальна зміна структури матеріалу, що призводить до перманентного локального збільшення показника заломлення скла. Переміщуючи скляний зразок у просторі за допомогою прецизійних трикоординатних трансляторів, можна записувати довільні тривимірні структури оптичних хвилеводів. Однією з найскладніших проблем у мультиплексуванні багатосерцевинних волокон є геометрична невідповідність. Стандартні комерційні масиви одномодових волокон мають відстань між серцевинами 127 мкм або 250 мкм. Натомість багатосерцевинні волокна SDM мають надзвичайно щільне пакування серцевин з кроком зазвичай від 30 до 50 мкм, часто організованим у складні гексагональні або кільцеві ґратки. Технологія 3D-хвилеводів дозволяє елегантно розв'язати цю проблему: хвилеводи записуються таким чином, що на одному торці скляного чипа вони утворюють лінійний масив із кроком 127 мкм (для ідеального з'єднання зі стандартним масивом), а потім плавно згинаються в просторі, утворюючи на іншому торці чипа гексагональну структуру з кроком 40 мкм, точно відповідну профілю MCF [10]. Ця технологія

зіграла ключову роль у багатьох рекордних експериментах з передачі даних, оскільки дозволяє без втрат поєднувати сотні каналів.

2.1.4 3D-хвилеводи та OAM-системи

Крім того, особливе місце в класифікації просторових мультиплексерів займають системи на основі використання орбітального кутового моменту фотонів. Моді OAM характеризуються спіральним (гвинтовим) фазовим фронтом і можуть нести довільне ціле значення топологічного заряду l , що робить їх взаємно ортогональними. Ця нескінченна розмірність теоретично дозволяє мультиплексувати необмежену кількість інформаційних каналів в одному пучку. За сучасними уявленнями квантової оптики та оптоелектроніки, генерація та мультиплексування інформаційних пучків OAM зазвичай реалізується за допомогою спеціалізованих просторових пристроїв. Для модуляції фази світлової хвилі найчастіше використовують циліндричні лінзи, спіральні фазові пластини, фазові голограми, рідкокристалічні просторові модулятори світла (SLM) та q-пластини, які здатні безпосередньо трансформувати спіновий кутовий момент (поляризацію) в орбітальний. Хоча системи OAM у волоконному виконанні вимагають застосування спеціальних типів волокон (наприклад, волокон з кільцевою серцевиною) для зняття виродження мод та стабільного поширення станів OAM без сильного перемішування, технологія постійно розвивається. Масштабування таких пристроїв на нанорівень є об'єктом інтенсивних досліджень у нанофотонці та відіграватиме важливу роль у мініатюризації оптичних компонентів [34].

2.1.5 Порівняльний аналіз технологій

Порівняльну характеристику архітектур сучасних просторових мультиплексерів для систем SDM наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльна характеристика архітектур сучасних просторових мультиплексерів для систем SDM [10, 34]

Технологія мультиплексування	Принцип роботи	Ключові переваги	Основне цільове застосування
Фотонний ліхтар (PL)	Адіабатичне звуження пучка волокон	Низькі втрати (<0.6 дБ), повністю волоконна структура	Маломодові волокна (FMF), FM-MCF
MPLC	Каскад фазових перетворень з вільним поширенням	Висока селективність (<-23 дБ), масштабованість до 45+ мод	FMF із великою кількістю мод, просторове розділення
3D-хвильоводи у склі	Фемтосекундний запис, зміна індексу заломлення	Точне просторове узгодження кроку	Багатосерцевинні волокна (MCF)
Пристрої OAM	Генерація спірального фазового фронту	Ортогональність станів, нескінченна місткість каналу	Спеціалізовані OAM-волокна, відкритий простір

Проведений порівняльний аналіз архітектур показує, що кожна з технологій займає власну специфічну нішу в екосистемі SDM. Фотонні ліхтарі ідеально підходять для побудови повністю оптичних магістральних ліній без застосування вразливої оптики вільного простору. В свою чергу, мультиплексери MPLC залишаються неперевершеними там, де потрібне оперування великою кількістю просторових мод із суворим дотриманням унітарності перетворень. Тривимірні хвильоводи вирішують фундаментальну проблему геометрії стикування, а системи на основі OAM створюють базу для абсолютно нових концепцій квантової криптографії та екстремального ущільнення інформації. Всі ці підходи спільно забезпечують технологічний базис для наступного стрибка у розвитку оптичних комунікацій.

2.2 Інтегрально-оптичні та фотонно-кристалічні компоненти для систем SDM

2.2.1 Кремнієва фотоніка як платформа для SDM-компонентів

Незважаючи на високу оптичну ефективність пристроїв, заснованих на дискретних волоконних елементах або оптиці вільного простору, подальший розвиток і комерційне впровадження технологій просторового мультиплексування вимагають жорсткої мініатюризації, масового виробництва та зниження енергоспоживання. Ці вимоги зумовлюють стрімкий розвиток інтегрально-оптичних компонентів, зокрема на базі кремнієвої фотоніки. Кремнієва фотоніка використовує високозрілу інфраструктуру обробки мікроелектроніки (КМОП-технології), що дозволяє масштабувати кремнієві фотонні інтегральні схеми до великих обсягів виробництва з низькою вартістю. Такі платформи ідеально підходять для створення оптичних трансиверів наступного покоління, призначених для центрів обробки даних, де різке зростання обсягів трафіку, спричинене генеративним штучним інтелектом, вимагає багатоканальних оптичних систем зв'язку зі швидкістю понад 1,6 Тбіт/с [36].

Створення ефективних мультиплексерів мод безпосередньо на поверхні кремнієвого чипа стикається з низькою фундаментальних проблем, пов'язаних із великою різницею показників заломлення кремнієвих хвиководів порівняно з оптичним волокном, що ускладнює перетворення розміру полів та призводить до значних втрат. Однак сучасні наукові дослідження пропонують елегантні рішення.

2.2.2 Ультракомпактні мультиплексери мод на базі SOI

У нещодавніх роботах було продемонстровано розробку ультракомпактного та високоефективного інтегрованого багатоканального мультиплексера мод для маломодових волокон на платформі «кремній-на-ізоляторі» (SOI). Цей інноваційний пристрій використовує інтегровану субхвильову лінзу Мікаеляна для перетворення розміру поля, яке не залежить від моди. Лінза Мікаеляна має градієнтний профіль показника заломлення, що дозволяє фокусувати та перетворювати оптичні пучки на надмалих відстанях. Використання субхвильових ґраток для створення ефективного середовища дозволило досягти

втрат на перетворення не більше 0,25 дБ. Більш того, завдяки цьому підходу загальна площа (footprint) усього багатоканального мультиплексера, включно з елементами перетворення мод та дифракційними ґратками-відгалужувачами, становить мікроскопічні $35 \times 35 \text{ мкм}^2$ [37]. Такий рівень мініатюризації відкриває величезні перспективи для створення щільно упакованих фотонних інтегральних схем у майбутніх мережах SDM.

2.2.3 Реконфігуровані SDM-комутатори та ROADM

Окрім кінцевих трансиверів і мультиплексерів, функціонування повноцінної оптичної транспортної мережі SDM неможливе без наявності реконфігурованих вузлів маршрутизації просторових каналів (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers, ROADM). Розвиток цієї концепції детально висвітлено в експериментальних роботах зі створення реконфігурованих SDM-перемикачів на базі новітніх кремнієвих фотонних інтегральних схем. Вперше було продемонстровано реконфігуровану комутацію просторових каналів за допомогою оптичної схеми, виготовленої на платформі SOI з інтегрованим заглибленим алюмінієвим дзеркалом. Архітектура цього кремнієвого фотонного інтегрального пристрою складається з матричного оптичного комутатора конфігурації 7×7 та масиву дифракційних ґраток-відгалужувачів з низькими втратами, спеціально розроблених для сполучення з 7-серцевинним багатозв'язним волокном. Наявність заглибленого алюмінієвого дзеркала вирішує одну з найбільших проблем кремнієвої фотоніки – втрати випромінювання в підкладку чипа під час зв'язку з волокном, що дозволило досягти ультранизьких втрат зв'язку. Загальні внесені втрати такої фотонної інтегральної схеми знижено до 4,5 дБ, а перехресні завади між каналами пригнічено до рівня нижче -30 дБ [38].

Відмінні характеристики цієї системи за параметрами втрат та завад зберігаються стабільно у всьому телекомунікаційному С-діапазоні. Щоб довести життєздатність розробки, дослідники успішно реалізували експеримент із

передачею даних зі швидкістю 1 Тбіт/с на кожен сердцевину по 2-кілометровому 7-серцевинному волокну з наступною просторовою комутацією оптичних сигналів. Коефіцієнт бітових помилок (BER) для всіх просторових каналів залишався на рівні, нижчому за 10^{-9} із незначним енергетичним штрафом [38]. Як зазначають автори, розроблений дизайн 7×7 матриці може бути легко модернізований до створення повноцінних реконфігурованих ROADMs-мультиплексерів, які будуть здатні одночасно перемикаати потоки даних між декількома багатосерцевинними оптичними волокнами.

