

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

КОЧЕТОВА ЛЮДМИЛА АНАТОЛІЇВНА

УДК 537.86.

**ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕЛІНІЙНИХ СТРУКТУР ІЗ
СИЛЬНОЮ ЛОКАЛІЗАЦІЄЮ ПОЛЯ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2020

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Просвірін Сергій Леонідович,
Радіоастрономічний інститут НАН України
(м. Харків),
головний науковий співробітник відділу теоретичної
радіофізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Тарапов Сергій Іванович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України (м. Харків),
завідувач відділу радіоспектроскопії

доктор фізико-математичних наук, доцент
Бутрим Олександр Юрійович,
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна (м. Харків),
професор кафедри теоретичної радіофізики

Захист відбудеться "24" грудня 2020 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

Автореферат розісланий "20" листопада 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

В даний час проводяться глобальні дослідження з мініатюризації оптичних пристроїв, властивості яких змінюються за допомогою зміни інтенсивності поля, що падає, або прикладеної напруги [1-3]. Такі мініатюрні прилади можуть бути реалізовані на базі нелінійних періодичних структур (решіток). Властивості нелінійних решіток в цьому випадку можуть залежати від інтенсивності поля, що падає. Це новий сучасний науковий напрям, який часто називають «Керування світлом за допомогою світла» [4]. Для такого застосування необхідно, щоб решітка містила, наприклад, елементи з нелінійним діелектриком типу Керра [5-7]. В цьому випадку діелектрична проникність нелінійного діелектрика залежить від значення квадрату модуля електричного поля всередині решітки. Таким чином, решітка може характеризуватися двома значеннями коефіцієнта проходження або відбиття для одного і того ж значення інтенсивності поля, що падає. Одне зі значень коефіцієнта проходження (відбиття) буде відповідати випадку, коли інтенсивність поля, що падає, збільшується, інше значення коефіцієнта проходження (відбиття) відповідає випадку, коли інтенсивність поля, що падає, зменшується. Таким чином, буде відбуватися перемикання режимів. Слід зазначити, що важливою умовою для прояву властивостей нелінійного діелектрика в структурах є наявність сильного електричного поля всередині діелектрика. Тому є необхідність проектувати такі нелінійні решітки, які здатні концентрувати електромагнітне поле. Наприклад, це планарні решітки на нелінійній діелектричній підкладці, що підтримують режим замкнених мод.

Для застосування нелінійних решіток для створення оптичних пристроїв нового покоління необхідно чітко розуміти механізми отримання бістабільного режиму роботи решіток. Потрібно знати при яких значеннях інтенсивності поля, що падає, будуть здійснюватися перемикання. Необхідна оцінка значень інтенсивності поля всередині решіток, а так само необхідне розуміння які нелінійні матеріали найбільш прийнятні для використання в решітках. Побудова розв'язання задачі дифракції плоских електромагнітних хвиль на нелінійних решітках дозволяє опрацювати такі питання. Дослідження властивостей нелінійних решіток проводиться на основі вивчення їх властивостей в лінійному випадку, коли на решітку падає хвиля з невеликою інтенсивністю. Для цього моделюються різні геометрії таких решіток. Було побудовано алгоритми розв'язання у наступних задачах і проведено аналіз отриманих високочастотних резонансів структур, а саме: розсіювання електромагнітних хвиль на решітці з асиметричних півкілець [8-9], яка розташована на тонкій діелектричній підкладці; розсіювання електромагнітних хвиль на подвійній решітці типу fish-scale, яка розташована на тонкій діелектричній підкладці [10-11]; розсіювання електромагнітних хвиль на металевому екрані зі щільною, яка заповнена діелектриком [12]. Ці структури є перспективними для дослідження їх властивостей з використанням нелінійного діелектрика керровського типу.

В даний час досліджується питання про отримання бістабільного відгуку періодичної решітки на дефектних модах. Такі структури можуть концентрувати

поле в дефекті. В роботі [13] було вивчено дифракцію на решітці з металевих брусів з однорідним діелектричним заповненням щілин. Такий тип решітки викликає особливий інтерес, якщо заповнення щілин виконано з кусково-однорідних діелектриків. Це дозволить комбінувати різні типи матеріалів для заповнення, тим самим покращуючи характеристики структури, а також дасть можливість використовувати дефект в заповненні щілин, при наявності якого збільшується поле всередині структури. Таким чином, розробка алгоритму розв'язання лінійної задачі дифракції плоскої електромагнітної хвилі на решітці із брусів з кусково-однорідним заповненням є основою для розв'язання такої задачі в нелінійному режимі.

