

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

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем**

«На правах рукопису»
УДК 621.372.83

«До захисту допущено»
ВО завідувача кафедри
_____ Валерій ПРАВИЛО
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Дослідження параметрів та проектування 2-резонаторних Add-Drop фільтрів на діелектричних мікрорезонаторах»

Виконав:
студент II курсу, групи ТС-01мн
Пащенко Андрій Ігорович _____

Керівник:
професор кафедри ІКТС, д.т.н., професор
Трубін О. О. _____

Рецензент:
доцент кафедри ТК, к.т.н., доцент
Трубаров І. В. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра інформаційно-комунікаційних технологій та систем
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
Освітньо-наукова програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувача кафедри

_____ Валерій ПРАВИЛО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Пащенко Андрію Ігоровичу

1. Тема дисертації «Дослідження параметрів та проектування 2-резонаторних Add-Drop фільтрів на діелектричних мікрорезонаторах», науковий керівник дисертації Трубін Олександр Олексійович, професор, доктор технічних наук, затверджені наказом по університету від «03» травня 2022 р. № НС/173/2022.
2. Термін подання студентом дисертації 08.06.2022 р.
3. Об'єкт дослідження: системи зв'язаних між собою оптичних мікрорезонаторів.
4. Предмет дослідження: розробка математичних моделей фільтрів та пошук нових застосувань зв'язаних мікрорезонаторів з прийнятними характеристиками розсіювання.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 1) Аналіз наукової літератури за темою використання в оптичних системах зв'язку Add-Drop фільтрів на діелектричних мікрорезонаторах. (*письмовий звіт*)
 - 2) Проведення розрахунків 2-ланцюгових Add-Drop фільтрів на діелектричних мікрорезонаторах. (*письмовий звіт*)

3) Дослідження застосування оптичних мікрорезонаторів у оптичних системах зв'язку. (*письмовий звіт*)

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

- 1) Презентація для захисту магістерської дисертації на тему: «Дослідження параметрів та проектування 2-резонаторних Add-Drop фільтрів на діелектричних мікрорезонаторах»

7. Орієнтовний перелік публікацій:

Пащенко А.І., Трубін О.О. «Модельовання 2-резонаторного Add-Drop фільтра на мікрокільцевих резонаторах», МНТК “Перспективи Телекомунікацій”, 2021, с.76-78, Київ

8. Дата видачі завдання “1” жовтня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Планування та затвердження структури дисертації	01.09-13.09	Виконано
2	Збір та аналіз інформації для першого розділу дисертації	13.09-27.09	Виконано
3	Написання тексту першого розділу дисертації	27.09-25.10	Виконано
4	Збір та аналіз інформації для другого розділу дисертації	25.10-15.11	Виконано
5	Написання тексту другого розділу дисертації	15.11-27.12	Виконано
6	Збір та аналіз інформації для третього розділу дисертації	27.12-24.01	Виконано
7	Написання тексту третього розділу дисертації	24.01-28.02	Виконано
8	Аналіз результатів дослідження, підбиття підсумків	28.02-04.04	Виконано
9	Узагальнення усіх виконаних результатів, закінчення виконання дисертації	04.04-23.05	Виконано
10	Підготовка до захисту дисертації	23.05-13.06	Виконано

Студент

Андрій ПАЩЕНКО

Науковий керівник

Олександр ТРУБІН

РЕФЕРАТ

Темою магістерської дисертації є дослідження параметрів та проектування Add-Drop фільтрів на діелектричних мікрорезонаторах.

Робота містить 89 сторінок, зокрема 35 ілюстрацій, 2 таблиці, 28 джерел інформації та один лістинг.

Тема магістерської дисертації є актуальною, оскільки для задоволення постійно зростаючих вимог щодо швидкостей передавання та спрощення систем необхідно знаходити нові методи побудови та проектування елементів та самих оптичних систем зв'язку.

Мета дисертації полягає в аналізі та дослідженні можливих способів збільшення пропускнуої здатності систем електронних комунікацій шляхом використання нових селективних елементів з кращими умовами розгалудження оптичних сигналів зв'язку за допомогою систем зв'язаних між собою оптичних мікрорезонаторів.

Об'єктом дослідження є системи зв'язаних між собою оптичних мікрорезонаторів. Предметом дослідження є розробка математичних моделей фільтрів та пошук нових застосувань зв'язаних мікрорезонаторів.

При виконанні роботи застосовувалося моделювання у пакеті програмного забезпечення MathCad для створення математичної моделі 2-резонаторних фільтрів.

оптичний зв'язок, мікрорезонатори, фільтри, мультиплексування, моделювання, add-drop фільтри, моди шепочучої галереї, селективні пристрої, високо-добротні фільтри, мікро-кільцевий резонатор, WDM, WGM.

ABSTRACT

The topic of the master's dissertation is the study of the parameters and design of Add-Drop filters on dielectric microcavities.

The work contains 89 pages, including 35 illustrations, 2 tables, 28 sources of information, and 1 listing.

The theme of the master's dissertation is relevant because, in order to meet the ever-increasing requirements for transmission speeds and simplification of systems, it is necessary to find new methods of building and designing of elements of optical systems and whole optical communication systems.

The purpose of the dissertation is to analyze and study possible ways to increase the bandwidth of electronic communications systems by using new selective elements with better conditions for coupling optical communication signals using systems of interconnected optical microcavities.

The object of research is the systems of coupled optical microcavities. The subject of research is the development of mathematical models of filters and the search for new applications for coupled microcavities.

The simulation software package MathCad was used in order to create a mathematical model of 2-resonator filters.

optical communication, microresonators, filters, multiplexing, modeling, add-drop filters, whispering gallery modes, selective devices, high quality filters, micro-ring resonator, WDM, WGM.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	10
1 АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ МІКРОРЕЗОНАТОРІВ. 12	
1.1 Фізичні принципи роботи оптичних мікрорезонаторів з коливаннями шепчучої галереї.....	16
1.1.1 Нові джерела оптичного випромінювання	17
1.1.2 Солітони, згенеровані у мікрорезонаторах.....	18
1.2 Смугові фільтри в оптичних комунікаціях.....	22
1.3 Фільтри високого порядку	26
1.4 Ланцюг зв'язаних резонаторів.....	29
1.5 Проблеми при проектуванні селективного обладнання.....	33
1.6 Формулювання мети та завдань дослідження.....	35
1.7 Висновки з розділу 1	35
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ADD-DROP ФІЛЬТРІВ	37
2.1 Способи розрахунку параметрів та моделювання селективних елементів систем зв'язку	37
2.1.1. Спектральні характеристики оптичних фільтрів	41
2.2 Математична модель фільтрів, виконаних із застосуванням різних дискових мікрорезонаторів	48
2.3 Пропонований метод моделювання 2-резонаторних Add-Drop фільтрів..	51
2.4 Дослідження параметрів 2-резонаторного Add-Drop фільтра.....	54
2.5 Висновки з розділу 2.....	55
3 ПРОПОНОВАНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ADD-DROP ФІЛЬТРІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ.....	56
3.1 Побудова фотонних пристроїв зв'язку з допомогою Add-Drop фільтрів	56
3.2 Системи оптичних комунікацій з використанням мікрокільцевих пристроїв	61

3.2.1 Оптичне модулювання на основі мікрокільцевих резонаторів.....	64
3.2.2 Оптичне мультиплексування на основі мікрокільцевих резонаторів.....	70
3.3 Способи виготовлення мікрокільцевих систем	74
3.4 Висновки з розділу 3.....	81
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	84
Додаток А Лістинг програми моделювання дворезонаторних Add-Drop фільтрів у ПЗ MathCad.....	88

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ	Амплітудно-частотна характеристика
ВОЛЗ	Волоконно-оптична лінія зв'язку
ДКС	Дисипативні Керрівські солітони
МШГ	Моди шепочучої галереї
НВЧ	Надвисокі частоти
ОВ	Оптичне волокно
ОВД	Область вільної дисперсії
РШГ	Резонатор з модами типу шепочучої галереї
ФСМ	Фазова самомодуляція (самофокусування)
ЧХЗ	Чотирьох-хвильове змішування
ADC	Asymmetric Directional Couplers – асиметричний спрямований відгалужувач
APF	All-pass Filter – всепропускаючий фільтр
CCW	Coupled Continuouswave Waveguide – хвилеводи з об'єднаними резонаторами
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor – комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник
CROW	Coupled Ring Optical waveguide – хвилевідний ланцюг зв'язаних резонаторів
CW	Continuous Wave – неперервний сигнал
DR	Dielectric Resonator – діелектричний резонатор
DRR	Double Ring Resonator – резонаторна система з двома кільцями
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне мультиплексування каналів за довжинами хвиль
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier — волоконно – оптичний підсилювач на оптичному волокні, легovanому йонами ербію

ER	Extenuation Rate – коефіцієнт загасання
FSR	Free Spectral Range – вільний спектральний діапазон
FWHM	Full-width on a half maximum – повна ширина смуги пропускання на половині максимуму
LD	Laser Diode – лазерний діод
OSA	Optical Spectrum Analyzer – аналізатор оптичного спектру
PD	Photodiode – фотодіод
PN-перехід	Positive-Negative junction – електронно-дірковий перехід
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer – перелаштовуваний оптичний Add-Drop мультиплексор
SCISSOR	Side-coupled Integrated Spaced Sequence of Optical Resonator – зв'язані по боковій стінці інтегровані послідовності оптичних резонаторів
SRR	Single Ring Resonator – одиничний кільцевий резонатор
TDM	Time Division Multiplexing – мультиплексування каналів з розділом за часом
WDM	Wavelength Division Multiplexing – мультиплексування каналів з розподілом за довжинами хвиль
WGM	Whispery Gallery Modes – моди шепочучої галереї

ВСТУП

Основною тенденцією розвитку сучасних систем зв'язку є збільшення обсягів переданої інформації, що вимагає зменшення затримок та збільшення швидкостей передачі. Для виконання цих вимог необхідні зміни в інфраструктурі мережевих операторів. Одні з ключових елементів оптичної інфраструктури мереж електронних комунікацій — це фільтри. Для побудови селективних пристроїв найважливішим є вибір резонаторних елементів. [1]

При дослідженні та проектуванні селективного обладнання для систем зв'язку до уваги приймається декілька важливих факторів, а саме: форми та матеріал резонатора, які обираються для певної задачі. Однозначно визнати першість одного з них неможливо, але все ж хотілося б виділити дискові та кільцеві мікрорезонатори. Вони мають дві важливі особливості, а саме: функціональність і компактність. [2, 5, 9]

Функціональність стосується до того факту, що широкий спектр бажаних характеристик фільтрів може бути отриманий шляхом об'єднання декількох кілець, а компактність полягає у тому, що кільцеві та дискові резонатори з радіусами менш ніж 25 мкм можуть використовуватися для створення інтегральних пристроїв зі щільностями порядку 10^4 - 10^5 елементів на квадратний сантиметр.

На основі попереднього аналізу існуючих розробок опто-волоконних фільтрів виникає задача дослідження та розробки нових методів проектування фільтрів, які відрізняються більш простим конструктивним виконанням та більш якісними параметрами, придатними для використання у більш високочастотних діапазонах довжин хвиль. [5, 14, 16]

Метою дисертації є аналіз та дослідження можливих способів збільшення пропускну здатності систем електронних комунікацій шляхом використання нових селективних елементів, які характеризуються кращими

умовами розгалудження оптичних сигналів завдяки використанню систем зв'язаних між собою оптичних мікрорезонаторів з коливаннями шепочучої галереї.

Завданнями дослідження є розробка математичних моделей фільтрів, виконаних із застосуванням різних дискових мікрорезонаторів; дослідження нових структур зв'язаних мікрорезонаторів з прийнятними характеристиками розсіювання. Для побудови математичної моделі фільтрів буде застосовано приблизне вирішення системи рівнянь Максвелла, засноване на застосуванні теорії збуджень. Застосування теорії збуджень має дозволити знайти вирішення задачі розрахунку S-матриці фільтрів у аналітичному вигляді. Для цього будуть розраховані параметри фільтрового каскаду в системі MathCad.

У роботі будуть розглянуті основні закономірності зміни характеристик розсіювання фільтрів при варіації параметрів зв'язку мікрорезонаторів. Розраховано частотні залежності матриці розсіювання смугових фільтрів з різними дисковими мікрорезонаторами інфрачервоного діапазону довжин хвиль. Встановлено найбільш оптимальні конфігурації зв'язаних мікрорезонаторів, які дозволяють досягати найкращих характеристик розсіювання.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ МІКРОРЕЗОНАТОРІВ

Оптичні мікрорезонатори обмежують світло невеликими об'ємами шляхом резонансної рециркуляції. Пристрої на основі оптичних мікрорезонаторів вже незамінні для широкого кола застосувань та досліджень. Наприклад, мікрорезонатори з активних напівпровідникових матеріалів $A^{III}B^V$ контролюють спектри випромінювання лазерів, щоб забезпечити передачу даних на великі відстані по оптичних волокнах, у квантових оптичних пристроях мікрорезонатори можуть спонукати атоми або квантові точки випромінювати спонтанні фотони в потрібному напрямку або створювати середовище, де долаються такі дисипативні механізми, як спонтанне випромінювання. Застосування цих пристроїв настільки ж різноманітні, як їх геометричні та резонансні властивості. [2]

Можливості, щодо досягнення надвисоких добротностей у мікроторцевих системах є дуже широкими. На рисунку 1.1 продемонстровано пристрій з діаметром 120 мкм і коефіцієнтом Q понад 100 мільйонів, проте це не найкращі досягнуті результати. Можливості покращення характеристик добротності та довгоживучості пристроїв буде розглянута у наступних розділах. Коливання шепочучої галереї можна знайти в декількох геометріях резонаторів: у сферах, дисках та кільцях. На вставці: електронна мікрофотографія мікротороїдного резонатора, що складається з тонкого шару кварцу на кремнієвій опорі та підкладці.

Оптичний мікрорезонатор має залежний від розміру резонансний частотний спектр. Мікромасштабний об'єм гарантує, що резонансні частоти розподіляються в цьому спектрі більш рідко, ніж у відповідному "макромасштабному" резонаторі. Ідеальний резонатор затримав би у собі світло на нескінченний час (тобто без втрат) і мав би резонансні частоти з точними значеннями. Відхилення від цього ідеального стану описується коефіцієнтом Q резонатора (який пропорційний часу утримання в одиницях

оптичного періоду). Коефіцієнт Q та об'єм мікрорезонатора (V) є важливими факторами у застосуванні цих пристроїв, а узагальнення значень, типових для пристроїв, що порівнюються у цьому розділі, наведено у Таблиці 1.1. Також репрезентативними прикладами трьох методів обмеження, що використовуються у мікрорезонаторах є фільтри, наведені у таблиці 1.1.

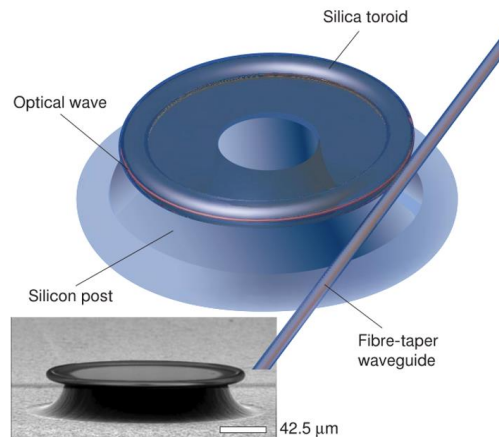
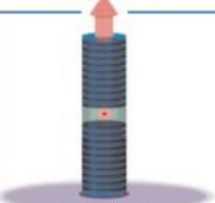
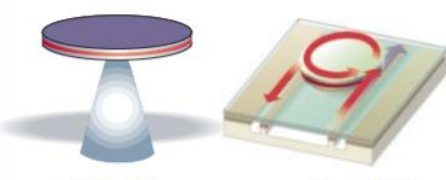
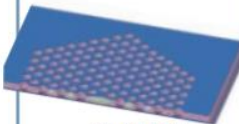
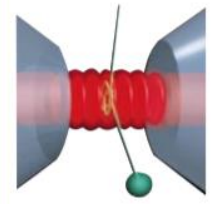
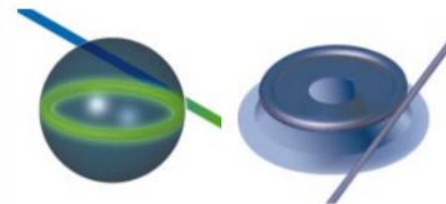


Рисунок 1.1 - Візуалізація мікротороїдного резонатора з надвисокою добротністю Q [2]

Таблиця 1.1 – Найпоширеніші структури оптичних мікрорезонаторів [2]

	Fabry-Perot	Whispering gallery	Photonic crystal
High Q	 $Q: 2,000$ $V: 5 (\lambda/n)^3$	 $Q: 12,000$ $V: 6 (\lambda/n)^3$ $Q_{III-V}: 7,000$ $Q_{Poly}: 1.3 \times 10^5$	 $Q: 13,000$ $V: 1.2 (\lambda/n)^3$
Ultrahigh Q	 $F: 4.8 \times 10^5$ $V: 1,690 \mu\text{m}^3$	 $Q: 8 \times 10^9$ $V: 3,000 \mu\text{m}^3$ $Q: 10^8$	

У таблиці 1.1 мікрорезонатори розділені за стовпцями відповідно до використовуваного методу обмеження електромагнітного випромінювання в

межах резонатора та за рядками у порядку зростання за величиною Q -фактора. Режим мод малого та ультрамалого об'єму – це інші можливі класифікації, які дещо доповнюють цю схему. Представлені приклади, з вимірними Q_s та V_s . Верхній ряд: мікростовбець, міродиск, напівпровідник, полімерний Add/Drop фільтр, фотонний кристалічний резонатор. Нижній ряд: об'ємний оптичний резонатор Фабрі-Перо, мікросфера, мікротороїд. n - коефіцієнт заломлення матеріалу, а V , якщо не вказано, не надано. Об'єм V мікросфери був виведений за діаметром, на відміну від Q , для надвисокодобротного резонатора Фабрі-Перо, наведено тонкість \mathcal{F} . Для Add/Drop фільтра наведено два значення Q : одне для полімерної конструкції, Q_{poly} , а друге для конструкції напівпровідників $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, $Q_{\text{III-V}}$. [2]

У дисертації розглядаються такі застосування оптичних мікрорезонаторів як: посилення та придушення спонтанного випромінювання, нові джерела оптичного випромінювання, солітони та динамічні фільтри в оптичному зв'язку.

Окрім надвисокодобротних мікрорезонаторів Фабрі – Перо, моди шепчучої галереї активно досліджуються у кремнеземних та кварцових мікросферах. Резонатори з коливаннями шепчучої галереї – це типово діелектричні сферичні структури, в яких хвилі обмежені «безперервним повним внутрішнім відбиттям». Сфери мають атомноподібний модний спектр, у якому високі значення l числа (головний кутовий індекс або оптичний режим) та малі радіальні моди мають орбіти біля поверхні сфери (рис. 1.2). Відмінна обробка поверхні має вирішальне значення для максимізації добротності мікрорезонатора, а утворення сфер за рахунок поверхневого натягу (тобто у вигляді краплі розплавленого кварцу) забезпечує майже атомно-гладку поверхню (шорсткість поверхні становить лише кілька нанометрів або менше при використанні такого способу виготовлення). Об'ємні оптичні втрати від кремнезему також надзвичайно низькі, і були отримані рекордні коефіцієнти Q порядку $8 * 10^9$. Для цих

вимірювань залежність Q від діаметра сфери узгоджується з втратами, викликаними шорсткістю поверхні. Крім того, спостерігалася залежність від часу для виміряного Q , яка, як вважається, є результатом адсорбції води та утворення ОН-груп на поверхні сфери. В цій системі продемонстровано якісне та сильне зчеплення, а моделювання показує, що суттєве поліпшення міцності зв'язку можливе за рахунок використання сфер зі зменшеними діаметрами.

Волоконно-оптичний кабель вважається найбільш ймовірним середовищем для передачі квантової інформації. У зв'язку з цим волоконно-оптичні конуси (див. Рис. 1.2), які забезпечують наднизькі втрати та пряме зчеплення з надвисокодобротними Q -сферами були запропоновані як засіб для передавання квантових мод із резонатора до волокна.

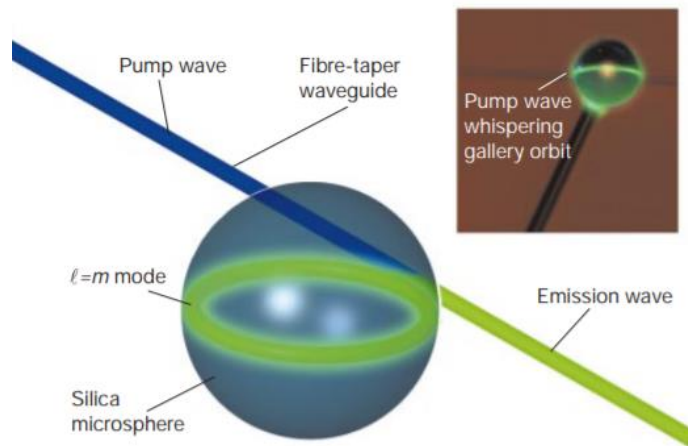


Рисунок 1.2 - Ілюстрація кварцевого сферичного мікрорезонатора з модами шепчучої галереї [2]

На рисунку 1.2 зелена орбіта - це режим $l = m$, захоплений на поверхні кулі. Показаний конічний хвилевід з конусним волокном, який використовується для передавання потужності до резонатора та від нього. На рисунку джерело енергії для накачування оптичної потужності у мікрорезонатор (синього кольору) індукує циркуляцію оптичного

випромінення всередині сфери, достатню для утворення оптичних коливань (хвиля зеленого випромінювання). На вставці: мікрофотографія, на якій зображена легована мікросфера. У цьому випадку зелене випромінювання є результатом накачування оптичної потужності до мікрорезонатора.

