Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИЙ СЕНСОР НА ОСНОВІ ІНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІм-19-1
Россохатська А.С.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Одаренко Є. М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Мачехін Ю. П.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«____»_____ 20 ___ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Россохатській Анастасії Сергіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Фотонно-кристалічний сенсор на основі інтерферометра Маха-Цендера

затверджена наказом по університету від « 27 » жовтня 2020 р. № 1450 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Конструкція інтерферометра Маха-Цендера, дисперсійні властивості фотонного кристалу, довжина хвилі випромінювання λ=1550 нм, конструкція фотонно-кристалічного хвилевода.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Аналітичний огляд інтерференційних вимірювань. 2 Аналіз фотонно-кристалічного інтерферометра Маха-Цендера. 3 Характеристики передачі енергії через інтерферометр. 4 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)
Схема оптична структурна (Л1) – установка експериментальна
Кресленик деталі основа підставки під лазер—А4 – 1шт.
Кресленик деталі опора підставки під лазер—А4 – 1шт.
Демонстраційний матеріал — 16 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про фотонні кристали та їх характеристики	02.11.20 – 08.11.20	Виконано
2	Дослідження фотонних кристалів	09.11.20 – 15.11.20	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик фотонно-кристалічних сенсорів на основі інтерферометра Маха-Цендера	16.11.20 – 20.11.20	Виконано
4	Порівняння характеристик різних структур	21.11.20 – 25.11.20	Виконано
5	Аналіз отриманих результатів розрахунків	26.11.20 – 29.11.20	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	30.11.20 – 05.12.20	Виконано
7	Оформлення графічної та демонстраційної частин	06.12.20 – 08.12.20	Виконано
8	Проходження нормоконтролю та отримання рецензії на роботу	09.12.20 – 13.12.20	Виконано
9	Підготовка та захист атестаційної роботи	14.12.20 – 16.12.20	

Дата видачі завдання 2 листопада 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. кафедри ФОЕТ Одаренко Є. М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 46 с., 26 рис., 2 додатки, 11 джерел.

ІНТЕРФЕРОМЕТР, СЕНСОР, ФОТОННИЙ КРИСТАЛ, ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНИЙ ІНТЕРФЕРОМЕТР МАХА-ЦЕНДЕРА, БІОСЕНСОР, ФОТОН.

Об’єкт дослідження — інтерферометр Маха-Цендера.

Метою атестаційної роботи є закріплення знань, що стосуються основних фізичних процесів, які мають місце у інтерферометрах, будови цих приладів, принципу їх дії, основних параметрів і характеристик, розроблення фотонно-кристалічного сенсора на основі інтерферометра Маха-Цендера та розрахунок його основних параметрів.

Методи дослідження — комп’ютерне моделювання.

У роботі були розглянуті сенсори на основі фотонно-кристалічного інтерферометра Маха-Цендера, характеристики передачі енергії через інтерферометр.

ABSTRACT

Explanatory note of attestation work: 46 p., 26 fig., 2 applications, 11 sources.

INTERFEROMETER, SENSOR, PHOTON CRYSTAL, PHOTON-CRYSTAL INTERFEROMETER MACHA-CENTER, BIOSENSOR, PHOTON.

The object of the study is the Mach-Zendera interferometer.

The purpose of attestation work is to consolidate the knowledge relating to the basic physical processes that take place in interferometers, the structure of these devices, the principle of their operation, the basic parameters and characteristics, the development of the photon crystalline interferometer Maha-Zender, and the calculation of its basic parameters.

Methods of research — computer simulation.

The sensors based on the Mach-Zender photonic-crystalline interferometer and the characteristics of energy transfer through the interferometer were considered in the work.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы: 46 с., 26 рис., 2 приложения, 11 источников.

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ, СЕНСОР, ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ, ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР МАХА-ЦЕНДЕРА, БИОСЕНСОР, ФОТОН.

Объект исследования — интерферометр Маха-Цендера.

Целью аттестационной работы является закрепление знаний, касающихся основных физических процессов, которые имеют место в интерферометрах, строения этих приборов, принципа их действия, основных параметров и характеристик, разработка фотонно-кристаллического интерферометра Маха-Цендера, и расчет его основных параметров.

Методы исследования — компьютерное моделирование.

В работе были рассмотрены сенсоры на основе фотонно-кристаллического интерферометра Маха-Цендера, характеристики передачи энергии через интерферометр.

ЗМІСТ

Вступ……... 8
1 Аналітичний огляд інтерференційних вимірювань ……..... 9
1.1 Електрооптичні модулятори за схемою інтерферометра Маха-Цендера……. 9
1.1.1 Залежність вихідної оптичної потужності модулятора від прикладеної до електродів напруги 12
1.1.2 Модуляція напругою $U_1 = U_M \sin \omega t$ без зміщення робочої точки…….. 14
1.2 Біосенсор на основі інтерферометра Маха-Цендера ……..... 19
2 Аналіз фотонно-кристалічного інтерферометра Маха-Цендера ……. 27
2.1 Аналіз результатів чисельних розрахунків……..... 27
2.2 Розрахунок характеристик сенсора …… 33
Висновки …….. 45
Перелік джерел посилання ……. 46
Додаток А Графічний матеріал……... 47
Додаток Б Демонстраційний матеріал…….. 52

ВСТУП

У аналоговій електроніці і радіотехнічних системах модуляція здійснюється за допомогою транзистора, що працює в нелінійному режимі. Отримання сигналів з амплітудною і фазовою (кутовою) модуляцією пов'язано з операцією множення двох сигналів. На виході транзисторного перетворювача спектр сигналу містить комбінаційні частоти, виключення яких з спектру модульованого сигналу викликає труднощі. Перетворення сигналів в оптичних пристроях має ряд переваг. Основні — лінійні і більшстабільні характеристики перетворень сигналів.

В системах оптичного зв'язку першим і найпоширенішим є бінарний амплітудний формат модуляції. Його отримують шляхом прямої модуляції струму накачування напівпровідникового лазера. При прямій модуляції змінюється вихідна потужність. Істотне збільшення можливостей оптичних систем зв'язку дозволяє використовувати передавачі на основі напівпровідникових лазерів з безперервним накачуванням і зовнішньою модуляцією.

Великі можливості надають електрооптичні модулятори по схемі інтерферометра Маха-Цендера. Електрооптичні модулятори Маха-Цендера (Mach-Zehnder) застосовуються в аналогових і цифрових системах комунікації, волоконно-оптичних датчиках. Використання електрооптичних модуляторів дозволяє істотно поліпшити технічні характеристики трактів передачі аналогових і цифрових сигналів, забезпечити електромагнітну сумісність ліній передачі інформації. Крім того, вони можуть застосовуватися в радіотехнічних пристроях.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ

1.1 Електрооптичні модулятори за схемою інтерферометра Маха-Цендера

Електрооптичний модулятор на базі інтерферометра Маха-Цендера на дискретних елементах наведено на рис. 1.1 [1]. Він призначений для модуляції випромінювання потужного лазера. Вихідний монохроматичний світловий пучок I потрапляє на перший дільник світлового потоку 1 і ділиться на два однакових пучка I_1 і I_2. Ці два пучка направляються в електрооптичні елементи 3 з монокристалічного матеріалу з лінійним електрооптичним ефектом, в яких при подачі на електроди 4 керуючого напруги відбувається зміна показника заломлення. Завдяки цьому світлові пучки набувають взаємну різницю фаз φ. Світлові пучки після електрооптичних елементів 3 потрапляють в з'єднувач розділених пучків світла (напівпрозоре дзеркало *2*) і потім на фотоприймач (ФП).

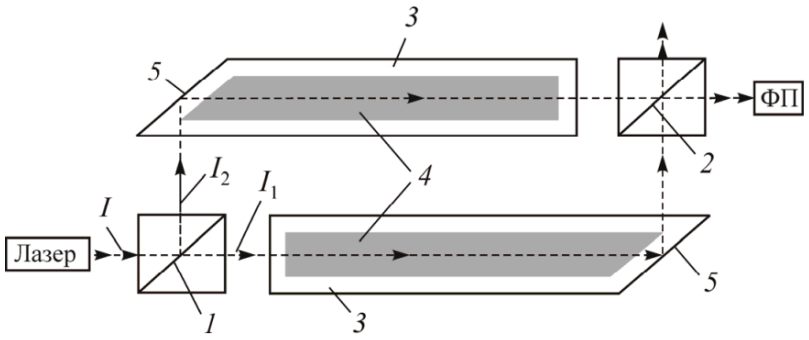


Рисунок 1.1 — Електрооптичний модулятор по схемі інтерферометра Маха-Цендера на дискретних елементах

Модулятор включає такі елементи: 1 — дільник світлового потоку на два пучка світла; 2 — з'єднувач розділених пучків світла; 3 — електрооптичні елементи; 4 — електроди; 5 — відбиваючі елементи; ФП — фотоприймач; I_1

та I_2 — світлові пучки в каналах модулятора.

Без модуляції сигнал на виході фотоприймача з лінійною характеристикою пропорційний інтенсивності падаючого на нього випромінювання:

$$I = I_0 + I_m \cos\varphi, \tag{1.1}$$

де I_0 та I_m — постійна і змінна складові інтенсивності випромінювання;

φ — різниця фаз інтерферуючих пучків I_1 та I_2.

У разі рівності інтенсивностей I_1 та I_2 дорівнюватимуть $I_0 = I_m$. Тоді $I = I_m(1+\cos\varphi)$, а напруга фотоприймача U дорівнює:

$$U = U_m(1+\cos\varphi). \tag{1.2}$$

Типовий електрооптичний модулятор Маха-Цендера в інтегральному виконанні схематично представлений на рис. 1.2 [2]. В якості матеріалу для його створення використовують ніобат літію ($LiNbO_3$). На поверхні цього матеріалу створюють необхідну оптичну хвилеводну конфігурацію. Безперервне випромінювання лазера з інтенсивністю I_O проходить через *Y*-розгалужувач і далі розповсюджується по двох незалежних каналах (плечах інтерферометра). Для керування характеристиками випромінювання між світловодами напилюються електроди для постійної напруги.

На першу групу електродів подають модулюючу напругу $U_M = U_m \sin\omega t$ та напругу, що несе інформацію, U_I (аналоговий або бінарний сигнал). На другу групу електродів подають напругу зміщення робочої точки U_O. Електричний сигнал викликає зміни показника заломлення світлового каналу. Напруги прикладені так, щоб прискорити рух лазерного випромінювання в одному плечі і уповільнити в іншому. Це дозволяє зменшити в два рази величину керуючих напруг. Лазерне випромінювання в каналах поширюється

з різними швидкостями і набуває різниці фаз φ. Потім їх складання Y-з'єднувачем викликає на виході інтерференційну зміну потужності випромінювання.

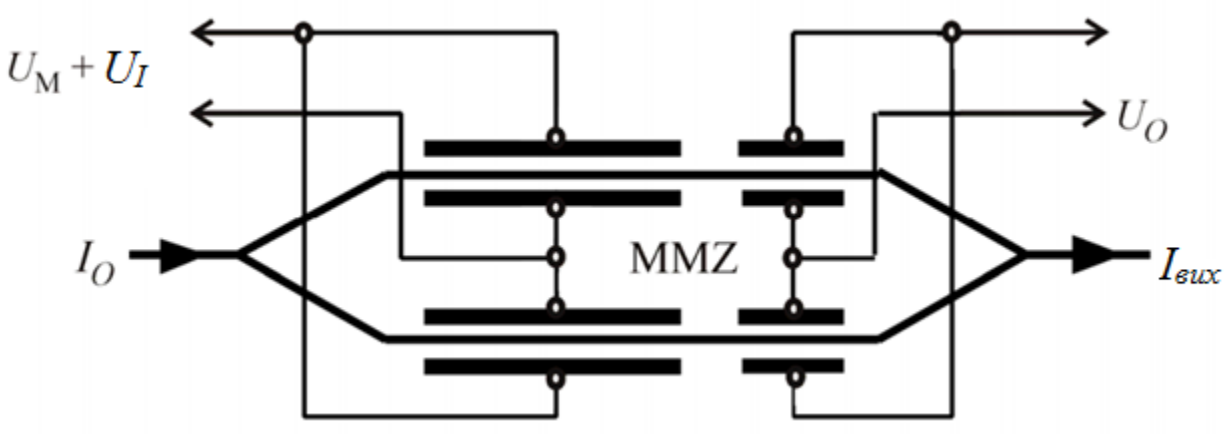


Рисунок 1.2 — Схема електрооптичного модулятора Маха-Цендера в інтегральному виконанні

На рисунку показані такі позначення: I_O, $I_{вих}$ — лазерне випромінювання на вході і виході модулятора; U_M — модулююча напруга, $U_M = U_m \sin \omega t$; U_I — інформаційна напруга; U_O — напруга зсуву робочої точки

В цей час електрооптичні модулятори Маха-Цендера на основі кристалів ніобата літію $LiNbO_3$ виробляються для довжин хвиль лазера 800, 1060 1300, 1550 і 2000 нм [3]. Діапазон модуляції — від низьких частот до 40 ГГц. Швидкість модуляції цифрових сигналів від 12,5 Гбіт/с до 40 Гбіт/с. Напівхвильова напруга — від 2,5 В до 9,5 В. Внесені втрати лазерного випромінювання 2,7—6,0 дБ. Випускаються амплітудні електрооптичні модулятори Маха-Цендера (модулятори інтенсивності): аналогові модулятори серії MXAR-LN, цифрові модулятори серії MX-LN і подвійний паралельний модулятор MXIQ-LN. Модулятори мають електроди для зміщення робочої точки. Подвійний паралельний модулятор MXIQ-LN-40 складається з двох підключених паралельно модуляторів Маха-Цендера. Він забезпечує на виході такі формати модуляції: DQPSK, OFDM, QAM та SSB [3—5]. Також

виробляються інтегрально-оптичні інтерферометри Маха-Цендера для довжини хвилі 1550 нм з напівхвильовою напругою 3,2 [6].