Отже, дослідження бістабільних властивостей нелінійних періодичних структур є багатообіцяючими завданнями, які увійдуть в основу зі створення малогабаритних оптичних перемикачів і оптичних транзисторів [14-16].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт у відділі квазіоптики Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України у рамках держбюджетних тем: «Розвинення методів і засобів оптики і квазіоптики для встановлення закономірностей та особливостей взаємодії терагерцевого випромінювання з фізичними і біологічними об'єктами» (0111U010479), «Розвиток та застосування оптичних і квазіоптичних методів для дослідження процесів генерації і перетворення електромагнітних хвиль терагерцевого, інфрачервоного і видимого діапазонів» (0117U004036).

Мета і задачі дослідження

Мета роботи – виявлення та дослідження нових резонансних властивостей і бістабільної взаємодії електромагнітних хвиль з нелінійними планарними одиночними та періодичними структурами складної форми інфрачервоного (ІЧ) діапазону.

Для досягнення поставленої мети треба було вирішити наступні задачі:

1. Отримати та дослідити бістабільні частотно-селективні властивості решітки з асиметричною формою елементів періодичної комірки на нелінійній діелектричній підкладці.

2. Отримати та дослідити бістабільні характеристики подвійної решітки типу fish-scale, яка розташована на нелінійній діелектричній підкладці.

3. Розробити спосіб збудження та керування властивостями дисипативного солітону в нелінійному магнітооптичному плоскому хвилеводі.

4. Розв'язати задачу багатомодової дифракції плоскої монохроматичної хвилі на періодичній решітці з ідеально провідних брусів із кусково-однорідним діелектричним заповненням щілин.

5. Отримати та дослідити бістабільні частотно-селективні властивості ідеально провідного металевих екрану з заповненням щілин нелінійним однорідним діелектриком керровського типу.

6. Розв'язати задачу розсіяння плоскої монохроматичної хвилі на періодичній решітці з металевих брусів із заповненням щілин нелінійним однорідним діелектриком керровського типу.

7. Отримати та дослідити бістабільні характеристики решітки з ідеально провідних брусів із нелінійним діелектричним дефектом в кусково-однорідному діелектричному заповненні щілин.

Об'єктом дослідження дисертації є процеси взаємодії електромагнітного поля зі складними структурами, які містять нелінійні включення.

Предметом дослідження є бістабільні або мультистабільні властивості складних нелінійних структур.

Методи дослідження

Для розв'язання поставлених завдань у дисертації було використано наступні методи: метод комплексних амплітуд, метод часткових областей, метод матриць передачі, метод інтегральних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна визначається наступними оригінальними теоретичними результатами, які отримано вперше:

1. Отримано бістабільні залежності коефіцієнтів проходження на замкнених модах планарної решітки з асиметрично-розірваних кілець та подвійної планарної решітки типу fish-scale, коли обидва типи решіток розташовано на підкладці з нелінійного діелектрика керровського типу в інфрачервоному діапазоні. Досліджено планарну магнітооптичну хвилевідну систему та продемонстровано ефективний спосіб магнітооптичного керування поширенням дисипативних солітонів в такій системі.

2. Розв'язано задачу розсіяння плоскої електромагнітної хвилі на решітці з ідеально провідних прямокутних брусів із багат шаровим діелектричним заповненням щілин у багатомодовому режимі та отримано ІЧ частотні спектри резонансів решітки у лінійному випадку. Отримано ІЧ частотні спектри резонансів на дефектних модах решітки, коли щілини заповнено N -шарами, що попарно чергуються, а середній шар є дефектний діелектричний шар з меншою/більшою діелектричною проникністю, ніж у регулярному заповненні щілин, та показано збільшення добротності резонансу на досліджуваній дефектній моді.

3. Отримано мультистабільні залежності коефіцієнтів проходження від інтенсивності поля, що падає, через щілину в ідеально провідному металевому екрані з заповненням нелінійним однорідним діелектриком керровського типу та через решітку з металевих брусів із заповненням щілин нелінійним діелектриком керровського типу, яка розміщена на тонкій діелектричній підкладці у випадку H -поляризованої хвилі в довгохвильовому наближенні в інфрачервоному діапазоні.

4. Отримано бістабільні залежності коефіцієнтів проходження на дефектній моді від інтенсивності поля, що падає, через решітки з ідеально провідних брусів коли щілини заповнено N -шарами, що попарно чергуються, а середній шар є нелінійний діелектричний дефектний шар керровського типу нелінійності з меншою діелектричною проникністю ніж у регулярному заповненні щілин в багатомодовому режимі в інфрачервоному діапазоні.