1.1 Фізичні принципи роботи оптичних мікрорезонаторів з коливаннями шепчучої галереї

Моди шепчучої галереї — це один з типів власних мод хвильового поля або резонансів всередині оптичного резонатора. Вказані моди є хвилям, які по коловій траєкторії переміщуються всередині резонатора. МШГ існують за рахунок неперервного повного внутрішнього відбиття від поверхні резонатора, що в свою чергу має відповідати умовам резонансу. Після проходження однієї довжини шляху в резонаторі хвилі повертаються на початкову позицію з однаковою фазою. У результаті величезна кількість хвиль симфазно взаємодіють та формують режим стоячих хвиль. [3]

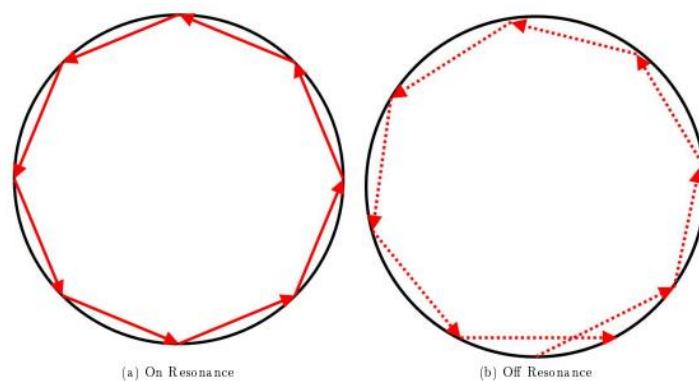


Рисунок 1.3 - Розповсюдження світла у резонаторів круглої форми (а) у резонансному та поза резонансним збудженням мод типу шепчучої галереї [4]

Зменшуючи об'єм резонатора на три-чотири порядки, в порівнянні із звичайними макророзмірними аналогами і обравши матеріал з достатньо малими власними втратами можливо доволі легко створити високодобротні

пристрої з такими модами. Ідея РШГ в тому, щоб шляхом покращення методів виготовлення та передавання зменшити шорсткість стінок, що впливає на процес відбивання від межі розподілу середовищ, і таким чином перейти до ковзаючого режиму розповсюдження променів. [5]

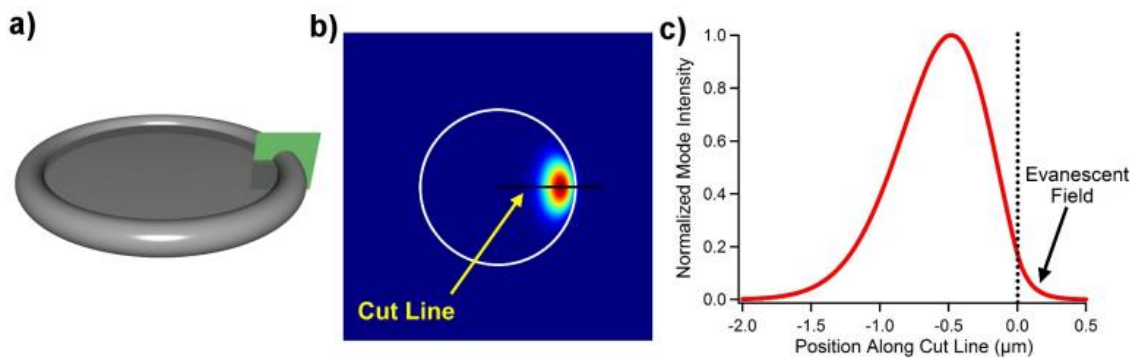


Рисунок 1.4 - Тороїдальний резонатор WGM з площиною розрізу, позначеною зеленим кольором. (b) Зображення нормованої інтенсивності моди вздовж площини розрізу резонатора. (c) Енергія електромагнітної хвилі зосереджена поблизу межі розділу середовищ [4]

1.1.1 Нові джерела оптичного випромінювання

Прагнення щодо створення ефективних і компактних лазерних джерел, які пропонують розширені функціональні можливості, надихнули велику кількість досліджень мікрорезонаторів. Невеликі об'єми резонаторів та високі добротності дозволили створити пристрої з порогами оптичного накачування потужності близько субмікровату у мікросферах та пороги струму в мікроамперному масштабі у напівпровідникових лазерах. З появою багатохвильових систем зв'язку, налаштовуваних та компактних джерел випромінювання набули ще більшого значення. [2]

Джерела, які використовують нелінійно стимульований процес для досягнення дії лазера, являють собою інший клас пристроїв. Резонансна рециркуляція слабких вхідних сигналів у резонаторах надвисокої якості Q з

малим об'ємом створює величезну напруженість модового поля і тим самим знижується поріг для утворення нелінійних явищ. Для заданої вхідної потужності P_{in} , інтенсивність циркуляції всередині резонатора задається значенням $I = P_{in} \frac{\lambda Q}{2\pi n V}$, де n - індекс групи. Для резонатора з добротністю 100 мільйонів та об'єму мод 500 мм^3 (обидва значення досяжні у сферах з діаметром близько 40 мм) інтенсивність циркуляції перевищує 1 ГВт/см^2 при менш ніж 1 мВт сполученої вхідної потужності.

Спостереження за стимульованим Раманівським розсіюванням, багаторядним випромінюванням Стокса, стимульованим розсіюванням Бріллюена та багатьма іншими нелінійними ефектами були вперше досліджені в мікрокраплях. Ефект Керра також спостерігали у мікросферах надвисокої добротності на рівнях вхідної потужності близько мікроватта. Також були продемонстровані ефективні твердотільні Раманівські лазерні джерела з використанням волоконно-з'єднаних мікросфер з надвисокою добротністю, які показали рекордно низькі порогові потужності накачування на рівні 65 мВт. Джерела випромінювання, засновані на ефекті Раманівського розсіювання, можуть бути використані для розширення діапазону довжин хвиль звичайних лазерів у важкодоступні смуги. [2]

1.1.2 Режим утворення солітонів у мікрорезонаторах

Оптичні мікрорезонатори є середовищем у якому можна проспотерігати ефект Керра під дією лазерного випромінювання з накачуванням безперервної дії (CW) як універсальної платформи для нелінійної оптики. У мікрорезонаторах відбувається параметричне перетворення частоти, стимульоване Бріллюенівське та Раманівське розсіювання. Зокрема, значну увагу завдяки своєму високому технологічному потенціалу привернули частотні гребінки на основі мікрорезонаторів з десятками гігагерцевих модових інтервалів від видимої до середньої інфрачервоної довжин хвиль та

в інтервалах довжин хвиль, які дають можливість самореференції. Вже зараз такі частотні гребінки знайшли застосування в когерентній оптичній передачі даних, генерації електронних сигналів із малим рівнем шуму та інших задачах оптичного зв'язку. Особливе значення має генерація часових дисипативних Керрівських солітонів (DKS), – ультракоротких імпульсів світла, які поширюються необмежено і без зміни форми всередині мікрорезонатора. Такі DKS забезпечують надійний спосіб досягнення гладких спектральних огинаючих та низькошумних частотних гребінок. [6]

Завдяки цим властивостям такі солітонові частотні гребінки можуть створювати, наприклад, основу для оптичних систем передачі даних зі швидкостями 50 Тбіт/с і більше. Важливими умовами для існування DKS є оптична нелінійність і аномальна дисперсія групової швидкості матеріалу, які, врівноважуючи один одного, стають причиною підтримання енергії для розповсюдження солітонів. Крім того, неминучі втрати в резонаторі компенсуються неперервним лазером або «утримуючим променем», який за допомогою нелінійного параметричного підсилення Керра постійно забезпечує енергію солітонів. Тимчасовий DKS, який є проявом складної, але стабільної взаємодії між дисперсією, нелінійністю, параметричним посиленням і втратами, спостерігався лише нещодавно (до їх спостереження в мікрорезонаторі) у довгих волоконно-кільцевих резонаторах. Волоконно-кільцевий резонатор накачується оптичною потужністю від CW, а для збудження DKS використовувалися окремі пікосекундні імпульси.

Насправді, генерація DKS в мікрорезонаторах на сьогоднішній день залишається складним завданням. По-перше, для досягнення стабільної роботи, солітону необхідний точний і швидкий контроль. По-друге, через спонтанне утворення ДКС із неконтрольованого солітонового середовища, кількість, а також відносне розділення в часі між ДКС є випадковими і не можуть бути детерміновано керованими. Хоча на сьогоднішній день утворення та підтримання існування солітонів у мікрорезонаторах, як

правило, покладається на лазер, що здійснює неперервне накачування потужності до резонатора, було показано, що фазова та амплітудна модуляція CW лазера може подолати деякі проблеми, пов'язані з утворенням DKS. Ці підходи схожі на експериментальні демонстрації, де біхроматичне керування або параметричний вибір використовувалися для контролю динаміки чотирихвильового змішування у режимі нормальної дисперсії за допомогою модуляції інтенсивності CW-лазера.

Однак у всіх випадках енергія накачування від CW лазера залишається невід'ємним драйвером для роботи такої системи. Така робота CW лазера на відміну від нерезонансних схем у нелінійній оптиці, де, наприклад, у генерації суперконтинууму, щоб отримати вигоду від нелінійно-оптичних ефектів, використовуються ультракороткі імпульси високої пікової потужності (підвищення пікової потужності відповідає робочому циклу зворотного імпульсу). Резонансно посилене імпульсне керування мікрорезонатором для нелінійної оптики і, зокрема, генерація ДКС не тільки відповідає новій схемі генерації резонансного суперконтинууму, але також може забезпечити безпрецедентно ефективне генерування ультракоротких солітонних імпульсів і частотної гребінки на основі мікрорезонатора.

У конфігурації з імпульсним підтриманням роботи системи, періодична послідовність керуючих імпульсів повинна була б замінити систему накачування CW, щоб всередині резонатора резонансно посилений імпульс поширювався разом із солітонним імпульсом (рис.1a,b). Однак, виходячи з сучасного розуміння, це вимагатиме точного налаштування частоти повторення керуючого імпульсу, щоб уникнути розходження керуючого імпульсу та солітону. Беручи до уваги тривалість керуючого імпульсу 1 пс і частоту повторення керуючого імпульсу 10 ГГц, можна очікувати, що солітон і керуючий імпульс будуть дрейфувати один від одного (що призведе до анігіляції солітону) протягом менш ніж 10 мс, якщо повторення керуючого імпульсу частота відрізняється лише на 1 Гц від природної

частоти повторення імпульсів солітону (визначається вільним спектральним діапазоном (FSR) мікрорезонатора). Стабілізація FSR мікрорезонатора до рівня 1 Гц, серед інших аспектів, передбачала б стабільність температури краще ніж 10 мкК, незважаючи на ефект порівняно сильного нагріву, індукованого лазером. Отже, стабільне генерування DKS залишається надзвичайно складним завданням і здійснюється лише експериментально.

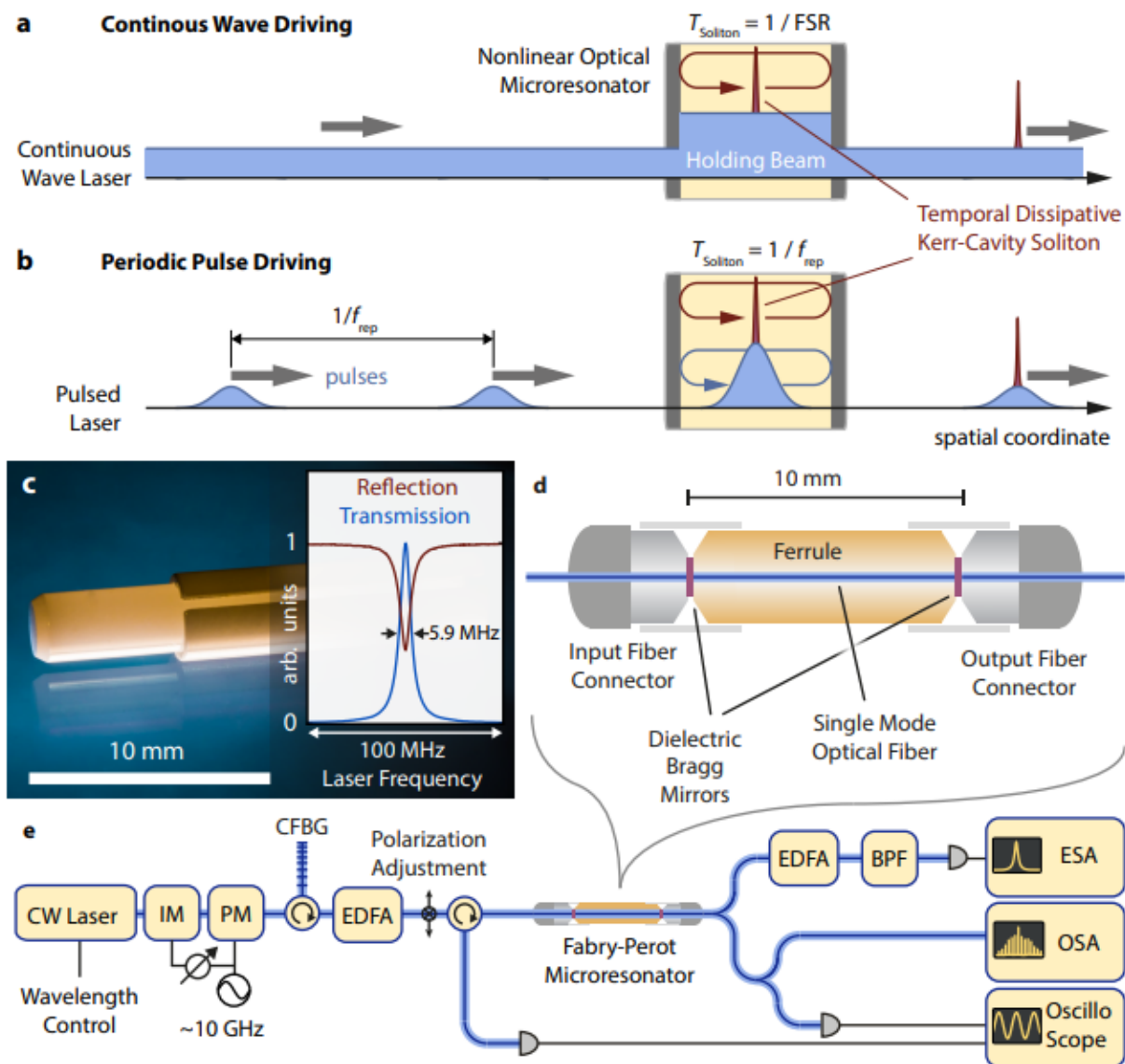


Рисунок 1.5 - Схеми для утворення солітонів [6]

На рисунку 1.5 (а) У мікрорезонаторі під дією безперервного оптичного випромінювання (CW) може утворюватися тимчасовий дисипативний

солітон (b) Імпульсний режим утворення солітонів у мікрорезонаторі: періодичні імпульси можуть резонансно накопичуватися в резонаторі, коли їх відповідні оптичні режими збігаються з резонансними частотами резонатора. Стабільні солітони можуть утворюватися лише в тому випадку, якщо частота повторення інверсного керуючого імпульсу $1/f_{\text{пов}}$ і час обертання солітону точно збігаються. (c) Фотографія мікрорезонатора Фабрі-Перо на основі волокна. На вставці показано виміряні характеристики передавання на резонансній частоті. (d) Схема мікрорезонатора та його інтеграція в установку. (e) Експериментальна установка, що містить піко-секундний генератор періодичних лазерних імпульсів на основі електрооптичних модуляторів інтенсивності та фази (ІМ/РМ), керованих генератором сигналів 10 ГГц. Для компенсації та формування імпульсів використовується чірпована волоконна решітка Брегга (CFBG). EDFA: волоконний підсилювач, легований ербієм, BPF: смуговий фільтр, ESA: електронний аналізатор спектру, OSA: оптичний аналізатор спектру.

1.2 Смугові фільтри в оптичних комунікаціях

Оптичні резонатори з WGM мають високий ступінь налаштовуваності і вузькі резонансні смуги пропускання, а також досягають надзвичайної інтенсивності оптичного поля, що спровокувало їх широке використання в телекомунікаціях як Add-Drop, смугових та вибіркового фільтрів для лазерів. З тих пір вони перетворилися на важливий інструмент для дослідження нелінійно-оптичних явищ і квантових електродинамічних принципів. Проте найважливіше застосування, яке розглядається у цій роботі – для побудови оптичних розгалуджувачів і мультиплексорів для систем зв'язку з оптичним мультиплексуванням за довжинами хвиль. Типова структура Add-Drop фільтра представлена на рисунку 1.6:

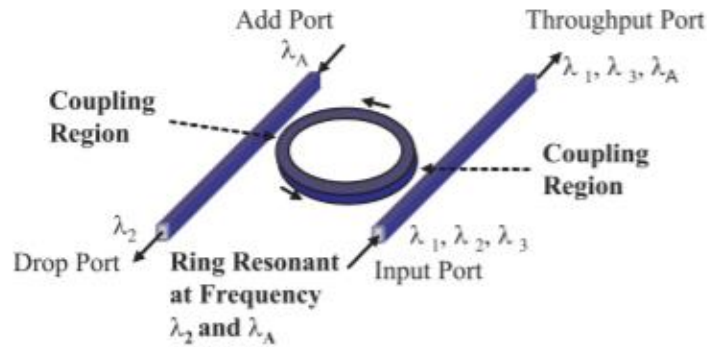


Рисунок 1.6 - Приклад використання кільцевого резонатора як фільтра [9]

Елементарна структура такого пристрою – це одне мікротільце, пов’язане з двома одномодовими хвилеводами (рис. 1.6). Саме у такій конфігурації система може виконувати функції розгалудження та працювати у режимі Add-Drop фільтра. При цьому особливістю цієї структури є її висока селективність: за допомогою конкретного резонатора можна видаляти або додавати конкретні канали у WDM систему. Можливості щодо високощільної інтеграції таких пристроїв на єдиному чіпі складають високий інтерес, з огляду на їхню величезну доротність та можливість побудови оптичних мультиплексорів/демультиплексорів.

Передавання енергії, для підсилення або розгалудження, до кільцевого резонатора відбувається шляхом зв’язку кільця із оптичним волокном, за рахунок електромагнітного зв’язку. Таким чином у кільце передається оптична хвилеводна мода, яка циркулює по кільцю. При резонансі у фільтрі встановлюється режим, у якому певні хвилі інтерферують та оптична потужність збільшується. Умова резонансної роботи фільтру:

$$n_{\text{ef}}L/\lambda = m\pi, \quad (1.1)$$

де $n_{\text{еф}}$ — ефективний показник заломлення, L — довжина шляху моди по коловій траєкторії, m — цілі числа.

Резонансні частоти для резонатора, виходячи з (1.1):

$$\lambda_{\text{рез}} = \frac{n_{\text{еф}} 2R}{m} \quad (1.2)$$

При передаванні оптичного випромінювання, яке відповідає умовам резонансу, до кільця потрапляє максимум потужності (рис. 1.7, б). Суть роботи Add-Drop фільтру заключається в тому, що для розгалудження сигналів потрібен зв'язок резонатора з другим хвилеводом, що у результаті дає можливість передавати оптичну енергію на порт виходу (рис. 1.7, а).

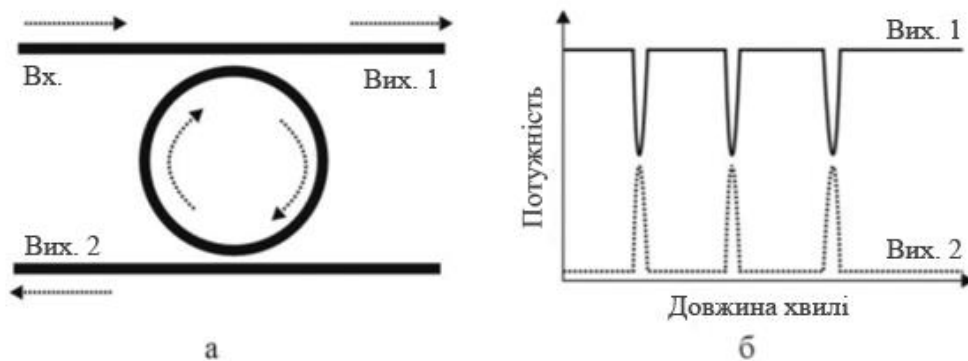


Рисунок 1.7 - а — напрямки передавання енергії у мікротріцевому фільтрі, б — узагальнена спектральна характеристика Add-Drop систем [4]

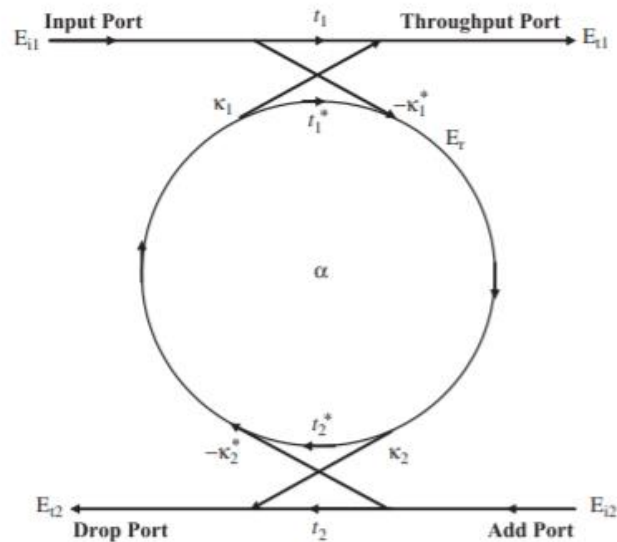


Рисунок 1.8 - Найпростіша модель Add-Drop фільтру [9]

При роботі фільтру на частоті резонансу вихідна потужність з Drop порта:

$$P_{t2-Resonance} = |E_{t2-Resonance}|^2 = \frac{(1 - |t_1|^2) \cdot (1 - |t_2|^2) \cdot \alpha}{(1 - \alpha |t_1 t_2|)^2}, \quad (1.3)$$

де $\alpha = \left| \frac{t_1}{t_2} \right|$.

Основним викликом для виготовлення цих пристроїв є забезпечення контролю та відтворюваності зв'язку хвилевода до резонатора та розмірів резонатора. Одним із підходів до отримання кращого контролю зчеплення є використання так званих вертикальних сполучних структур (області зчеплення, які визначаються насамперед товщиною шару на відміну від літографії).

Інший виклик для виробництва стосується спектральної форми та амплітудно-частотних характеристик фільтра цих пристроїв. Функції спектральної відповіді з похилими характеристиками АЧХ, кращими ніж це можливо за допомогою простої реакції фільтра Лоренца (однополюсного), необхідні для конкатенації компонентів у мережах. Запропоновано

конструкції таких багатополюсних фільтрів на основі з'єднаних резонаторів та продемонстровано пристрої, які задовольняють вказаним вимогам. Для компенсації викликаних виробництвом відхилень у критичних розмірах резонатора може знадобитися активне регулювання частоти або ультрафіолетова обрізка показника заломлення пристрою.

1.3 Фільтри високого порядку

Каскадні резонатори у вигляді пов'язаних оптичних хвилевідних резонаторів широко використовуються в якості оптичних і фотонних фільтрів. Мікрорезонатори з МШГ відкривають нові можливості для створення багатополюсних фільтрів, оскільки мають малий розмір, низькі втрати і хорошу можливість інтеграції з оптичними мережами зв'язку. [5]

Раніше уже були продемонстровані компактні і надійні багатополюсні фільтри, засновані на каскадних інтегрованих кільцевих мікрорезонаторах з плавленого кварцу. Такі фільтри мають смугу пропускання 10-100 ГГц і відповідну оптичну добротність порядку 10^4 - 10^5 . Ці фільтри виробляються комерційно, мають пласку вершину і різкі спади смуги пропускання і можуть бути використані для високопродуктивних застосувань, особливо в системах оптичного мультиплексування зі спектральним розділенням каналів. Оптичні фільтри другого порядку з мегагерцовою смугою пропускання були реалізовані на основі двох пов'язаних високодобротних ($Q \approx 10^8$) сферичних мікрорезонаторів, один з яких, виготовлений з германатного скла, був перебудовуваним. [10]

У лабораторії стандартів частоти JPL був продемонстрований трьохрезонаторний фільтр на резонаторах із ніобату літію. Цей фільтр має ряд властивостей, які вирізняють їх на фоні інших подібних фільтрів на МШГ:

- 1) великий діапазон робочих станів із можливістю швидкого переналаштування та передавальною характеристикою високого порядку;
- 2) вузьку смугу (20 МГц);
- 3) малі втрати на з'єднанні з волокна в волокно.

Поєднання цих трьох характеристик робить цей фільтр надзвичайно корисним для широкого діапазону застосувань в оптиці. Оскільки мікрохвильові сигнали в фотонних системах проявляються як бічні смуги оптичної несучої, такі фільтри можуть бути використані на будь-якій мікрохвильовій частоті, гарантуючи однакові характеристики у всьому діапазоні від 1 до 100 ГГц і навіть вище.

Багаторезонаторні каскадні фільтри мають значно більш розріджений спектр в порівнянні з окремо взятими РШГ. Це властивість каскадів резонаторів обумовлено так званим ефектом Верньєра. Для появи сильного резонансу необхідною умовою є накладення резонансів у всіх резонаторах каскаду. Цей же ефект проріджування спектра спостерігався і в пов'язаних кільцевих волоконних резонаторах. Ефективна різкість подібних багаторезонаторних систем, що визначається як відношення частотного інтервалу між смугами пропускання фільтра (область вільної дисперсії - ОВД) до ширини смуги пропускання виявляється дуже великою. [5]

Одна з декількох переваг пов'язаних кільцевих резонаторів в якості фільтрів є можливість збільшення коефіцієнта перебудови з множником M , визначеним відношенням:

$$M = \frac{1}{1 - a_2/a_1}, \quad (1.4)$$

де a_1 і a_2 - радіуси двох резонаторів. Діапазон перебудови фільтра на основі двох пов'язаних кільцевих або МШГ резонаторів в M разів більше, ніж у одного резонатора. Оскільки значення M може бути дуже велике для двох резонаторів близького розміру, для перебудови можна використовувати тільки швидкий, але набагато слабший електрооптичний ефект. Важливо

відзначити, що вираз для коефіцієнта M залишається справедливим лише до тих пір, поки значення M виходить менше тонкості \mathcal{F} резонаторів.

Кожен кільцевий резонатор з МШГ має свій набір власних частот, який утворює спектр пропускання фундаментальних мод з частотними відстанями, що визначаються областю вільної дисперсії $\Delta f_{\text{овд}}$. Якщо два кільця мають трохи відмінні радіуси (або ефективні показники заломлення), тоді два набори смуг пропускання в гребінках спектрів мають невелику різницю у відстанях між сусідніми піками. Перебудова частоти досягається підстроюванням частоти піків в двох гребінках при зміні показника заломлення в одному або в обох кільцевих резонаторах. Пропускання фільтра при цьому дискретним чином стрибкоподібно перебудовується від частоти f_0 до частоти $f_0 + \Delta f_{\text{осд}}$; при цьому напруга для такої перебудови в M разів менше, ніж треба було б, щоб перебудувати частоту одного резонатора безперервним чином на $\Delta f_{\text{осд}}$.