1.1.1 Залежність вихідної оптичної потужності модулятора від прикладеної до електродів напруги

Залежність вихідної потужності лазерного випромінювання модулятора $I_{вих}$ від прикладеної до електродів напруги U (при $U_O = 0$) має вигляд:

$$I_{вих} = 0{,}5 I_o \left(1 + \cos \frac{\pi U}{U_\pi} \right) = 0{,}5 I_o (1 + \cos \varphi), \qquad (1.3)$$

де I_o — вхідна потужність випромінювання лазера з урахуванням втрат в Y-розгалужувачах;

U — напруга, що подається на електроди;

U_π — напівхвильова напруга, при якій $\varphi = \pi$;

$\varphi = \frac{\pi U}{U_\pi}$ — різниця фаз інтерферуючих пучків.

Залежність вихідної оптичної потужності ідеального модулятора від різниці фаз φ інтерферуючих лазерних пучків приведена на рис. 1.3.

Точка *1* відповідає робочій точці без напруги зміщення. Подачею на електрооптичний елемент модулятора постійної напруги зміщення робочої точки U_O, рівного $\frac{U_\pi}{2}, \frac{3U_\pi}{2}$ або $-\frac{U_\pi}{2}$, U_π — можна перевести роботу модулятора в точки *2, 3* або *4* (лінійна ділянка, область квадратури [7]).

Експериментальна залежність вихідної потужності оптичного випромінювання модулятора від величини прикладеної напруги (різниця фаз φ інтерферуючих лазерних пучків) приведена в роботі [8].

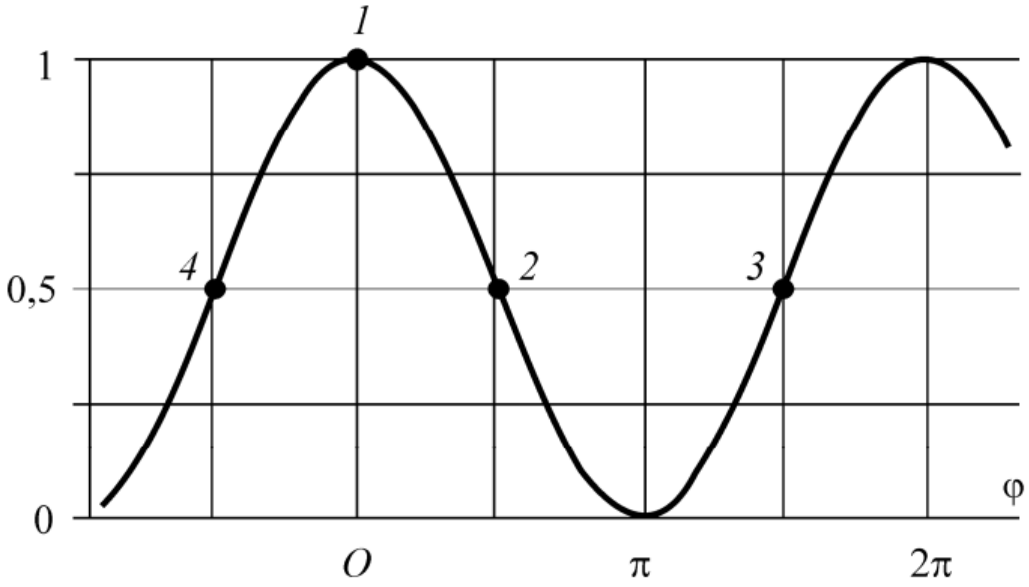


Рисунок 1.3 — Залежність потужності випромінювання

На рисунку $I_{вих} = 0{,}5I_o(1+\cos\varphi)$ на виході ідеального, симетричного модулятора (інтерферометра) від різниці фаз φ.

Зсув робочої точки можливий за рахунок створення несиметричною (з різною фізичною довжиною плечей) топологією хвилеводів [7, 8] в процесі виготовлення модулятора. При такому способі зміщення в датчиках на основі волоконних інтерферометрів і модуляторах ВОЛЗ (волоконно-оптичних ліній зв'язку) не потрібне окреме джерело живлення, підвищується стабільність положення робочої точки модулятора.

На рис. 1.2 без напруги зміщення робочої точки ($U_O = 0$) напруга фотоприймача з лінійною характеристикою дорівнює:

$$U_{ФП} = U_m(1+\cos\varphi). \qquad (1.4)$$

Величина U_m визначається значенням потужності випромінювання лазера, втратами випромінювання в модуляторі і характеристиками фотоприймача. При лінійній характеристиці фотоприймача сигнал без постійної складової дорівнює:

$$U_{ФП} = U_m \cos\varphi. \qquad (1.5)$$

1.1.2 Модуляція напругою $U_1 = U_M \sin\omega t$ без зміщення робочої точки

Введемо модуляцію різниці ходу інтерферуючого випромінювання шляхом подачі на один електрооптичний елемент (рис. 1.4) напругу, що модулює $U_1 = U_M \sin\omega t$. На другий електрооптичний елемент подамо інформаційний сигнал U_I. Можлива подача U_1 та U_I на обидва електрооптичних елементів (див. рис. 1.2). Розглянемо випадок аналогового повільно мінливого інформаційного сигналу U_I. Це призведе до появи на виході фотоприймача модульованого сигналу:

$$U_{ФП1} = U_m \cos(\varphi + \Delta\varphi_1 \sin\omega t). \qquad (1.6)$$

Початкові фази прийняті рівними нулю. Величина φ відповідає інформаційному сигналу. При аналоговому інформаційному сигналі $\varphi = \frac{\pi U}{U_\pi}$, де U_I — напруга аналогового сигналу, U_π — напівхвилева напруга, при якому $\varphi = \pi$, визначається властивостями електрооптичним елементом модулятора. При цифровому сигналі (бінарному) φ може набувати таких значень, наприклад: $\varphi = 0°$ для «0» та $\varphi = 180°$ для «1». Для радіотехнічного сигналу (однотональний) $\varphi = \varphi_I \sin 2\pi ft$. Величина $\Delta\varphi_1$ дорівнює максимальній зміні різниці фази модульованого інтерферуючого випромінювання $\Delta\varphi_1 = \frac{\pi U_М}{U_\pi}$, де $U_М$ — амплітуда напруги, що модулює. У радіотехніці $\Delta\varphi_1$ — амплітуда зміни фази називається девіацією фази.

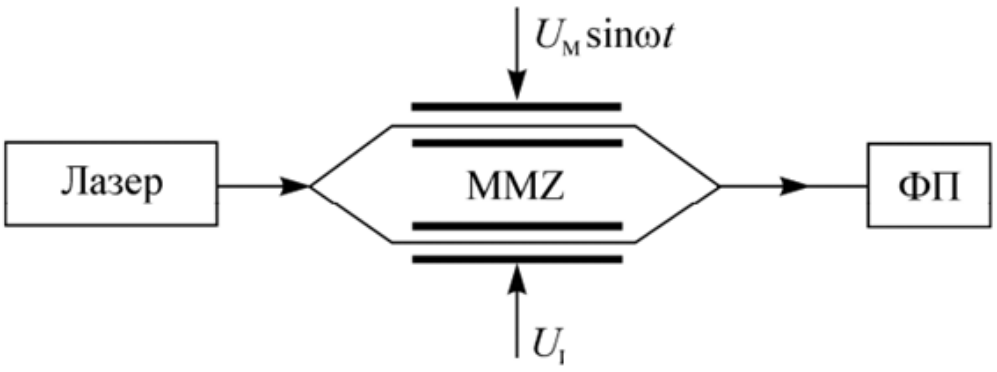


Рисунок 1.4 — Електрооптичний модулятор без зміщення робочої точки

Тригонометрична формула складання аргументів:

$$\cos(\alpha+\beta)=\cos\alpha\cos\beta-\sin\alpha\sin\beta \tag{1.7}$$

дозволяє вираз (1.7) привести до виду:

$$U_{ФП1}=U_m\cos\varphi\cos(\Delta\varphi_1\sin\omega t)-U_m\sin\varphi\sin(\Delta\varphi_1\sin\omega t). \tag{1.8}$$

Амплітуди коливань $U_m\cos\varphi$ та $U_m\sin\varphi$ відрізняються по фазі між собою на $\pi/2$.

Використовуємо математичні вирази [7, с. 33]:

$$\cos\left[\beta\sin(\omega t+\varphi)\right]=J_0(\beta)+2J_2(\beta)\cos 2(\omega t+\varphi)+$$
$$+2J_4(\beta)\cos 4(\omega t+\varphi)+2J_6\cos 6(\omega t+\varphi)+\ldots;$$
$$\sin\left[\beta\sin(\omega t+\varphi)\right]=$$
$$=2J_1(\beta)\sin(\omega t+\varphi)+2J_3(\beta)\sin 3(\omega t+\varphi)+2J_5\sin 5(\omega t+\varphi)+\ldots \tag{1.9}$$

Розкладання виразу (1.8) в ряд Фур'є (у формулі (1.9) 1 $\beta=\Delta\varphi_1$, $\varphi=0$) набуде вигляду:

$$U_{ФП1} = U_m J_0(\Delta\varphi_1)\cos\varphi - 2U_m J_1(\Delta\varphi_1)\sin\varphi\sin\omega t +$$
$$+ 2U_m J_2(\Delta\varphi_1)\cos\varphi\cos 2\omega t - 2U_m J_3(\Delta\varphi_1)\sin\varphi\sin 3\omega t +$$
$$+ 2U_m J_4(\Delta\varphi_1)\cos\varphi\cos 4\omega t - \ldots, \qquad (1.10)$$

де коефіцієнти $J_0(\Delta\varphi_1)$, $J_1(\Delta\varphi_1)$, $J_2(\Delta\varphi_1)$, $J_3(\Delta\varphi_1)$, $J_4(\Delta\varphi_1)$, …, $J_n(\Delta\varphi_n)$ — функції Бесселя першого роду порядків 0, 1, 2, 3, 4, ..., n з $\Delta\varphi_1$ як аргумент (рис. 1.5). Функція $\cos(\Delta\varphi_1 \sin\omega t)$ — парна, містить косинусоїдальні гармоніки парного порядку. Функція $\sin(\Delta\varphi_1 \sin\omega t)$ — непарна, містить синусоїдальні гармоніки непарного порядку.

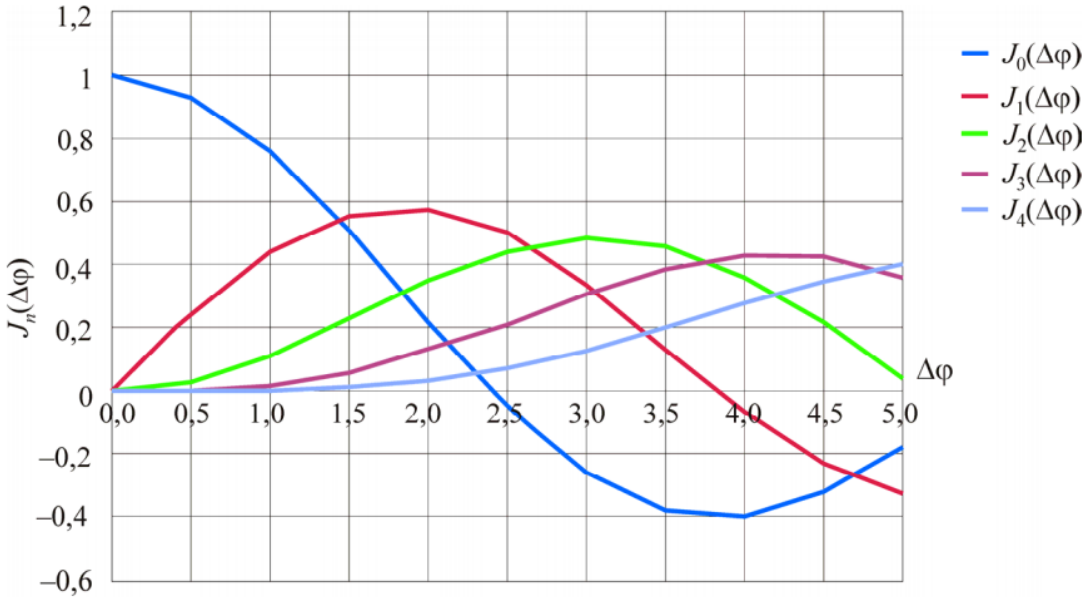


Рисунок 1.5 — Графіки функцій Бесселя першого роду 0, 1, 2, 3 і 4-го порядків

З приведених графіків видно, що максимальне значення $J_1(\Delta\varphi)$ — при $\Delta\varphi_1 = 1{,}84$; максимальне значення $J_2(\Delta\varphi)$ — при $\Delta\varphi_1 = 3{,}05$.

Модулятор з низьким напівхвильовою напругою MZDD-LN-10 Performance Highlights має напівхнильову напругу Vπ RF @ 50kHz 2,5V і діапазон напруг модуляції (modulation voltage range) від –20 до +20 В [3].

Максимально допустиме значення $\Delta\varphi$ дорівнює: $\Delta\varphi = \frac{\pi U_{доп}}{U_{\pi}} = \frac{\pi 20}{2{,}5} = 8\pi$. На рис. 1.5 представлений цілком робочий діапазон $\Delta\varphi$ електрооптичних модуляторів Маха-Цендера.