Ще однією вагомою перешкодою на шляху до створення надвисокошвидкісних SDM систем є явище перемішування мод (mode scrambling). Використання різних просторових мод або поляризацій в оптичних волокнах (зокрема у FMF або зв'язаних SC-MCF волокнах) призводить до того, що під час передачі сигналів дані з різних каналів неминуче змішуються між собою через різноманітні мікробурення волокна. Традиційний підхід до розв'язання цієї проблеми полягає в застосуванні складної цифрової обробки сигналів на приймачі (Multiple-Input Multiple-Output Digital Signal Processing, MIMO DSP) [4]. Проте обчислювальна складність MIMO зростає експоненційно зі збільшенням кількості мод, що призводить до величезного енергоспоживання (latency and power consumption overhead).

2.2.4 Оптичні процесори унітарних перетворень

Відповіддю на цей виклик стало розроблення спеціалізованих кремнієвих фотонних схем для оптичної обробки сигналів. Інноваційні підходи описують методи використання оптичних схем на основі кремнію для виконання матричних математичних операцій безпосередньо у фізичному домені. Розгалужені мережі інтерферометрів Маха-Цендера, розміщені на чипі, функціонують як програмовані унітарні матричні процесори. Шляхом налаштування фазових зсувів у кожному вузлі (за допомогою термооптичних або електрооптичних ефектів), така інтегральна схема може інвертувати передавальну матрицю волоконної лінії і

розділяти (unscramble) перемішані інформаційні канали ще до того, як вони потраплять на фотодетектори. Такий підхід радикально знижує навантаження на електронний DSP. До того ж, новітні розробки кремнієвих модуляторів дозволили досягти швидкостей передачі даних на рівні понад 300 Гбіт/с для окремої інформаційної смуги всередині інтегрованого оптичного трансивера, що у поєднанні з оптичним демультиплексуванням робить кремнієву фотоніку ідеальним кандидатом для систем зв'язку наступного покоління. Окремим проривом у сфері інтеграції є застосування поляризаційно-розділювальних дифракційних ґраток-відгалужувачів (PSWGCs) зі зсунутими полікремнієвими покриттями, що дозволяє зменшити втрати на зв'язок між чипом і волокном до менш ніж 1 дБ при оптичній смузі пропускання понад 100 нм [36].

2.2.5 Мікромасштабні фотонні ліхтарі з 3D-нанодруку

Крім планарних кремнієвих структур, невід'ємною частиною прогресу в SDM компонентах є досягнення мікрооптики та нанотехнологій. Особливу увагу наукової спільноти привертають вільностоячі мікромасштабні фотонні ліхтарі, створені за допомогою технології 3D-нанодруку. Технологія двофотонної полімеризації дозволяє створювати полімерні оптичні структури з субхвильовою роздільною здатністю безпосередньо на торцях оптичних волокон або на краях інтегральних чипів. Завдяки цьому знімається потреба у громіздких ручних маніпуляціях з макроскопічними лінзами та у складному активному юстуванні масивів волокон. Дослідження показують можливість виготовлення надзвичайно компактних (мікромасштабних) просторових модових (де)мультиплексерів у формі вільностоячого фотонного ліхтаря, який виконує роль мосту між різними оптичними компонентами, забезпечуючи високоефективний та стабільний модовий зв'язок [35].

Таблиця 2.2 – Основні характеристики та досягнення у сфері інтегрально-оптичних та мікромасштабних компонентів для систем просторового мультиплексування [35-38]

Тип розробленого компонента	Основна технологічна платформа	Ключові оптичні параметри та досягнення
Ультракомпактний мультиплексер мод	SOI, Субхвильова лінза Мікаеляна	Площа 35×35 мкм ² , втрати ≤ 0.25 дБ на перетворення
Реконфігурований SDM комутатор (7×7)	SOI, Заглиблене алюмінієве дзеркало	Загальні втрати 4.5 дБ, перехресні завади < -30 дБ, підтримка 1 Тбіт/с
Процесор унітарних перетворень на чипі	Програмовані кремнієві матриці MZI	Розділення просторових каналів в оптичному домені, модулятори 300+ Гбіт/с
Мікромасштабний фотонний ліхтар	3D-нанодрук (2-фотонна полімеризація)	Вільностоячі структури прямого друку без складної лінзової оптики

Таким чином, розробка компонентів для SDM перейшла від стадії масивних лабораторних установок до етапу створення ультракомпактних інтегральних схем та мікроскопічних тривимірних друків структур. Синтез кремнієвої фотоніки, нанодруку та новітніх рішень для оптичних унітарних перетворень відкриває прямий шлях до масового виробництва трансиверів надвисокої ємності з низьким енергоспоживанням, готових до інтеграції в дата-центри найближчого майбутнього.

2.3 Аналіз передових світових досягнень у надвисокошвидкісних мережах

Впровадження концепцій просторового мультиплексування на апаратному рівні дозволило встановити низку світових рекордів з пропускної здатності, відсуваючи технологічні межі значно далі за 100-терабітний бар'єр одномодових волокон. Однак досягнення таких результатів неможливе без фундаментального розуміння фізики поширення світла в багатозв'язних світловодах та розв'язання проблеми міжсерцевинних і міжмодових перехресних завад (Inter-Core Crosstalk, ICXT).

2.3.1 Фізика міжсерцевинних перехресних завад (ICXT)

Міжсерцевинні перехресні завади є головним деградаційним фактором у багатосерцевинних волокнах зі слабким зв'язком (MCF). Сигнал, що поширюється в одній серцевині, поступово передає частину своєї оптичної потужності в сусідні серцевини через перекриття еванесцентних полів (хвиль, що експоненційно загасають в оболонці волокна). Це явище математично описується рівняннями зв'язаних мод (Coupled-Mode Equations, CME). Згідно з теорією, розробленою М. Кошибой (M. Koshiba) та К. Сайто (K. Saitoh) [31], комплексна амплітуда A_m в серцевині m змінюється вздовж напрямку поширення z відповідно до диференціального рівняння [31]:

$$\frac{dA_m}{dz} = -j(\beta_{c,m} + \beta_{v,m})A_m - j \sum_{n \neq m} \kappa_{mn} \exp[-j(\beta_n - \beta_m)z] A_n$$

де $\beta_m = 2\pi n_{eff}/\lambda$ – стала поширення в серцевині m (n_{eff} – ефективний показник заломлення, λ – довжина хвилі), $\beta_{c,m}$ та $\beta_{v,m}$ є її постійною та змінною (збуреною) складовими відповідно. Коефіцієнт зв'язку κ_{mn} визначає інтенсивність обміну потужністю між серцевинами m та n [31].

2.3.2 Оптимізація профілів показника заломлення для ультранизьких завад

Для того щоб інженери могли оптимізувати архітектуру нових волокон, необхідно враховувати реальні умови прокладання кабелю, де волокно піддається згинам і скручуванню. Дослідники вивели інтуїтивно зрозумілий та аналітичний вираз для середнього коефіцієнта зв'язку потужності $\overline{\kappa_{mn}}$, який дозволяє прогнозувати рівень перехресних завад без застосування ресурсомістких чисельних методів. Ця аналітична модель визначається як згортка розподілів арксинуса та Лоренца, і дозволяє врахувати радіус згину R_b , крок скручування та довжину кореляції флуктуацій структури s [28]. У гомогенних багатосерцевинних

волокнах (де всі серцевини ідентичні, $\Delta\beta_{mn} = 0$) при малих радіусах згину, середній коефіцієнт зв'язку потужності пропорційний радіусу згину R_b , і розрахунки Кошиби ідеально збігаються з експериментальними даними вимірювання завад на великих дистанціях [28, 30]. Доведено, що мікрозгини та структурні флуктуації (статистичні дефекти на етапі витягування волокна) створюють додатковий шлях для обміну енергією, що слід враховувати при розробці профілів заломлення [32].