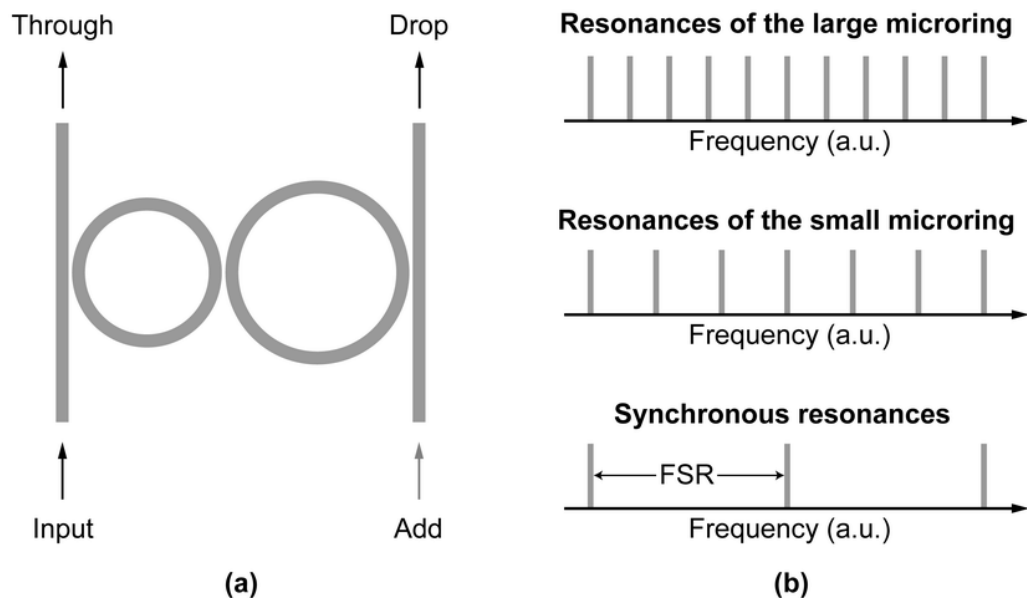


Рисунок 1.9 - Схема мікротілогового фільтра другого порядку, що використовує ефект Верньє. (b) Ілюстрація ефекту Верньє. Потужність буде падати лише на частотах, де обидва мікротілогця є резонансними (синхронні резонанси). [11]

У дворезонаторному фільтрі на довжині хвилі близько 1,55 мкм було продемонстровано збільшення перебудови в $M = 40$ разів. Коефіцієнт перебудови для термооптичних пристрою склав 120 ГГц/мВт, а для електрооптичних – 120 ГГц/12В. На основі такого фільтра і ербієвого волоконного підсилювача був розроблений перебудовуваний одночастотний лазер з придушенням неосновних мод на рівні, більшому 30 дБ. Теплова перебудова такого лазера складала понад 35 нм.

У загальному випадку перебудовувані фільтри на основі резонаторів з МШГ дозволяють перебудовувати спектр резонаторів, але не дозволяють змінювати смугу пропускання. Раніше було запропоновано використовувати каскадних резонаторів для формування в реальному часі і смуги пропускання. Ключовою рисою цього підходу є можливість простої до зміни частоти і ширини пропускнуго вікна фільтра, що призводить до зміни групової затримки оптичного сигналу, властивості, надзвичайно затребуваної для систем обробки сигналів в реальному часі.

Ширина спектрального вікна фільтра (смуги пропускання) може бути напорчуд вузькою. Теоретично, якщо резонатори не мають власних втрат, ця ширина може бути як завгодно малою. Однак, насправді, мінімальна ширина резонансу визначається втратами в матеріалі резонаторів і поверхневими втратами. [5]

1.4 Ланцюг зв'язаних резонаторів

Хвилевідний ланцюг зв'язаних резонаторів – це тип хвилеводів, в якому світло поширюється за рахунок зв'язку між сусідніми резонаторами. Такі хвилеводи, звані оптичними хвилеводами зв'язаних резонаторів (CROWs), пропонують покращений контроль над їхніми дисперсійними характеристиками (порівняно зі звичайним хвилеводом) і потенційно можуть

знайти застосування у напрямках затримки, збереження та буферизації оптичних імпульсів. [12]

CROW можна реалізувати з різними типами резонаторів, такими як резонатори Фабрі-Перо, фотонні кристали та кільцеві резонатори. Загальні характеристики (дисперсійне відношення, зонна структура тощо) дуже схожі і визначаються насамперед вільним спектральним діапазоном (FSR), коефіцієнтом добротності (Q) кожного резонатора та зв'язком між сусідніми резонаторами.

На додаток до різних типів резонаторів, хвилеводи з об'єднаними резонаторами (CCW) можуть використовувати альтернативні конфігурації зв'язку, такі як одинарні, подвійні та зв'язані по боковій стінці інтегровані послідовності оптичних резонаторів (SCISSOR). Різні схеми зв'язку характеризуються різним зворотним зв'язком конфігурації, а отже, демонструють різні спектральні характеристики та дисперсійні криві. Залежно від використовуваного типу резонатора, не всі конфігурації з'єднання можуть бути легко реалізовані. Фотонні кристалічні структури вносять у систему властивий розподілений зворотний зв'язок, і тому непридатні для реалізації багатопрхідних CCW, таких як односторонній та кручений SCISSOR.

Тож стає зрозумілим, необхідність використання для CROW кільцевих резонаторів. Одномодові мікротільця з високим $Q > 10^6$, які можливо реалізувати планарними способами виготовляються багатьма дослідницькими групами, а також кількома комерційними компаніями. Реалізація мікротільця проста, вимагає одного етапу виготовлення і не вимагає надвисоких роздільних здатностей. [12]

CROW у загальному випадку можна розглядати як ланцюг прямозв'язаних кільцевих резонаторів, як показано на рис. 1.10 та рис. 1.11. Крайній лівий і правий резонатори з'єднані з лінійними хвилеводами, які служать портами вводу-виводу.

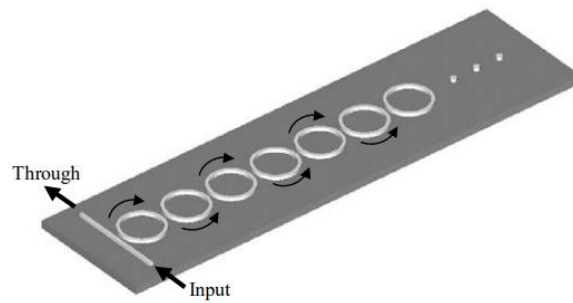


Рисунок 1.10 - Приклад нескінченного ланцюга зв'язаних резонаторів [12]

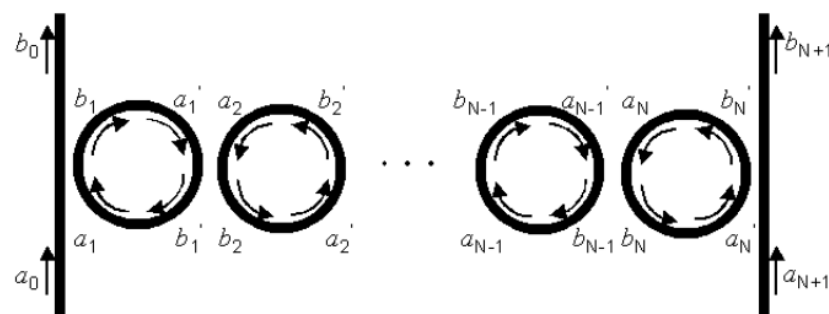


Рисунок 1.11 - Біжуча хвиля в хвилеводі з ланцюгом зв'язаних резонаторів [12]

Хоча спектральні властивості скінченного ланцюга резонаторів відрізняються від властивостей нескінченного ланцюга, для великої кількості резонаторів проєктований та реалізований пристрій може бути апроксимований нескінченною послідовністю.

На рисунку 1.12 зображено порівняння між дисперсійним відношенням нескінченної CROW і скінченного пристрою, що складається з 20 резонаторів з коефіцієнтом зв'язку $|k|^2 = 0,5$, $R = 20$ мкм та $n = 1,5$.

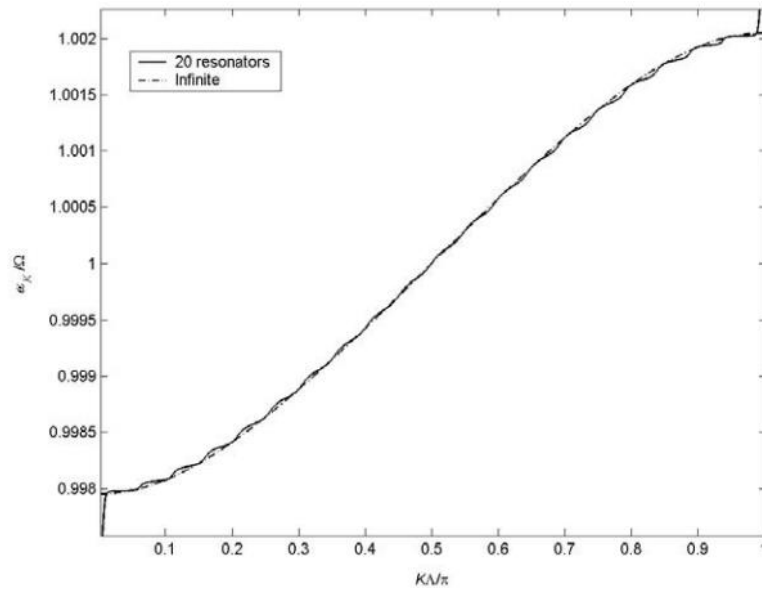


Рисунок 1.12 - Точні співвідношення дисперсії для 20 резонаторів (суцільний графік) і нескінченного (штрихова лінія) CROW [12]

Невеликі нерівномірності у передавальній функції скінченної CROW впливають з резонансів структури. Зі збільшенням числа резонаторів ці резонанси будуть нескінченно близькими, а хвилі згладжуватимуться.

CROW можна аналізувати за допомогою різних методів, таких як метод жорсткої зв'язки, матриці передачі та аналіз у часовій області. Серед цих схем метод матриці перенесення є найбільш інтуїтивно зрозумілим і гнучким, оскільки він дозволяє аналізувати кінцеві структури з втратами та дисперсійні структури з сильними коефіцієнтами зв'язку, які не обов'язково ідентичні для всіх резонаторів. Втрати можна включити, просто додавши уявний доданок до коефіцієнта поширення β . Для скінченних структур можна вивести матрицю переносу, що з'єднує амплітуди хвиль у хвилеводах вводу-виводу, з'єднаних з CROW:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}_{N+1} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}_0 \quad (1.5)$$

Враховуючи вхідні дані CROW, a_0 та a_{N+1} , виходи b_0 та b_{N+1} можна легко оцінити з (1.5). Для одного входу (наприклад, $a_{N+1} = 0$) функції передачі через порт пропускання (b_0) та видалення (b_{N+1}) задаються:

$$\frac{b_0}{a_0} = -\frac{A}{B} \quad (1.6)$$

$$\frac{b_{N+1}}{a_0} = C - \frac{AD}{B} \quad (1.7)$$

Для кінцевої структури хвильовий вектор виводиться із середнього фазового зсуву між сусідніми резонаторами, заданого співвідношенням між фазовою характеристикою пристрою та кількістю резонаторів. Між дисперсійними відношеннями існує відмінне узгодження, за винятком частот, близьких до краю смуги передавання. Це відхилення впливає з того факту, що поділ між смугою пропускання і зазором чітко визначено лише для нескінченно довгої структури. Для кінцевої структури між ними існує плавний перехід, що проявляється у відхиленні між дисперсійними кривими в перехідній області. [12]

1.5 Проблеми при проєктуванні селективного обладнання

У попередній частині роботи було розглянуто найважливіші області застосування оптичних мікрорезонаторів і виділено кілька конструкцій мікрорезонаторів для кожної (див. Таблицю 1.1). У квантово-оптичних системах можливі значні додаткові переваги з постійним вдосконаленням технологій мікрівиробництва та впровадженням нових конструкцій з низькими втратами. Тригеровані, одиночні фотонні джерела отримають вигоду від поліпшення зв'язку волокон, і мініатюризація до субмікрометрової шкали резонансних QED-пристроїв (з використанням сильних або слабких зв'язків) є можливою. Крім того, поява нових геометрій

на основі пластин ультрависокої добротності Q має забезпечити платформу для досліджень сильного зв'язку, які поєднують як функції комплексного пристрою на єдиному чіпі, так і ефективне зчеплення з оптичними волокнами. Технологічні застосування, такі як пристрій динамічного додавання/відкидання, забезпечать кращий контроль та відтворення характеристик фільтра у все більш складних конструкціях.

Ще одна галузь, яка заслуговує особливої уваги, - це біологічне та хімічне зондування. Станом на сьогодні уже були розроблені оптичні датчики, які використовують зв'язок з витікаючим полем; однак, високоякісні оптичні мікрорезонатори, як датчик-датчик, мають потенціал щоб значно підвищити чутливість детектування. Нещодавно були продемонстровані датчики з перетворювачами на основі мікрорезонаторів з коливанням шепочучої галереї. Здається ймовірним, що це стане важливою областю застосування для цих пристроїв. Подібним чином, широкий технологічний вплив резонансних пристроїв на акустичні, радіо та мікрохвильові частоти свідчить про те, що багато інших застосувань для цих пристроїв з'являться в оптичній області.

Нарешті можна перерахувати основні завдання, які слід було б вирішити, щоб перетворити високодобротні відкриті діелектричні резонатори з наукових розробок і макетів в доступні на ринку готові пристрої.

По-перше, слід розробити ефективну і надійну технологію забезпечення зв'язку з резонаторами. Існуючі елементи зв'язку, хоча і є дуже ефективними в реалізації в експериментальних умовах, але дуже ніжні і чутливі до зовнішніх впливів.

По-друге, для високодобротних резонаторів повинні бути розроблені вакуумуючі контейнери. Кристалічні діелектричні резонатори набагато більш стійкі до впливу навколишнього середовища в порівнянні з мікросферами з плавленого кварцу, але пил з повітря рано чи пізно все одно погіршує добротність вказаних пристроїв.

По-третє, має бути розроблена технологія масового виробництва високодобротних резонаторів потрібної форми і з'єднана з технологією виготовлення елементів зв'язку.

Пошук рішень цих проблеми відбувається в активному режимі, проте їх остаточне рішення поки не знайдено. [5]

1.6 Формулювання мети та завдань дослідження

Метою дисертації є аналіз та дослідження можливих способів збільшення пропускної здатності систем електронних комунікацій шляхом використання нових селективних елементів з кращими умовами розгалудження оптичних сигналів зв'язку за допомогою систем зв'язаних між собою оптичних мікрорезонаторів.

Завданнями дослідження є розробка покращених математичних методів дослідження фільтрів, виконаних із застосуванням мікрокільцевих резонаторів; а також аналіз, дослідження та пропонування сфер для застосування зв'язаних мікрорезонаторів з покращеними характеристиками розсіювання.

Для побудови математичної моделі фільтрів буде застосовано приблизне вирішення задачі розсіювання, застосовуючи теорію збуджень. Застосування цих теоретичних засад дозволить знайти рішення задачі розрахунку S -матриці фільтрів у аналітичному вигляді. Для цього будуть розраховані параметри фільтрового каскаду та проведено моделювання системи в програмному забезпеченні MathCad.

1.7 Висновки з розділу 1

У першому розділі було визначено актуальність дослідження оптичних мікрорезонаторів. Проведено аналіз сучасних публікацій у наукових джерел

та монографій на тему застосування оптичних мікрорезонаторів для систем зв'язку у тому числі: для підсилення, розгалуження, мультиплексування та демультиплексування оптичних сигналів.

Визначено високу актуальність застосування оптичних фільтрів на основі мікрокільцевих резонаторів у системах зв'язку. В ході дослідження порівняно різні типи резонаторних структур, на основі яких, можлива побудова фільтрів: Фабрі-Перо, фотонні кристали та кільцеві резонатори. Мікрокільцеві резонатори наразі мають найкращі досягнені показники добротності серед існуючих конструктивів для побудови оптичних фільтрів. Проте в ході дослідження виявлено основні проблеми та недоліки при проєктуванні оптичного селективного обладнання.

У наступних розділах роботи буде розглянуто способи розрахунку параметрів та моделювання селективних елементів систем зв'язку. А також буде запропоновано новий метод моделювання Add-Drop фільтрів, заснований на вирішенні задачі розсіювання.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ADD-DROP ФІЛЬТРІВ

Перш ніж детально розглянути особливості кремнієвих мікрокільцевих резонаторів важливо здійснити огляд загальних властивостей кільцевих резонаторів. Це допоможе краще зрозуміти унікальні можливості, а також обмеження кремнієвих мікрокільцевих. Загалом, кільцевий резонатор складається з петлевого оптичного хвилеводу та механізму зв'язку для доступу до петлі. Коли хвилі в петлі створюють зворотний фазовий зсув, що дорівнює цілому числу, помноженому на 2π , хвилі інтерферують, і резонатор знаходиться в резонансі.

Далі буде проаналізовано та наведено усі важливі поняття та співвідношення, необхідні для опису та аналізу функціональної поведінки кільцевих резонаторів.

2.1 Способи розрахунку параметрів та моделювання селективних елементів систем зв'язку

У своїй найпростішій формі кільцевий резонатор можна сконструювати шляхом подачі одного виходу спрямованого відгалужувача назад на його вхід, так званого повнопрохідного (APF) або режекторного фільтра. Термін кільцевий резонатор зазвичай використовується для позначення будь-якого резонатора з петлею, але у вузькому значенні це кругове кільце. Коли форма витягнута з прямим перерізом вздовж одного напрямку (як правило, вздовж ділянки зчеплення), також використовується термін резонатор іподрому.

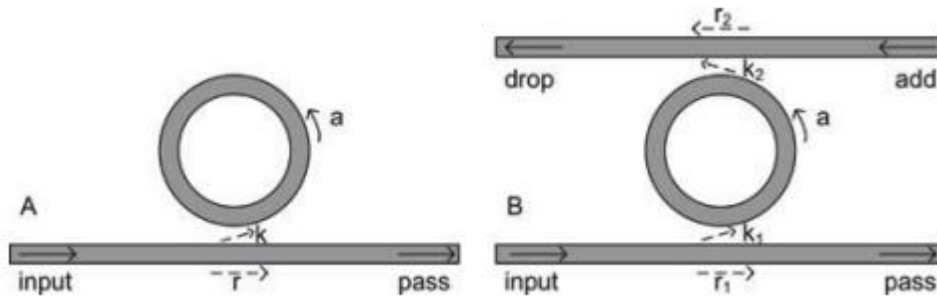


Рисунок 2.1 - Повнопрохідний (а) та Add-Drop (b) фільтри [13]

Основні спектральні властивості кільцевого резонатора можна легко отримати, припустивши дію безперервної хвилі та узгодження полів. Виходячи з припущення, що відображення назад у шинний хвилевод є незначними ми можемо записати відношення переданого та падаючого поля в шинному хвилеводі як:

$$\frac{E_{pass}}{E_{input}} = e^{i(\pi+\phi)} \frac{a-re^{-i\phi}}{1-rae^{-i\phi}}, \quad (2.1)$$

де $\phi=\beta L$ — однопрохідний фазовий зсув, L — довжина руху в обидві сторони, β — константа поширення циркулюючої моди, a – індекс передачі амплітуди за один прохід, включаючи втрати при поширенні в кільці і втрати в розгалужувачах. Індекс a співвідноситься з коефіцієнтом ослаблення потужності α [1/см] як $a^2=\exp(-\alpha L)$. Зводячи рівняння (2.1) у квадрат, ми отримуємо показник передачі інтенсивності T_n (ми використовуємо індекс n режекторного фільтра, щоб не плутати з пропускнуою передачею T_p від Add-Drop фільтра).

$$T_n = \frac{I_{pass}}{I_{input}} = \frac{a^2-2racos\phi+r^2}{1-2racos\phi+(ra)^2}, \quad (2.2)$$

де r – коефіцієнт самозв'язку. Аналогічно, ми можемо визначити k як коефіцієнти перехресного зв'язку, і тому r^2 і k^2 – це коефіцієнти розщеплення потужності розгалужувача, і передбачається, що вони

задовольняють умові $r^2 + k^2 = 1$, що означає, що в секції зв'язку немає втрат. Це припущення може призвести до невеликої помилки на рівнях потужності передачі. Ширина резонансу залишається правильною, поки втрати, введені розгалужувачами, включаються в коефіцієнт втрат резонатора a .

Кільце знаходиться в резонансі, коли фаза ϕ кратна 2π , або коли довжина хвилі світла вміщається цілу кількість проходів всередині оптичної довжини кільця:

$$\lambda = n_{e\phi} L / m, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (2.3)$$

Для ідеальних резонаторів з нульовим загасанням, $a \approx 1$, передача дорівнює одиниці для всіх значень розстроювання ϕ . При критичному зв'язку, коли введена у резонатор потужність дорівнює втратам потужності в кільці тоді задовольняється умова $1 - a^2 = k^2$ або $r = a$, передача при резонансі падає до нуля. Фазовий аргумент передачі поля періодично змінюється з частотою. Повнопрохідні резонатори затримують вхідні сигнали через тимчасове зберігання оптичної енергії в резонаторі.

З рівняння (2.1) можливо обчислити робочий фазовий зсув φ , індукований кільцевим резонатором:

$$\varphi = \pi + \phi + \arctan \frac{r \sin \phi}{a - r \cos \phi} + \arctan \frac{r \sin \phi}{1 - r \cos \phi} \quad (2.4)$$

Побудована фазова характеристика кільця без внутрішніх втрат ($a=1$) на рис. 2.2 а для різних значень коефіцієнта самозв'язку r . Для сильного самозв'язку (хороші резонанси) фазова характеристика стає дуже крутою поблизу резонансу. Таким чином, кільцевий резонатор може додати значний зсув фази, що залежить від довжини хвилі, який, можна використовувати для уповільнення світла в оптичному буфері. На рис. 2.2 б зображено фазову характеристику для різних значень a (внутрішні втрати кільця) і фіксованого $r=0,85$. Для $r=a$ (критичного зв'язку) передача відувається із різким зсувом

фази на π на резонансній довжині хвилі. Однак для $r < a$ (перезв'язок) передача відчуває безперервну затримку, тоді як для $r > a$ (недозв'язок) фазовий зсув поблизу резонансу демонструє сильне зменшення, яке зображено як фазовий зсув на 2π на рис. 2.2b.