Використовуючи формули добутку тригонометричних функцій:

$$2\cos\alpha\cos\beta = \cos(\alpha-\beta)+\cos(\alpha+\beta), \tag{1.11}$$

$$2\sin\alpha\sin\beta = \cos(\alpha-\beta)-\cos(\alpha+\beta) \tag{1.12}$$

перетворимо вираз (1.10) до вигляду:

$$\begin{aligned} U_{ФП1} = {} & U_m J_0(\Delta\varphi_1)\cos\varphi + U_m J_1(\Delta\varphi_1)\left[-\cos(\omega t-\varphi)+\cos(\omega t+\varphi)\right]+ \\ & + U_m J_2(\Delta\varphi_1)\left[\cos(2\omega t-\varphi)+\cos(2\omega t+\varphi)\right]+ \\ & + U_m J_3(\Delta\varphi_1)\left[-\cos(3\omega t-\varphi)+\cos(3\omega t+\varphi)\right]+ \\ & + U_m J_4(\Delta\varphi_1)\left[\cos(4\omega t-\varphi)+\cos(4\omega t+\varphi)\right]+\ldots \end{aligned} \tag{1.13}$$

Спектр сигналу фотоприймача $U_{ФП1}$ з урахуванням знака складових представлений на рис. 1.6.

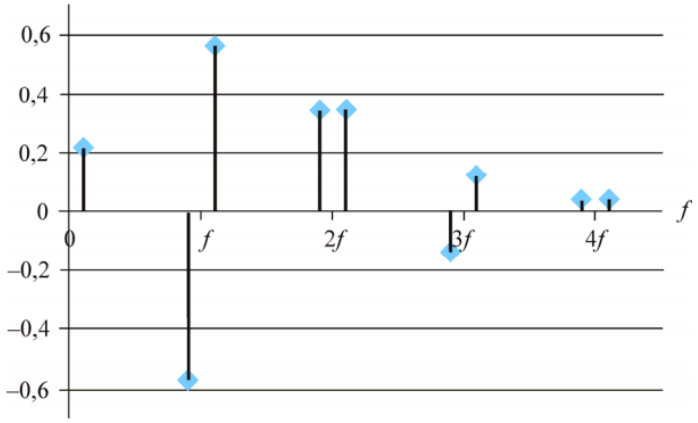


Рисунок 1.6 — Спектр сигналу фотоприймача $U_{ФП1}$

Складові однієї частоти рознесені умовно: при U_m =1, $\Delta\varphi_1 = \frac{\pi U_м}{U_\pi} = 2;$

$J_0(2) = 0{,}2239;\ J_1(2) = 0{,}5767;\ J_2(2) = 0{,}3528;\ J_3(2) = 0{,}1289;\ J_4(2) = 0{,}0340.$

Спектральні складові на парних частотах відповідають спектру балансної амплітудної модуляції з придушенням несучої (Double side band, DSB). Складові непарних гармонік мають різні знаки.

Передатна характеристика інтерферометра Маха-Цендера (рис. 1.7) представляє собою відрізок синусоїди, з якої для управління процесом модуляції вибирають одну з напівхвиль, задаючи на ній певна напруга зсуву $U_{см}$ за допомогою системи електродів напруги зсуву. Ця напруга може бути вибрана як для роботи в лінійній, так і в квадратичній області передавальної характеристики.

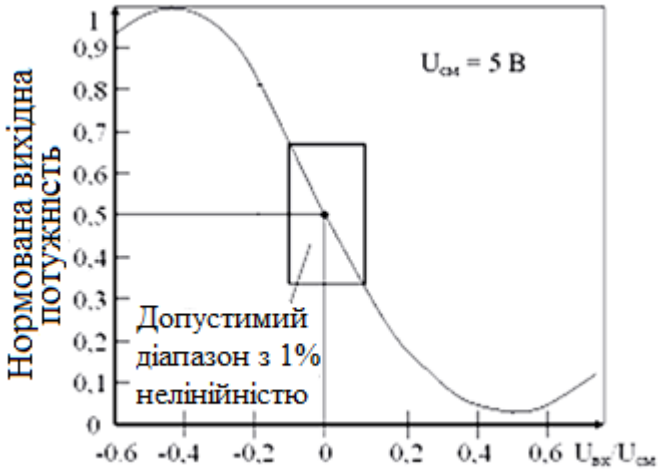


Рисунок 1.7 — Передатна характеристика модулятора типу інтерферометра Маха-Цендера

Такий тип модулятора найбільш широко використовується в різних додатках, і перш за все в системах нового покоління і мультиплексуванні по довжинах хвиль.

1.2 Біосенсор на основі інтерферометра Маха-Цендера

В інтегрованому інтерферометрі Маха-Цендера Y-подібне з'єднання розділяє світло, яке направляється на дві гілки: чутливу і контрольну. Після певної відстані два сигнали об'єднуються в вихідний оптичний хвилевід через другий Y-перехід, створюючи перешкоди обох променів. Розрахунки і моделювання були виконані для розробки високочутливих пристроїв інтерферометра Маха-Цендера, в яких взаємодія загасаючої хвилі з зовнішнім середовищем максимізувала. В результаті була отримана направлена структура інтерферометра Маха-Цендера на основі ребристих хвилеводів SiO_2 / Si_3N_4 / SiO_2 з одномодовою поведінкою для товщини серцевини менше 250 нм, ширини ребра 3 мкм і глибиною ребра менше 2 нм (рис. 1.8).

Масова межа виявлення всього $\Delta n = 10^{-7}$ одиниці показника заломлення (RIU) була продемонстровані.

Що стосується біосенсорних можливостей інтерферометра Маха-Цендера, наприклад, найнижча межа гібридизації ДНК в буферному розчині становила 10 пМ. Крім того, виявили ДНК — мішень з двома незбіжними підставами. Крім того, в даний час проводяться мультиплексні інтерферометри Маха-Цендера для одночасного виявлення декількох біомолекулярних взаємодій.

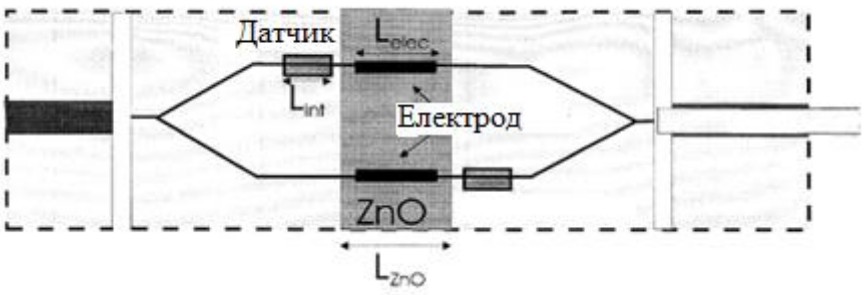


Рисунок 1.8 — Схема інтерферометра Маха-Цендера

Розширення сфери застосування безмаркерних біосенсорів і їх повсюдне поширення неможливо без мініатюризації існуючих на сьогоднішній день

пристроїв. Для створення компактних біосенсорів можуть бути використані такі оптичні системи як: хвилеводи, діелектричні і плазмонні хвилеводи, а також оптичні інтерферометри на їх основі, оптичні резонатори і фотонні кристали [9]. Більшість подібних біосенсорів об'єднує загальний принцип роботи, при якому детектування сигналу стає можливим через зміну оптичних властивостей середовища поблизу поверхні таких структур за рахунок хімічних реакцій і адсорбції на поверхню об'єктів, що детектуються.

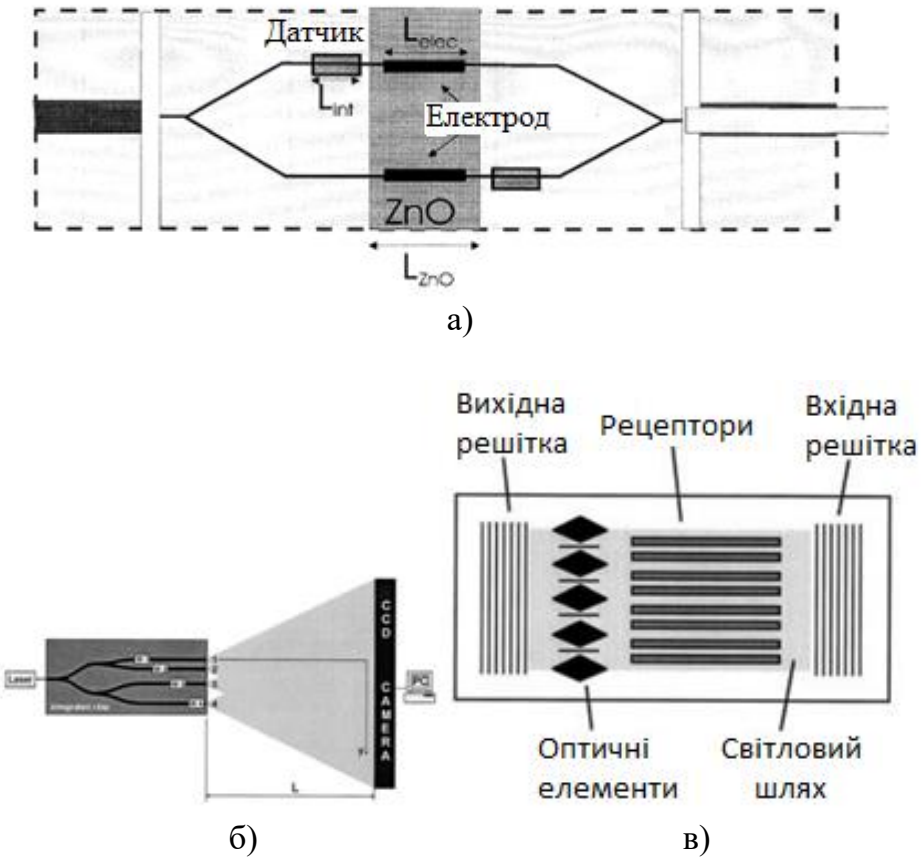
У безмаркерних біосенсорах на основі оптичних волокон і хвилеводів зміна оптичних властивостей середовища, що знаходиться в полі відповідних оптичних мод, призведе до зміни амплітуди і фази сигналу, що поширюється в хвилеводній системі. Використання оптичних волокон в конструкції біосенсора дає ряд переваг, обумовлених їх низькою вартістю і розвиненими методами генерації і обробки сигналів, на що, в свою чергу, вплинуло їх застосування в сфері телекомунікації. Звідси також набули поширення волоконні біосенсори, що використовують Бреггівські і довгоперіодні решітки. Використання діелектричних хвилеводів дозволяє створювати компактні біосенсори, в тому числі інтегровані на чіпі, а також реалізовувати складні оптичні схеми з більш високою чутливістю і можливістю проведення декількох паралельних вимірювань.

Фазові вимірювання мають зазвичай більшу чутливість, однак для їх ефективного застосування потрібне створення інтерференційних систем. В оптичних біосенсорах були реалізовані інтерферометри Маха-Цендера, (рис. 1,9, а) Юнга (рис. 1.9, б) і Хартмана (рис. 1.9, в), в яких одне з плечей інтерферометра використовується в якості опорного і не взаємодіє з детектованою речовиною.

Перший біосенсор, що використовує інтерферометр Маха-Цендера, був запропонований в 1993 році і включав в себе хвилеводи з нітриду кремнію на кремнієвої підкладці с термічно вирощеним оксидом кремнію.

Товщина хвилеводу при цьому була обрана такою, щоб даний хвилевід мав тільки одну оптичну моду, що виключало зв'язування різних мод одна з

одною. Далі обидва плеча інтерференційної схеми були поміщені в кювети з рідиною. Можливість біодетектування була забезпечена тим, що одне з плечей покрили біоспецифічним шаром на основі антитіл.



а) Маха-Цендера; б) Юнга; в) Хатмана.

Рисунок 1.9 — Компактні оптичні біосенсори на основі інтерферометрів

Для підвищення відгуку біосенсорів на основі інтерферометра Маха-Цендера була запропонована схема біодетектування, в якій в одне з плечей був інтегрований електрооптичний модулятор (рис. 1.9, а). Практично одночасно з біосенсорами на основі інтерферометра Маха-Цендера був розроблений безмаркерний оптичний біосенсор на основі інтерферометра Юнга, в якому вихідні сигнали з детектуючого і опорного плечей формували інтерференційну картину на фотодетектуючій матриці. Перевагою даного