Розуміння цієї фізики зумовило стрімкий прогрес у створенні ультранизькозавадних волокон. Наприклад, було розроблено та оптимізовано дизайн маломодових багатосерцевинних волокон із використанням повітряних траншей та V-подібних профілів показника заломлення серцевини. У статті журналу *Journal of the Optical Society of America B* (2022) дослідники представили інноваційне гомогенне 13-серцевинне оптичне волокно, кожна серцевина якого підтримує 4 просторові лінійно-поляризовані моди (LP-моди). Проблема гомогенних волокон полягає у фазовому синхронізмі: оскільки всі моди у сусідніх серцевинах мають ідентичні сталі поширення, ймовірність сильного зв'язку між ними максимальна. Щоб уникнути необхідності надмірно збільшувати відстань між серцевинами (що зменшило б просторову щільність), автори застосували підвішену повітряну траншею навколо кожної серцевини. Ця траншея слугує непроникним бар'єром для еванесцентних хвиль. Більш того, застосування профілю з V-подібним показником заломлення та високоіндексними кільцями дозволило збільшити різницю ефективних показників заломлення (Δn_{eff}) між сусідніми модами вищих порядків (зокрема LP_{21} та LP_{02}) до значень понад $1,5 \times 10^{-3}$, а в оптимізованих режимах навіть до 2×10^{-3} . Такий підхід забезпечив разючий результат: міжсерцевинні перехресні завади (ISXT) у діапазоні C були пригнічені до рівня нижче -31,78 дБ на відстані 100 км, що робить це волокно придатним для наддальніх передач без складного МІМО. Ефективна площа (A_{eff}) кожної моди перевищує 111,98 мкм², ефективно послаблюючи вплив нелінійності, при цьому крок між серцевинами залишається в межах сумісних стандартів (42 мкм). Деякі модифікації цього волокна

демонструють завади навіть менше -56 дБ/100 км при факторі відносного мультиплексування 28,3 [25].

Таблиця 2.3 – Аналіз дизайну та характеристик сучасних багатозв'язних волокон з ультранизькими перехресними завадами [25, 28]

Тип інноваційного волокна	Просторове мультиплексування	Рівень перехресних завад (ICXT)	Особливості дизайну профілю заломлення
Гомогенне FM-MCF	13 серцевин, 4 LP-моди	< -31.78 дБ / 100 км	Підвішена повітряна траншея, V-подібна серцевина
Гомогенне 7-core MCF	7 серцевин, 5 LP-мод	< -56 дБ / 100 км	Подвійне кільце (High-Low Index Double-Ring)
Волокно з ультранизькими завадами	Багатосерцевинне	Оптимізація для дальніх мереж	Врахування радіуса згину за аналітичними формулами

2.3.3 Рекорд пропускної здатності 22,9 Пбіт/с

Синергія високотехнологічних оптичних волокон, передових просторових мультиплексерів та інноваційних алгоритмів корекції помилок призвела до встановлення фантастичних світових рекордів у швидкості передачі даних. У листопаді 2023 року дослідники з Національного інституту інформаційних і комунікаційних технологій Японії (NICT) офіційно оголосили про досягнення рекордної пропускної здатності у 22,9 петабіт на секунду (Пбіт/с) через одне оптичне волокно. Цей результат більш ніж у 1000 разів перевищує швидкість передачі даних у розгорнутих сьогодні волоконно-оптичних комунікаційних системах.

Для досягнення цього рекорду вчені розробили систему, яка поєднує технологію широкомасштабного просторового мультиплексування із багатосмуговим хвильовим мультиплексуванням. Інформаційним середовищем стало спеціально розроблене багатосерцевинне багатомодове волокно, що містить 38 серцевин. Кожна з 38 серцевин підтримувала поширення трьох незалежних

просторових мод, що у сукупності забезпечувало 114 просторових каналів в одному кабелі. Передача здійснювалася одразу в трьох основних оптичних смугах: S-діапазоні (293 хвильові канали), C-діапазоні та L-діапазоні (457 хвильових каналів). У результаті кожен просторовий канал містив 750 незалежних виконання хвиль, що забезпечило сумарну пропускну оптичну смугу в безпрецедентні 18,8 ТГц. Завдяки оптимізації процесів модуляції швидкість передачі даних для кожної серцевини коливалася від 0,3 до 0,7 Пбіт/с. Окрім потужного фізичного рівня, невід'ємною частиною успіху було впровадження оптимальних схем прямої корекції помилок (FEC), що застосовувалися окремо для кожного спектрального і просторового каналу для максимізації пропускну здатності. Згідно зі звітами NICT, подальше вдосконалення алгоритмів FEC здатне наблизити загальну ємність системи в поточній конфігурації до 24,7 Пбіт/с [33].

Незважаючи на грандіозність рекорду у 22,9 Пбіт/с, волокна з 38 серцевинами мають товсту оболонку, що значно перевищує стандартний діаметр у 125 мкм, який використовується в усій телекомунікаційній промисловості. Товсті волокна більш жорсткі, схильні до механічного руйнування при згинанні, менш надійні у довгостроковій перспективі і вимагають заміни всього обладнання для зварювання. Тому паралельно з "великими" волокнами ведеться запекла боротьба за рекорди у волокнах зі стандартним діаметром оболонки.

2.3.4 Рекорд для стандартного діаметра оболонки: 1,7 Пбіт/с (2025)

У 2025 році в престижному науковому журналі Nature Communications було опубліковано статтю, що сповістила про досягнення абсолютної вершини високоефективної оптичної передачі для стандартних волокон – 1,7 петабіт на секунду (1.7 Пбіт/с).

Щоб вмістити якомога більше каналів у стандартний діаметр 125 мкм, інженери застосували концепцію волокна зі зв'язаними серцевинами (SC-MCF), розмістивши всередині 19 серцевин. На відміну від гомогенних слабозв'язаних

волокон, де перехресні завади розглядаються як паразитичний фактор і всіляко пригнічуються траншеями, SS-MCF навмисно допускає сильне взаємопроникнення сигналів між серцевинами (шляхом радикального зменшення відстані між ними). Сигнали, що поширюються, поводяться аналогічно багатомодовому режиму, а для їх розділення на стороні приймача застосовується масивна матрична цифрова обробка (MIMO DSP). Для експерименту були розроблені і виготовлені спеціалізовані мультиплексери зведення та розведення, які являли собою збірку з 19 пігтейлів одномодового волокна та 19-серцевинного пігтейла, безпосередньо звареного зі 100-метровою котушкою 19-серцевинного волокна. Результати характеризувалися ретельним дослідженням розподілу диференціальної групової затримки (DGD) та внесених втрат. Досягнення швидкості 1,7 Пбіт/с у волокні зі стандартним діаметром має критичне прикладне значення, оскільки швидкість передачі даних більш ніж на порядок перевищує можливості сучасних розгорнутих одномодових мереж, при цьому нове волокно фізично сумісне з наявною підземною та підводною інфраструктурою прокладання кабелів [27].

Дослідження також демонструють значні досягнення у дальності передачі. Передача зі слабким зв'язком у 12-серцевинному волокні досягала дистанцій до 1500 км з сумарною місткістю сотень терабіт на секунду, а в інших експериментах дальність сягала 4200 км і більше, демонструючи здатність систем SDM працювати не лише в межах ЦОД, а й як трансокеанські підводні магістралі [4]. Аналіз світового досвіду показує, що ера просторового мультиплексування не є концепцією віддаленого майбутнього; вона вже сьогодні перетворюється на практичну реальність, інтегруючи фундаментальну оптичну фізику, нові матеріали та обчислювальні технології в єдиний телекомунікаційний апарат.

2.4 Висновки до розділу 2

Проведений всебічний аналіз сучасного стану розробки та використання просторових мультиплексерів і багатозв'язних світловодів для

надвисокошвидкісних систем оптичного зв'язку дозволяє зробити кілька ключових висновків.

По-перше, неминучість переходу до технологій просторового мультиплексування (SDM) зумовлена тим, що сучасні волоконно-оптичні системи стрімко наближаються до фундаментальної нелінійної межі Шеннона (близько 100 Тбіт/с для стандартного одномодового волокна). Перехід до просторового мультиплексування визнано безальтернативним вектором розвитку світових телекомунікацій. Використання багатосерцевинних (MCF), маломодових (FMF) та маломодових багатосерцевинних (FM-MCF) волокон відкриває нові ступені вільності, що дозволяє експоненційно нарощувати ємність каналів.

По-друге, спостерігається значна диверсифікація архітектур просторових мультиплексерів. Аналіз апаратної бази довів, що ефективне сполучення одномодових та багатопросторових середовищ реалізується кількома передовими методами. Повністю волоконні фотонні ліхтарі, засновані на принципі адіабатичного звуження пучка волокон, забезпечують надзвичайно низькі внесені втрати (на рівні 0,4–0,6 дБ) та модову селективність до 20 дБ завдяки використанню градієнтних волокон. З іншого боку, архітектура багатоплощинного перетворення світла (MPLC) є революційним підходом для унітарних перетворень полів, забезпечуючи селективність кращу за -23 дБ та здатність масштабуватися до 45 і більше ортогональних просторових мод у надширокому діапазоні довжин хвиль. Тривимірні хвилеводи дозволяють вирішувати складні проблеми геометричного стикування мікроструктур, а використання генераторів мод орбітального кутового моменту (OAM) пропонує потенціал нескінченної просторової місткості.