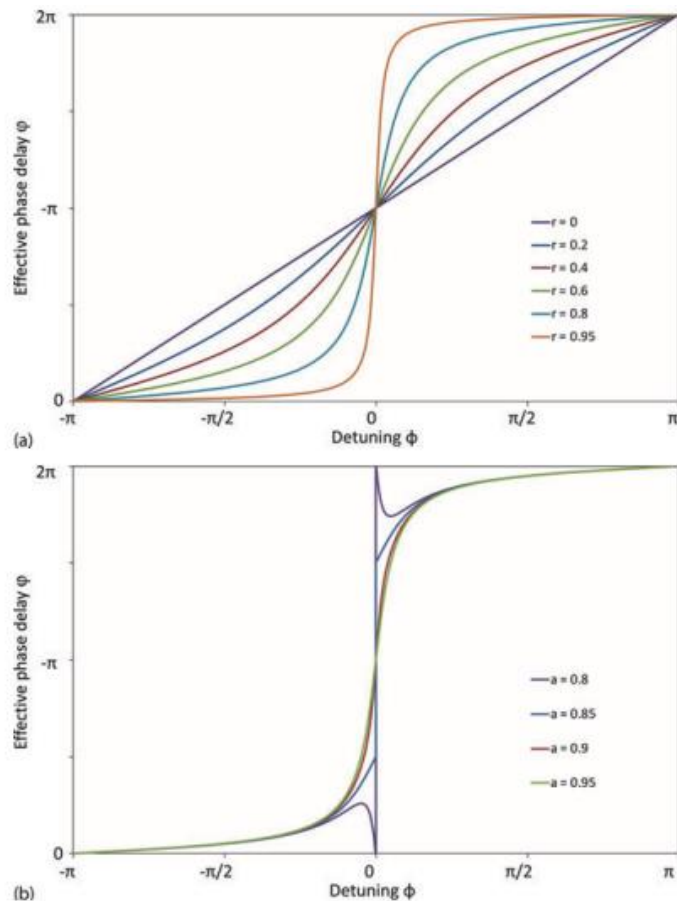


Рисунок 2.2 - Ефективна фазова затримка повнопрохідного фільтра (a) з $a=1$ і різними значеннями самозв'язку r і (b) для $r=0,85$ і різними значеннями a . При критичному зв'язку $r=a=0,85$ ми отримуємо різкий зсув фази на π . Для надмірного та недозв'язку фазовий зсув є безперервним, але в протилежному напрямку. [13]

Коли кільцевий резонатор з'єднаний з двома хвилеводами, енергія частково передається на Drop порт. Передача енергії до порту передавання та відкидання також може бути розрахована від роботи CW та збігу полів:

$$T_{thought} = \frac{I_{thought}}{I_{input}} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + r_1^2}{1 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (2.5)$$

$$T_{drop} = \frac{I_{drop}}{I_{input}} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{1 - 2r_1 r_2 a \cos\phi + (r_1 r_2 a)^2} \quad (2.6)$$

Якщо загасання незначне ($a \approx 1$), критичний зв'язок відбувається при симетричному зчепленні ($k_1 = k_2$). Для резонатора з втратами, критичне з'єднання виникає, коли втрати відповідають зв'язку $ar_2 = r_1$.

2.1.1. Спектральні характеристики оптичних фільтрів

Характеристичні параметри мікрорезонатора показані на рис. 2.3. Вони залежать від втрат і коефіцієнтів зв'язку і можуть бути отримані безпосередньо з формул для характеристик передавання (2.2) та (2.5).

З виразів (2.2) та (2.5) можна вивести повну ширину на половині максимуму (FWHM) резонансного спектру для кільцевого резонатора на всі прохідні частоти:

$$FWHM = \frac{(1 - ra)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{ra}} \quad (2.7)$$

Ця ж характеристика для Add-Drop резонатора:

$$FWHM = \frac{(1 - r_1 r_2 a)\lambda_{res}^2}{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}} \quad (2.8)$$

У межах першого порядку наближення дисперсії, діапазон довжин хвиль між двома резонансами або вільний спектральний діапазон (FSR) у функції довжини хвилі дорівнює:

$$FSR = \frac{\lambda_{res}^2}{n_g L}, \quad (2.9)$$

де L – довжина повного проходу резонатора. Сильне утримання зв'язуючих хвилеводів дозволяє робити дуже різкі вигини (радіусом до 3 мкм) із все ще низьким випромінюванням. Це значною мірою збільшує потенціал FSR кільцевих резонаторів в порівнянні зі звичайними оптичними резонаторами.

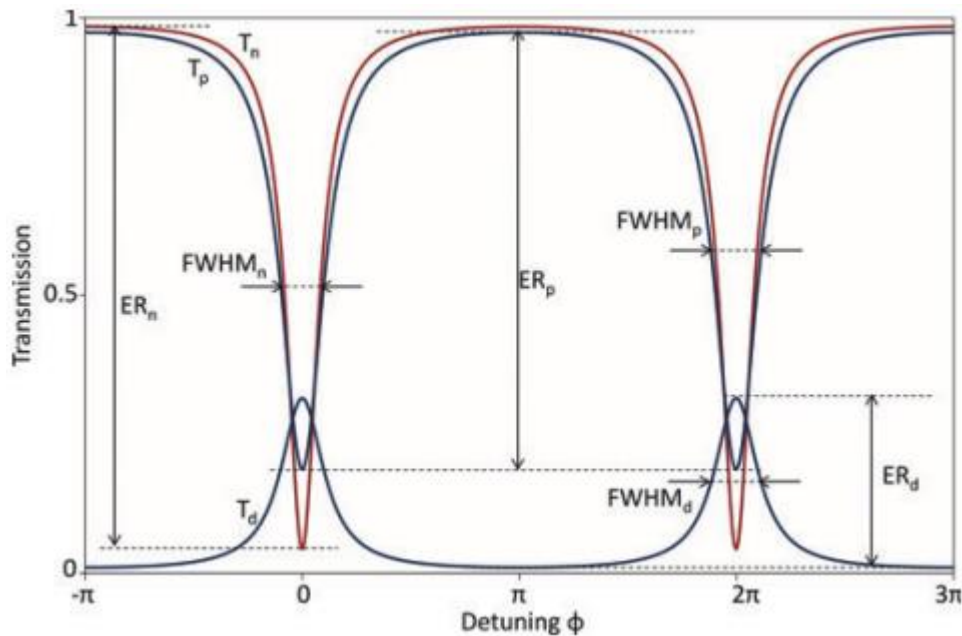


Рисунок 2.3 - Спектр пропускання повнопрохідного кільця та двох виходів Add-Drop резонатора з зазначеними важливими спектральними характеристиками $a = 0.85$, $r = r_1 = r_2 = 0.9$. Через додаткові втрати, внесені другою секцією зчеплення, Add-Drop кільця мають ширший пік. Крім того, з'єднання є далі від критичного зв'язку, що призводить до меншого коефіцієнта згасання. [13]

Важливо зазначити, що і в FWHM, і в FSR є саме груповий індекс n_g у знаменнику, а не ефективний індекс n_{eff} . Груповий індекс враховує дисперсію хвилеводу і визначається як:

$$n_g = n_{eff} - \lambda_0 \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \quad (2.10)$$

Груповий індекс і відповідна групова швидкість: $v_g = \frac{c}{n_g}$, описують швидкість, з якою рухається огинаюча імпульсу та є характеристикою дисперсійного середовища (або хвилеводу).

Коефіцієнт згасання включення-вимкнення через порт передавання резонатора дорівнює $\frac{T_t}{R_{min}}$. Для конфігурації кільця APF можна показати:

$$T_t = \frac{(r + a)^2}{(1 + ra)^2} \quad (2.11)$$

$$R_{min} = \frac{(r - a)^2}{(1 - ra)^2} \quad (2.12)$$

Для Add-Drop фільтру ми можемо визначити ті ж самі ER та $\frac{T_{max}}{T_d}$ для передачі через порт Drop. При резонансі ER між наскрізним і відкидним портом резонатора Add-Drop визначається як: $\frac{T_{max}}{R_{min}}$. T_t , R_{min} , T_{max} і T_d визначаються як:

$$T_t = \frac{(r_2 a + r_1)^2}{(1 + r_1 r_2 a)^2} \quad (2.13)$$

$$R_{min} = \frac{r_2^2 a^2 - 2r_1 r_2 a + r_1^2}{(1 - r_1 r_2 a)^2} \quad (2.14)$$

$$T_{max} = \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)a}{(1 - r_1 r_2 a)^2} \quad (2.15)$$

$$T_d = \frac{(1 - r_2^2)(1 - r_2^2)a}{(1 + r_1 r_2 a)^2} \quad (2.16)$$

Тонкість (finesse) визначається як відношення FSR та ширини резонансу:

$$\mathcal{F} = \frac{FSR}{FWHM} \quad (2.17)$$

Таким чином, тонкість можна вважати мірою різкості резонансів відносно їх інтервалу. В свою чергу така поширена змінна як коефіцієнт якості (Q-фактор) або добротність є мірою різкості резонансу щодо його центральної частоти:

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{FWHM} \quad (2.18)$$

Фізичний сенс тонкості та добротності пов'язаний з кількістю зроблених проходів енергії в резонаторі у процесі загасання під дією внутрішніх втрат резонатора та виходом на один з портів оптичного фільтра. Виявлено, що тонкість відображає кількість обертів світла в кільці в межах 2π до того, як його енергія зменшиться до $1/e$ від початкового значення. Коефіцієнт добротності являє собою кількість коливань поля до того, як циркулююча енергія буде виснажена до $1/e$ початкової енергії. Для визначення добротності мікрокільце збуджується до певного рівня і враховується швидкість загасання потужності. З цієї точки зору зрозуміло, що втрати в обидва боки, а також зв'язок у напрямних розгалажувачах є факторами втрат, які необхідно зменшити для отримання високодобротних резонансів. Таким чином, повнопропускний резонатор буде демонструвати більш високу добротність, ніж Add-Drop резонатор (коли обидва пристрої працюють близько до критичного зв'язку).

Тут є сенс означити різницю між навантаженою добротністю та ненавантаженою Q . Ненавантажена добротність резонатора є добротністю, коли резонатор не з'єднується з хвилеводами. При з'єднанні з хвилеводом в

резонатор вносяться додаткові втрати. Отже, завантажена Q завжди менша, ніж ненавантажена Q . У роботі завжди у розрахунках використовується завантажена Q , говорячи про Q -фактор, якщо спеціально не вказано інше.

2.1.2 Втрати та з'єднання оптичного резонатора

Втрати, які вносить резонатор у процесі роботи можна розділити на різні внески: втрати хвильоводного поширення та втрати в ділянці зв'язку. Втрати в ділянці зв'язку виникають від втрат на поширення, від додаткової шорсткості бічної стінки, що впливає на розподілену інтенсивність, і навіть від невідповідності ширини хвильоводу, викликаної процесом виготовлення. Втрата в обидва боки A включає в себе три втрати, які вносяться узагальнено:

$$A[dB] = A'_{prop}L + 2A_{coupl} + 4A_{bend}, \quad (2.19)$$

де A'_{prop} – втрати на одиницю довжини, зазвичай виражаються в [дБ/см], A_{coupl} та A_{bend} втрати на введення та виведення потужності до резонатора. З рівнянь (2.17) і (2.18) добротність і тонкість можна переписати як функцію фізичних параметрів кільцевого резонатора для all-pass та Add-Drop фільтрів:

$$Q_{a-p} = \frac{\pi n_g L \sqrt{ra}}{\lambda_{res}(1 - ra)} \quad (2.20)$$

$$\mathcal{F}_{a-p} = \frac{\pi \sqrt{ra}}{1 - ra} \quad (2.21)$$

$$Q_{a-d} = \frac{\pi n_g L \sqrt{r_1 r_2 a}}{\lambda_{res}(1 - r_1 r_2 a)} \quad (2.22)$$

$$\mathcal{F}_{a-d} = \frac{\pi \sqrt{r_1 r_2 a}}{1 - r_1 r_2 a} \quad (2.23)$$

Для збільшення добротності дуже важливо зменшити втрати в резонаторі. Втрати при поширенні зменшуються за рахунок високоякісного матеріалу, використаного при виготовленні, та високоякісної обробки. Втрати на вигин можна зменшити за рахунок конструкції адиабатичних вигинів, які плавно вигинаються замість кругових вигинів.

Формула для добротності припускає, що краща Q отримується для великих L і малих втрат в порожнині, але ці два члени не є незалежними, оскільки накопичені втрати при поширенні збільшуються з довжиною порожнини. На рис. 2.4 представлені залежності добротності та тонкості як функції довжини резонатора для різних втрат на поширення та для конфігурацій Add-Drop та APF. На цих графіках початковий коефіцієнт втрат через вигини (0,04 дБ) і розгалужування (0,035 дБ для APF і 0,07 для Add-Drop резонатора), заснований на реалістичних значеннях, виміряних на кремнієвих кільцевих резонаторах. Резонатори працюють при критичному зв'язку, $r = a$ в конфігурації з усіма проходами, $r_1 = r_2 a$ в конфігурації Add-Drop, r_2 встановлено на 0,99.

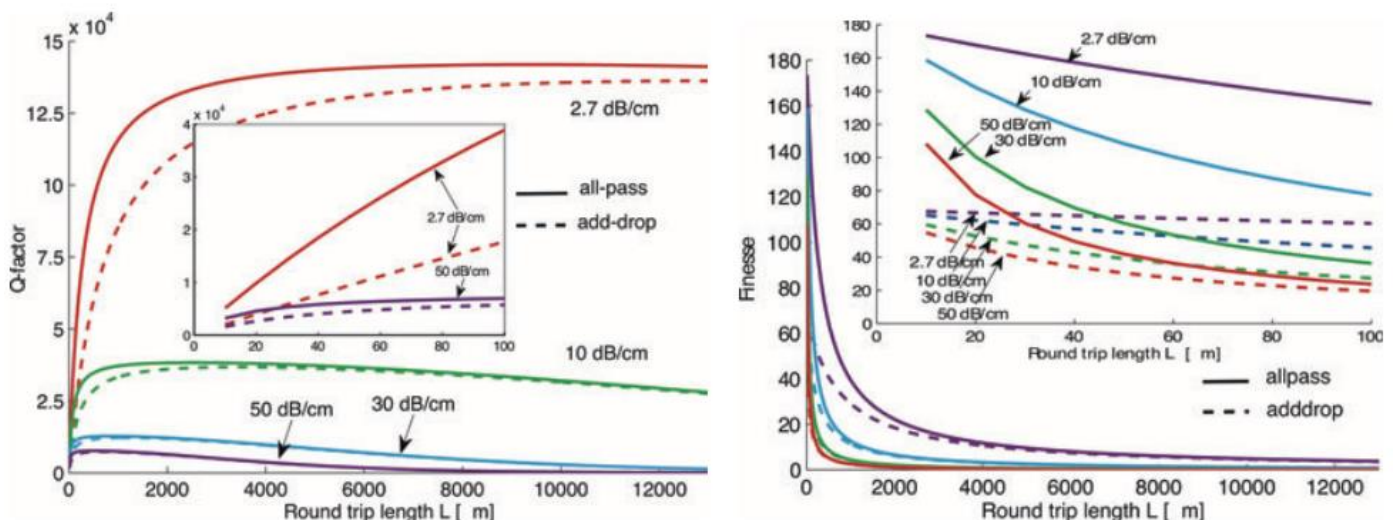


Рисунок 2.4 - а – залежність добротності від довжини резонатора для чотирьох показників втрат при поширенні, б – залежність тонкості від довжини резонатора для чотирьох показників втрат при поширенні. [13]

При втратах на поширення, встановлених на рівні 2,7 дБ/см (що відповідає втратам у хвилеводі в кремнієвому дроті з повітряною оболонкою в процесі виготовлення), найвища добротність, яку можна отримати за даних умов, становить близько $1,42 \cdot 10^5$ з APF резонатором довжиною приблизно 10 мм. Найвища добротність для Add-Drop резонатора буде $1,36 \cdot 10^5$ для майже 13 мм довжини. Однак більша довжина також приводить до меншої тонкості.

Інші способи розрахунку параметрів оптичних фільтрів наведено у таблиці 2.1. Дані вирази придатні для практичного використання та аналізу побудованих оптичних фільтрів, адже враховують такі параметри як довжина шляху моди, збережена та розсіяна енергія поля резонатора, втрати потужності на один прохід по резонатору та час перебування імпульсу в резонаторі.

Таблиця 2.1 – Основні параметри мікрорезонаторів і методи їх розрахунку

Параметр	Формула	Зміст складових формули
1	2	3
Вільний спектральний діапазон	$FSR = \Delta\lambda = \lambda_{m+1} - \lambda_m$	λ_{m+1}, λ_m — послідовні резонанси резонатора
Умова резонансу	$\Omega = n_{e\phi}L/m\pi$	$n_{e\phi}$ — ефективний показник заломлення, L — довжина шляху, який проходить мода, m — ціле число
Стала поширення	$\beta = k \cdot n_{e\phi} = \frac{2\pi n_{e\phi}}{\lambda}$	$k = 2\pi/\lambda$ — хвильове число

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Добротність	$Q = \lambda_0 \times \frac{FES}{PD}$	FES — збережена енергія поля, PD — розсіяна енергія, λ_0 — резонансна частота
Втрати резонатора	$PD = \frac{\alpha_{RT} * U}{\tau_{RT}}$	U — енергія, яку запасав резонатор, α_{RT} — втрати потужності на один прохід по резонатору, τ_{RT} — час перебування імпульсу в резонаторі
Тонкість резонатора	$\mathcal{F} = \frac{\Delta\lambda_{FSR} Q}{\lambda_0}$	

2.2 Математична модель фільтрів, виконаних із застосуванням різних дискових мікрорезонаторів

Розглянемо систему різних діелектричних резонаторів, що складаються з різних матеріалів. Припускаємо, що поле власних коливань кожного ізольованого DR відоме: (\vec{e}_s, \vec{h}_s) , $(s = 1, 2, \dots, N)$. Тут \vec{e}_s — електричне поле, а \vec{h}_s — напруженість магнітного поля s -го ізольованого DR. Поле власних коливань системи N -DR (\vec{e}, \vec{h}) можна знайти як суперпозицію полів ізольованих резонаторів:

$$\vec{e} = \sum_{s=1}^N b_s \vec{e}_s \quad \vec{h} = \sum_{s=1}^N b_s \vec{h}_s \quad (2.24)$$

Відомо, що амплітуди b_s різних резонаторів повинні задовольняти умові:

$$\sum_{s=1}^N (k_{sn} + i\tilde{k}_{sn}) b_s - \lambda b_n = 0, \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad (2.25)$$

де

$$\lambda = 2 \cdot (\delta\omega/\omega_0 + i\omega''/\omega_0) \quad (2.26)$$

$\omega_0 = \text{Re}[\omega_s]$ — дійсна частина частот ізольованих окремих резонаторів ($s = 1, 2, \dots, N$); $\delta\omega = \text{Re}(\tilde{\omega} - \omega_0)$; $\omega'' = \text{Im}(\tilde{\omega})$; $\tilde{\omega}$ — комплексна резонансна частота системи DR; k_{sn}, \tilde{k}_{sn} — коефіцієнти зв'язку s -го і n -го DR на затухаючих і розширюючих хвилях лінії передачі відповідно:

$$\begin{aligned} k_{sn} &= \frac{-1}{\omega_0 \omega_n} \sum_{t \geq t_M} (c_t^{s\pm})_0 (c_t^{n\mp})_0 * e^{-\Gamma \Delta z}; \\ \tilde{k}_{sn} &= \frac{1}{\omega_0 \omega_n} \sum_{t \leq t_M} (c_t^{s\pm})_0 (c_t^{n\pm})_0 * e^{-i\Gamma \Delta z}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Тут t_M — кінцевий мультиіндекс, що визначає кількість хвиль, що поширюються в лінії, а $c_t^{s\pm}$ — коефіцієнт розширення s -го поля DR на t -й хвилі лінії передачі, розрахований у системі координат, пов'язаній з s -м резонаторним центром; $\Delta z = |z_s - z_n|$; z_s — поздовжня координата s -го DR; Γ — поздовжнє хвильове число лінії передачі; $\omega_n = \frac{1}{4} \int_{V_n} (\varepsilon_n |\vec{e}_{1n}|^2 + \mu_0 |\vec{h}_{1n}|^2) dv$ — енергія, накопичена в діелектрику s -го DR; $\varepsilon_n = \text{Re} \tilde{\varepsilon}_n$; $\tilde{\varepsilon}_n = \varepsilon_n - i\varepsilon_n''$ — комплексна діелектрична проникність, μ_0 — проникність n -го DR.

У випадку різних DR коефіцієнти зв'язку (2.27) мають різний вигляд: $k_{sn} \neq k_{ns}$ і $\tilde{k}_{sn} \neq \tilde{k}_{ns}$.

Загалом, надавши розв'язок системі рівнянь (2.25) для кожного отриманого λ_v , можна як приблизно розрахувати комплексну частоту $\tilde{\omega}_v$ коливань зв'язку системи, так і визначити всі амплітуди окремо кожного резонатора $\vec{b}^v = (b_1^v, b_2^v, \dots, b_N^v)$, ($v = 1, 2, \dots, N$).

Розв'язання задачі хвилеводного розсіювання хвиль на системі DR можливо знайти у вигляді розкладання по модах зв'язку решіток DR (2.24):

$$\vec{E} \approx \vec{E}_l^+ + \sum_{S=1}^N a^s \vec{e}^s \quad \vec{H} = \vec{H}_l^+ + \sum_{S=1}^N a^s \vec{h}^s, \quad (2.28)$$

де (\vec{e}^s, \vec{h}^s) — складові електро-магнітного поля систем з N різних резонаторів (2.24), що відповідає власному значенню λ_s (2.26).

За допомогою теорії збурень після інтегрування об'єму кожного окремо взятого резонатора система рівнянь з невідомими коефіцієнтами a^s була отримана у вигляді:

$$\sum_{S=1}^N a^s b_t^s Q_{st}(\omega) = -\frac{(c_l^{t+})^*}{P_t^D}, \quad (t = 1, 2, \dots, N), \quad (2.29)$$

де для різних резонаторів функції $Q_{st}(\omega)$ залежать від окремо взятих резонаторів і номерів пов'язаних коливань:

$$Q_{st}(\omega) = 2i \frac{\omega - \tilde{\omega}^s}{\omega_0} Q_t^D + \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (2.30)$$

де $Q_t^D = \frac{\omega \omega_0}{P_t^D}$, $P_t^D = \omega_0 \frac{\varepsilon''_t}{2} \int_{V_t} |\vec{e}_t|^2 dv$ — потужність втрат в діелектрику t -го резонатора.

Характеристику передавання T і коефіцієнт відбиття R різних систем DR в лінії передачі можна отримати з (2.28), використовуючи співвідношення (2.24) у вигляді:

$$\begin{cases} T = T_0 + \sum_{u=1}^N \left(\sum_{S=1}^N b_s^u c_s^+ \right) a_u = T_0 - \frac{1}{B(\omega)} \sum_{S=1}^N B_s^+(\omega), \\ R = R_0 + \sum_{u=1}^N \left(\sum_{S=1}^N b_s^u c_s^- \right) a_u = R_0 - \frac{1}{B(\omega)} \sum_{S=1}^N B_s^-(\omega), \end{cases} \quad (2.31)$$

Тут T_0, R_0 — коефіцієнти пропускання та відбиття лінії передачі без DR;

$$B_s^\pm = \det \begin{bmatrix} b_1^1 Q_{11}(\omega) & \dots & Q_1^D \sum_{u=1}^N b_u^s \tilde{k}_{u1}^{\mp+} & \dots & b_1^N Q_{N1}(\omega) \\ b_2^1 Q_{12}(\omega) & \dots & Q_2^D \sum_{u=1}^N b_u^s \tilde{k}_{u2}^{\mp+} & \dots & b_2^N Q_{N2}(\omega) \\ \cdot & \dots & \dots & \dots & \cdot \\ b_N^1 Q_{1N}(\omega) & \dots & Q_N^D \sum_{u=1}^N b_u^s \tilde{k}_{uN}^{\mp+} & \dots & b_N^N Q_{NN}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$B(\omega) = \det \begin{bmatrix} b_1^1 Q_{11}(\omega) & \dots & b_1^N Q_{N1}(\omega) \\ b_2^1 Q_{12}(\omega) & \dots & b_2^N Q_{N2}(\omega) \\ \cdot & \dots & \cdot \\ b_N^1 Q_{1N}(\omega) & \dots & b_N^N Q_{NN}(\omega) \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

де $\tilde{k}_{sn}^{++} = (c_s^+ c_n^{+*}) / (\omega_0 \omega_n) = (\tilde{k}_{sn})_0 e^{-i\Gamma(Z_s - Z_n)}$; $\tilde{k}_{sn}^{\mp+} = (c_s^- c_n^{+*}) / (\omega_0 \omega_n) = (\tilde{k}_{sn})_0 e^{-i\Gamma(Z_s - Z_n)}$;

$(\tilde{k}_{sn})_0$ — коефіцієнти зв'язку (2.27) для хвилі, що поширюється, виражені без урахування різниці фаз в лінії передачі ($s, n = 1, 2, \dots, N$).

2.3 Пропонований метод моделювання 2-резонаторних Add-Drop фільтрів

З допомогою вирішення задачі розсіювання електромагнітних хвиль інтегральних оптичних ліній на системах зв'язаних між собою оптичних мікрорезонаторів, наведеній у попередньому розділі можливе проектування фільтрів різних типів (Чебишівський, Баттервортівський та інших). Далі показано метод розрахунку параметрів фільтрів різних типів (Чебишівський, Баттервортівський) за допомогою вирішення рівнянь Максвелла. [14]



Рисунок 2.5 - Схема 2-резонаторного фільтру, модель якого пропонується

На рис. 2.5 зображено фільтр який складається з резонаторів (R1, R2) та двох хвилеводних трактів (1-2 та 3-4), де 1 — порт введення сигналу, 2 — порт виведення підсиленого сигналу, 3 — порт видалення, 4 — порт додавання.