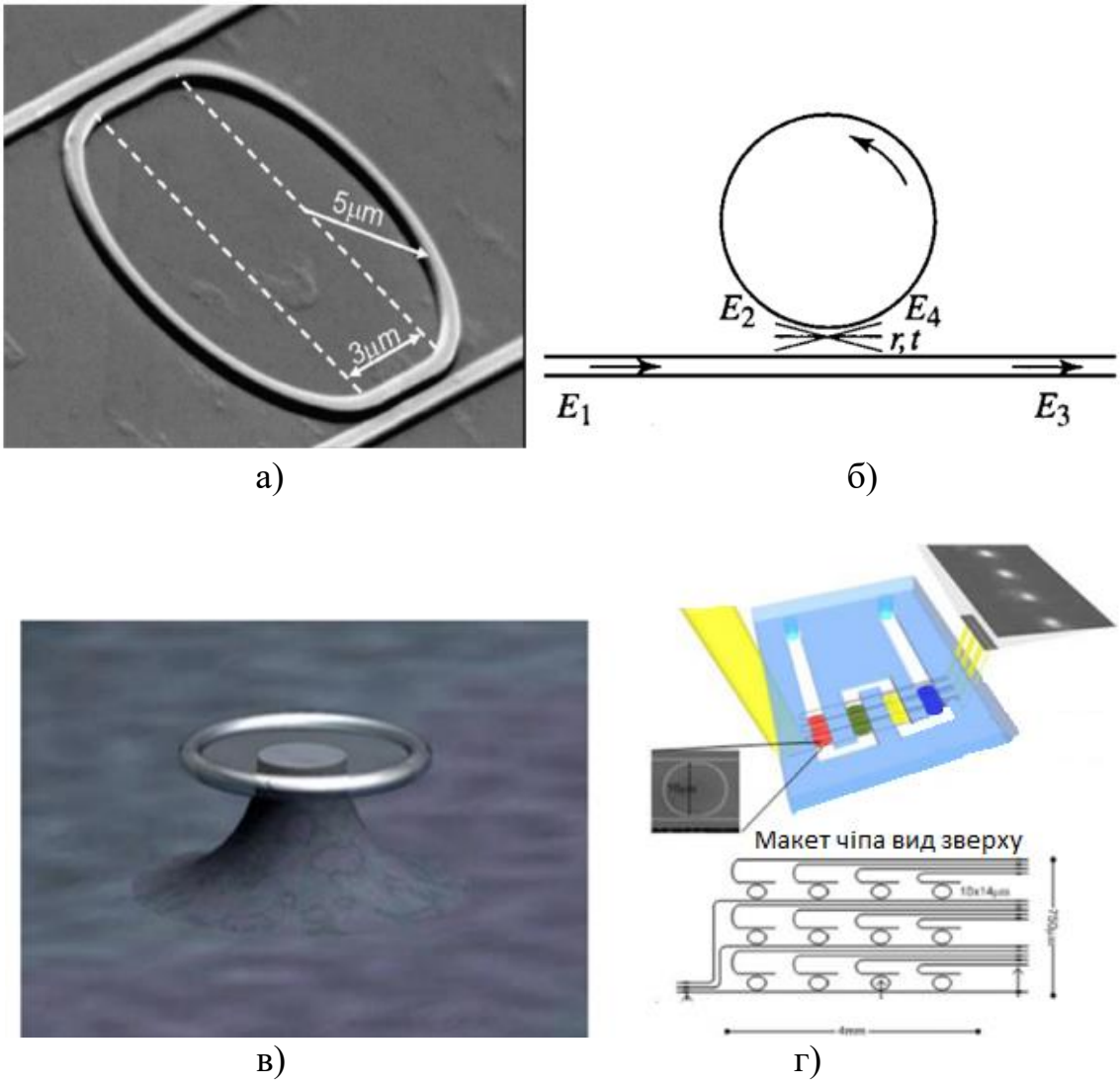
типу інтерферометра для біодетектування є відсутність потреби використовувати фазовий модулятор для підвищення чутливості, а також простота реалізації схеми, що дозволяє одночасно проводити кілька паралельних вимірювань. В одній з таких схем використовувалися чотири паралельно розташованих хвилеводи, 1 опорний і 3 детектуючих, при цьому відстань між хвилеводами було вибрано такою, щоб в інтерференційній картині могли бути виділені одиничні гармоніки, що відповідають процесам біодетектування в кожному з плечей інтерферометра (рис. 1.9, б). Ще одним досить схожим типом інтерферометра, що використовується в конструкціях безмаркерних біосенсорів, є інтерферометр Хартмана. В даних біосенсорах використовується один плоский діелектричний хвилевід, а біоспецифічна поверхня розділена на окремі смуги, покриті різними біологічними мішенями, що специфічні до певних речовин, за рахунок чого стає можливим реалізувати кілька вимірів одночасно (рис. 1.9, в). При цьому біля оптичного виходу розташовані інтегровані оптичні елементи, що формують на виході інтерференційну картину. Однак, незважаючи на такі переваги безмаркерних біосенсорів на основі оптичних інтерферометрів, як висока чутливість і компактність по одному або двом вимірам, дані системи залишаються макроскопічними з огляду на те, що для отримання достатнього відгуку взаємодія світла з речовиною має відбуватися на достатній довжині хвилеводу, яка найчастіше складає кілька сантиметрів.

Описана проблема може бути вирішена використанням в біодетектуванні оптичних резонаторів, що підвищують ефективність взаємодії світла за рахунок високої добротності збуджених в них резонансів, типове значення якої становить 10^6. В свою чергу зменшення розмірів біодетектуючої поверхні дозволить створювати високоінтегровані пристрої, а також скоротити кількість використовуваних в детекторах зразків. У якості оптичних резонаторів в біодетектуванні можуть бути використані мікрокільцеві резонатори, мікротори і диски, мікросфери, а також капіляри систем оптофлюідики. Крім цього, використання оптичних резонаторів уможливлює

створення компактних пристроїв, що дозволяють здійснювати одночасне детектування декількох хімічних взаємодій за рахунок зв'язування збуджувального хвилеводу з декількома резонаторами (рис. 1.10)

Найпростішим прикладом оптичного резонатора, використовуваного в біодетектуванні, є скляна мікросфера з радіусом близько 100 мкм. Такий резонатор відрізняє простота виготовлення, так як мікросфери можна отримати розплавленням кінця оптичного волокна, і досить високі значення добротності, що призводять до високої спектральної роздільності при біодетектуванні. Крім цього, найчастіше використані в біосенсорах резонансні моди галереї, що шепоче, добре описуються аналітично і роблять можливим детектування не тільки присутності того чи іншого об'єкта, а й його властивостей, таких як орієнтація молекул в шарі і товщина шару. До недоліків таких резонаторів можна віднести їх досить великі розміри, що призводять до високої локалізації випромінювання всередині резонатора, а також складність при інтеграції з іншими оптичними компонентами.

Мікрокільцеві (рис. 1.10, а) і мікродискові (рис. 1.10, б) резонатори позбавлені цих недоліків і можуть бути виготовлені в різних конфігураціях і з різних матеріалів з використанням фотолітографії. Більш того, в перспективі біосенсори на основі даних оптичних резонаторів можуть бути інтегровані в портативні пристрої з використанням CMOS технології, завдяки якій можуть бути реалізовані різні схеми збудження і зняття оптичного сигналу, а також масиви резонаторів, які здійснюють паралельні вимірювання (рис. 1.10, г). Матеріалом для виготовлення мікрокольцевих і мікродискових резонаторів можуть служити різне скло, кремній і його нітрид і карбід, а також органічні полімери. Розрахунки показують, що межа детектування біосенсорів на основі даного типу резонаторів становить аж до 10^{-9}, однак на даний момент чутливість експериментальних пристроїв менше на кілька порядків.



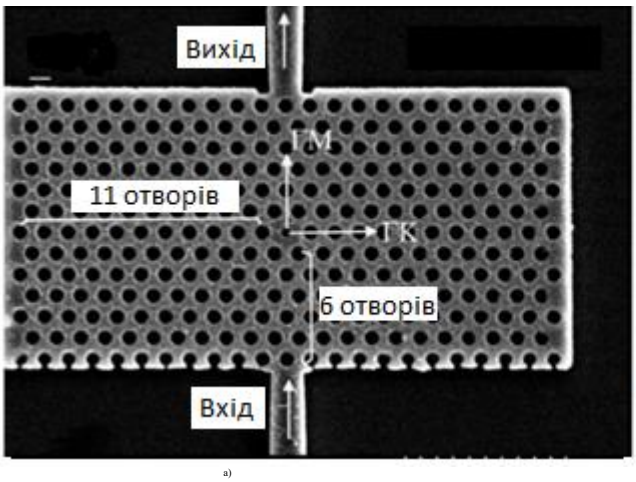
а) б)

в) г)

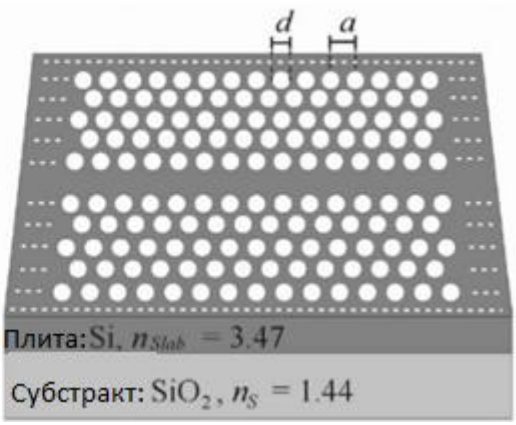
а) мікрокільцевий; б) мікродисковий;
в) мікротороідальний; г) масив мікрокільцевих резонаторів для паралельного біодетектування

Рисунок 1.10 — Резонатори

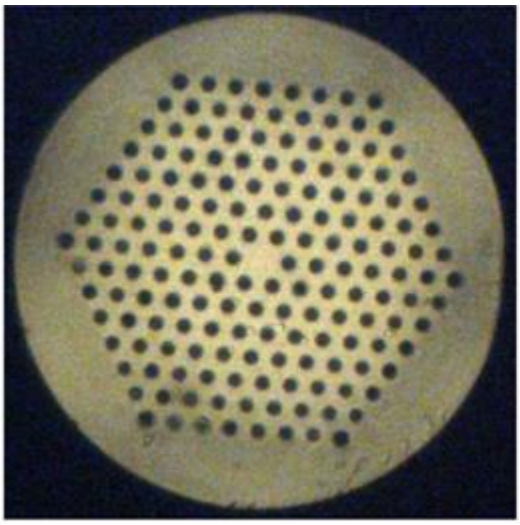
Ще однією перспективною технологією для створення відносно компактних біосенсорів є схеми на основі фотонних кристалів (рис. 1.11), які являють собою періодичну діелектричну структуру, яка формує оптичні заборонені зони для розповсюдження по ним випромінювання.



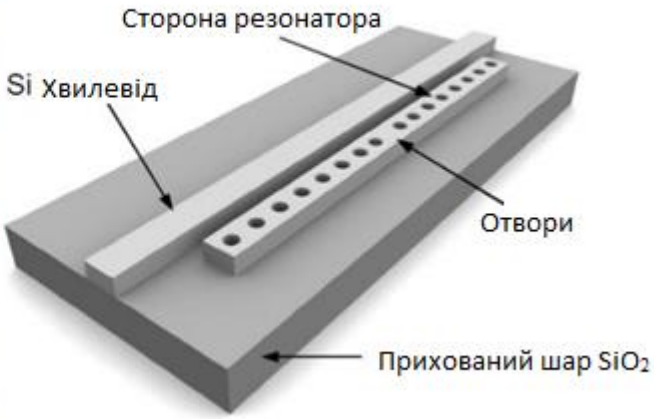
а)



б)



в)



г)

а) дефекти в фотонних кристалах;

б) хвилеводи на основі фотонних кристалів;

в) фотонно-кристалічні волокна; г) резонатори на основі фотонних кристалів.

Рисунок 1.11 — Оптичні системи на основі фотонних кристалів

При цьому для застосування в біодетектуванні особливий інтерес представляють фотонні кристали, в яких періодичні зміни показника заломлення створюються за рахунок порожнин в діелектрику, які можуть бути заповнені досліджуваними зразками. В даному випадку сильно підвищується ефективність взаємодії випромінювання з біологічними об'єктами, які

адсорбуються на стінках порожнин фотонного кристала.

Серед конфігурацій оптичних біосенсорів, що використовують фотонні кристали можна виділити три типи. В першому типі біосенсорів використовуються фотонні кристали з дефектом, при цьому наявність дефекту призводить до появи «дефектної моди», яка буде видна у відбитому або тому, що пройшло, випромінюванні у вигляді резонансу на тлі забороненої зони фотонного кристала (рис. 1.11, а). Далі адсорбція біомолекул в порожнині дефекту і в сусідніх з нею порожнинах буде приводити до зсуву резонансу, відповідного до цього дефекту. У другому типі біосенсорів використовуються хвилеводи на основі фотонних кристалів, а біодетектування здійснюється за рахунок моніторингу частоти відсікання випромінювання, що розповсюджується по хвилеводу, на яку впливає показник заломлення середовища поряд з хвилеводом (рис. 1.11, б). У ще одному типі біосенсорів використовуються фотонно-кристалічні оптоволокна, що містять порожнини вздовж волокна (рис. 1.11, в). Перевагами біосенсорів на основі фотонно-кристалічних оптоволокон є високий рівень взаємодії речовини зі світлом і можливість використовувати порожнини всередині волокна як канали системи мікрофлюідики.

2 АНАЛІЗ ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА

2.1 Аналіз результатів чисельних розрахунків

В атестаційній роботі розглядається одна з можливих реалізацій інтерферометра Маха-Цендера, який широко застосовується в різноманітних електронних системах. Інтерферометр такого типу характеризується відносно простою реалізацією (наприклад, на базі оптоволоконних ліній передачі) і тому широко розповсюджений в схемах спектрометрії та модуляції оптичного випромінювання.

Найбільш сучасним варіантом конструкції інтерферометра Маха-Цендера є його схема на основі фотонних кристалів. Такі схеми зараз інтенсивно досліджуються теоретично і експериментально [8].

Звичайний фотонно-кристалічний інтерферометр Маха-Цендера базується на різноманітних елементах трактів фотонно-кристалічних хвилеводів. Саме ці хвилеводи забезпечують спрямовану передачу електромагнітної енергії через канали інтерферометра [9].

На рис. 2.1 представлена схема інтерферометра Маха-Цендера, яка досліджується в даній роботі. Ця схема побудована за допомогою двовимірного фотонного кристалу з трикутною симетрією. Цей фотонний кристал сформований періодичною сіткою вакуумних отворів в пластині діелектрика з проникністю $\varepsilon = 12$. Таке значення діелектричної проникності відповідає арсеніду галію та кремнію в ближньому інфрачервоному діапазоні. Саме в цьому діапазоні ($\lambda = 1{,}550$ мкм) працюють більшість фотонно-кристалічних пристроїв.