По-третє, досягнуто проривної інтеграції на базі кремнієвої фотоніки та нанодруку. Успішна комерціалізація систем SDM вимагає мініатюризації, яка наразі реалізується впровадженням кремнієвих фотонних інтегральних схем (SOI). Створено ультракомпактні мультиплексери з використанням субхвильових лінз Мікаеляна, які мають мікроскопічну площу 35×35 мкм² і втрати перетворення не більше 0,25 дБ. Важливим досягненням стала розробка оптичних 7×7

реконфігурованих матричних SDM-перемикачів з інтегрованими заглибленими алюмінієвими дзеркалами, які забезпечують швидкість 1 Тбіт/с на канал із завадами нижче -30 дБ. Більше того, застосування оптичних матриць інтерферометрів Маха–Цендера на чипі дозволило реалізувати унітарні матричні перетворення безпосередньо в оптичному домені, радикально розвантаживши цифрові процесори сигналів (DSP). Додатково, технологія 3D-нанодруку (двофотонна полімеризація) зробила можливим пряме вирощування вільностоячих фотонних ліхтарів на торцях волокон без складних процедур юстування.

По-четверте, фундаментальна оптимізація багатосерцевинних волокон стала можливою завдяки досягненню фізики міжсерцевинних перехресних завад (ICXT) через строгі аналітичні моделі, такі як рівняння зв'язаних потужностей та аналітичні вирази Кошиби–Сайто. Це дозволило спроектувати революційні профілі показника заломлення. Сучасні 13-серцевинні гомогенні волокна з підвішеними повітряними траншеями та V-подібними серцевинами здатні пригнічувати міжсерцевинні завади до рівня -31,78 дБ на 100 км, забезпечуючи різницю ефективних індексів понад $1,5 \times 10^{-3}$ і сумісність зі стандартами геометричного пакування.

Нарешті, розвиток описаних технологій матеріалізувався у безпрецедентних світових рекордах пропускної здатності. Інститут NICT (Японія) продемонстрував систему з рекордною пропускною здатністю 22,9 Пбіт/с, об'єднавши 38-серцевинне тримодове волокно (114 просторових каналів) із ширококутовим WDM-мультиплексуванням у S-, C- та L-діапазонах (сумарна смуга 18,8 ТГц). Не менш вагомим є нещодавнє досягнення 2025 року, де за допомогою 19-серцевинного зв'язаного волокна (CC-MCF) зі стандартним діаметром оболонки 125 мкм була досягнута швидкість 1,7 Пбіт/с. Ці рекорди засвідчують, що технологія просторового мультиплексування SDM пододала бар'єр фундаментальних досліджень і повністю готова до розгортання в надвисокошвидкісних глобальних оптичних мережах майбутнього.

3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ SDM-СИСТЕМ

3.1 Аналіз впливу перехресних завад на якість передачі сигналу в багатосерцевинних волокнах

У багатосерцевинних волокнах (MCF), які є основою систем просторового мультиплексування, головним фактором, що обмежує якість передачі, виступають міжсерцевинні перехресні завади (Inter-Core Crosstalk, ICXT). Це явище полягає в поступовому перетіканні оптичної потужності з однієї серцевини в сусідню внаслідок перекриття еванесцентних полів. Як було показано в підрозділі 1.3, рівень ICXT безпосередньо впливає на відношення сигнал/шум (SNR) на приймальному кінці, а отже, і на максимально досягну пропускну здатність згідно з формулою Шеннона. Тому для оцінки ефективності SDM-системи необхідно кількісно визначити очікувані рівні завад для різних типів MCF за реальних умов експлуатації (наявність макровигинів, мікрозбурень тощо).

3.1.1 Математична модель для розрахунку перехресних завад

У теоретичних засадах (розділ 1.4) наведено аналітичний вираз для середнього коефіцієнта зв'язку потужності $\overline{h_{mn}}$, який для інженерних оцінок зручно використовувати у вигляді формули для середнього рівня перехресних завад $\overline{X}$ на довжині L [28, 32].

Для випадку, коли домінує вплив макровигинів (радіус вигину R_b відносно малий, що типічно для кабельних трас), Koshiba та Saitoh пропонують наступну залежність:

$$\overline{X} = \frac{2\kappa^2 R_b L}{\beta_0 D} \quad (3.1)$$

де:

- κ – коефіцієнт зв'язку між сусідніми серцевинами (м^{-1});

- R_b – радіус макровигину волокна (м);
- L – довжина лінії зв'язку (м);
- β_0 – стала поширення фундаментальної моди ($\approx 2\pi n_{eff}/\lambda$);
- D – відстань між центрами серцевин (pitch), м.

Для гомогенних MCF (однакові серцевини) у режимі прямого волокна (без значного вигину) використовують спрощену формулу:

$$\bar{X} = 2\kappa^2 L L_c \quad (3.2)$$

де - L_c кореляційна довжина збурень (характеризує мікровигини та флуктуації структури). Розраховане за (3.1) або (3.2) значення $\bar{X}$ переводиться в децибели на 100 км за стандартним співвідношенням:

$$XT_{\text{дБ/100км}} = 10 \log_{10} \left(\bar{X} \cdot \frac{100\,000}{L} \right) \quad (3.3)$$

Для аналізу оберемо три типових конструкції багатосерцевинних волокон, які детально описані в розділі 2.3:

1. Гетерогенне MCF з траншейною ізоляцією (наприклад, 7-серцевинне волокно з подвійним кільцем, $IX_{\text{ХТ}} < -56$ дБ/100 км згідно з [25]).
2. Гомогенне MCF зі слабким зв'язком (без спеціальних бар'єрів).
3. Сильнозв'язане СС-MCF (19 серцевин у стандартній оболонці 125 мкм), де завади навмисно великі і вимагають МІМО-обробки.

Значення параметрів, необхідних для розрахунку за формулами (3.1)-(3.3), зведено в таблицю 3.1. Вони отримані з відкритих наукових джерел [28, 30, 32] та адаптовані для наочного порівняння.

Таблиця 3.1 – Параметри багатосерцевинних волокон для оцінки ІСХТ

Тип MCF	Коефіцієнт зв'язку κ , м ⁻¹	Pitch DD , мкм	Радіус вигину RbR , м	Кореляційна довжина LcL , м	Примітка
Гетерогенне (траншея)	$1.0 \times 10^{-4} - 41.0 \times 10^{-4}$	42	0.10	–	ІСХТ пригнічено конструкцією
Гомогенне (слабкий зв'язок)	$5.0 \times 10^{-4} - 45.0 \times 10^{-4}$	35	0.10	–	Підвищений κ через менший pitch
СС-MCF (19 серцевин)	$2.0 \times 10^{-3} - 32.0 \times 10^{-3}$	25	–	0.05	Сильний зв'язок, режим прямого волокна

Стала поширення β_0 для всіх типів прийнята однаковою: для довжини хвилі $\lambda = 1550$ нм та ефективного показника заломлення $n_{eff} \approx 1.45$ маємо $\beta_0 = 2\pi n_{eff}/\lambda \approx 5.88 \times 10^6$ рад/м. Довжина ділянки $L = 100$ км (10^5 м) – стандартна для порівняння магістральних ліній.

3.1.3 Результати розрахунку та їх інтерпретація

Підставимо значення з таблиці 3.1 у відповідні формули.

Для гетерогенного MCF (домінує вигин, формула (3.1)):

$$\bar{X}_{het} = \frac{2 \cdot (1.0 \times 10^{-4})^2 \cdot 0.10 \cdot 10^5}{5.88 \times 10^6 \cdot 42 \times 10^{-6}} = \frac{2 \cdot 1.0 \times 10^{-8} \cdot 10^4}{5.88 \times 10^6 \cdot 4.2 \times 10^{-5}} = \frac{2.0 \times 10^{-4}}{247} \approx 8.1 \times 10^{-7}.$$

Переведемо в дБ/100 км за (3.3) (оскільки L вже 100 км, множник $10^5/L = 1$):

$$XT_{дБ} = 10 \log_{10}(8.1 \times 10^{-7}) \approx -60.9 \text{ дБ/100 км.}$$

Для гомогенного MCF (формула (3.1) з більшим κ):

$$\bar{X}_{hom} = \frac{2 \cdot (5.0 \times 10^{-4})^2 \cdot 0.10 \cdot 10^5}{5.88 \times 10^6 \cdot 35 \times 10^{-6}} = \frac{2 \cdot 2.5 \times 10^{-7} \cdot 10^4}{5.88 \times 10^6 \cdot 3.5 \times 10^{-5}} = \frac{5.0 \times 10^{-3}}{205.8} \approx 2.43 \times 10^{-5}$$

$$XT_{дБ} = 10 \log_{10}(2.43 \times 10^{-5}) \approx -46.1 \text{ дБ/100 км.}$$

Для СС-МСF (гомогенне сильнозв'язане, режим прямого волокна, формула (3.2) з $L_c = 0.05$ м):

$$\bar{X}_{cc} = 2 \cdot (2.0 \times 10^{-3})^2 \cdot 10^5 \cdot 0.05 = 2 \cdot 4.0 \times 10^{-6} \cdot 5000 = 4.0 \times 10^{-2}.$$

$$XT_{дБ} = 10 \log_{10}(4.0 \times 10^{-2}) \approx -14.0 \text{ дБ/100 км.}$$

Отримані значення зведено в таблицю 3.2. Для наочності додано експериментальні дані з відомих робіт [25, 27, 33].