Коефіцієнт зв'язку для фільтру, зображеного на рис. 2.5, можна отримати з [15], і для випадку з двома резонаторами він має вигляд:

$$K = \left\| k_{s2}(1 - \delta_{s2}) + i(\tilde{k}_1^e \delta_{s1} + \tilde{k}_1^o \delta_{s2} + \tilde{k}_2^e \delta_{s3} + \tilde{k}_2^o \delta_{s4} + \tilde{k}_{OS}) \right\| \quad (2.33)$$

Де \tilde{k}_N^e — коефіцієнт зв'язку мікрорезонатора з лінією зв'язку для парних коливань; \tilde{k}_N^o — коефіцієнт зв'язку мікрорезонатора з лінією зв'язку для непарних коливань; k_{s2} — коефіцієнт взаємного зв'язку мікрорезонаторів; \tilde{k}_{OS} — коефіцієнт зв'язку мікрорезонаторів з відкритим простором; δ_s — символ Кронекера.

Параметри матриці розсіювання на вході (виході) 2-резонаторного фільтру можна розрахувати використовуючи вирази:

$$S_{1v} = 20 \log(|T_{1v}|) = 20 \log \left(\left| \delta_{2v} - \frac{Q^D}{\det B} \sum_{s=1}^{2N} \frac{\det B_v^s}{Q_s(\omega)} \right| \right), \quad (2.34)$$

де

$$B_v^s = \begin{bmatrix} b_1^{e1} & \dots & \sum_{n=1}^n b_n^{es} \tilde{k}_{n1}^{\mp+} & \dots & b_1^{e2N} \\ b_1^{o1} & \dots & \sum_{n=1}^n b_u^{es} \tilde{k}_{n1}^{\mp+} & \dots & b_1^{o2N} \\ \cdot & & \dots & \dots & \cdot \\ & b_N^{o1} & \dots & 0 & \dots & b_N^{o2N} & \cdot \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$B(\omega) = \begin{bmatrix} b_1^{e1} & \dots & b_1^{e2N} \\ b_1^{o1} & \dots & b_1^{o2N} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ b_N^{o1} & \dots & b_N^{o2N} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$Q_s(\omega) = \frac{f}{f_0} + 2iQ^D \left(\frac{f}{f_0} - 1 - \frac{\lambda_s}{2} \right), \quad (2.37)$$

де Q^D – добротність мікрорезонатора, N – кількість резонаторів, λ_s – власні значення матриці K , f_0 – частота власних коливань ізольованих мікрорезонаторів.

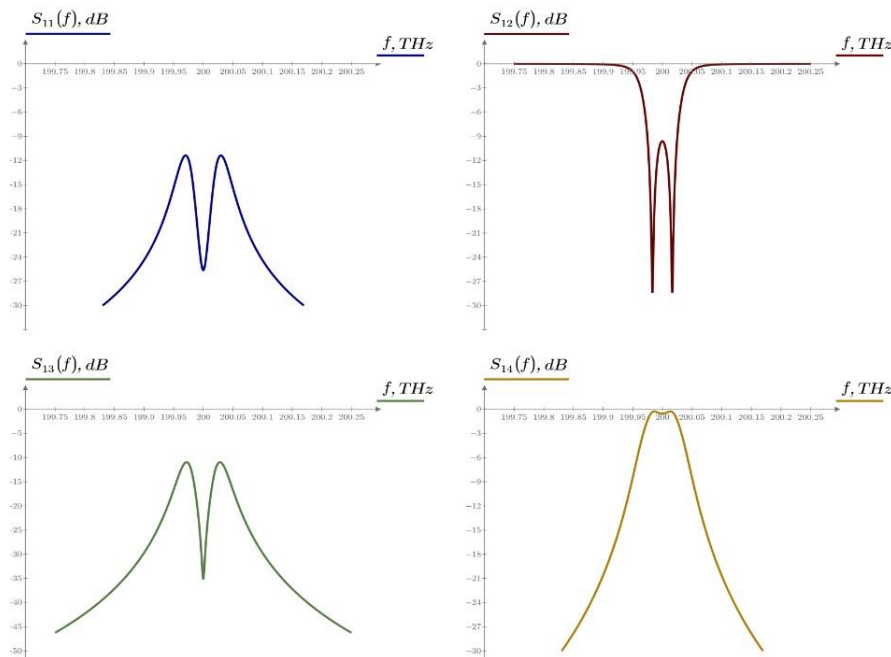


Рисунок 2.6 - Результат розрахунків матриць розсіювання 2 резонаторного Add-Drop фільтра

Використовуючи результати розрахунку залежності матриці розсіяння від частоти для 2-резонаторного Add-Drop фільтра наведені на рис. 2.6. Лістинг запропонованої програми для розрахунку параметрів 2-резонаторних Add-Drop фільтрів за допомогою математичного пакету Mathcad наведений у додатку А. Значення, використані при розрахунках: $f_0 = 200$ ТГц; $Q^D = 10^6$;

$$\tilde{k}_{OS} = 10^{-7}; \tilde{k}^e = 1.5 \cdot 10^{-4}; \tilde{k}^0 = 2 \cdot 10^{-4}; k_{12}^e = k_{21}^e = 2 \cdot 10^{-4}; k_{12}^0 = k_{21}^0 = -3 \cdot 10^{-4}.$$

В результаті розрахунків отримано фільтр, з квазі-Чебишівською характеристикою АЧХ на виході 4. Отримані розрахунки відповідають отриманим у роботі [17].

2.4 Дослідження параметрів 2-резонаторного Add-Drop фільтра

Варіюючи коефіцієнти зв'язку фільтрів з лініями передачі та коефіцієнти зв'язку фільтрів R1 з R2 можна бачити, що використовуючи коефіцієнти:

- $\tilde{k}^e = 2 \cdot 10^{-4}$, $\tilde{k}^0 = 2.5 \cdot 10^{-4}$, $k_{12}^e = k_{21}^e = 2 \cdot 10^{-4}$, $k_{12}^0 = k_{21}^0 = -3 \cdot 10^{-4}$ можна отримати Баттервортівську характеристику (гладка характеристика у смузі пропускання, невелика крутизна спаду) — рис 3а;

- $\tilde{k}^e = 2 \cdot 10^{-4}$, $\tilde{k}^0 = 0.5 \cdot 10^{-4}$, $k_{12}^e = k_{21}^e = 1 \cdot 10^{-4}$, $k_{12}^0 = k_{21}^0 = -3 \cdot 10^{-4}$ можна отримати Чебишівську характеристику 1 роду (з пульсацією у смузі пропускання, покращене значення крутизни спаду) — рис 3б.

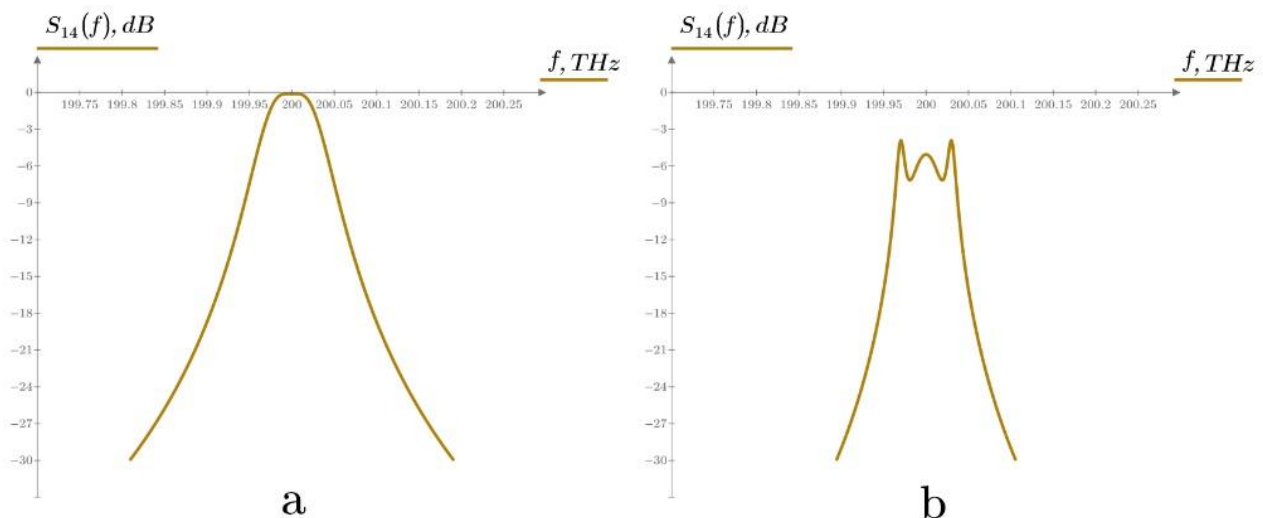


Рисунок 2.7 - Варіювання коефіцієнтів зв'язку Add-Drop фільтра

У результаті моделювання продемонстровано можливість розрахунку фільтрів різного типу за допомогою запропонованої моделі. Отримані дані підтверджують можливість застосування моделі для майбутнього проектування оптичних фільтрів.

2.5 Висновки з розділу 2

У другому розділі було проведено дослідження основних характеристик оптичних мікрорезонаторів, показано способи їх розрахунку та систематизовано інформацію з попередніх досліджень. Проведено аналіз сучасних публікацій, наукових джерел та монографій на тему способів моделювання оптичних мікрорезонаторів для систем зв'язку у тому числі.

Визначено високу практичну користь способу моделювання селективних пристроїв шляхом вирішення задачі розсіювання. В ході дослідження отримано рівняння у загальному вигляді для системи з N різних резонаторів. Також продемонстровано застосування методу вирішення рівнянь Максвелла для завдання моделювання 2-резонаторного Add-Drop фільтру. В ході дослідження також показано можливості щодо проектування оптичних фільтрів з прийнятними характеристиками для побудови фільтрів різних типів: Баттервортівський, Чебишівський та інших.

У наступних розділах роботи буде проаналізовано переваги та недоліки запропонованого методу, а також буде продемонстрована реалізація перелаштовуваного оптичного Add-Drop мультиплектора (ROADM) побудованого з використанням мікрокільцевих резонаторів.

3 ПРОПОНОВАНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ADD-DROP ФІЛЬТРІВ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ

3.1 Побудова фотонних пристроїв зв'язку з допомогою Add-Drop фільтрів

Існує широкий перелік сфер застосування кільцевих резонаторів. У цьому розділі буде наведено кілька прикладів використання кільцевих резонаторів та можливості щодо підвищення ефективності систем оптичного зв'язку, шляхом застосування мікрорезонаторів у таких системах.

Перше застосування — це використання пов'язаних кільцевих резонаторів в оптичних лініях затримки, які забезпечують затримку часу для оптичного сигналу. У системах зв'язку з оптичним часовим мультиплексуванням (TDM), наприклад, ця функція потрібна для цілей синхронізації. У демультіплексорах TDM і в оптичних логічних вентилях, наприклад, локальні керуючі сигнали повинні співпадати в часі з вхідними сигналами даних.

Іншою важливою областю є використання кільцевих резонаторів для динамічної компенсації дисперсії. Хроматична дисперсія, спричинена зміною групової швидкості світла, що поширюється всередині волокна, зі змінами оптичної частоти є однією з фундаментальних проблем оптичних комунікацій. Імпульс даних завжди містить спектр довжин хвиль. Оскільки імпульс проходить по волокну, компоненти з більш короткою довжиною хвилі поширюються швидше (негативна дисперсія), ніж компоненти з більшою довжиною хвилі (позитивна дисперсія). Цей ефект розширює імпульс і змушує його заважати сусіднім імпульсам і спотворює загальний сигнал передачі.

Практичні компенсатори дисперсії повинні мати обмежену налаштовуваність, рівномірно вносити втрати при компенсації дисперсії та працювати в усьому необхідному діапазоні довжин хвиль. Кільцеві резонатори можна використовувати для збільшення фізичної довжини лінії,

змушуючи світло багато разів долати фізичну відстань. Проте резонансне посилення забезпечується ціною обмеження пропускної здатності. Чим більше підсилення, тим вужча пропускна здатність резонатора. Кільцеві резонатори забезпечують велику компенсацію дисперсії для кількох довжин хвиль одночасно в обмеженому діапазоні частот. Структурний блок багатоступінчастого компенсатора дисперсії з використанням кільцевих резонаторів показаний на рис. 3.1. Групова затримка кільцевого резонатора йде за періодичною кривою. Каскадування кількох циклів дозволяє синтезувати різні криві затримки.

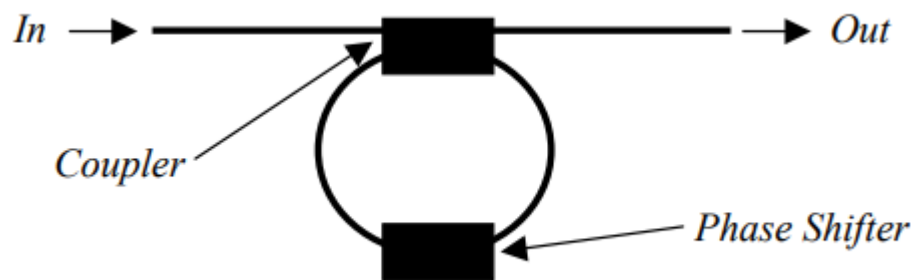


Рисунок 3.1 - Однокільцевий резонатор (SRR) як будівельний блок для багатоступеневих компенсаторів дисперсії [9]

Одиничний кільцевий резонатор (SRR), інтегрований з фотодіодом (PD), може використовуватися, наприклад, для стабілізації лазерного діода (LD), що випромінює на певній довжині хвилі (рис. 3.2) або для визначеної комутації між каналами FSR (наприклад, 25 ГГц). Фотодіод налаштовується таким чином, що він орієнтується на резонансну довжину хвилі кільця, яка, у свою чергу, є довжиною хвилі випромінюваного лазера. Якщо PD виявляє більше світла – це означає, що лазер вийшов за межі своєї довжини хвилі, і його потрібно налаштувати повторно.

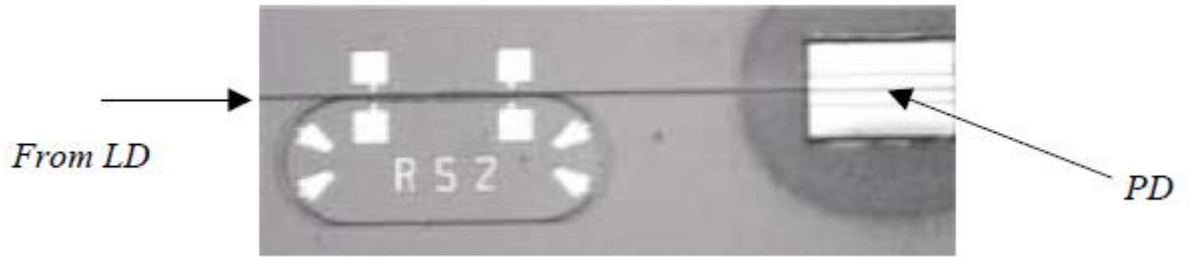


Рисунок 3.2 - Фотографія виготовленого пасивного SRR з інтегрованим PD на пропускному порті [9]

Установка для стабілізації довжини хвилі лазерного діода представлена на рис.3.3.

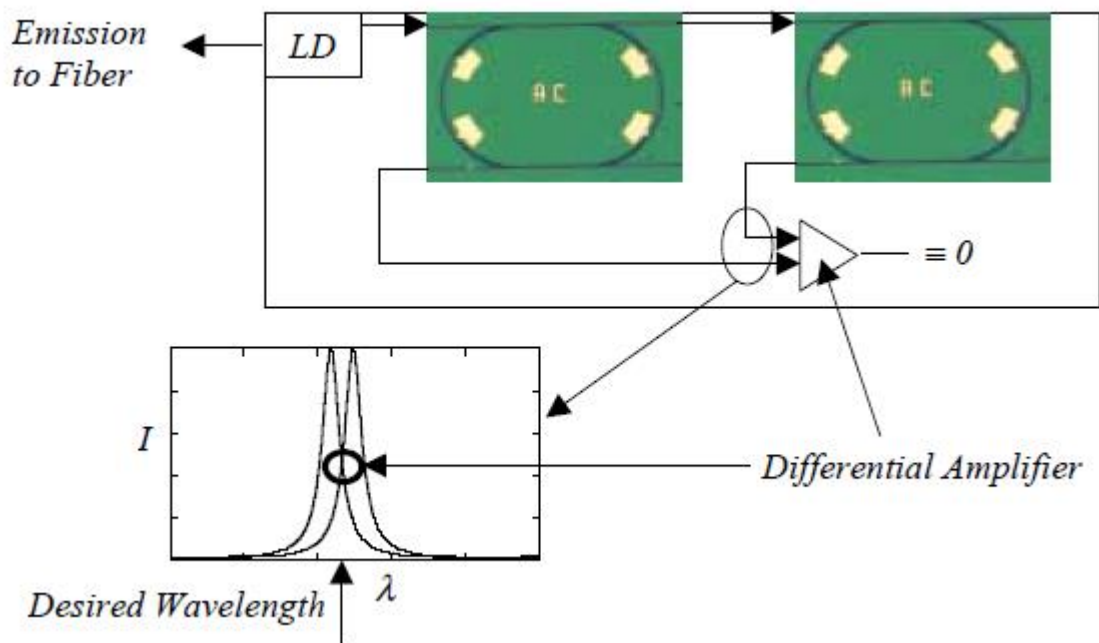


Рисунок 3.3 - Стабілізація довжини хвилі та налаштування комутації за допомогою кільцевих резонаторів [9]

Кільцеві резонатори у пропонованій схемі мають ідентичну геометрію. Характеристика пропускання другого кільцевого резонатора дещо розлаштована. Диференціальний підсилювач віднімає сигнали одне від одного. Лазер працює на бажаній довжині хвилі до тих пір, поки виявляється

нуль. FSR кільцевих резонаторів реалізує у цьому випадку комутацію з вибраним кроком довжин хвиль. Подібна конфігурація також може бути використана для генерації сигналів міліметрового діапазону довжин хвиль без потреби у використанні високочастотних фотодіодів.

На рисунку 3.4 продемонстровано спосіб реалізації інтеграції кільцевого резонатора з інтерферометром Маха-Цендера для використання як компактного режекторного фільтра та періодичного мультиплексора/демультиплексора.

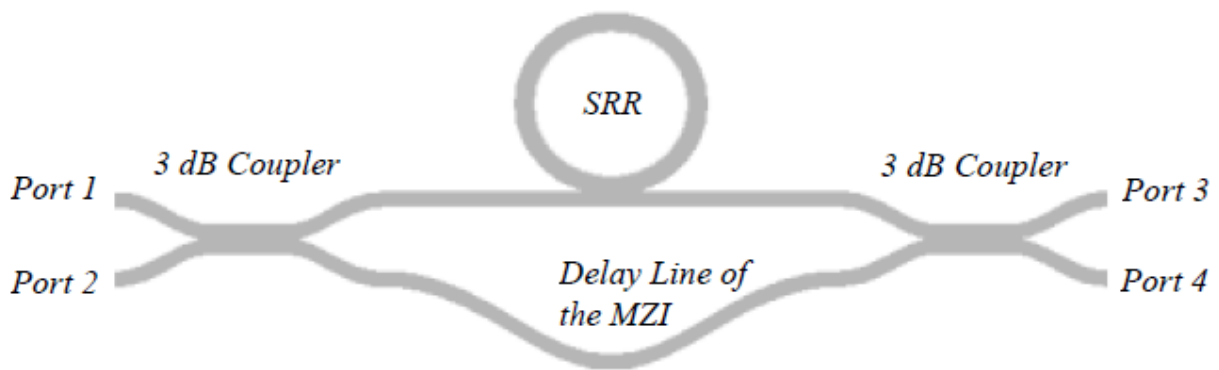


Рисунок 3.4 - Конфігурація МЦІ з кільцевим резонатором [9]

У випадку використання режекторного фільтра втрати в кільці в обхідному напрямку є малі порівняно з силою зв'язку хвилеводу. Кільце вносить фазовий зсув на π при резонансі на хвилеводі з бічним зв'язком. Однокільцеві резонатори, поєднані з одним хвилеводом, які представлені в цій дипломній роботі, можна використовувати як режекторні фільтри з коефіцієнтом включення-вимкнення більше 20 дБ.

Кільцеві резонатори з інтегрованими SOA можна використовувати як налаштовувані модулі додавання/відкидання для гнучкої побудови WDM систем у мережах з мультиплексуванням з поділом за довжинами хвиль. Високопродуктивні фільтри додавання/відкидання можуть бути реалізовані за допомогою подвійних кільцевих резонаторів (DRR) і потрійних кільцевих резонаторів (TRR) зі специфічною характеристикою передачі (плоский верх і високий коефіцієнт включення-вимкнення > 20 дБ), представлені теоретично

та практично в цій дипломній роботі. Схема можливого чотирьохканального модуля додавання/відкидання показана на рис. 3.5.

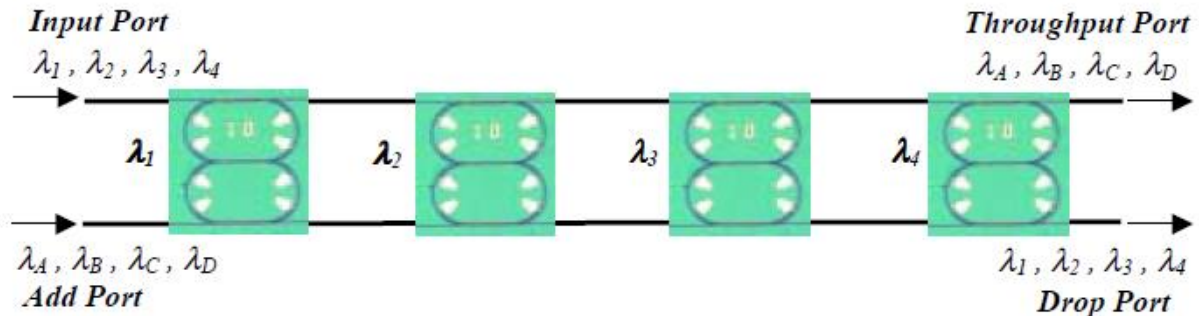


Рисунок 3.5 - Приклад побудови WDM системи з використанням чотирьох дворезонаторних Add-Drop фільтрів [9]

Вхідні довжини хвиль мають відстань між каналами, напр. 25 ГГц. DRR, які використовуються в цій конфігурації, повинні мати FSR щонайменше 100 ГГц. Кожен подвійний кільцевий резонатор налаштовується на кожну відповідну довжину хвилі. Цей спосіб дозволяє реалізувати модуль додавання/відкидання з використанням лише двох шинних хвилеводів. Більше число каналів можна реалізувати, якщо використовуються кільцеві резонатори з більшим FSR.

Вертикально зв'язані кільцеві резонатори також є можливими кандидатами для реалізації Add/Drop фільтрів. Пристрої, засновані на бічній зв'язці, вимагають використання передових технологій виготовлення для досягнення відтворюваної пропускної здатності фільтра та високої ефективності відкидання. Інший спосіб підключення кільцевого резонатора до хвилеводу – це вертикальне сполучення. Чутливий поділ між кільцевим резонатором і шинними хвилеводами контролюється зростанням або осадженням матеріалу, що дозволяє створювати зазори $< 0,3$ мкм.

Пристрої, що діють селективно за довжинами хвиль, комутують і налаштовуються, продемонстровані в цій дисертації, також є кандидатами

для використання в якості перемикачів у системах DWDM для просторового поділу каналів DWDM на два додаткових набори з подвійним вихідним інтервалом між каналами. Наприклад: вхідний спектр з інтервалом між каналами 50 ГГц передається на два набори з інтервалом каналів 100 ГГц. Це ефективний спосіб зменшити відстань між каналами та збільшити кількість каналів, а отже збільшити пропускну здатність мережі та зменшити витрати на передачу. Комбінація перемикачів дозволяє створити демультиплексор для 8 каналів з інтервалом між каналами 25 ГГц (рис. 3.6).