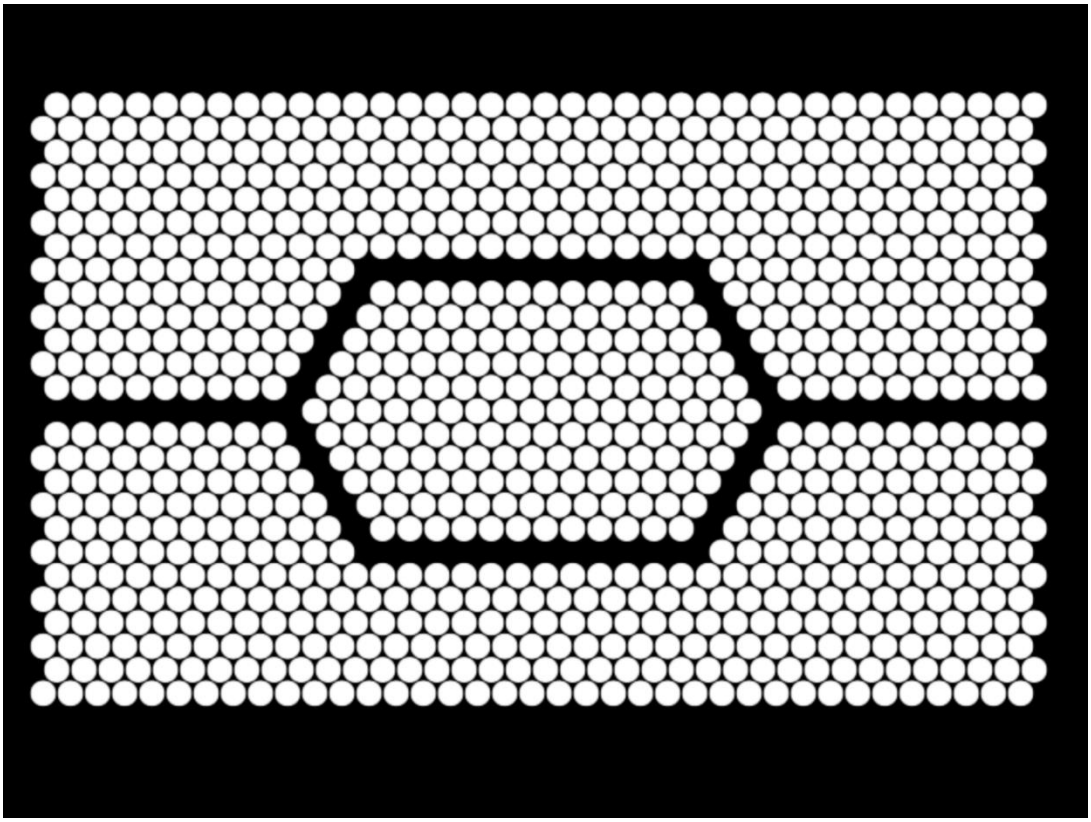
З рис. 2.1 видно, що схема інтерферометра складається з кількох структурних елементів:

— вхідні та вихідні хвилеводи;

— два хвилеводні розгалужувачі (Y-подібні хвилеводи);

— чотири хвилеводні повороти.

Кожен з цих складових елементів має свою спектральну характеристику. Найбільш важливою серед них є залежність коефіцієнтів проходження від частоти сигналу.



Рисунку 2.1 — Схема фотонно-кристалічного інтерферометра Маха-Цендера

Тому при проектуванні інтерферометра необхідно проводити узгодження цих спектральних характеристик. Без цього узгодження неможливе нормальне функціонування інтерферометра, оскільки воно потребує одночасного проходження сигналу через всі плечі пристрою.

Для розв'язування цієї задачі слід визначити дисперсійні та спектральні характеристики як окремих елементів так і пристрою в цілому. На початку необхідно визначити робочий діапазон частот який відповідає фотонній забороненій зоні фотонного кристалу, що використовується для побудови інтерферометра Маха-Цендера. Це потребує розрахунку дисперсійних

характеристик нескінченого двовимірного фотонного кристалу. В даному випадку необхідно знати дисперсійну проникність основи структури та геометричні розміри вакуумних отворів. В даній роботі використовується нормоване на період структури $\frac{r}{a} = 0{,}45$, де a — період фотонного кристалу. Таке значення вибрано виходячи з даних досліджень, що наведені в літературі [9]. В цих умовах реалізується максимальна широка фотонна заборонена зона. Це означає, що робочий діапазон є найбільш широким.

Для розрахунку дисперсійних характеристик фотонного кристалу використовують комп'ютерний пакет MIT Photonic Bands (MPB), що добре опробований для чисельних розрахунків, періодичних структур різної розмірності. В основі цього пакету лежить метод розкладання по плоским хвилям, що добре зарекомендував себе для чисельних розрахунків електродинамічних характеристик періодичних структур.

На рис. 2.2 представлені результати розрахунку дисперсійних діаграм нескінченного фотонного кристалу. Позначення на вісі абсцис відповідають точкам високої симетрія в кристалографії, які використовуються для позначення меж першої зони Брелюена, вісь ординат відповідає нормованій частоті $\frac{\omega a}{2\pi c}$, c — швидкість світла в вакуумі. Дві горизонтальні смуги на дисперсійні діаграмі позначають заборонені фотонні зони, в яких відсутні дисперсійні криві, отже в цих заборонених зонах можливе розповсюдження електромагнітних хвиль в будь-якому напрямку. Тому, в цих частотних зонах відбувається локалізація електромагнітної енергії в дефектах періодичної структури. А саме на основі дефектів періодичності формуються різноманітні фотонно-кристалічні хвилеводи та резонатори.

З рис. 2.2 видно, що в даній частотній зоні є дві заборонені фотонні зони, одна з них (низькочастотна) має значно більшу ширину і тому досить зручна для використання в різноманітних фотонно-кристалічних структурах.

Тому в даній роботі дослідження проводяться саме в межах цієї забороненої зони, тобто в діапазоні $0{,}3 < \frac{\omega a}{2\pi c} < 0{,}5$.

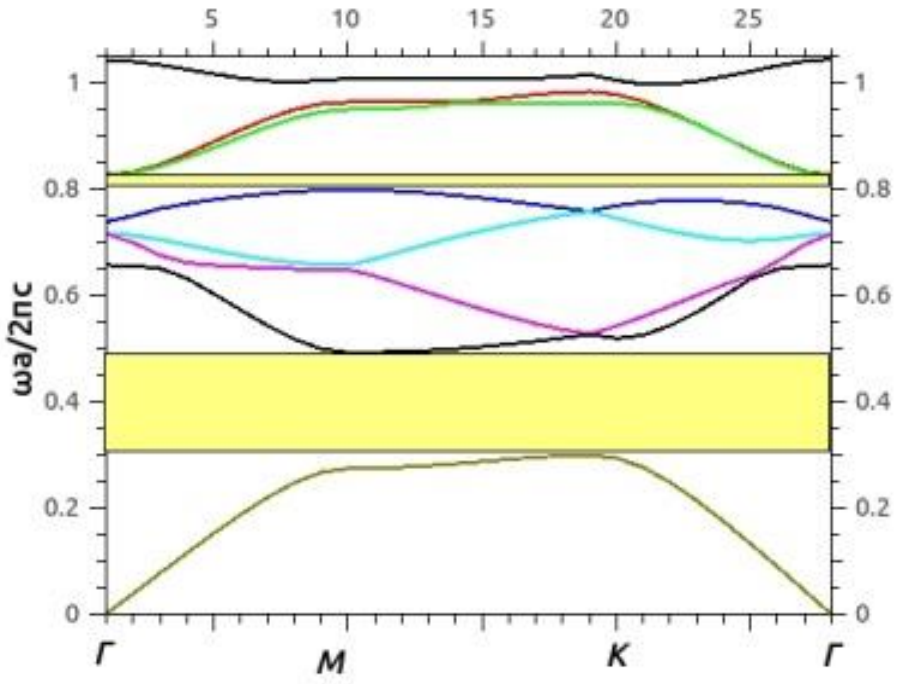


Рисунок 2.2 — Дисперсійна характеристика фотонного кристалу

Для визначення експлуатаційних характеристик інтерферометра Маха-Цендера необхідно знати його найважливішу характеристику — спектральну. Для цього на вхід інтерферометра необхідно подати широкосмуговий сигнал, діапазон якого перекриває заборонену фотонну зону. На наступному етапі необхідно зафіксувати проходження енергії через інтерферометр на всіх частотах цього діапазону. Зрозуміло, що найбільш цікавим для практичної реалізації є режим, коли електромагнітний сигнал повністю проходить через інтерферометр; такий режим відповідає оптимальному узгодженню спектральних характеристик всіх складових частин інтерферометра Маха-Цендера.

Розрахунок спектральних характеристик проводиться за допомогою комп'ютерного пакету MIT Electromagnetic Equation Propegation (MEEP).

Цей пакет базується на методі скінченних різниць в частотній області (FDTD). Він дозволяє проводити чисельні розрахунки для всіх електродинамічних характеристик різноманітних мікрохвильових та оптоелектронних пристроїв; для формування вхідного широкосмугового сигналу використовується стандартне джерело випромінювання з Гаусівським спектром.

На рис. 2.3 представлена спектральна характеристика такого сигналу.

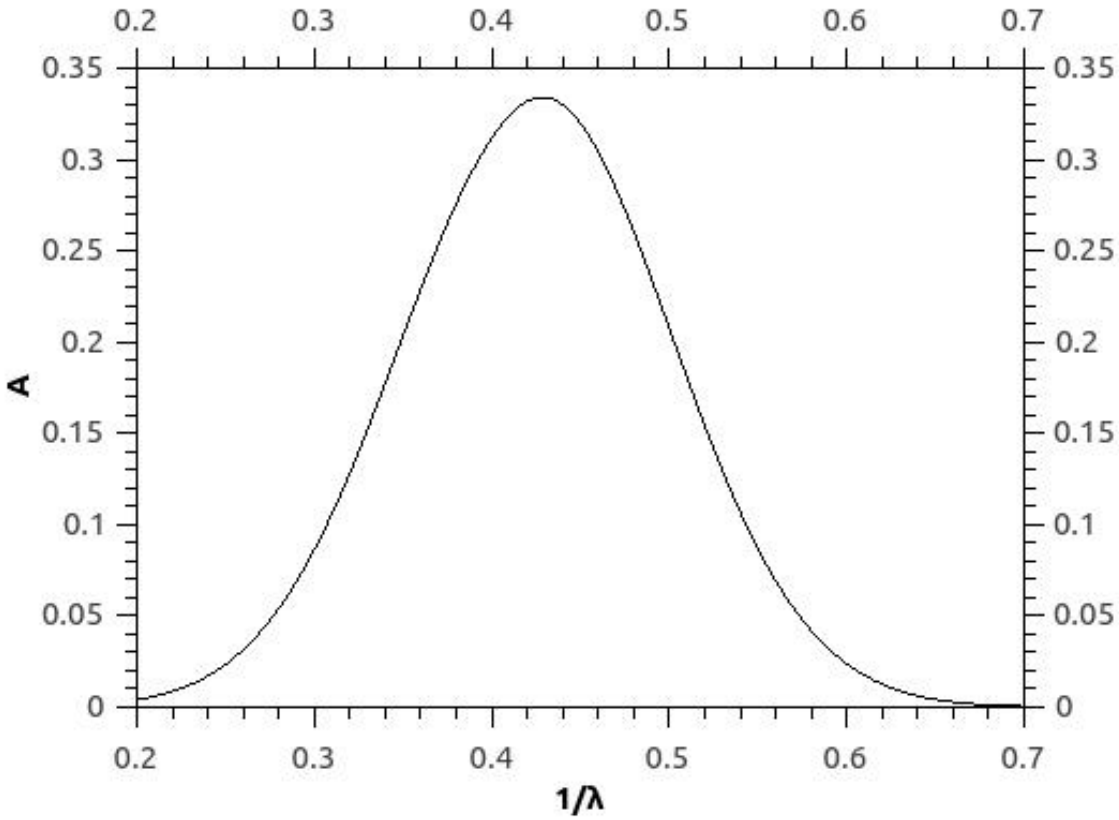


Рисунок 2.3 — Гаусівська спектральна характеристика

Його центральна частота знаходиться поблизу середини забороненої фотонної зони. Таким чином, на рівні половинної потужності цей сигнал перекриває всю заборонену фотонну зону.

Детектор, що фіксує проходження електромагнітної енергії через інтерферометр Маха-Цендера розташовується на його виході в правій частині

схеми на рис. 2.1. Ширина цього детектора обирається більше ніж ширина фотонно-кристалічного хвилевода. Це дає можливість фіксувати максимальну частоту енергії, яка розповсюджена не тільки в хвилеводному каналі, а і в області, які межують з ним.

Це необхідно для забезпечення вірогідності чисельних розрахунків. Таким чином, фактично на вхід інтерферометра подається Гаусівський імпульсний сигнал. Це означає, що час розрахунку повинен перевищувати час проходження цього імпульсу через весь інтерферометр. Це перевищення необхідно для врахування енергії «хвостів» імпульсу. При проходженні чисельного моделювання результатом є енергія сигналу на виході інтерферометра. Для обчислення коефіцієнтів проходження необхідне нормування цієї енергії на деяке опорне значення. При виконанні розрахунків в якості цього опорного значення використовується енергія сигналу, яка пройшла через звичайний фотонно-кристалічний хвилевід [10].

На рис. 2.4 представлені результати розрахунків коефіцієнтів проходження сигналу через інтерферометр Маха-Цендера як функції частоти. З рисунку видно, що за межами забороненої фотонної зони проходження майже відсутнє.

Це цілком зрозумілий результат, оскільки за межами забороненої зони енергія сигналу проникає в фотонно-кристалічну оболонку хвилевода і розсіюється в ній. Але, разом з тим, з рис. 2.1 видно, що в межах забороненої фотонної зони спектральна характеристика є нерівномірною — вона має смуги пропускання та запирання. Тому необхідні додаткові розрахунки інтерферометра для визначення робочої частоти пристрою.