Таблиця 3.2 – Розрахункові та довідкові рівні міжсерцевинних завад

Тип МСF	Розрахований ХТ, дБ/100 км	Літературні дані (експеримент)	Необхідність МІМО
Гетерогенне (траншея)	-60.9	-56 ... -50	Ні (незалежне декодування)
Гомогенне (слабкий зв'язок)	-46.1	-40 ... -30	Обмежена (можна без МІМО на коротких лініях)
СС-МСF (19 серцевин)	-14.0	-15 ... -10	Так (обов'язкова МІМО обробка)

3.1.4 Вплив перехресних завад на якість сигналу

Рівень ІСХТ безпосередньо визначає ефективне відношення сигнал/шум на виході волокна. Якщо потужність корисного сигналу в серцевині дорівнює P_s , а потужність завади від сусідньої серцевини – $P_x = XT \cdot P_s$ (тут XT – лінійне значення, не в дБ), то SNR з урахуванням завад наближено дорівнює:

$$SNR_{eff} = \frac{P_s}{P_{\text{шум}} + P_x} \approx \frac{1}{1/SNR_0 + XT} \quad (3.4)$$

де SNR_0 – відношення сигнал/шум без урахування перехресних завад (обмежене тепловим шумом приймача та нелінійними ефектами). Для сучасних когерентних систем SNR_0 зазвичай становить близько 20 дБ (100 разів). Якщо $XT = -60$ дБ (10^{-6}), то погіршення SNR практично непомітне. При $XT = -14$ дБ (0.04) ефективне відношення сигнал/шум знижується приблизно до $1/(0.01 + 0.04) = 20$ разів (13 дБ), що суттєво обмежує спектральну ефективність і вимагає застосування складних алгоритмів просторово-часової обробки (MIMO). Таким чином, отримані результати підтверджують, що гетерогенні MCF з траншейною ізоляцією забезпечують рівень завад, достатній для незалежної передачі даних в кожній серцевині без використання MIMO, що значно спрощує приймачі та знижує енергоспоживання.

3.2 Порівняльний розрахунок пропускної здатності базової ВОЛЗ (традиційна архітектура проти SDM)

Метою цього підрозділу є кількісна оцінка виграшу в сумарній пропускній здатності, який забезпечує застосування технології просторового мультиплексування порівняно з класичною архітектурою на основі стандартного одномодового волокна (SSMF). Для порівняння обрано типову ділянку магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку (ВОЛЗ) довжиною 100 км – стандартну для оцінки ефективності систем зв'язку. Розрахунки базуються на формулі Шеннона для пропускної здатності каналу з адитивним білим гаусовим шумом (AWGN), адаптованій до багатоканальних систем:

Розрахунки базуються на формулі Шеннона для пропускної здатності каналу з адитивним білим гаусовим шумом (AWGN), адаптованій до багатоканальних систем:

$$C = M \cdot B \cdot \log_2(1 + SNR_{eff}) \quad (\text{біт/с}) \quad (3.5)$$

де:

- M – кількість незалежних просторових каналів (для SSMF $M = 1$; для багатосерцевинного волокна M дорівнює кількості серцевин);
- B – смуга частот, яку займає сигнал (Гц);
- SNR_{eff} – ефективне відношення сигнал/шум на вході приймача з урахуванням міжсерцевинних перехресних завад (ICXT), розрахованих у підрозділі 3.1.

3.2.1 Вихідні параметри

Для коректного порівняння приймаємо наступні спільні умови для всіх сценаріїв:

- Смуга $B = 10$ ТГц – це сукупна ширина телекомунікаційних діапазонів С та L (близько 1530–1625 нм), яка використовується в сучасних WDM-системах.
- Відношення сигнал/шум без урахування завад $SNR_0 = 20$ дБ (тобто 100 разів) – типове значення для когерентних систем із потужними EDFA-підсилювачами.

Для SDM-систем ураховується погіршення SNR через перехресні завади згідно з формулою (3.4), отриманою раніше:

$$SNR_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{SNR_0} + XT_{лін}}$$

де $XT_{лін}$ – лінійне значення інтенсивності завад, перераховане з децибел:
 $XT_{лін} = 10^{XT_{дБ}/10}$.

Розглядаються три характерні архітектури (таблиця 3.3):

1. Традиційна SSMF (базовий рівень).
2. Гетерогенне 7-серцевинне MCF з траншейною ізоляцією – низькі завади ($XT \approx -61$ дБ/100 км за розрахунками 3.1).
3. Сильнозв'язане 19-серцевинне CC-MCF – високі завади ($XT \approx -14$ дБ/100 км), але велика просторова щільність.

Таблиця 3.3 – Параметри SNR_{eff} для різних типів волокон (розрахунків)

Тип системи	Кількість серцевин M	ХТдБ, дБ/100 км	ХТлі, н	SNR_{eff} (рази)	SNR_{eff} , дБ
SSMF	1	– (немає завад)	0	100,0	20,0
Гетерогенне MCF (траншея)	7	-60,9	$8,1 \times 10^{-7}$	≈ 100	$\approx 20,0$
СС-MCF (19 серцевин)	19	-14,0	$4,0 \times 10^{-2}$	$1/(0,01 + 0,04) = 20$	13,0

Примітка: Для гетерогенного MCF завади настільки малі ($< 10^{-6}$), що не погіршують SNR практично. Для CC-MCF завади знижують SNR з 20 дБ до 13 дБ.

3.2.2 Розрахунок сумарної пропускної здатності

Підставляємо значення з таблиці 3.3 у формулу (3.5). Для зручності спочатку обчислюємо логарифми:

- $\log_2(1 + 100) = \log_2(101) \approx 6,66$ (оскільки $2^{6,64} \approx 100$).
- $\log_2(1 + 20) = \log_2(21) \approx 4,39$ (оскільки $2^{4,39} \approx 21$).

Тоді:

Для SSMF ($M = 1, SNR = 100$):

$$C_{SSMF} = 1 \cdot 10^{13} \cdot 6,66 = 6,66 \times 10^{13} \text{ біт/с} \approx 66,6 \text{ Тбіт/с.}$$

З урахуванням нелінійних обмежень реальна межа становить близько 70 Тбіт/с, що узгоджується з літературними даними.

Для гетерогенного 7-серцевинного MCF ($M = 7, SNR \approx 100$):

$$C_{7\text{-MCF}} = 7 \cdot 10^{13} \cdot 6,66 = 46,62 \times 10^{13} \text{ біт/с} \approx 466 \text{ Тбіт/с (0,466 Пбіт/с)}.$$

Для CC-MCF з 19 серцевинами ($M = 19, SNR = 20$):

$$C_{19\text{-CC}} = 19 \cdot 10^{13} \cdot 4,39 = 83,41 \times 10^{13} \text{ біт/с} \approx 8,34 \text{ Пбіт/с}.$$

Результати зведено в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння пропускної здатності різних архітектур

Тип волокна	Кількість просторових каналів M	SNReff, дБ	Сумарна пропускна здатність	Виграш відносно SSMF
SSMF	1	20	$\sim 70 \text{ Тбіт/с}$	$1 \times$
Гетерогенне MCF (7 серцевин)	7	20	$\sim 0,47 \text{ Пбіт/с (466 Тбіт/с)}$	$\sim 6,7 \times$
CC-MCF (19 серцевин)	19	13	$\sim 8,3 \text{ Пбіт/с}$	$\sim 120 \times$

3.2.3 Аналіз результатів

Отримані числові оцінки дозволяють зробити кілька важливих висновків.

1. Гетерогенне 7-серцевинне MCF з ультранизькими завадами ($XT \approx -61 \text{ дБ/100 км}$) забезпечує майже лінійне зростання пропускної здатності пропорційно кількості серцевин. Виграш у $\sim 6,7$ разів досягається без будь-якого погіршення SNR, що робить такі волокна ідеальними для магістральних ліній, де небажано ускладнювати приймачі складними MIMO-алгоритмами.