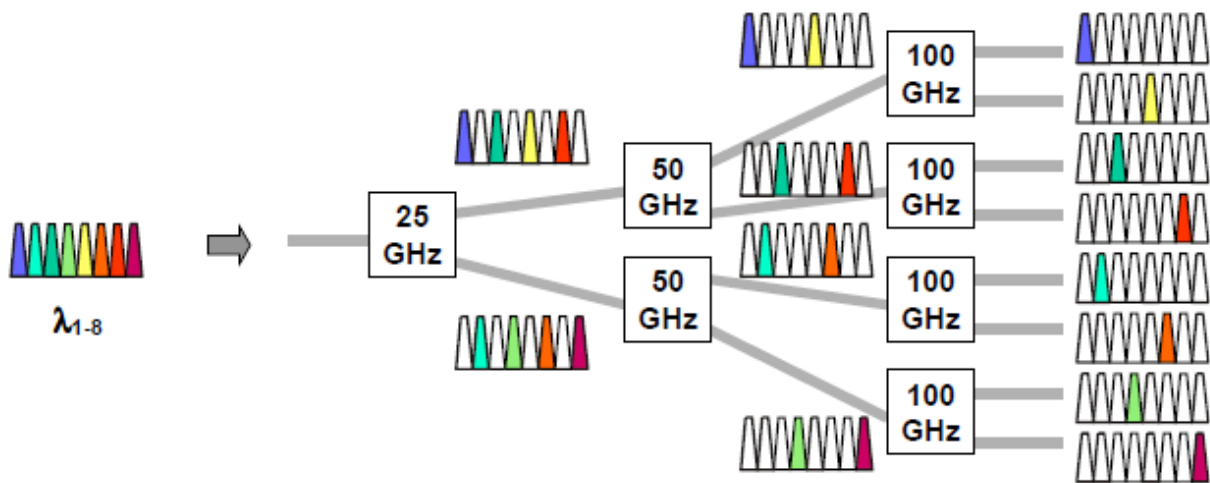


Рисунок 3.6 - DWDM демультиплексор на основі перемикачів [9]

Це лише деякі з застосувань, які можна реалізувати за допомогою кільцевих резонаторів. У наступному підрозділі представлено схеми для побудови WDM систем з використанням мультиплексорів на мікротрієцевих резонаторах.

3.2 Системи оптичних комунікацій з використанням мікротрієцевих пристроїв

Основна роль оптичних волокон давно полягала в передачі високошвидкісних потоків інформації від точки до точки, між вузлами

мережі. Електронно на вузлах оброблялися та перемикалася сигнали, мультиплексуючи або демультиплексуючи їх на різні швидкості передачі даних, спрямовуючи їх на різні вузли. По суті, телекомунікаційну мережу можна розглядати як побудовану з двох основних компонентів систему: ліній, які передають сигнали, і комутаторів, які обробляють і спрямовують сигнали. Волокна представляють собою ліній передавання для високошвидкісних сигналів.

Першим великим кроком до оптичних мереж стала поява мультиплексування з поділом за довжинами хвиль (WDM). Початковою привабливістю WDM була його здатність примножувати ємність одного волокна. Замість того, щоб передавати один канал із розподілом за часом (TDM) зі швидкістю 2,5 або 10 Гбіт/с або навіть більше, волокно може передавати 40, 80, 96, 120 або більше оптичних каналів на різних довжинах хвилі, кожен з яких може бути на різних швидкостях передачі даних. WDM робить можливим керування та обробку сигналів на рівні довжини хвилі.

Якщо різні сигнали надсилаються по окремих оптичних каналах, фільтр може виділити потрібний оптичний канал, не порушуючи роботу решти каналів. Цей принцип застосовується в будь-якій системі WDM: оптичні фільтри використовуються для відокремлення одного оптичного каналу від комбінованого сигналу без електроніки. Оптичні фільтри є ключовими пристроями для систем WDM. Найбільш очевидним застосуванням є демультиплексування дуже близько розташованих каналів, однак вони також відіграють важливу роль у відновленні втрат і компенсації дисперсії. Спрощена схема системи WDM показана на рис. 3.7.

Add-Drop фільтр потрібен у оптичній кільцевій мережі, щоб відокремити канал, який потрібно виділити, від каналів, які проходять через вузол. Node 1 (рис. 3.7) приймає виділений канал на довжині хвилі λ_{1T} і може передавати інформацію на тій же довжині хвилі λ_{1R} , що і виділений, або на новій довжині хвилі, яка не заважає тим, які вже використовуються іншими

каналами на прохідному тракті $\lambda_{1T} = \lambda_{1R}$. Відстань між каналами стандартизована на основі сітки Міжнародного союзу телекомунікацій (ITU), яка визначає частоту розносу між каналами у 100 ГГц, $f = 193,1 \pm m * 0,1$ ТГц, де m — ціле число. Центральна точка відліку каналів у WDM системі визначена на частоті 193,1 ТГц, що відповідає довжині хвилі 1552,524 нм у вакуумі.

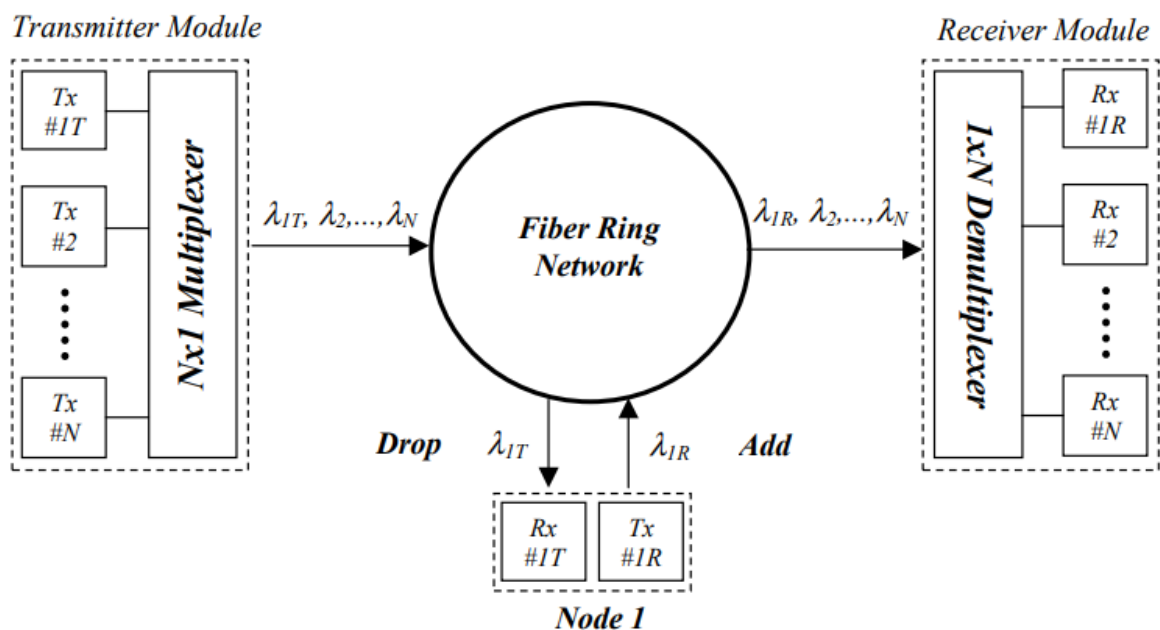


Рисунок 3.7 - Застосування Add-Drop фільтрів у WDM системах зв'язку [9]

У минулому, на етапах становлення WDM систем, відстань між каналами становила близько 100 ГГц зі швидкістю передачі даних до 10 Гбіт/с на канал. У ході розвитку технології використовувалися такі способи збільшення пропускної здатності: збільшення використовуваного діапазону довжин хвиль, більш ефективне використання вже охопленої смугу пропускання, наприклад, зменшуючи відстань між каналами до 50 ГГц, 25 ГГц або навіть 12,5 ГГц, а також застосовуючи більш ефективні методи модуляції.

Збільшення швидкості передачі даних призводить до відповідного збільшення пропускної здатності каналу. Це означає, що буде менше місця

для розміщення смуги пропускання сигналу, якщо відстань між каналами зменшується. Більш тісний рознос між каналами вимагає більш чітких відгуків фільтрів і співвідношення включення-вимкнення більше 20 дБ, щоб розділити канали без перехресних перешкод від інших каналів.

В ідеалі, фільтр повинен мати прямокутну амплітудну характеристику та нульову дисперсію (що відповідає лінійній спектральній фазі в смузі пропускання фільтра). Швидкість передачі даних 10 Гбіт/с має спектральну смугу частот у 6,25 ГГц, використовуючи спектральну ефективність 1,6 біт/с/Гц. Отже, ідеальна смуга пропускання фільтра з прямокутною амплітудною характеристикою для цієї швидкості передачі даних була б 6,25 ГГц.

Для застосування смугових фільтрів існує кілька факторів, які впливають на необхідну ширину смуги пропускання крім основної межі, встановленої бітовою швидкістю. Ширина смуги пропускання повинна відповідати виробничим допускам на довжину хвилі фільтра та центру лазера, а також їх поляризацію, температуру та характеристики старіння. Для міжміських систем з високою бітовою швидкістю також може стати проблемою дисперсія фільтра та розширення сигналу через нелінійність волокна.

3.2.1 Оптичне модулювання на основі мікрорезонаторів

З розвитком багатоядерних процесорів виникла нагальна потреба в комунікаційній ємності для внутрішнього з'єднання. Кремнієва фотоніка може задовольнити зростаючі вимоги до пропускну здатності зв'язку майбутніх високошвидкісних обчислювальних пристроїв. Багато зусиль було зроблено для досягнення більшої комунікаційної ємності шляхом поєднання більш ніж однієї техніки мультиплексування. Для кодування оптичних даних при мультиплексуванні необхідні електрооптичні модулятори. У роботі [21]

продемонстровано спосіб використання матриці мікрокільцевих резонаторів для створення модулятора 4×4 з модовим мультиплексором і демультимплексором на основі асиметричних спрямованих відгалужувачів (ADC), щоб продемонструвати високошвидкісну модуляцію з перебудовуваним мультиплексуванням з розділенням довжини хвилі (WDM) і мультиплексуванням з розділенням режиму. За допомогою такої структури досягається передача даних з пропускнуою здатністю $4 \times 4 \times 32$ Гбіт/с.

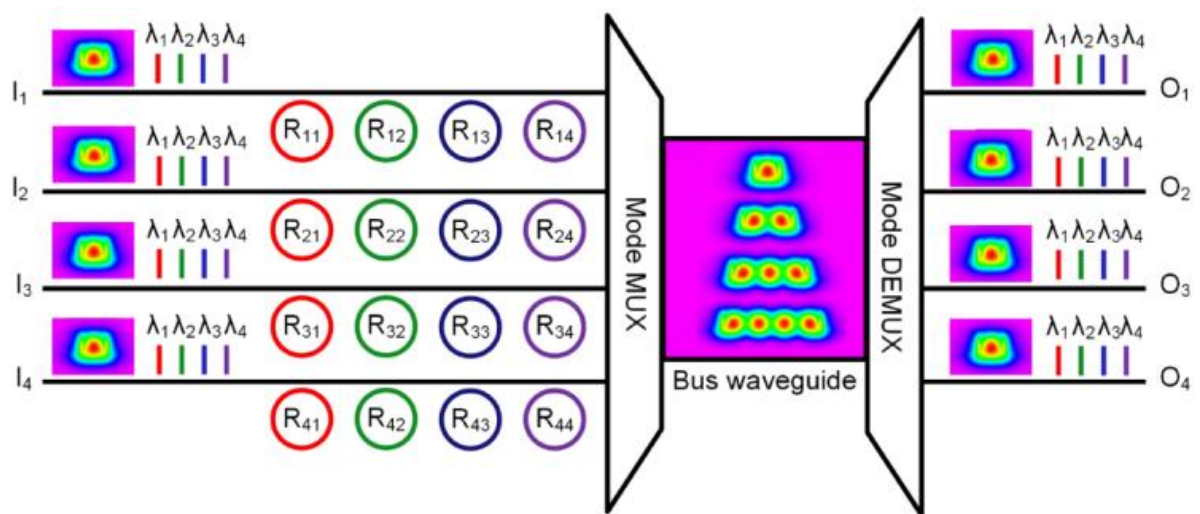


Рисунок 3.8 - Схема матриці мікрокільцеві, які працюють у режимі модулювання 4×4 , інтегрованої з модовим мультиплексором і демультимплексором для вбудованого оптичного з'єднання [21]

На рисунку 3.8 показана схема матриці мікрокільцевого модулятора 4×4 , інтегрованої з модовим мультиплексором і демультимплексором. На рисунку позначено чотири вхідних порти як I_1 - I_4 , а чотири вихідних порти як O_1 - O_4 відповідно. Чотири джерела випромінювання незатухаючих гармонік (CW) з різними довжинами хвиль мультиплексується та підключаються до кожного вхідного порту пристрою. Вхідне світло з певною довжиною хвилі модулюється відповідним мікрокільцевим модулятором. Модульоване світло не буде піддаватися впливу інших мікрокільцевих модуляторів з різними

резонансними довжинами хвилі через селективну характеристику мікрокільцевого модулятора по довжині хвилі. Резонансне розділення хвиль у просторі між 4 мікрокільцевими модуляторами в кожному рядку матриці можна налаштувати за допомогою вбудованих з ними мікропідсилювачів.

Усі чотири групи оптичних сигналів з мультиплексуванням за довжинами хвиль є основною поперечною електричною (TE_0) модою. У модовому мультиплексорі три з них перетворюються в моди вищого порядку (TE_1 , TE_2 і TE_3). В результаті у вихідному багатомодовому хвилеводі модового мультиплексора (шинний хвилевод на рис. 3.8) є чотири просторові моди. У модовому демультиплексорі оптичні сигнали модового мультиплексування демультиплексуються на чотири моди TE_0 і виводяться на 4 вихідні порти (O_1 до O_4). За умов реального застосування хвилевод може бути достатньо довгим, щоб підтримувати глобальний зв'язок між різними ядрами процесора на одному чіпі. Неперервне випромінювання з мультиплексуванням за довжинами хвиль може генеруватися або лазерними діодами та мультиплексором довжини хвилі, або групою мікрокільцевих лазерів. Оптичні сигнали мультиплексування довжини хвилі на кожному вихідному порті нарешті розділяються на 4 окремих оптичних сигнали з різними довжинами хвилі за допомогою демультиплексора довжин хвиль та подаються на чотири фотодетектори. Оптичні сигнали з мультиплексуванням за довжинами хвиль також можуть бути безпосередньо подані в групу селективних, по довжині хвилі, фотодетекторів.

Кремнієвий мікрокільцевий модулятор складається з кільцевого хвилеводу і прямого хвилеводу, які мають ширину 400 нм, висоту 220 нм і товщину підкладки 70 нм. Такий хвилевід підтримує лише основні квазі- TE моди. Коли мікрокільцевий модулятор знаходиться у резонансі на певній довжині хвилі, вхідне світло буде підсилюватися в кільцевому хвилеводі, що призведе до падіння оптичної потужності на вихідному порті. Коли мікрокільцевий модулятор не на резонансній, а на певній довжині хвилі,

вхідне світло не зазнає значних втрат у кільцевому хвилеводі, зберігаючи майже всю оптичну потужність на вихідному порті. За допомогою налаштування ефективного індексу кільцевого хвилеводу резонансна довжина хвилі зміщується, що викликає модуляцію світла, що проходить. Для досягнення високої швидкості модуляції навколо кільцевого хвилеводу вбудовано PN-перехід. Мікрокільцевий модулятор з меншим радіусом має більший вільний спектральний діапазон (FSR), який може вмістити більше каналів, але є більш складним для виготовлення, оскільки радіуси мікрокільцевих модуляторів у кожному рядку матриці розраховані на 9,955 мкм, 9,985 мкм, 10,015 мкм і 10,045 мкм. Незначні відмінності роблять їх резонансні довжини хвиль рівномірно розподіленими в діапазоні FSR. Мікропідсилювачі у формі « Ω » вбудовані зверху мікрокільцевих модуляторів для зсуву резонансних довжин хвиль. Порівняно з термооптичним ефектом, ефект дисперсії плазми досить слабкий. Таким чином, для досягнення відносно великого динамічного коефіцієнта згасання (ER) при помірній напрузі накачування необхідна більш висока добротність. Тоді як більша добротність означає більший час життя фотона, що впливає на швидкість модуляції мікрокільцевого модулятора.

На рисунку 3.9 показані статичні спектри пропускання, виміряні на вихідних портах O_1 , O_2 , O_3 та O_4 , коли широкосмугові сигнали передаються до вхідних портів I_1 , I_2 , I_3 та I_4 відповідно. Режими TE_0 з вхідних портів I_1 , I_2 , I_3 та I_4 спочатку перетворюються в режими TE_3 , TE_1 , TE_0 і TE_2 , відповідно, модовим мультиплексором, а потім перетворюються назад у режими TE_0 на 4 вихідних портах за допомогою модового демультимплексора. Світло спрямовується від i -го вхідного порту до i -го вихідного порту ($i = 1, 2, 3, 4$). Вносимі втрати від I_1 до O_1 , I_2 до O_2 , I_3 до O_3 і I_4 до O_4 становлять 8,2 дБ, 7,8 дБ, 7,1 дБ і 8,5 дБ від волокна до волокна. У той час як через неідеальність модового мультиплексора і демультимплексора частина світла просочується на інші вихідні порти і стає перехресною перешкодою для

відповідного режиму. З рисунків бачимо, що міжмодові оптичні перехресні перешкоди пристрою менше -20 дБ в діапазоні довжин хвиль від 1525 нм до 1565 нм. Різкі спади в цих спектрах є фільтруючими спектральними характеристиками чотирьох мікрокільцевих модуляторів, які мають FSR приблизно 10 нм. Різні коефіцієнти екстинкції обумовлені різними структурними параметрами мікрокільцевих модуляторів.

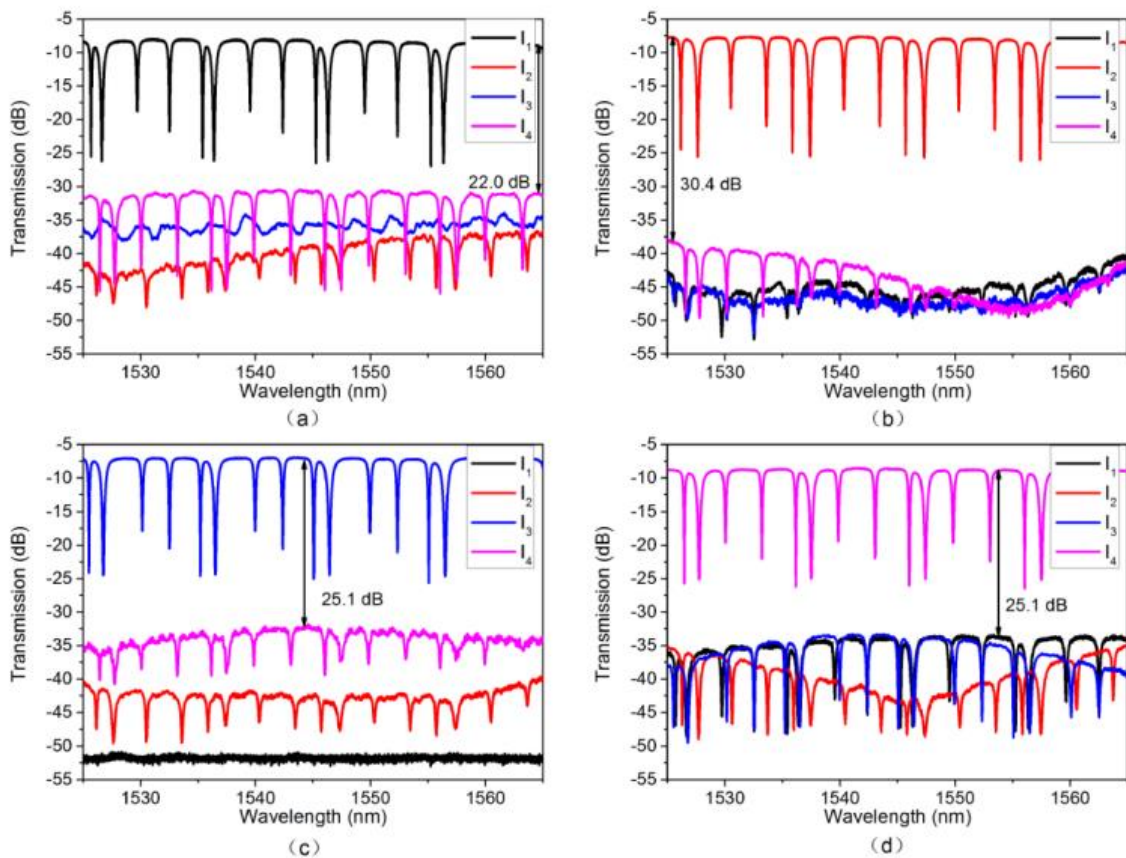


Рисунок 3.9 - Спектри пропускання, виміряні на вихідних портах схеми – O_1 (a), O_2 (b), O_3 (c) і O_4 (d) при широкосмуговому вхідному випромінюванні з вхідних портів I_1 , I_2 , I_3 і I_4 відповідно [21]

Постановка експерименту [21] показана на рис. 3.10. Незатухаюче випромінювання відповідної довжини хвилі генерується настроюваним лазером і підключається до пристрою. Псевдовипадковий електричний

сигнал двійкової послідовності 32 Гбіт/с подається на мікрокільцеві модулятори за допомогою одного наскрізного зонда.

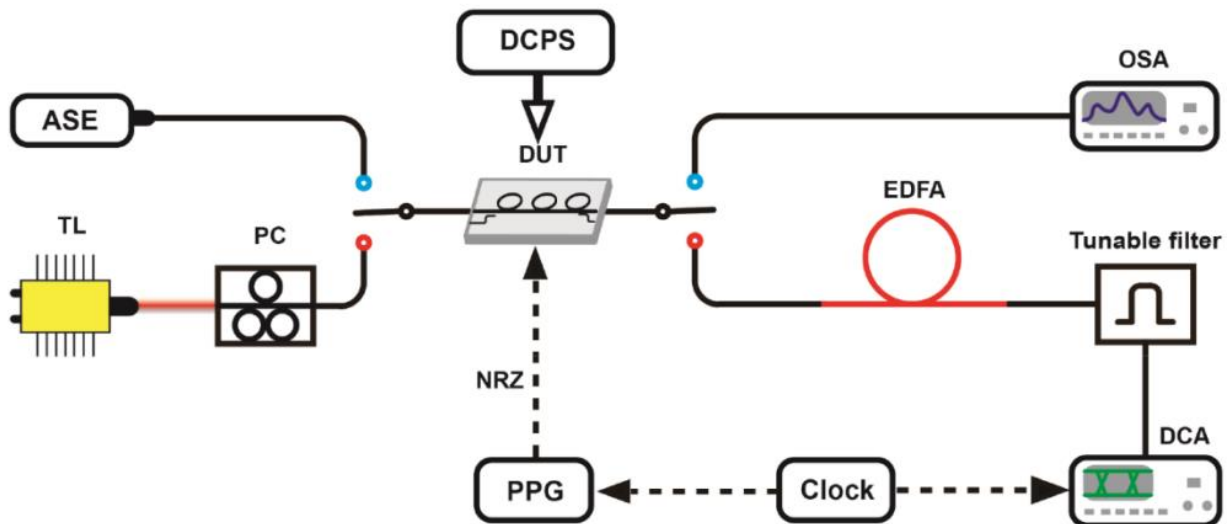


Рисунок 3.10 - Експериментальна установка. ASE: посилюване спонтанне випромінювання, TL: перебудований лазер, PC: контролер поляризації, DCPS: джерело живлення постійного струму, DUT: пристрій, що тестується, PPG: генератор імпульсної діаграми, OSA: аналізатор оптичного спектру, DCA: аналізатор цифрового зв'язку, EDFA: волоконний підсилювач, легований ербієм

[21]

Максимальна оптична потужність перебудованого лазера становить 3,0 дБм. Оптична потужність перед аналізатором цифрового зв'язку (Agilent 86100D) становить близько -9,0 дБм, що перевищує його чутливість (-5 дБм) на швидкості 40 Гбіт/с, тому вихідний оптичний сигнал підсилюється волоконним EDFA підсилювачем і фільтрується налаштовуваним фільтром перед передавання в цифровий аналізатор зв'язку для спостереження діаграми. На рисунку 3.9 показані очні діаграми для передачі даних на 4 різних довжинах хвилі і в 4 різних режимах. Чіткі та відкриті очні діаграми підтверджують якість модуляції, забезпечують достатні значення співвідношення сигнал/шум для передачі даних зі швидкістю 32 Гбіт/с і

функції (де)мультиплексування. Продуктивність пристрою може досягати $4 \times 4 \times 32$ Гбіт/с.