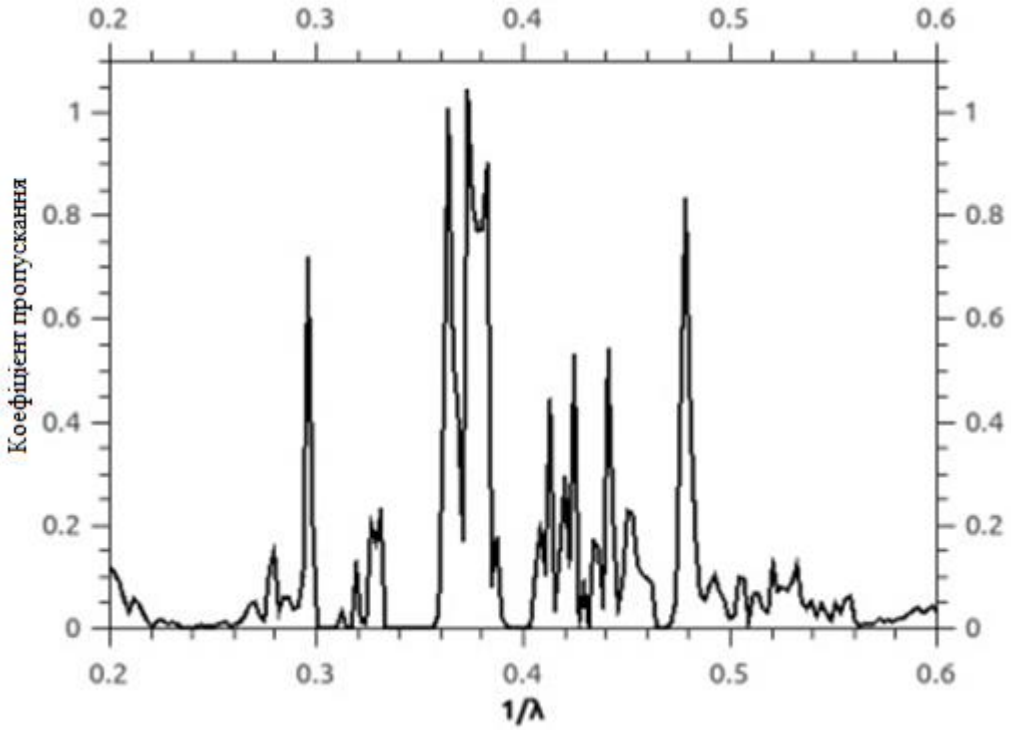


Рисунок 2.4 — Результат розрахунків спектральної характеристики інтерферометра Маха-Цендера

2.2 Розрахунок характеристик сенсора

Одним із важливий практичних застосувань фотонно-кристалічних інтерферометрів Маха-Цендера є створення різноманітних сенсорів для визначення матеріальних параметрів середовищ. Зазвичай такі сенсори будуються на основі високодобротних резонансних структур і результатом їх роботи є зсув резонансної частоти, який співставляється з відповідною зміною показника заломлення або інших матеріальних параметрів зразка в даній роботі розглядається сенсор оснований на інших фізичних принципах. Тут досліджуване середовище розташовується в одному з плечей інтерферометра Маха-Цендера. В результаті в цьому плечі відбувається додатковий фаховий зсув сигналу, що призводить до зміни інтенсивності випромінювання на виході інтерферометра. Схема представлена на рис. 2.5.

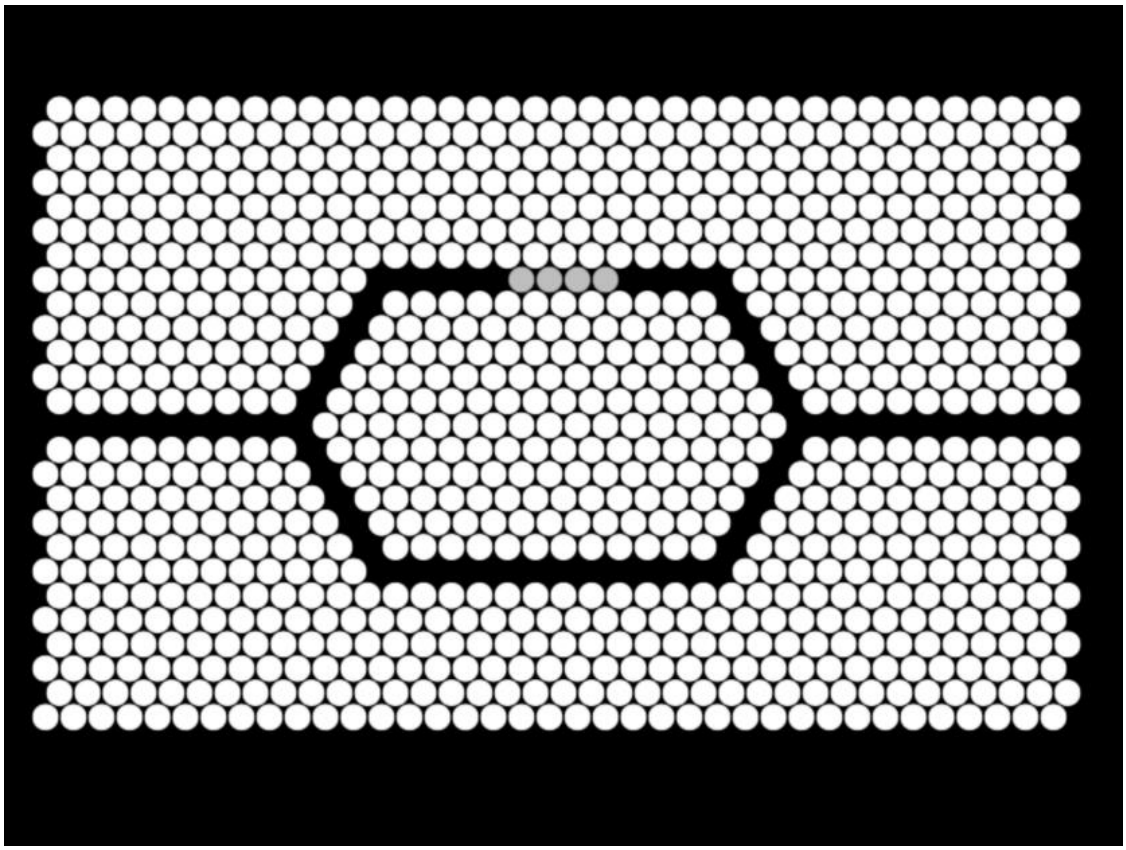


Рисунок 2.5 — Схема фотонно-кристалічного інтерферометра Маха-Цендера з пустотілими отворами для досліджуваного об’єкту

В цій схемі досліджуване середовище розташовується в пустотілих отворах які сформовані у верхньому плечі інтерферометра. Слід зазначити що така схема більш зручна для дослідження рідких середовищ які можна транспортувати через капілярів трубки до пустотілих отворів фотонно-кристалічної структури.

Чисельні розрахунки спектральної характеристики сенсора на основі інтерферометра Маха-Цендера виконувались в комп'ютерному пакеті MEEP [1]. Результати розрахунку представлені на рис. 2.6, по осі ординат відкладена потужність сигналу на виході інтерферометра у довільних одиницях виміру, по осі абсцис відкладена нормована частота сигналу яка відповідає частоті, відкладеній на дисперсійній діаграмі (рис. 2.2).

Спектральна характеристика побудована в тій частині забороненої зони фотонного кристалу де потужність на виході інтерферометра помітно відрізняється від 0.

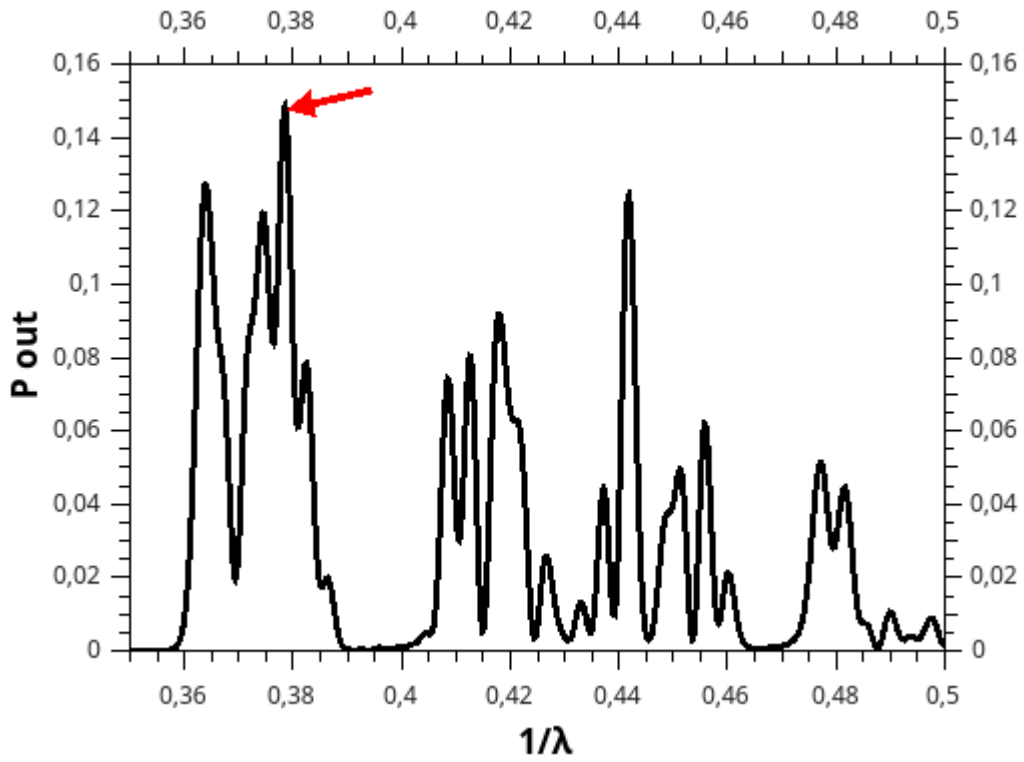


Рисунок 2.6 — Результат розрахунків спектральної характеристики інтерферометра Маха-Цендера

Порівняння спектральних характеристик рис. 2.6 та рис. 2.4 показують, що додавання отворів в одне плече інтерферометра призводить до суттєвих змін спектральної характеристики. Максимуми проходження спостерігається вже на інших частотах.

Зрозуміло, що для підвищення чутливості сенсора доцільно використовувати частоти на ярких спостерігається максимальне проходження сигналу через інтерферометр. Розглянемо спочатку робочу частоту інтерферометра 0,3785. Максимум проходження на цій частоти позначений на рис. 2.6 стрілкою.

На рис. 2.7 представлені результати розрахунку амплітудного розподілу електричного поля на цій частоті у випадку коли в сигнальних отворах відсутня досліджувана речовина, тобто їх діелектрична проникність дорівнює одиниці. З рисунку видно, що в цьому випадку хвиля не проходить через сигнальне плече інтерферометра і відбивається назад в фотонно-кристалічний хвилевід. Після проходження сигналу через опорне плече частина сигналу відгалужується в інше плече і також відбивається від отворів у хвилеводі.

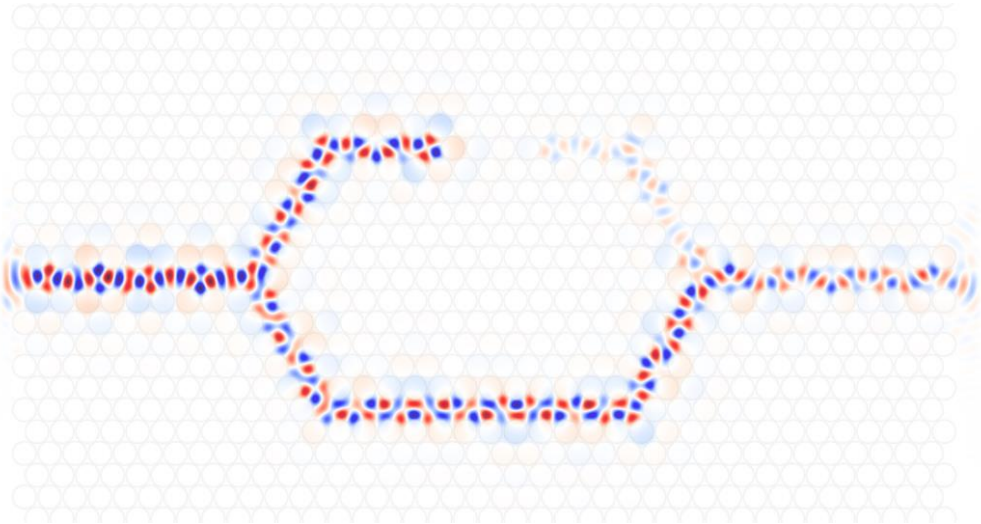


Рисунок 2.7 — Результати розрахунку амплітудного розподілу електричного поля: частота 0,3785, ε =1

Розглянемо далі інший випадок, коли сигнальні отвори заповнені речовиною з діелектричною проникністю 3,6. На рис. 2.8 представлені результати розрахунку розподілу поля в інтерферометрі для цього випадку. Видно, що хвиля проходить через сигнальне плече інтерферометра, але дещо послаблюється порівняно з опорними плечем. Зрозуміло, що потужність сигналу на виході системи в цьому випадку буде відрізнятися від ситуації зображеної на рис. 2.7.

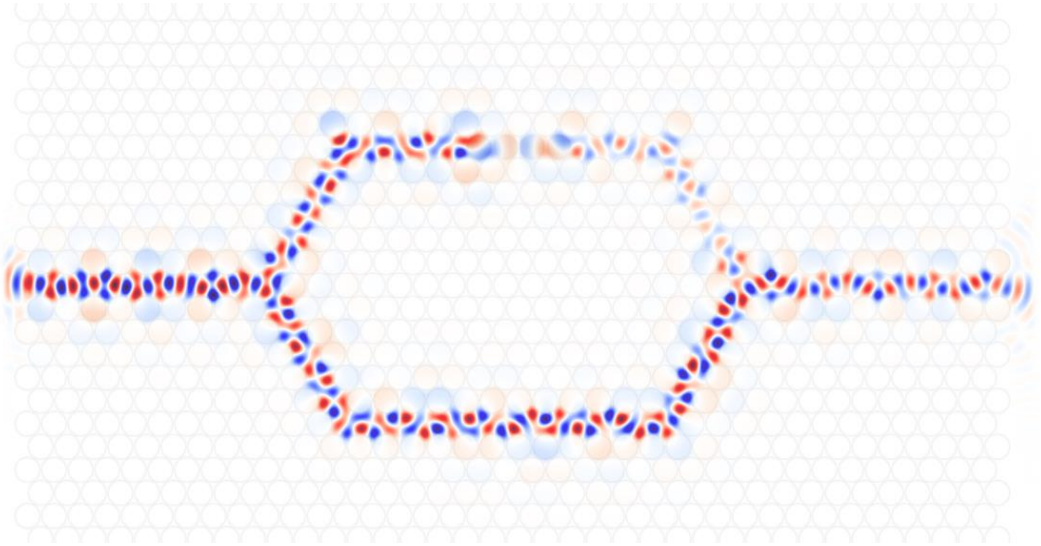


Рисунок 2.8 — Результати розрахунку амплітудного розподілу електричного поля: частота 0,3785, ε =3,6

Чисельні розрахунки спектральної характеристики сенсора були проведені в діапазоні зміни діелектричної проникності ε досліджуваного середовища від 1 до 4 — з кроком 0,2.