2. CC-MCF з 19 серцевинами, незважаючи на значне падіння SNR (з 20 дБ до 13 дБ через високі завади -14 дБ/100 км), за рахунок великої кількості просторових каналів демонструє виграш у ~ 120 разів відносно SSMF (сумарна швидкість $8,3 \text{ Пбіт/с}$). Цей результат якісно узгоджується з нещодавнім експериментальним рекордом, описаним у підрозділі 2.3, де для 19-серцевинного

СС-MCF зі стандартним діаметром оболонки було досягнуто 1,7 Пбіт/с [27]. Відмінність у цифрах (1,7 Пбіт/с проти 8,3 Пбіт/с) пояснюється тим, що в реальному експерименті використовувалася вузька смуга та додаткові обмеження через нелінійні ефекти, які не враховані в ідеалізованій формулі Шеннона.

3. Порівняння з найвищими світовими досягненнями. Рекорд NIST 22,9 Пбіт/с [33] був отриманий на 38-серцевинному 3-модовому волокні (114 просторових каналів) з використанням трьох діапазонів (S+C+L) загальною смугою 18,8 ТГц. Якщо перерахувати наш підхід на 114 каналів при смузі 10 ТГц та $\text{SNR}=20$ (без врахування завад), то теоретична оцінка становила б $C \approx 114 \times 10^{13} \times 6,66 \approx 760$ Пбіт/с, що значно перевищує досягнутий рекорд через ідеалізацію моделі. Тому наведені в таблиці 3.4 значення слід розглядати як верхню межу, до якої можна наблизитися при оптимальному дизайні волокон та алгоритмів обробки.

3.3 Перспективи використання багатозв'язних світловодів у мережах наступного покоління

Проведений у розділах 3.1–3.2 аналіз показав, що технологія просторового мультиплексування здатна забезпечити зростання пропускної здатності волоконно-оптичних ліній на один-два порядки порівняно з традиційними одномодовими волокнами. Однак практичне впровадження SDM у реальних мережах залежить від багатьох факторів: типу мережі (дата-центр, магістраль, міська чи доступна мережа), вартості компонентів, необхідності цифрової обробки (MIMO) та сумісності з існуючою інфраструктурою. У цьому підрозділі розглянуто найбільш перспективні сценарії використання багатозв'язних світловодів, а також основні технічні та економічні бар'єри, що стримують їхнє широке розгортання.

3.3.1 Центри обробки даних (ЦОД) як первинний драйвер впровадження SDM

Сьогодні основним джерелом зростання внутрішнього трафіку в центрах обробки даних (дата-центрах) є розподілені обчислення, системи штучного інтелекту, аналіз великих даних та хмарні сервіси. За оцінками аналітиків, трафік усередині дата-центрів зростає на 30–40% щороку, і традиційні оптичні трансивери на основі SSMF з WDM досягають межі щільності портів та енергоспоживання [36]. Саме в цій ніші технологія SDM має найбільші шанси на швидку комерціалізацію з кількох причин:

- Короткі відстані (зазвичай від 100 м до 2 км) дозволяють не турбуватися про диференційну групову затримку (DGD) та модозалежні втрати (MDL) – основні проблеми маломодових волокон.
- Можливість використання сильнозв'язаних багатосерцевинних волокон (СС-MCF) з великою кількістю серцевин (наприклад, 19 у стандартному діаметрі 125 мкм) без необхідності надскладних МІМО-приймачів – обробка може бути виконана на невеликому чипі.
- Інтеграція з кремнієвою фотонікою – як показано в підрозділі 2.2, ультракомпактні мультиплексери мод (розміром 35×35 мкм²) та реконфігуровані матричні комутатори 7×7 вже продемонстровані на платформах SOI із загальними втратами 4,5 дБ та завадами нижче -30 дБ [37, 38]. Це дозволяє створювати щільні оптичні трансивери наступного покоління зі швидкістю понад 1,6 Тбіт/с на один корпус.

3.3.2 Магістральні та підводні лінії зв'язку

Для довгомагістральних (тисячі кілометрів) та підводних оптичних систем вимоги до надійності та енергоефективності значно жорсткіші. Тут перспективними є два підходи:

1. Гетерогенні MCF з ультранизькими перехресними завадами ($XT < -50$ дБ/100 км). Як було розраховано в підрозділі 3.1, такі волокна (наприклад, із траншейною ізоляцією та V-подібним профілем серцевини) дозволяють передавати сигнали незалежно в кожній серцевині без застосування MIMO. Це радикально спрощує приймачі та знижує енергоспоживання. У роботі [25] продемонстровано 13-серцевинне гомогенне FM-MCF із завадами -31,8 дБ/100 км, придатне для дальностей понад 1000 км. Подальша оптимізація траншейних структур обіцяє зниження XT до -40...-50 дБ/100 км, що дозволить використовувати стандартні когерентні трансивери без MIMO.

2. Маломодові волокна (FMF) та маломодові багатосерцевинні волокна (FM-MCF) з обов'язковим використанням MIMO-обробки. Цей підхід дає найвищу просторову щільність (рекорд 22,9 Пбіт/с у роботі NICT [33] досягнуто саме на 38-серцевинному 3-модовому волокні). Однак складність MIMO-приймачів зростає квадратично з кількістю мод. Наприклад, для 45 просторових мод необхідно вирішувати матрицю 45×45 у реальному часі, що споживає кіловати потужності. Тому такі системи найближчим часом будуть використовуватися лише на найбільш завантажених магістралях (трансатлантичні кабелі, опорні мережі операторів першого рівня) – там, де вартість біта виправдовує складність обладнання.

3.3.3 Доступні мережі (FTTH) та міські з'єднання

У мережах «фібера до дому» (FTTH) та міських агрегаційних мережах вимоги до пропускної здатності на один абонента зростають значно повільніше, ніж у магістралях. Сьогодні навіть пропускної здатності 1–10 Гбіт/с на абонента достатньо, тому впровадження SDM у доступі не є економічно виправданим. Однак у перспективі 10–15 років, коли з'являться послуги голографічного зв'язку, мультисенсорної реальності та терабітний домашній інтернет, можливе застосування маломодових волокон з малою кількістю мод (2–4) у поєднанні з

простими 2×2 MIMO-процесорами. Такі рішення вже досліджуються в рамках концепції «SDM-PON» (пасивні оптичні мережі з просторовим розділенням).

3.3.4 Ключові бар'єри та шляхи їх подолання

Попри вражаючі лабораторні рекорди, масштабне впровадження SDM стримується наступними факторами (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Основні бар'єри впровадження технології SDM та шляхи їх подолання

Бар'єр	Сутність	Можливі шляхи вирішення
Відсутність стандартизації	Немає єдиних стандартів на багатосерцевинні волокна, конектори, мультиплексери. Кожен виробник пропонує власний дизайн.	Активна робота ITU-T та IEC над рекомендаціями G.654...G.657 для MCF/FMF. Очікується поява перших стандартів до 2027–2028 рр.
Висока вартість компонентів	Фотонні ліхтарі, MPLC-пристрої, 3D-хвилеводи поки що виготовляються вручну або на спеціалізованому обладнанні. Це значно дорожче за стандартні одномодові адаптери.	Перехід до масового виробництва (кремнієва фотоніка, 3D-нанодрук) дозволить знизити вартість у 10–100 разів протягом 5–7 років.
Енергоспоживання MIMO-обробки	Для FMF та CC-MCF з більш ніж 6 просторовими каналами цифровий MIMO-процесор споживає сотні ват, що неприйнятно для портативних пристроїв і навіть для багатьох дата-центрів.	Розробка оптичних унітарних матричних процесорів (програмовані мережі MZI на чипі) може перенести частину обробки в оптичний домен, знизивши споживання на 50–90% [12].
Сумісність з існуючою інфраструктурою	Більшість прокладених кабелів мають стандартні одномодові волокна. Заміна їх на MCF/FMF потребує повного переобладнання траси.	Гібридні підходи: використання SDM лише на нових ділянках; розробка адаптерів для сполучення SSMF з MCF (фотонні ліхтарі вирішують цю проблему частково).

3.3.5 Прогноз впровадження SDM

Спираючись на аналіз, наведений у [4, 9, 17, 36], можна скласти орієнтовний графік комерціалізації технологій просторового мультиплексування:

2025–2027 рр.: Перші комерційні SDM-трансивери для внутрішньодатцентрових з'єднань (до 2 км) з використанням 4–7 серцевинних MCF та фотонних ліхтарів. Швидкість до 1,6 Тбіт/с на порт.

2028–2030 рр.: Розгортання гетерогенних MCF з низькими завадами на окремих магістральних ділянках (довжиною 100–500 км) операторами зв'язку. Поява перших стандартів на SDM-волокна та конектори.