3.2.2 Оптичне мультиплексування на основі мікрокільцевих резонаторів

Мікрокільцеві резонатори з дещо різними радіусами можуть бути легко підключені до одного хвилеводу для реалізації функції мультиплексування з поділом за довжинами хвилі (WDM). На рис. 3.11 (а) показана схема фотонного зв'язку з використанням WDM CMOS – комплементарної структури метал-оксид-напівпровідник. Мікрокільцеві модулятори на основі інжекції несучої можуть управлятися невеликими коливаннями напруги для досягнення великого спектру модуляцій вихідного сигналу під дією великих значень вхідного струму вище порогового значення. Однак через притаманний цьому класу пристроїв повільний час дифузії для високошвидкісної роботи необхідні попередньо налаштовані сигнали накачування. Щоб налаштувати резонанс мікрокільця на вхідну довжину хвилі лазера і компенсувати будь-які теплові дрейфи, також потрібна схема налаштування. У роботі [22] продемонстровано кремнієвий фотонний WDM-передавач 50 Гбіт/с на основі мікрокільцевих модуляторів з інжекцією несучої. Для регулювання резонансної довжини хвилі мікрокільця включені за схемою температурного підлаштування та налаштування зміщення. Для автоматичного фіксування довжини хвилі реалізована схема з цифровим керуванням у драйвері CMOS 2Vpp. Це є важливим кроком на шляху до повністю інтегрованого WDM CMOS фотонного каналу.

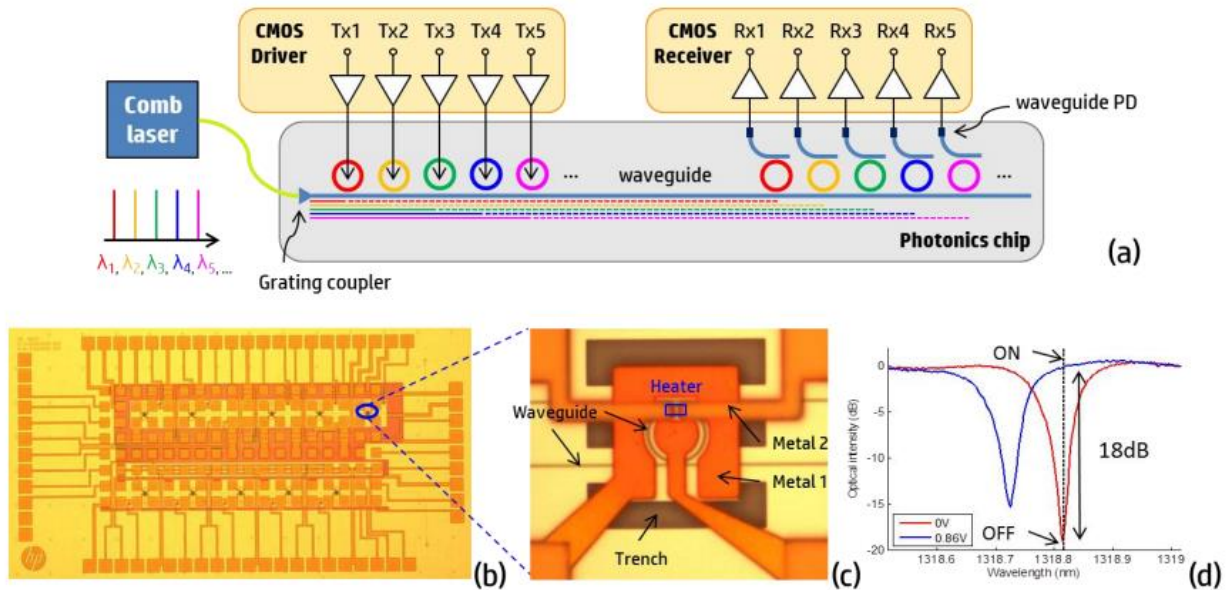


Рисунок 3.11 - (а) Схеми фотонного зв'язку WDM CMOS. (б) Виготовлений 5-канальний кремнієвий фотонний трансивер. (с) Мікроскопічне зображення мікротрітцевого модулятора. (d) Оптична передача мікротрітцевого модулятора при 0 В і 0,86 В [22]

На рис. 3.11 (б) показано виготовлений 5-канальний фотонний приймач із передавачами у верхній половині та приймачами у нижній половині. Для забезпечення доступу до оптичного входу та виходу використовуються вертикальні волокно-до-чіпа решіткові пристрої зв'язку. Основний елемент кожного каналу складається з мікротрітцевого резонатора з інтегрованим Ge хвилеводним фотодіодом у його краплинному порту та вбудованим нагрівачем поблизу кільцевого хвилеводу, як показано на рис. 3.11 (с). Два шари металу у схемі об'єднано стандартним процесом дамасцену (покриття одного матеріалу іншим, шляхом насікання). Загальна площа фотонного приймача в даний час обмежена контактними площадками з перекидним чіпом і відповідними схемами CMOS на вузлах технології 65 нм. Мікротрітцеві резонатори з різноманітними радіусами близько 5 мкм генерують серію каналів WDM і підтримують більше 20 каналів з інтервалом 80 ГГц при довжині хвилі 1,3 мкм. Оптичний спектр пропускання

мікрорізьцевого резонатора на рис. 3.11 (d) демонструє коефіцієнт добротності $Q = 1,2 \cdot 10^4$ із коефіцієнтом згасання включення/вимкнення 18 дБ.

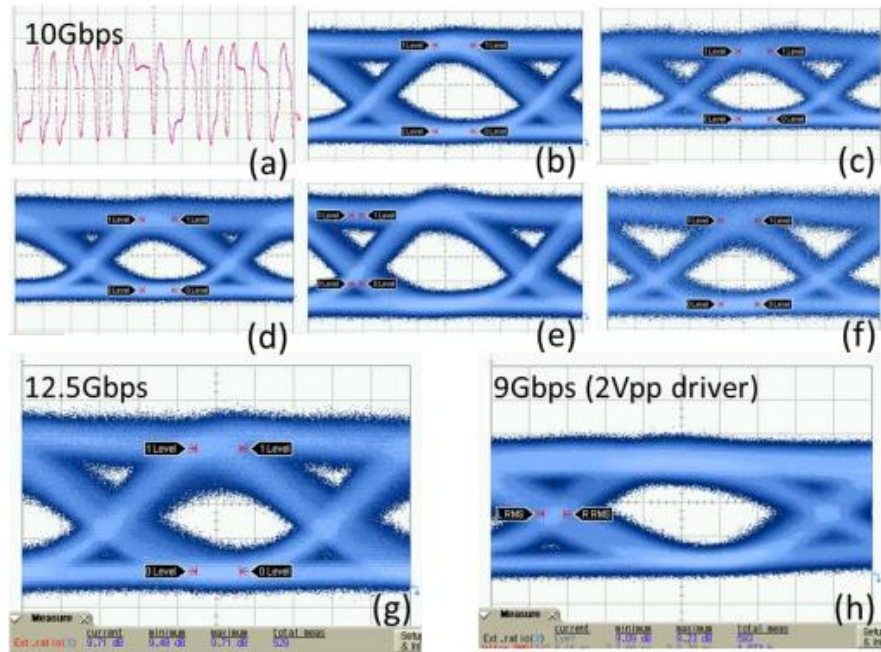


Рисунок 3.12 - Очні діаграми (a) вхідного сигналу до корегування 10 Гбіт/с, (b-f) оптичного сигналу 10 Гбіт/с у п'яти різних каналах, (g) оптичного сигналу 12,5 Гбіт/с і (h) оптичного сигналу 9 Гбіт/с з 2 Vpp CMOS-драйвером [22]

Тут показано адаптований фотонний пристрій для задоволення потреб у трансиверах WDM. Управляючи мікрорізьцевими модуляторами зовнішніми попередньо підкресленими електричними сигналами на швидкості 10 Гбіт/с (рис. 3.12 (a)), продемонстровано, що оптичні вихідні сигнали на всіх п'яти каналах мають чітку різницю між логічними “0” та “1” з достатнім запасом потужності для детектування (рис. 3.12 (b-f)). Також можлива робота зі швидкістю 12,5 Гбіт/с, результат якої на рис. 3.12 (g). Драйвер CMOS 2Vpp,

підключений до мікрокільця, показує роботу зі швидкістю 9 Гбіт/с з енергоефективністю 473 фДж/біт.

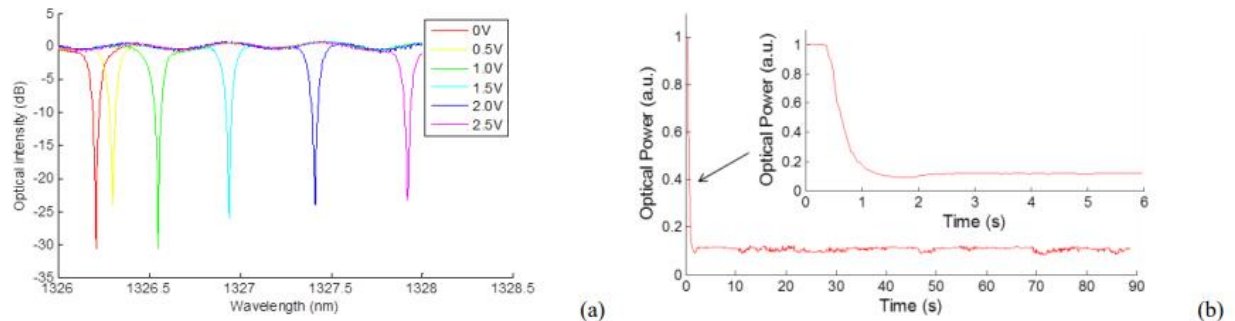


Рисунок 3.13 - (а) Спектри пропускання мікрокільцевого резонатора при різних зміщеннях підсилювача. (б) Стабілізація довжини хвилі за допомогою схеми CMOS. Оптична потужність контролюється на хвилеводі наскрізного порту [22]

Локальний підсилювач реалізований шляхом легування кремнієм на тому ж етапі, що й утворення р-і-n переходу. У шарі кремнію товщиною 50 нм досягається опір накладки близько 800 Ом/мкм. На рис. 3.13 (а) показано резонансні зсуви щодо різних зміщень нагрівача з ефективністю налаштування 23 мкВт/ГГц або 44 мВт/FSR. Рис. 3.13 (б) описує результати налаштування зміщення, яке слугує доповненням до теплового налаштування з кращою енергетичною ефективністю. Контур управління для схем налаштування на основі зміщення в драйвері $2V_{pp}$ збільшує анодну напругу р-і-n-діода, щоб зміщувати резонансну довжину хвилі через накопичені вільні носії в кільцевому хвилеводі з ефективністю 6,8 мкВт/ГГц. Оптична потужність контролюється через прохідний порт мікрокільця, і, таким чином, мінімальна оптична потужність є оптимальною робочою точкою. Вона монотонно зменшується в процесі налаштування і залишається на мінімальному рівні потужності після того, як мікрокільцевий резонанс зафіксований на довжині хвилі лазера. Схеми CMOS також можуть забезпечувати моніторинг Dпор-портів. Для того, щоб реалізувати повністю

інтегрований WDM CMOS фотонний канал, можливо використовувати методи з'єднання перевернутого кристалу, щоб забезпечити масштабну інтеграцію між CMOS і фотонними мікросхемами. Це може значно зменшити форм-фактор і покращити пропускну здатність сигналу при високих швидкостях передачі даних.

3.3 Способи виготовлення мікрокільцевих систем

Високі коефіцієнти оптичної добротності (Q) є критично важливими для оптичних мікрорезонаторів в умовах, де ефективність застосування визначає якість роботи усієї системи, у таких сферах як нелінійна оптика, квантова електродинаміки та інше. Вибір способу та методу виготовлення оптичних резонаторів на пряму впливає на отримані показники добротності та відповідно на усі характеристики роботи оптоволоконної системи, у тому числі в таких застосуваннях як, солітоновий зв'язок, передавання даних оптичними гребінками та інше.

Рекордні показники добротності у наш час досягають понад 1,1 мільярда для вбудованих оптичних резонаторів. Використовуючи кремнієві резонатори шепочучої галереї на підкладці, дані показники добротності можуть бути досягнутими на довжинах хвиль, що охоплюють діапазони C та L (100 нм) і для діапазону різноманітних розмірів резонаторів і сімейств мод. Рекордно низький поріг параметричних коливань у субміліват досягнутий у пристроях з вільним спектральним діапазоном (FSR) у 9 ГГц. Що вказує на великий потенціал застосування термічно обробленого кремнезему на підкладці з кремнію як перспективної структури побудови резонаторів.

Численні застосування мікрорезонаторів з високою оптичною добротністю через ефективність у ряді систем матеріалів і платформ пристроїв стимулювали помітну цікавість до пошуку способів поліпшення

їхніх параметрів. Коефіцієнт добротності часто дуже впливає на продуктивність пристрою. Наприклад, у Раманівських, параметричних і Бріллюєнівських нелінійних оптичних осциляторах перехідний бар'єр квадратично залежить від Q . Більше того, ця сама Q -залежність входить до формул ширини смуги пропускання лазерних осциляторів, наприклад, мікрорезонаторних лазерів Брюлієна. Зрештою, цей же фактор є ключовими драйвером продуктивності солітонних мікрогребінкових систем. Завдяки оптимізації методів виготовлення кремнеземних резонаторів із шепочучою галереєю добротність цієї системи може бути збільшена до понад 1,1 мільярда.

Резонаторні пристрої з модами шепочучої галереї у клиноподібній формі виготовляються з використанням комбінації термічного окислення (товщина 8 мкм на кремнієвих пластинах високої чистоти 4 дюймів (100 мм) з плавучою зоною), оптичної літографії, буферного фтороводневого вологого травлення та сухого травлення кремнію дифторксененом XeF_2 . Щоб підвищити загальну добротність Q , у способі [19] було здійснено кілька покращень у процесах виготовлення та макеті пристрою. Рисунок резисту та наступні жолоби, утворені вологим травленням із забуференим HF кремнеземом, звужуються, як показано на рис. 3.14(a) і 3.14(b). Це скорочує час сухого травлення для видалення кремнію і, таким чином, зменшує ненавмисне мікроскопічне сухе травлення кремнезему. Температура кожного етапу виготовлення також суворо контролюється в межах $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Це включає як температуру сухого травлення, так і температуру джерела XeF_2 , обидва з яких керуються сервоприводом для забезпечення відтворюваних результатів. Важливість останнього контролю температури полягає в тому, що він дозволяє більш точно визначити (і максимізувати) підрізання кремнію для зменшення оптичних втрат. Кінцева межа підрізання визначається вигином кремнезему. Нарешті, мікрорезонатори з кремнезему відпалюють 2–3 рази протягом 20 годин у надчистому азотному середовищі при 1000°C для

видалення води та зняття об'ємного напруження у структурі звуженого кремнезему.

На рисунку 3.14 (а) Зображення мікрорезонатора з $FSR \sim 22\text{GHz}$ і діаметром 3 мм. Пунктирна біла лінія позначає поперечний переріз, зображений на рисунку b. (b) Поперечний переріз SEM з вузькою структурою траншеї та зрізом 120 мкм. (c) Ліва (права) панель, основний розподіл електричного поля в режимі TE (TM) з чисельного моделювання. Стрілки вказують вектори електричного поля.

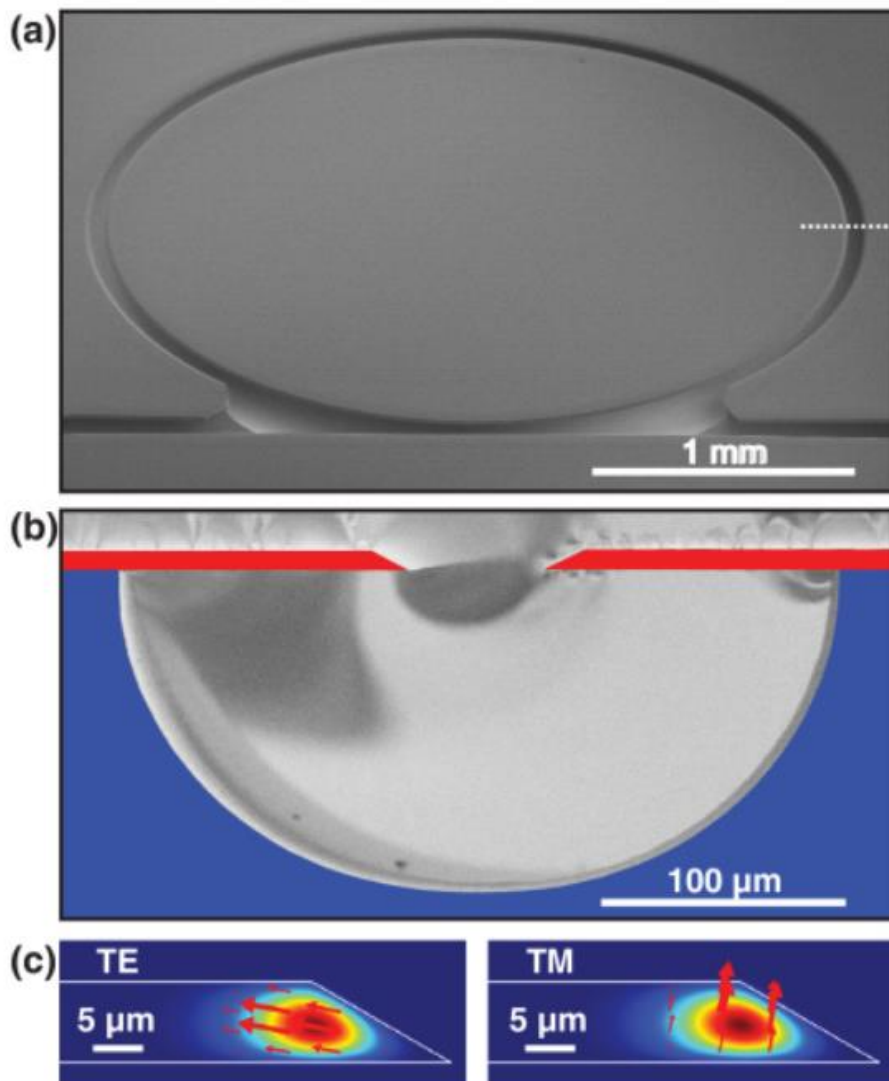


Рисунок 3.14 - Зображення мікрорезонаторів та профілів режимів [19]

Власні коефіцієнти добротності (Q_0) вимірюються за допомогою оцінки характеристики ширини резонансної смуги пропускання (з урахуванням ефектів хвилеводного навантаження) та за допомогою вимірювань резонаторного кільця. Зв'язок з резонаторами за допомогою конічного волоконного роз'єднувача та поляризаційного контролера використовувався для збудження мод, які переважно є ТЕ або ТМ (рис. 3.14(с)). Негативний ефект, який присутній у такій конфігурації – механічні вібрації. Щоб придушити ці вібрації, можна розташувати конічні волокна на верхній частині клинового краю, що контактує з поверхнею кремнезему. В результаті стан зв'язку стає стабільним, не викликаючи значних втрат на розсіювання в резонаторі. У той же час величину зчеплення можна легко контролювати, просто переміщаючи місце контакту конуса до резонатора. У результаті регулювання відстані між конусним хвилеводом і розташуванням оптичної моди [див. рис. 3.14(с)], можливо таким чином регулювати навантаження на резонатор хвилеводом.

Виміряна власна Q_0 залежно від діаметра резонатора зображена на рисунку 3.15а. FSR, діаметри резонаторів і значення Q_0 вказуються в мільйонах (М). Червона пунктирна лінія відповідає тонкості $\mathcal{F}=60\,000$. (b) Ліве зображення: вимірювання ширини смуги пропускання пристрою з FSR 10 ГГц на довжині хвиль 1585 нм. Верхня траса — резонансна передача (сині точки) з підгонкою лоренційської лінії (червона крива). Ширина смуги пропускання становить 220 кГц, що відповідає власному $Q_0=1130$ М і завантаженому $Q_L=860$ М. Нижня траса – це калібрування частоти (чорні точки) інтерферометром Маха-Цендера (FSR 5,979 МГц) з синусоїдальною підгонкою (блакитна крива) . Праве зображення: вимірювання параметрів приладу у зворотному включенні (синій графік), виміряного на лівому зображенні. Підгонка експоненціального розпаду показана червоним кольором. Час життя фотона становить 704 нс, що відповідає навантаженому $Q_L\approx 840$ М.

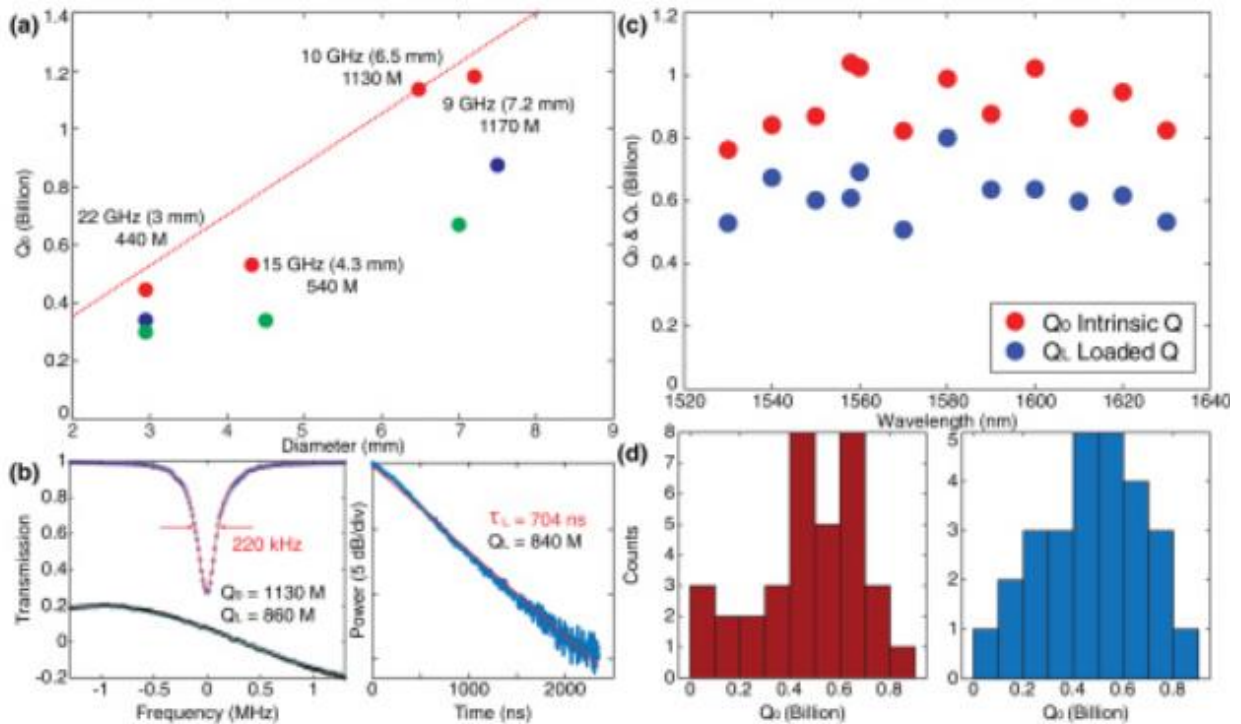


Рисунок 3.15 - Вимірювання Q. (a) Виміряна власна Q_0 залежно від діаметра резонатора. (c) Дані внутрішнього Q_0 та навантаженого Q_L , виміряні від 1530 нм до 1630 нм. (d) Розподіл значень Q_0 , виміряних з різних сімейств мод для поляризації моди TE (ліве зображення) і TM (праве зображення), виміряні при однаковому FSR [19]

На рисунку 3.15 (a) зображені найвищі власні коефіцієнти добротності, отримані для кількох діаметрів пристрою. Два розміри пристроїв мають Q-фактор понад 1,1 мільярда. Типове спектральне вимірювання проілюстровано на лівому зображенні рис. 3.14 (b), де показано спектр передачі для пристрою, що має вільний спектральний діапазон (FSR) приблизно 10 ГГц (діаметр 6,5 мм). Виміряно, що повна ширина смуги пропускання на половині від максимуму (при 1585 нм) становить 220 кГц, що відповідає завантаженій добротності $Q_L=860$ мільйонів (M). Вимірюючи глибину передачі, визначається добротність зв'язку $Q_c=3,6$ мільярдів, з якої впливає

внутрішня $Q_0=1,1$ мільярда (примітка: $1/Q_L=1/Q_0+1/Q_c$). Зростаюча залежність власної добротності зі збільшенням діаметра резонатора раніше спостерігалася в структурі клиноподібного резонатора і є результатом втрат на повороті, які обмежені поверхневим розсіюванням. Для подальшого підтвердження результатів Q також було виконано кільцеве зниження потужності резонатора. Дані відгуку з того самого пристрою, виміряні при режимі роботи, зображеному на лівому графіку на рис. 3.15 (b), показані на правому зображенні на рис. 3.15 (b). Враховуючи, затухання у зворотньому режимі, час життя фотона складає близько 704 нс, що відповідає $Q_L=840$ М і тісно узгоджується з навантаженою добротністю, визначеною через смугу пропускання. Раніше досягнуті високоефективні результати для кремнеземних резонаторів також зображені як сині та зелені крапки на рис. 3.15(a), що означає, що у роботі [19] було показано найефективніший спосіб виготовлення мікрокілець. Варто також зазначити, що добротність $Q_0>1$ мільярда підтримувалася протягом більше ніж півроку завдяки тому, що резонатори поміщені в очищену коробку з оргскла. Пристрої мають надвисоку добротність у широкій спектральній смузі, як показано на рис. 3.15 (c), де виміряні внутрішні та навантажені коефіцієнти добротності в резонаторі з FSR 9 ГГц та діаметром 7,3 мм є актуальними в залежності від довжини хвилі.