На рис. 2.9 представлені результати розрахунку спектральної характеристики сенсора у вузькому частотному діапазоні для робочої частоти 0,3785, яка позначена на рисунку вертикальною штриховою лінією. Різні криві відповідають різним значенням діелектричної проникності досліджуваного середовища. З рисунку видно, що зміна діелектричної проникності циліндрів в сигнальному плечі інтерферометра призводить до зміни значення потужності та зсуву максимумів проходження сигналу уздовж частотної вісі. Для даної конструкції сенсора використання. Для даної конструкції сенсора використання частотного зсуву резонансу не є доцільним оскільки величина цього зсуву дуже мала. Крім того досліджувана система є досить складною резонансною системою, для якої досить складно розрахувати умови резонансів. Тому основним сигналом сенсора будемо вважати зміну потужності сигналу на виході інтерферометра.

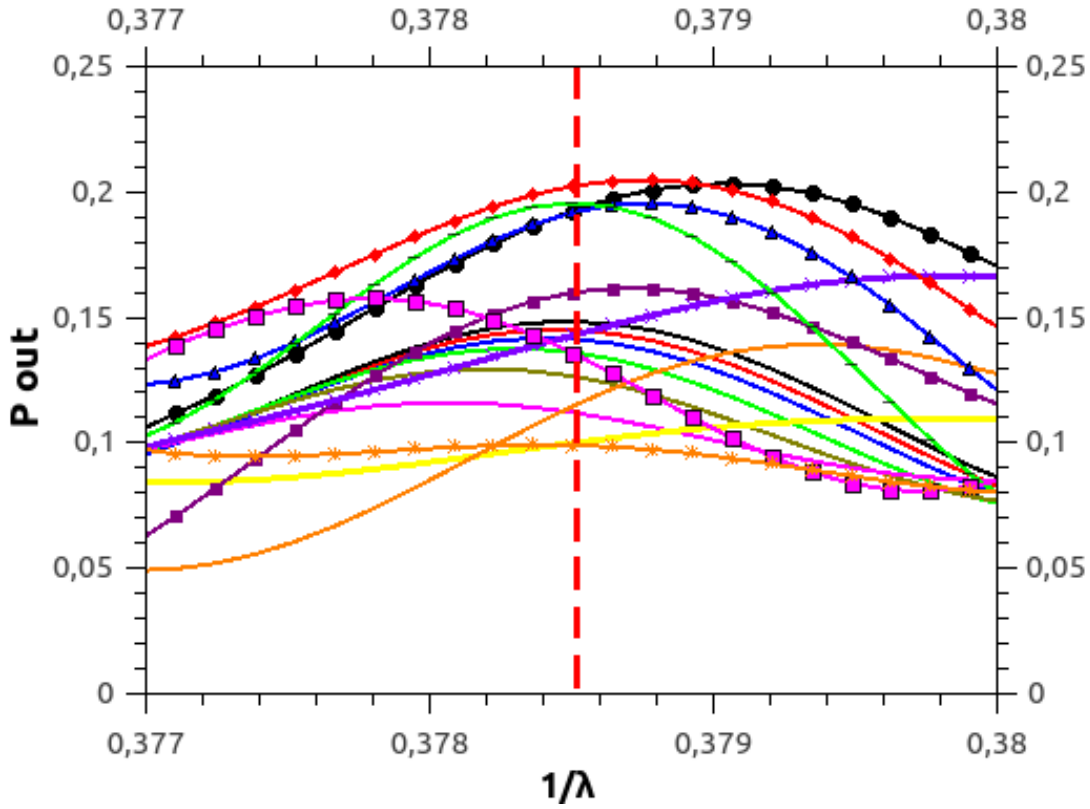


Рисунок 2.9 — Результати розрахунку спектральної характеристики сенсора у вузькому частотному діапазоні для робочої частоти 0,3785

На рис. 2.10 представлена розрахована залежність потужності сигналу на виході інтерферометра від діелектричної проникності досліджуваного середовища. Ця залежність відповідає значенню робочої частоті 0,3785. Отримана характеристика є досить не рівномірною, що свідчить про неможливість застосування такого сенсору у всьому розглянутому діапазоні зміни діелектричної проникності. Звичайно в сенсорах використовують ділянки робочих характеристик з максимальною крутістю, оскільки саме на цих ділянках сенсор має найбільшу чутливість. Крім того ці ділянки повинні бути рівномірними. Виходячи з цього, можна використовувати дві ділянки зміни діелектричної проникності: (1,0—2,2) та (3,5—4,0). Саме на цих ділянках робоча характеристика сенсора має рівномірний характер.

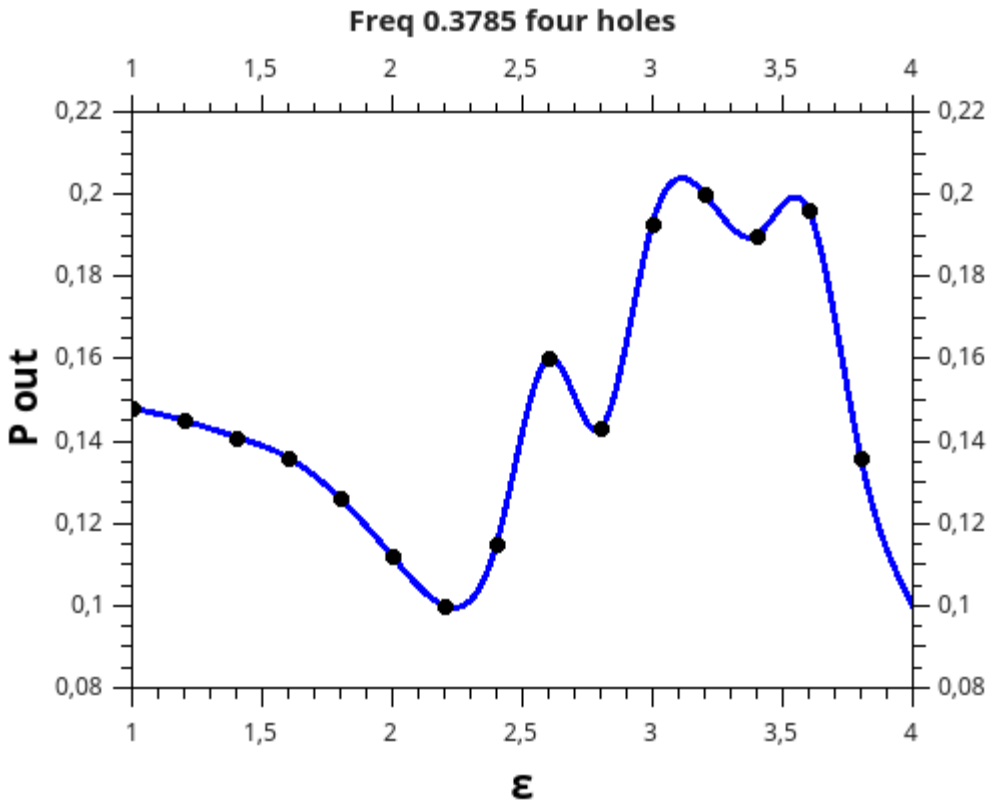


Рисунок 2.10 — Розрахована залежність потужності сигналу на виході інтерферометра від діелектричної проникності досліджуваного середовища

Розглянемо далі інший максимум проходження сигналу через інтерферометр. Цьому максимуму відповідає частота 0,4418 (позначено червоною стрілкою на рис. 2.11).

Зрозуміло, що у цьому випадку отвори в сигнальному плечі інтерферометра порожні (тобто заповнені діелектриком з одиничною діелектричною проникністю).

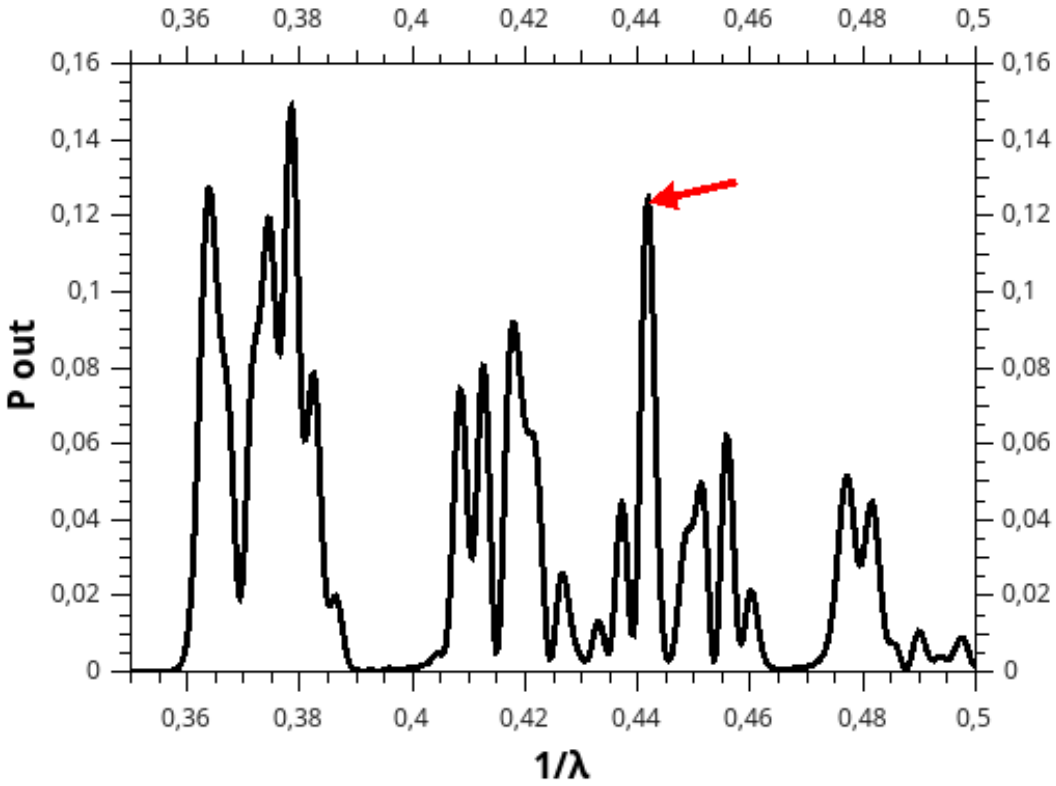


Рисунок 2.11 — Результат розрахунків спектральної характеристики інтерферометра Маха-Цендера з частотою 0,4418

На рис. 2.12 представлені результати розрахунку просторового розподілу амплітуди електричного поля в схемі інтерферометра на частоті 0,4418. Очевидно, що у цьому випадку, як і в попередньому, сигнал не проходить через сигнальне плече інтерферометра Маха-Цендера. Сигнал проходить через опорне плече, далі розгалужується на два потоки: один іде на вихід схеми, інший заходить в сигнальне плече, відбивається і також іде на вихід схеми.

Цікаво відзначити, що для цієї частоти в сигнальному плечі інтерферометра формується резонатор. Це видно по збільшеній амплітуді поля на ділянці сигнального плеча. В цьому резонаторі сигнал відбивається від отворів для досліджуваних речовин та від хвилеводного повороту.

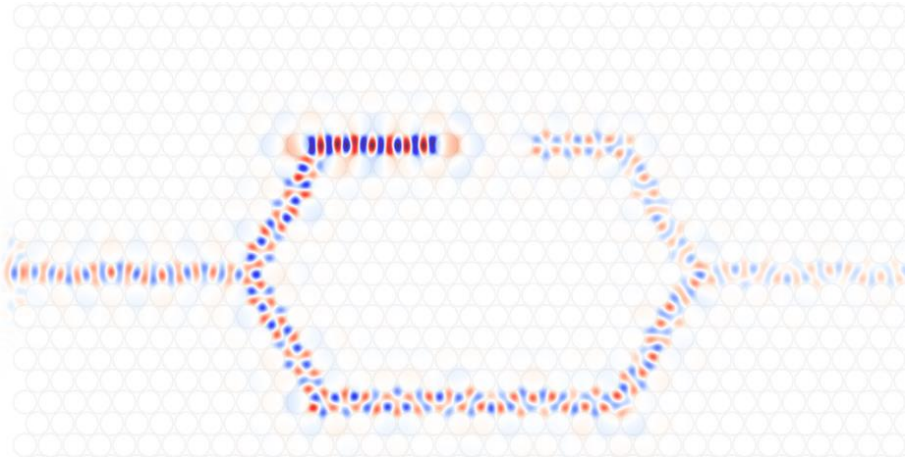


Рисунок 2.12 — Результати розрахунку амплітудного розподілу електричного поля частота 0,4418 ε = 1

Крім того, з рисунку видно, що в резонаторі спостерігається одномодове розповсюдження хвилі на відміну від інших ділянок плечей інтерферометра. Заповнення отворів в сигнальному плечі інтерферометра досліджуваними речовинами призводить до зміни спектральних характеристик схеми. Результати розрахунків безрозмірної потужності сигналу на виході інтерферометра для різних значень діелектричної проникності досліджуваної речовини представлені на рис. 2.13. Графік побудований для значень частоти сигналу поблизу частоти 0,4418. В цьому випадку діелектрична проникність змінювалася від 1 до 4 — з кроком 0,2. З рисунку видно, що зміна діелектричної проникності призводить до зміни величини потужності на виході інтерферометра та зсуву максимуму проходження уздовж частотної осі. Слід відзначити, що частотний зсув є доволі невеликим на відміну від зміни потужності. З рисунку видно, що зміна діелектричної проникності досліджуваної речовини супроводжується зміною потужності сигналу на виході інтерферометра у кілька разів. Таку зміну досить нескладно зафіксувати навіть не дуже чутливим обладнанням.