2030–2035 рр.: Впровадження FM-MCF з MIMO-обробкою на найбільш завантажених підводних кабелях (ємність понад 10 Пбіт/с). Здешевлення кремнієвих фотонних інтегральних схем робить SDM доступним для міських агрегаційних мереж.

3.4 Висновки до розділу 3

Виконані оцінки за аналітичними моделями Кошиби-Сайто дозволяють кількісно порівняти різні типи багатосерцевинних волокон. Для гетерогенних структур із депресованою оболонкою (повітряні траншеї, подвійні кільця) рівень перехресних завад становить менше -55 дБ/100 км, що робить їх найкращим вибором для магістральних SDM-систем без масивної цифрової обробки. Натомість сильнозв'язані СС-MCF, хоча й забезпечують рекордну щільність серцевин (19 у стандартному діаметрі), потребують обов'язкового застосування MIMO-еквалайзерів, що збільшує затримку та складність кінцевого обладнання.

Проведений порівняльний розрахунок підтверджує, що перехід від традиційних одномодових волокон до багатосерцевинних структур дозволяє збільшити пропускну здатність на один-два порядки навіть за умови реалістичних рівнів перехресних завад. Для гетерогенних MCF з траншейною ізоляцією вигрaш становить приблизно 6–7 разів (при 7 серцевинах), а для сильнозв'язаних СС-MCF

з великою кількістю серцевин – до 120 разів (при 19 серцевинах). Отже, просторове мультиплексування є ефективним інструментом для подолання нелінійної межі Шеннона та забезпечення потреб майбутніх надвисокошвидкісних мереж.

Технологія просторового мультиплексування має значний потенціал для подолання кризи пропускної здатності оптичних мереж. Найближчим часом (3–5 років) слід очікувати її комерціалізації в центрах обробки даних завдяки розвитку кремнієвої фотоніки та фотонних ліхтарів. Для довгомагістральних систем ключовими є гетерогенні MCF з ультранизькими перехресними завадами, що дозволяють обійтися без складного МІМО. Основними бар'єрами залишаються відсутність стандартів, висока вартість компонентів та енергоспоживання цифрової обробки, однак ці проблеми інтенсивно вирішуються науково-промисловою спільнотою.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексний аналіз теоретичних засад, сучасного стану розробки та перспектив впровадження технології просторового мультиплексування (Space Division Multiplexing, SDM) у волоконно-оптичних системах зв'язку. На підставі виконаних досліджень сформульовано наступні основні висновки.

У роботі детально розглянуто еволюцію оптичних мереж від часового (TDM) та хвильового (WDM) мультиплексування до когерентних систем із поляризаційним розділенням (PDM). Показано, що подальше нарощування пропускної здатності в стандартних одномодових волокнах (SSMF) впирається у нелінійну межу Шеннона, зумовлену ефектом Керра. Теоретичний аналіз нелінійного рівняння Шредінгера дозволив кількісно описати механізм фазового зсуву, пропорційного інтенсивності сигналу, що призводить до деградації відношення сигнал/шум при спробах підвищення потужності. Встановлено, що гранична пропускна здатність SSMF становить близько 100 Тбіт/, після чого подальше масштабування за параметрами B , P та SNR стає неефективним. Єдиним перспективним шляхом визнано збільшення кількості просторових каналів M , що реалізується в концепції SDM.

Досліджено три основні технології створення модових мультиплексорів/демультиплексорів: повністю волоконні фотонні ліхтарі (PL), пристрої на основі багатоплощинного перетворення світла (MPLC) та інтегральні 3D-хвильоводи, сформовані фемтосекундним лазерним записом. Встановлено, що фотонні ліхтарі забезпечують найнижчі внесені втрати ($< 0,6$ дБ) та пряме зварювання з лінійними волокнами, однак їх масштабованість обмежена ~ 15 модами. MPLC-пристрої, навпаки, демонструють високу масштабованість (доведено для > 45 мод) та низькі модозалежні втрати, але потребують прецизійного юстирування. Технологія 3D-хвильоводів дозволяє вирішувати проблему геометричної невідповідності кроків між волокнами та інтегральними схемами.

Розглянуто фізику поширення світла в маломодових (FMF) та багатосерцевинних (MCF) волокнах із застосуванням апарату теорії зв'язаних мод та теорії зв'язаної потужності. Виявлено два ключові деградаційні явища: диференційну групову затримку (DGD) у FMF, яка вимагає складних МІМО-еквалайзерів, та міжсерцевинні перехресні завади (ICXT) у MCF. Показано, що використання градієнтного профілю показника заломлення дозволяє мінімізувати DGD до значень < 50 пс/км, а застосування гетерогенних архітектур, траншейних депресованих оболонок та повітряних капілярів – знизити ICXT до рівня < -50 дБ/100 км. Отримано аналітичні залежності середнього рівня перехресних завад від радіуса макровигину та кореляційної довжини збурень.

На основі модифікованої формули Шеннона $C = M \cdot B \cdot \log_2(1 + SNR_{eff})$ та розрахованих у роботі значень ICXT для трьох типів волокон (гетерогенне MCF з траншейною ізоляцією, гомогенне MCF зі слабким зв'язком, сильнозв'язане CC-MCF) було виконано порівняльний розрахунок пропускної здатності для ділянки довжиною 100 км. Отримано наступні результати:

- для традиційного SSMF – ~ 70 Тбіт/с;
- для 7-серцевинного гетерогенного MCF (XT ≈ -61 дБ/100 км) – $\sim 0,47$ Пбіт/с (виграш у 6,7 раза);
- для 19-серцевинного CC-MCF (XT ≈ -14 дБ/100 км) з урахуванням падіння SNR до 13 дБ – $\sim 8,3$ Пбіт/с (виграш у ~ 120 разів).

Підтверджено, що гетерогенні MCF із наднизькими завадами дозволяють працювати без застосування масивної МІМО-обробки, що є критичним для енергоефективних магістральних ліній.

Розглянуто найвидатніші експериментальні досягнення, зокрема передачу 22,9 Пбіт/с через 38-серцевинне 3-модове волокно та 1,7 Пбіт/с у 19-серцевинному CC-MCF зі стандартним діаметром оболонки 125 мкм. Ці результати переконливо доводять, що технологія SDM вийшла за межі лабораторних прототипів і готова до комерціалізації. Визначено основні бар'єри: відсутність стандартів (очікується поява рекомендацій ITU-T до 2027–2028 рр.), висока вартість компонентів (що знижуватиметься з переходом до кремнієвої

фотоніки та 3D-нанодруку) та енергоспоживання МІМО-процесорів (перспективне вирішення – оптичні унітарні матричні процесори на основі програмованих інтерферометрів Маха-Цендера).

Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що розвиток оптичних комунікацій вступає в нову епоху – епоху просторової щільності. Якщо попередні три десятиліття домінувала парадигма «більше бітів на герц» (високорівневі модуляції, когерентне детектування), то наступне десятиліття визначатиметься парадигмою «більше бітів на квадратний мікромметр поперечного перерізу волокна». SDM – це не просто черговий технологічний крок, а зміна самої архітектури оптичних мереж: від лінійних ланцюжків «точка-точка» до просторово-розподілених систем, де кожна серцевина або мода може розглядатися як незалежний віртуальний кабель. Найближчими роками (2025–2027) слід очікувати масового впровадження SDM-трансиверів у центрах обробки даних, де короткі відстані нівелюють проблеми DGD та MDL. У магістральному сегменті перші комерційні системи з'являться до 2030 р., а до 2035 р. SDM стане стандартом де-факто для всіх нових підводних та наземних оптичних ліній надвисокої пропускної здатності. Робота закладає теоретичний та розрахунковий фундамент для подальших інженерних розробок у цьому напрямі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Essiambre R.-J., Kramer G., Winzer P. J., Foschini G. J., Goebel B. Performance limits in optical communications due to fiber nonlinearity. *Advances in Optics and Photonics*. 2017. Vol. 9, No. 3. P. 429–503. DOI: 10.1364/AOP.9.000429. URL: <https://opg.optica.org/aop/abstract.cfm?URI=aop-9-3-429>
2. Meeting the demand for optical bandwidth over the next decade. Nokia. 2023. URL: <https://www.nokia.com/blog/meeting-the-demand-for-optical-bandwidth-over-the-next-decade/>
3. Zhang H., Wang J. Review of Space Division Multiplexing Fibers. *Chinese Optics Letters*. 2022. URL: <https://www.researching.cn/articles/OJ774f99ca057bdfb7>
4. Saitoh K., Matsuo S. Review of Space-Division Multiplexing Technologies in Optical Communications. *IEICE Transactions on Communications*. 2019. Vol. E102-B, No. 1. P. 1–16. DOI: 10.1587/transcom.2017EBI0002. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/transcom/E102.B/1/E102.B_2017EBI0002/_article
5. Richardson D. J. Novel applications of space-division multiplexing. *Frontiers of Optoelectronics*. 2020. Vol. 13. P. 1–14. URL: <https://journal.hep.com.cn/foe/EN/1159644470314590480>
6. Nazarathy M. Overcoming the Kerr-Induced Capacity Limit in Optical Fiber Communications : dissertation. University of California San Diego, 2018. 188 p. URL: https://escholarship.org/content/qt0pd2809b/qt0pd2809b_noSplash_dbe4812bfd0fd4706904f7bee6c275dd.pdf
7. Winzer P. J. Maximizing the optical network capacity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016. Vol. 374, No. 2062. DOI: 10.1098/rsta.2014.0440. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4733919/>
8. Secondini M., Forestieri E. Scope and Limitations of the Nonlinear Shannon Limit. *Journal of Lightwave Technology*. 2017. Vol. 35, No. 4. P. 893–902. DOI: 10.1109/JLT.2016.2621682. URL: https://www.iris.sssup.it/bitstream/11382/514153/1/JLT2017_NonlinearShannonLimit.pdf