У типовому резонаторі є десятки мод з різних сімейств мод і поляризацій, які мають надвисокі коефіцієнти добротності. Гістограми виміряних значень Q_0 для сімейств режимів TE (ліве зображення) і TM (праве зображення) у резонаторі з FSR 9 ГГц (на довжині хвилі близько 1550 нм) наведені на рис. 3.15 (d). Коефіцієнти добротності на гістограмах вимірюються шляхом підгонки ширини лінії на спектрах, отриманих за допомогою швидкого частотного сканування діодного лазера із зовнішнім резонатором. В результаті виміряні значення Q , ймовірно, дещо нижчі, ніж фактичні значення Q . Для подальшого підтвердження вимірювань Q

параметричний поріг коливань також був виміряний за допомогою експериментальної установки на рис. 3.16 (а). Як показано на рис. 3.10 (b), порогове значення субмілліват (0,946 мВт) було виміряно за допомогою пристрою з FSR 9 ГГц при 1550 нм. Потужність чистої частотної гребінки також була виміряна та зображена. На вставці до рис. 3.16 (b) показано як відфільтрований, так і невідфільтрований спектр при входній потужності 1,12 мВт.

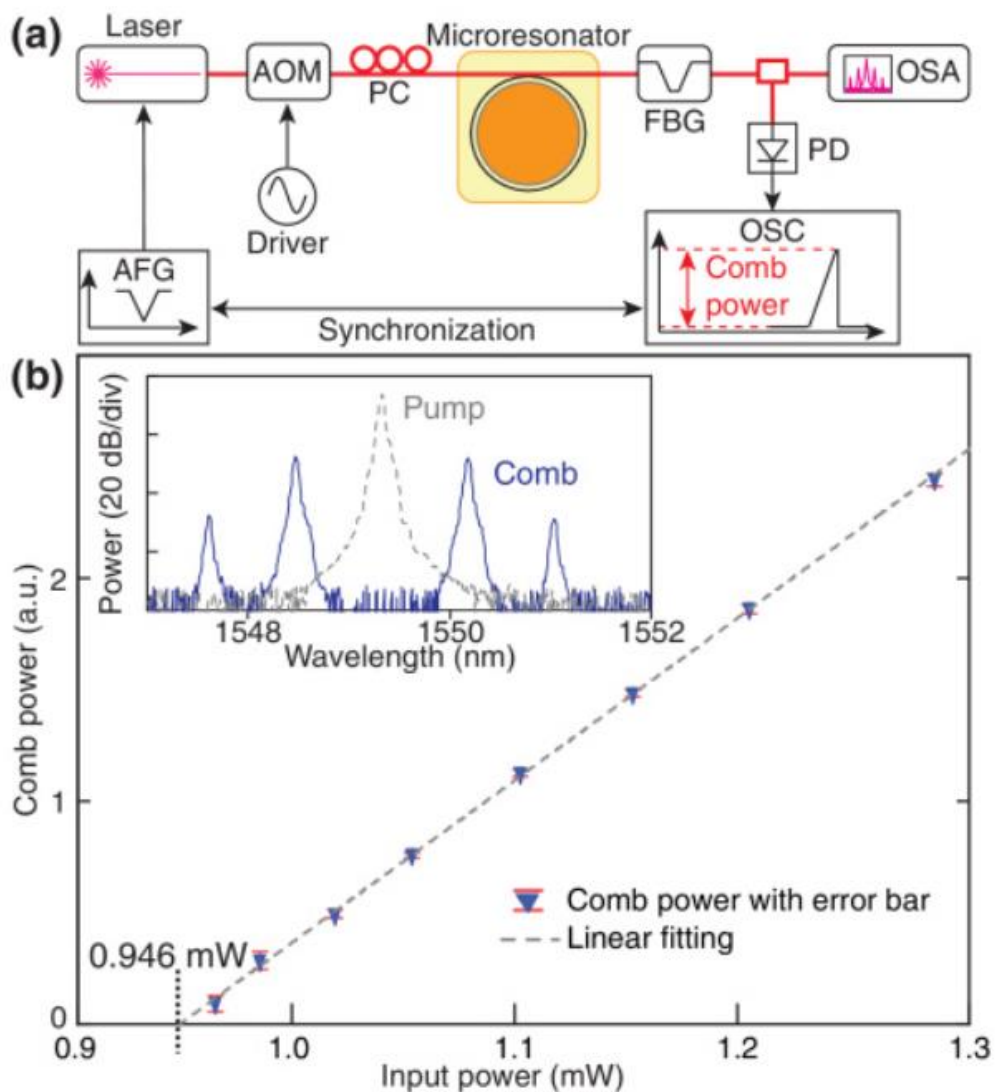


Рисунок 3.16 - (а) Експериментальна установка. (b) Графік залежності потужності параметричного коливання від входньої потужності [19]

Субміліватний поріг параметричного коливання, був виміряний та проаналізований в пристрої з FSR 9 ГГц, зображеному на рисунку 3.16а, де АОМ – акустооптичний модулятор; РС – поляризаційний контролер; FBG – волоконний фільтр Брегга; PD – фотодетектор; OSA – оптичний аналізатор спектру; OSC – осцилограф; AFG – генератор довільних сигналів. Графік залежності потужності параметричного коливання від вхідної потужності на довжині хвиль 1550 нм, що показує поріг коливань 0,946 мВт зображено на рисунку 3.16а. Вставка: спектр параметричних коливань (суцільний синій) і відфільтроване джерело (пунктирно-сірий) при вхідній потужності 1,12 мВт. [19]

Підсумовуючи, оптимізувавши методи виготовлення та параметри елементів, використовуваних для виготовлення мікрорезонаторів, можливо досягти коефіцієнтів добротності для схеми на чіпі у понад 1,1 мільярда в кремнієвих мікрорезонаторах. Крім того, окрім чистих структур кремнезему існує значний прогрес у структурах з надвисокою добротністю, де кремнезем забезпечує покриття для хвилеводів з нітриду кремнію тонкого шару. У цих структурах важливо розуміти межі втрат, які накладає кремнезем на загальну конструкцію.

3.4 Висновки з розділу 3

Технології кремнієвої фотоніки забезпечують масштабовані застосування для задоволення вимог як щодо високої пропускну здатності, так і до низької потужності для сучасних високопродуктивних обчислювальних та телекомунікаційних систем. Розвиток і активне застосування WDM систем відбувається впродовж останніх 30 років, та на даний час не існує більш перспективних середовищ передачі даних, з огляду на можливості щодо відстаней та швидкостей передачі. Дослідження оптичних мікрорезонаторів може надати додаткові джерела для покращення

показників роботи схем оптичного зв'язку, як з погляду на можливість створення високопродуктивних систем так і з огляду на зменшення споживаної енергії, що є важливим фактором у сучасний час.

У цьому розділі було представлено великий перелік прикладів використання кільцевих резонаторів та можливості щодо підвищення ефективності систем оптичного зв'язку, шляхом застосування мікрорезонаторів у таких системах. Найкращі результати показують схеми, у яких мікрорезонатори застосовані у якість селективних елементів, як для оптичних фільтрів, так і у схемах з хвильовим мультиплексуванням для побудови мультиплексорів/демультиплексорів.

ВИСНОВКИ

Кремнієва фотоніка та оптичні мікрорезонатори є складовими частинами широкого спектру важливих застосувань у галузях квантової електродинаміки, зондування, оптичних телекомунікацій та фотонних інтегральних схем. Найбільші перспективи застосування та розвитку зумовлені фізичними процесами, які лежать у основі мікрокільцевих резонаторів. Тож розвиток та пошук нових умов та способів застосування є актуальним завданням впродовж багатьох років.

Добротності порядку мільярда Q та можливість створення інтегральних схем з великою щільністю пристроїв у мікроновому масштабі є особливостями, які визначають потреби у розвитку технологій проектування та виготовлення пристроїв, які складаються з мікрокільць. Найпоширенішим застосуванням наразі є використання мікрорезонаторів у якості оптичних фільтрів та розгалужувачів, хоча їхній потенціал є набагато ширшим. Високу цікавість представляють можливості щодо побудови оптичних мультимплексорів і демультимплексорів з використанням РШГ.

У даній роботі було продемонстровано метод дослідження основної характеристики оптичних мікрорезонаторів – амплітудно-частотної характеристики, показано способи її розрахунку та систематизовано результати попередніх досліджень. Проведено аналіз сучасних публікацій, наукових джерел та монографій на тему моделювання оптичних мікрорезонаторів для систем зв'язку.

Проаналізовано можливість застосування систем з мікрокільць, показано їх переваги та недоліки. Вказано на можливі способи подолання проблем, які не були розв'язаними на початкових етапах дослідження оптичних мікрорезонаторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Підгурська Т.В. «Двосмугові фільтри на діелектричних резонаторах з вищими типами коливань»: автореф, Київ, 2016.
2. Kerry J. Vahala «Optical microcavities» NATURE | VOL 424 (6950) | 14 AUGUST 200 p.839-846 DOI:10.1038/nature01939
3. M. Gomilsek, «Whispering gallery modes» University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Physics, Ljubljana, 2011.
4. Сидоров А. И., «Основы фотоники: физические принципы и методы преобразования оптических сигналов в устройствах фотоники». Учебное пособие. СПб.: ФГБОУ ВПО «СПб НИУ ИТМО», 2014 г. – 148 стр.
5. Городецкий М. Л. «Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью» — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 416 с.
6. Ewelina Obrzud, Steve Lecomte, and Tobias Herr «Temporal Solitons in Microresonators driven by Optical Pulses», Nature Photonics volume 11, pages 600–607 (2017)
7. Attila Fülöp, Mikael Mazur, Abel Lorences-Riesgo, Óskar B. Helgason, Pei-Hsun Wang, Yi Xuan, Dan E. Leaird, Minghao Qi, Peter A. Andrekson, Andrew M. Weiner & Victor Torres-Company «High-order coherent communications using modelocked dark-pulse Kerr combs from microresonators» Nature COMMUNICATIONS 2018. Available: <https://www.nature.com/articles/s41467-018-04046-6.pdf>
8. M. A. Hernández-Acosta, M. Trejo-Valdez, J. H. Castro-Chacón, C. R. Torres-San Miguel, H. Martínez-Gutiérrez, C. Torres-Torres «Chaotic signatures of photoconductive $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanostructures explored by Lorenz attractors». New Journal of Physics 23 February 2018. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/aaad41>
9. Domonik G. Rabus «Integrated Ring Resonators» The Compendium With 243 Figures and 8 Tables, 2007. — 258 pages.

10. Savchenkov A. A., Ilchenko V. S., Handley T., Maleki L. «Second-order filter response with series-coupled silica microresonators» // IEEE Photonics Technology Lett. V. 15(4), 2003. P. 543–544.
11. T. Barwicz «Accurate Nanofabrication Techniques for High-Index-Contrast Microphotonic Devices», 2005. — 258 pages.
12. Jacob Scheuer, Joyce K. S. Poonb, George T. Paloczic and Amnon Yarivb «Coupled Resonator Optical Waveguides (CROWs) »
13. Wim Bogaerts, Peter De Heyn, Thomas Van Vaerenbergh, Katrien De Vos, Shankar Kumar Selvaraja, Tom Claes, Pieter Dumon, Peter Bienstman, Dries Van Thourhout, Roel Baets «Silicon microring resonators», Laser Photonics Rev. 6, No. 1, 47–73 (2012) / DOI 10.1002/lpor.201100017
14. Пащенко А.І., Трубін О.О. «Моделювання 2-резонаторного Add-Drop фільтра на мікрокільцевих резонаторах», 2021, Київ
15. Trubin A.A. «Lattices of Dielectric Resonators», Springer International Publishing Switzerland. Series in Advanced Microelectronics»53, 2016.
16. Trubin A. A. «Electrodynamic modeling of Add-Drop filters on optical microresonators», 2019, pp.30–36, DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12019.30-36>.
17. Trubin A. A. «Calculation parameters of Add-Drop filters on optical microresonators», <http://conferenc.its.kpi.ua/2019/paper/view/15706/8569>.
16. Квітка А. С., Трубін О.О. «Розрахунок параметрів оптичного фільтру для волоконно-оптичних мереж», 2019, Київ
17. Пащенко А. І. «Технології передачі даних солітонами на мікрокільцевих резонаторах», 2020, Київ
18. Dominik. G. Rabus «Realization of Optical Filters using Ring Resonators with integrated Semiconductor Optical Amplifiers in GaInAsP / InP», 2002, pp.141
19. Lue Wu, Heming Wang, Qifan Yang, Qing-xin Ji, Boqiang Shen, Chengying Bao, Maodong Gao, and Kerry Vahala «Greater than one billion Q

factor for on-chip microresonators» *Optics Letters* Vol. 45, Issue 18, pp. 5129-5131 (2020) <https://doi.org/10.1364/OL.394940>

20. Patrick Steglich, Marcel Hülsemann, Birgit Dietzel, Andreas Mai «Optical Biosensors Based on Silicon-On-Insulator Ring Resonators: A Review», *Molecules* 2019, 24, 519

21. Hao Jia, Lei Zhang, Jianfeng Ding, Lingchen Zheng, Chen Yuan, and Lin Yang «Microring modulator matrix integrated with mode multiplexer and demultiplexer for on-chip optical interconnect», January 2017 *Optics Express* 25(1):422

22. Chin-Hui Chen, Cheng Li, Ayman Shafik, Marco Fiorentino, Patrick Chiang, Samuel Palermo, and Ray Beausoleil «A WDM silicon photonic transmitter based on carrier-injection microring modulators», *Optical Interconnects Conference*, pp. 121-122, (2014)

23. T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, and T. J. Kippenberg «Temporal solitons in optical microresonators», *Nat. Photon.* 8, 145–152 (2014).

24. Ivan Shubin, Xuezhe Zheng, Hiren Thacker, Stevan S. Djordjevic, Shiyun Lin, Philip Amberg, Jin Yao, Jon Lexau, Eric Chang, Frankie Liu, Namseok Park, Kannan Raj, Ron Ho, John E. Cunningham, and Ashok V. Krishnamoorthy «Microring-based multi-chip WDM photonic module», *Optics Express* Vol. 23, Issue 10, pp. 13172-13184 (2015)

25. W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh, K. De Vos, S. Kumar Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. Van Thourhout, and R. Baets «Silicon microring resonators», *Laser Photon. Rev.* 6(1), 47–73 (2012)

26. Jalali, B.; Fathpour, S. «Silicon Photonics», *J. Lightwave Technol.* 2006, 24, 4600–4615

27. Q. Xu, B. Schmidt, J. Shakya, and M. Lipson «Cascaded silicon microring modulators for WDM optical interconnection», *Opt. Express* 14, 9431-9436 (2006).

28. Nawrocka M.S, Liu T., Wang X., and Panepucci R.R. «Tunable silicon microring resonator with wide free spectral range», *Appl PhysLett.* 2006; 89(7).

ДОДАТОК А ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ
ДВОРЕЗОНАТОРНИХ ADD-DROP ФІЛЬТРІВ У ПЗ МАТНСАД

$$\begin{aligned}
 QR &:= 10^6 & f0 &:= 200 & j &:= \sqrt[2]{-1} \\
 k_{1e} &:= 2 \cdot 10^{-4} & k_{1o} &:= 2.5 \cdot 10^{-4} & k_{2e} &:= 2 \cdot 10^{-4} & k_{2o} &:= 2.5 \cdot 10^{-4} & k_{os} &:= 10^{-7} \\
 k_{12e} &:= 2 \cdot 10^{-4} & k_{12o} &:= -3 \cdot 10^{-4} & k_{21e} &:= 2 \cdot 10^{-4} & k_{21o} &:= -3 \cdot 10^{-4} \\
 fn &:= f0 - 0.25 & fk &:= f0 + 0.25 & h &:= 0.0001 \\
 I &:= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\
 f &:= fn, fn + h..fk
 \end{aligned}$$

$$\lambda := \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} j(k_{1e} + k_{2e}) - \sqrt[2]{4 \cdot (k_{12e} \cdot k_{12e}) - (k_{1e} - k_{2e})^2} \\ j(k_{1e} + k_{2e}) + \sqrt[2]{4 \cdot (k_{12e} \cdot k_{12e}) - (k_{1e} - k_{2e})^2} \\ j(k_{1o} + k_{2o}) - \sqrt[2]{4 \cdot (k_{12o} \cdot k_{12o}) - (k_{1o} - k_{2o})^2} \\ j(k_{1o} + k_{2o}) + \sqrt[2]{4 \cdot (k_{12o} \cdot k_{12o}) - (k_{1o} - k_{2o})^2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 Im\lambda &:= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} (k_{1e} + k_{2e}) \\ (k_{1e} + k_{2e}) \\ (k_{1o} + k_{2o}) \\ (k_{1o} + k_{2o}) \end{bmatrix} & Re\lambda &:= \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} -\sqrt[2]{4 \cdot (k_{12e} \cdot k_{12e}) - (k_{1e} - k_{2e})^2} \\ \sqrt[2]{4 \cdot (k_{12e} \cdot k_{12e}) - (k_{1e} - k_{2e})^2} \\ -\sqrt[2]{4 \cdot (k_{12o} \cdot k_{12o}) - (k_{1o} - k_{2o})^2} \\ \sqrt[2]{4 \cdot (k_{12o} \cdot k_{12o}) - (k_{1o} - k_{2o})^2} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$B := \begin{bmatrix} (j \cdot k_{2e} - \lambda_0) \cdot ((j \cdot k_{1o} - \lambda_0) \cdot (j \cdot k_{2o} - \lambda_0) - k_{21o} \cdot k_{12o}) & (j \cdot k_{2e} - \lambda_1) \cdot ((j \cdot k_{1o} - \lambda_1) \cdot (j \cdot k_{2o} - \lambda_1) - k_{21o} \cdot k_{12o}) \dots \\ \dots & \dots \\ (-k_{12e}) \cdot ((j \cdot k_{1o} - \lambda_0) \cdot (j \cdot k_{2o} - \lambda_0) - k_{21o} \cdot k_{12o}) & (-k_{12e}) \cdot ((j \cdot k_{1o} - \lambda_1) \cdot (j \cdot k_{2o} - \lambda_1) - k_{21o} \cdot k_{12o}) \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots (j \cdot k_{2o} - \lambda_2) \cdot ((j \cdot k_{1e} - \lambda_2) \cdot (j \cdot k_{2e} - \lambda_2) - k_{12e} \cdot k_{12e}) & (j \cdot k_{2o} - \lambda_3) \cdot ((j \cdot k_{1e} - \lambda_3) \cdot (j \cdot k_{2e} - \lambda_3) - k_{12e} \cdot k_{12e}) \\ \dots & \dots \\ \dots (-k_{12o}) \cdot ((j \cdot k_{1e} - \lambda_2) \cdot (j \cdot k_{2e} - \lambda_2) - k_{12e} \cdot k_{12e}) & (-k_{12o}) \cdot ((j \cdot k_{1e} - \lambda_3) \cdot (j \cdot k_{2e} - \lambda_3) - k_{12e} \cdot k_{12e}) \end{bmatrix}$$

$$Q(f) := (Im\lambda) \cdot QR + \frac{f}{f0} \cdot I + j \cdot 2 \cdot QR \cdot \left(\left(\frac{f}{f0} - 1 \right) \cdot I - \frac{Re\lambda}{2} \right)$$

$$T_{11}(f) := k_{1e} \cdot \frac{QR}{(B_{0,0} \cdot B_{2,1} - B_{2,0} \cdot B_{0,1})} \cdot \left(-B_{0,0} \cdot \frac{B_{2,1}}{Q(f)_0} + B_{2,0} \cdot \frac{B_{0,1}}{Q(f)_1} \right) -$$

$$\begin{aligned}
& - \left(k_{10} \cdot \frac{QR}{(B_{1,2} \cdot B_{3,3} - B_{3,2} \cdot B_{1,3})} \cdot \left(-B_{3,3} \cdot \frac{B_{1,2}}{Q(f)_2} + B_{3,2} \cdot \frac{B_{1,3}}{Q(f)_3} \right) \right) \\
T_{12}(f) & := 1 + k_{1e} \cdot \frac{QR}{(B_{0,0} \cdot B_{2,1} - B_{2,0} \cdot B_{0,1})} \cdot \left(-B_{0,0} \cdot \frac{B_{2,1}}{Q(f)_0} + B_{2,0} \cdot \frac{B_{0,1}}{Q(f)_1} \right) + \\
& 1 + k_{10} \cdot \frac{QR}{(B_{1,2} \cdot B_{3,3} - B_{3,2} \cdot B_{1,3})} \cdot \left(-B_{3,3} \cdot \frac{B_{1,2}}{Q(f)_2} + B_{3,2} \cdot \frac{B_{1,3}}{Q(f)_3} \right) \\
T_{13}(f) & := \sqrt[2]{k_{1e} \cdot k_{2e}} \cdot \frac{QR}{(B_{0,0} \cdot B_{2,1} - B_{2,0} \cdot B_{0,1})} \cdot \left(-B_{2,0} \cdot \frac{B_{2,1}}{Q(f)_0} + B_{2,0} \cdot \frac{B_{2,1}}{Q(f)_1} \right) + \\
& \sqrt[2]{k_{10} \cdot k_{20}} \cdot \frac{QR}{(B_{1,2} \cdot B_{3,3} - B_{3,2} \cdot B_{1,3})} \cdot \left(-B_{3,3} \cdot \frac{B_{3,2}}{Q(f)_2} + B_{3,2} \cdot \frac{B_{3,3}}{Q(f)_3} \right) \\
T_{14}(f) & := \sqrt[2]{k_{1e} \cdot k_{2e}} \cdot \frac{QR}{(B_{0,0} \cdot B_{2,1} - B_{2,0} \cdot B_{0,1})} \cdot \left(-B_{2,0} \cdot \frac{B_{2,1}}{Q(f)_0} + B_{2,0} \cdot \frac{B_{0,1}}{Q(f)_1} \right) - \\
& - \left(\sqrt[2]{k_{10} \cdot k_{20}} \cdot \frac{QR}{(B_{1,2} \cdot B_{3,3} - B_{3,2} \cdot B_{1,3})} \cdot \left(-B_{3,3} \cdot \frac{B_{3,2}}{Q(f)_2} + B_{3,2} \cdot \frac{B_{3,3}}{Q(f)_3} \right) \right)
\end{aligned}$$

$$S_{11}(f) := 10 \cdot \log \left(|T_{11}(f)|^2 \right) \quad S_{12}(f) := 10 \cdot \log \left(|T_{12}(f)|^2 \right)$$

$$S_{13}(f) := 10 \cdot \log \left(|T_{13}(f)|^2 \right) \quad S_{14}(f) := 10 \cdot \log \left(|T_{14}(f)|^2 \right)$$