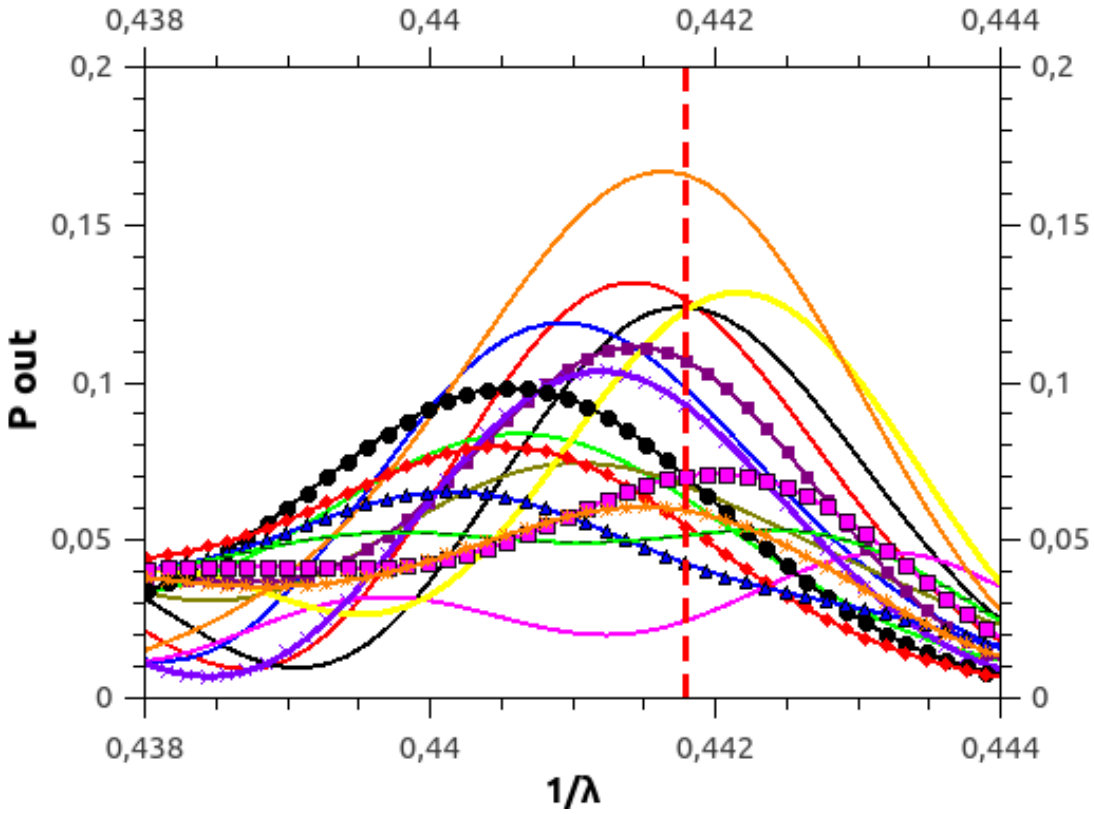


Рисунок 2.13 — Результати розрахунку спектральної характеристики сенсора у вузькому частотному діапазоні для робочої частоти 0,4418

На рис. 2.14 представлено залежність потужності на виході інтерферометра від діелектричної проникності досліджуваної речовини (частота 0,4418). На цій залежності можна виділити кілька ділянок з лінійним законом зміни потужності. Наприклад, максимальна чутливість схеми до зміни діелектричної проникності спостерігається в діапазоні $\varepsilon \in (2{,}0;\ 2{,}4)$. В цьому діапазоні потужність на виході інтерферометра змінюється майже на порядок і її залежність від діелектричної проникності є монотонною. Також можна використовувати ділянку $\varepsilon \in (2{,}4;\ 3{,}4)$, де спостерігається практичне монотонне зменшення потужності. Однак на цій ділянці характеристики чутливість схеми до зміни діелектричної проникності менша, ніж у попередньої.

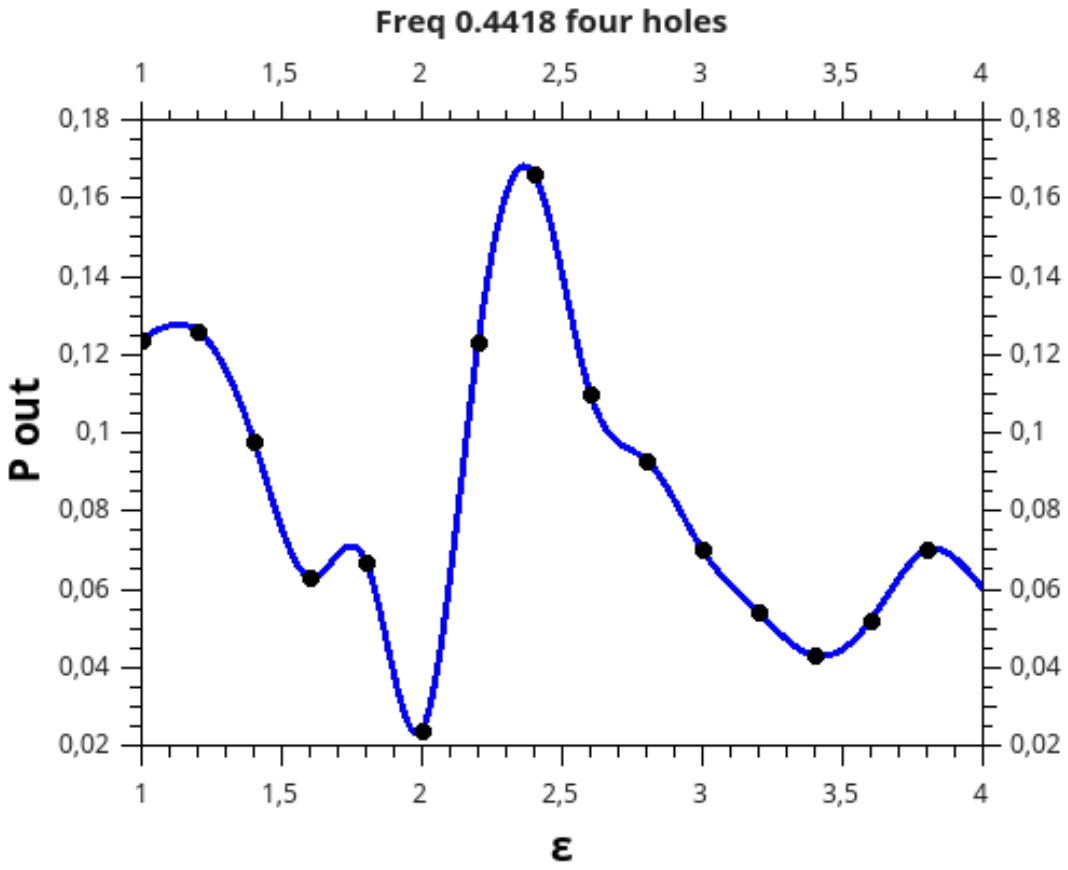


Рисунок 2.14 — Залежність потужності на виході інтерферометра від діелектричної проникності досліджуваної речовини (частота 0,4418)

Рисунок 2.15 ілюструє порівняння характеристик досліджуваної схеми на двох частотах, які відповідають максимумам проходження сигналу через інтерферометр Маха-Цендера. На основі цього рисунку можна обрати режим роботи інтерферометра та визначити інтервал значень діелектричної проникності зразків, де спостерігається максимальна чутливість схеми до зміни контрольних параметрів.

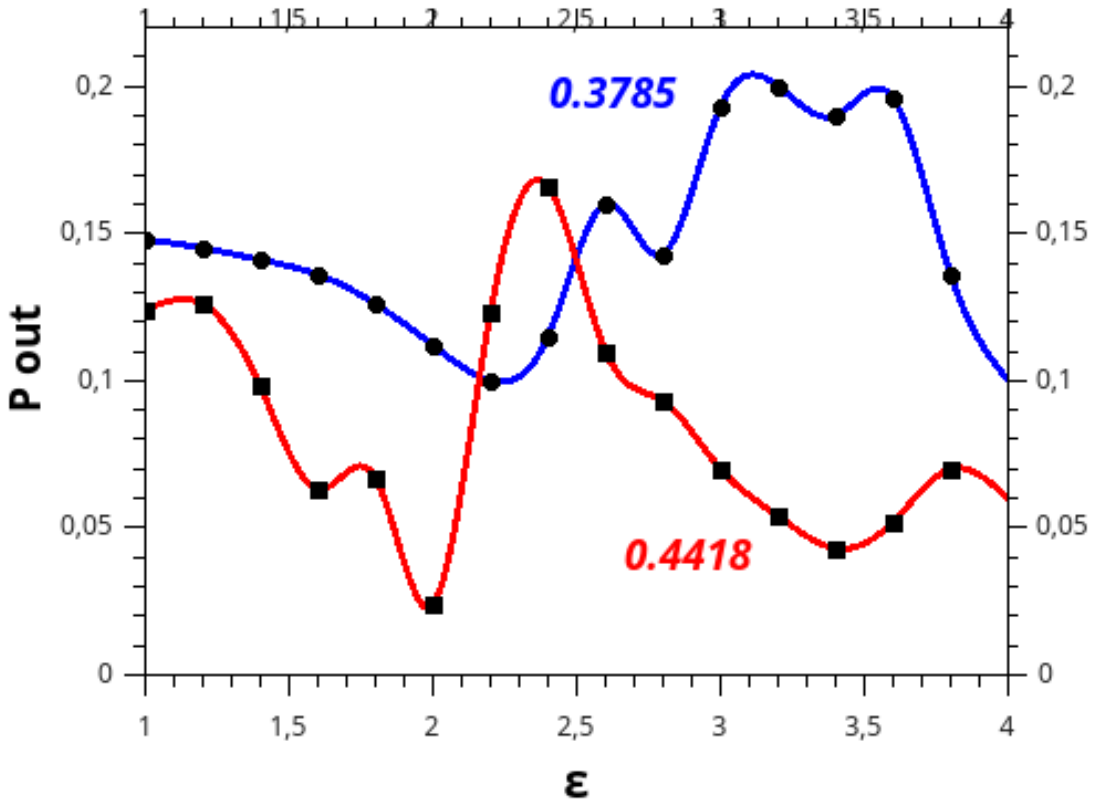


Рисунок 2.15 — Порівняння характеристик досліджуваної схеми на двох частотах, які відповідають максимумам проходження сигналу через інтерферометр Маха-Цендера

ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі зроблено аналітичний огляд науково-технічної літератури з питань пов'язаних з різними типами сенсорів їх принципом дії та конструкціями. Основну увагу було приділено сенсору на основі інтерферометра Маха-Цендера.

Обрано конструкцію фотонно-кристалічного інтерферометра Маха-Цендера на основі лінійних фотонно-кристалічних хвилеводів. Розроблено конфігураційний файл для пакету MEEP який дозволяє отримувати залежність коефіцієнта проходження від частоти та просторовий розподіл поля в фотонно-кристалічній структурі.

Проведено розрахунок коефіцієнта проходження хвилі через інтерферометр Маха-Цендера для кількох характерних частот, отримані просторові розподіли поля які свідчать про існування кількох режимів роботи інтерферометра.

Розраховані спектральні характеристики інтерферометра для різних значень діелектричної проникності досліджуваного зразка. Встановлені діапазони значень матеріальних параметрів зразка, де можна використовувати фотонно-кристалічний інтерферометр як сенсор матеріальних середовищ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Коломойцев Ю. В. Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение. Санкт-Петербург: Машиностроение, 1976. 296 с.

2. Скоков И.В. Оптические интерферометры. Москва: Машиностроение, 1975. 128 с.

3. Mach E. Uber den Verlauf von Funkenwellen in der Ebene und im Raume / E. Mach // Sitzungsbr. Akad. Wiss. Wien. 1878. V. 78. P. 819.

4. Von Neumann J. Sitzungsbr. Akad. Wiss. Wien / J. Neumann.// In John von Neumann Collected Work . 1978. V. 78. P. 819—838.

5. Colella P. The von Neumann Paradox for the Diffraction of Weak // J. Fluid Mech. 1990. V. 213. P. 71.

6. Пономарев Р.С. Модулятор интенсивности излучения на интерферометре Маха-Цендера. URL: http://www.fibopt.ru/rfo2011/presentation/A7-3.pdf (дата звернення 03.11.2020).

7. Skews B.W., Ashworth J.T. The physical nature of weak shock wave reflection // J. Fluid Mech. 2005. V. 542. P. 105

8. Афанасьев В.М. Электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха-Цендера // Прикладная фотоніка. 2016. Т. 3, № 4. С. 341.

9. Y.V. Sashkova, E.N. Odarenko. The modified Bragg waveguide with additional layers // Telecommunications and Radio Engineering. 2018. Vol. 77, No. 6. P.489—500.

10. Y.V. Sashkova, E.N. Odarenko, A.A. Shmat'ko, N.G. Shevchenko. Analysis of Slow Wave Modes in Modified Photonic Crystal Waveguides Using the MPB Package // IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. 2018, July 2—5, Kyiv, Ukraine, P. 164—167.

11. Гнатенко О.С., Чернишова Н.М., Крючков А.І. Методичні рекомендації та вимоги щодо оформлення пояснювальної записки атестаційної роботи. Харків: ХНУРЕ, 2018. 42 с.