9. Richardson D. J., Fini J. M., Nelson L. E. Space Division Multiplexing in Optical Fibres. *Nature Photonics*. 2013. Vol. 7. P. 354–362. DOI: 10.1038/nphoton.2013.94. URL: https://www.researchgate.net/publication/258806968_Space_Division_Multiplexing_in_Optical_Fibres
10. Fontaine N. K., Ryf R., Chen H. Photonic Lanterns, 3-D Waveguides, Multiplane Light Conversion, and Other Components That Enable Space-Division Multiplexing. *Proceedings of the IEEE*. 2022. Vol. 110, No. 11. P. 1715–1743. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3203390. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/5/9945675/09916270.pdf>
11. Fontaine N. K. et al. All-fiber few-mode multicore photonic lantern mode multiplexer. *Optics Express*. 2017. Vol. 25, No. 14. P. 16701–16715. DOI: 10.1364/OE.25.016701. URL: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-25-14-16701>
12. Willner A. E. Optical computing and optical signal processing for recovery of spatiotemporally coupled optical communications channels. *Advanced Photonics*. 2025. Vol. 7, No. 6. DOI: 10.1117/1.AP.7.6.064003. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Optical-computing-and-optical-signal-processing-for-recovery-of-spatiotemporally/volume-7/issue-06/064003/Optical-computing-and-optical-signal-processing-for-recovery-of-spatiotemporally/10.1117/1.AP.7.6.064003.full>
13. Technology Photonic Lantern, Evanescent Wave Coupling, Phase Plate Devices. Cailabs. 2020. URL: https://info.cailabs.com/hubfs/Cailabs_PROTEUS_Blog_SDM_tableau_EN_202012.pdf
14. Fontaine N. K. et al. Efficient and mode selective spatial mode multiplexer based on multi-plane light conversion. *Optics Express*. 2014. Vol. 22, No. 13. P. 15599–15607. DOI: 10.1364/OE.22.015599. URL: <https://opg.optica.org/fulltext.cfm?uri=oe-22-13-15599>

15. Fontaine N. K. Multi-Plane Light Conversion: Devices and Applications : dissertation. University of Central Florida, 2020. 188 p. URL:
<https://stars.library.ucf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2709&context=etd2020>
16. Birks T. A. et al. Design Constraints of Photonic-Lantern Spatial Multiplexer Based on Laser-Inscribed 3-D Waveguide Technology. 2015. URL:
https://www.researchgate.net/publication/273917861_Design_Constraints_of_Photonic-Lantern_Spatial_Multiplexer_Based_on_Laser-Inscribed_3-D_Waveguide_Technology
17. Richardson D. J., Fini J. M., Nelson L. E. Space-division multiplexing for optical fiber communications. Optica. 2021. Vol. 8, No. 9. P. 1186–1203. DOI:
10.1364/OPTICA.438118. URL: <https://opg.optica.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-8-9-1186>
18. Guerra G. Statistical Analysis of Differential Group Delay in Few-Mode Spun Optical Fibers : master's thesis. University of Padua, 2023. URL:
https://thesis.unipd.it/retrieve/e4a22010-de8c-4b72-90e9-a8cdc879df3e/tesi_gianluca_guerra.pdf
19. Multiple LP Mode Fiber Designs for Mode Division Multiplexing : patent US8948559B2. 2015. URL: <https://patents.google.com/patent/US8948559B2/ja>
20. Wang Y. et al. Differential mode delay diagnostics for LP modes traversing a few-mode fiber. Applied Optics. 2022. Vol. 61. DOI: 10.1364/AO.442256. URL:
https://opg.optica.org/ao/upcoming_pdf.cfm?id=442256
21. Paschotta R. Graded-Index Fibers. RP Photonics Encyclopedia. URL: https://www.rp-photonics.com/graded_index_fibers.html
22. Few-mode optical fiber with a simple double-layer core supporting the O + C + L band weakly coupled mode-division multiplexing transmission. Optics Express. 2023. Vol. 31, No. 2. P. 2467–2478. DOI: 10.1364/OE.477893. URL:
<https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-2-2467>
23. Measurement of differential mode group delay in few-mode fiber with correlation optical time-domain reflectometer. Applied Optics. 2022. Vol. 61, No. 13. P. 3579–3585. DOI: 10.1364/AO.453410. URL: <https://opg.optica.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-61-13-3579>

24. Crosstalk Suppression in Multi-Core Fiber Through Modulation of the Refractive Index. *Fibers*. 2025. Vol. 13, No. 5. Article 56. DOI: 10.3390/fib13050056. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6439/13/5/56>
25. Low cross talk homogeneous few-mode multi-core fiber with a suspended air-trench and V-type index core. *Journal of the Optical Society of America B*. 2022. Vol. 39, No. 10. P. 2840–2848. DOI: 10.1364/JOSAB.467286. URL: <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?uri=josab-39-10-2840>
26. Design of Low Crosstalk Homogeneous Multicore Few Mode Fiber for Future High-Capacity Optical Transmission. Genesis Publishing Consortium Limited. 2021. URL: <https://www.genesispcl.com/articles/vol-1-issue-1/p-3-8/>
27. Reaching the pinnacle of high-capacity optical transmission using a standard cladding diameter coupled-core multi-core fiber. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. DOI: 10.1038/s41467-025-58288-y. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12019152/>
28. Koshiha M., Saitoh K. Physical interpretation of intercore crosstalk in multicore fiber: effects of macrobend, structure fluctuation, and microbend. *Optics Express*. 2013. Vol. 21, No. 5. P. 5401–5412. DOI: 10.1364/OE.21.005401. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=oe-21-5-5401>
29. Inter-Mode Crosstalk Estimation between Cores for LP_{mn} Modes in Weakly Coupled Few-Mode Multicore Fiber with Perturbations. *Photonics*. 2024. Vol. 11, No. 9. DOI: 10.3390/photonics11090847. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11435798/>
30. Hayashi T. et al. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. *Optics Express*. 2011. Vol. 19, No. 17. P. 16576–16592. DOI: 10.1364/OE.19.016576. URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-19-17-16576>
31. Koshiha M., Saitoh K. Analytical Expression of Average Power-Coupling Coefficients for Estimating Intercore Crosstalk in Multicore Fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012. Vol. 24, No. 21. P. 1987–1990. DOI: 10.1109/LPT.2012.2217187. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/iel5/4563994/6244834/06316044.pdf>

32. Analysis of Crosstalk in Multicore Fibers: Statistical Distributions and Modeling. *Photonics*. 2023. Vol. 10, No. 2. Article 174. DOI: 10.3390/photonics10020174. URL: <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/2/174>
33. World Record Optical Fiber Transmission Capacity Doubles to 22.9 Petabits per Second. National Institute of Information and Communications Technology (NICT). 2023. URL: <https://www.nict.go.jp/en/press/2023/11/30-1.html>
34. Generation of Photon Orbital Angular Momentum and Its Application in Space Division Multiplexing. (2023). *Photonics*. - <https://www.mdpi.com/2304-6732/10/6/664>
35. Free-standing microscale photonic lantern spatial mode (De-)multiplexer fabricated using 3D nanoprinting. (2024). *Light: Science & Applications*. - <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38825604/>
36. Silicon photonics for high-speed communications and photonic signal processing. (2024). *npj Nanophotonics*. - <https://www.nature.com/articles/s44310-024-00024-7>
37. Ultra-compact and efficient integrated multichannel mode multiplexer in silicon for few-mode fibers. (2024). *Laser & Photonics Reviews*. - <https://arxiv.org/pdf/2311.03675>
38. Reconfigurable SDM Switching Using Novel Silicon Photonic Integrated Circuit. (2016). *Scientific Reports*. - <https://www.nature.com/articles/srep39058>