Практичне значення одержаних результатів

Нелінійні періодичні структури керровського типу нелінійності є основою цілого класу ультракомпактних приладів оптики й інтегральної фотоніки. Результати, що отримані в рамках дисертаційної роботи, поглиблюють розуміння фізичних явищ при взаємодії електромагнітних хвиль з нелійними періодичними структурами складної форми. Запропоновані геометрії планарних нелінійних решіток у даній роботі дозволяють значно збільшити концентрацію

електромагнітного поля всередині решіток. Ефективний спосіб для розв'язання задачі розсіювання електромагнітних хвиль на нелінійних решітках дозволяє оцінити необхідні величини інтенсивностей поля, що падає, при яких виявляються бістабільні частотно-селективні властивості решіток. Розроблені комп'ютерні програми дають можливість отримати характеристики розсіювання хвиль на розглянутих решітках при їх моделюванні з використанням різних геометричних параметрів і нелінійних матеріалів. За допомогою розробленого алгоритму розв'язання задачі багатомодової дифракції хвиль на решітці з ідеально провідних брусів з багат шаровим діелектричним заповненням щілин було отримано та вивчено бістабільні характеристики решітки з ідеально провідних брусів з дефектним шаром в періодичному заповненні щілин. Особливістю таких бістабільних резонансів на дефектних модах є їх прояв при дуже низьких величинах інтенсивностей поля, що падає. Так, нелінійні решітки, що підтримують режим замкнених мод або дефектні моди, можуть бути використані як логічні елементи для створення оптичної пам'яті та для проектування малогабаритних оптичних перемикачів.

Особистий внесок здобувача

У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в участі при формулюванні постановки завдань, проведенні чисельних експериментів, обговоренні отриманих результатів, визначенні наступних етапів роботи та підготовки наукових матеріалів до публікацій. У роботах [1*, 3*, 7*, 8*, 10*, 11*] автором самостійно були розроблені комп'ютерні програми для обчислення залежностей інтенсивності електричного поля всередині нелінійних періодичних структур і коефіцієнтів проходження від інтенсивності поля, що падає, на фіксованій частоті, а також обчислення залежностей інтенсивності електричного поля всередині нелінійних решіток і коефіцієнтів проходження від частоти при фіксованому значенні інтенсивності поля, що падає. У роботах [2*, 4*, 5*] автор брала активну участь в оптимізації параметрів обраних структур і аналізі отриманих результатів. Отримані результати продемонстрували бістабільний режим роботи наступних нелінійних структур: решітка з асиметрично-розірваних кілець; подвійна решітка типу fish-scale; екран із ідеально провідного металу зі щілиною, яка заповнена нелінійним діелектриком; решітка із металевих брусів з нелінійним діелектричним заповненням щілин і решітка із ідеально провідних брусів з нелінійним дефектним шаром в шаруватому періодичному заповненні щілин. У роботах [6*, 9*] автором було побудовано алгоритм для розв'язання задачі багатомодової дифракції електромагнітної хвилі на решітці із ідеально провідних брусів з багат шаровим діелектричним заповненням щілин, було розроблено комп'ютерну програму для обчислення розподілу електричного поля всередині щілин і побудови частотного спектру решітки. Результати було отримано у випадках періодичного шаруватого заповнення щілин і наявності дефектного шару в їх заповненні. Автором було проведено дослідження про вплив дефекту в решітці на її електродинамічні характеристики.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень за темою дисертації доповідались на наукових семінарах Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, а

також на міжнародних і українських конференціях: The International Conference on Laser and Fiber-Optical Network Modeling “LFNM” (Sevastopol 2010); The International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic Theory “DIPED” (Tbilisi 2010); The International Conference of Days on Diffraction “DD” (Saint Petersburg 2011); The 11th International Congress on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science “TCSET” (Lviv-Slavske 2012); The Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics “YSC” (Kharkiv 2013, 2014); The International Symposium Physics and Engineering of MM and Sub-MM Waves “MSMW” (Kharkiv 2016); The International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory “MMET” (Lviv 2016); The International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering “YSF” (Kharkiv 2016, Lviv 2017); URSI-Germany Kleinheubach Conference 2019 (Milttenberg 2019).

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 17 наукових роботах, у тому числі в 6 статтях [1*-6*] у профільних закордонних наукових журналах з імпакт-фактором, які входять до наукометричної бази SCOPUS, і в 11 збірниках доповідей на українських і міжнародних конференціях, основні з них [7*-11*].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку А. Обсяг дисертації становить 135 сторінок. Вона містить 35 рисунків і 163 бібліографічних посилань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та список публікацій.

В розділі 1 наведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи. Представлено короткий опис прикладів дифракційних періодичних структур різної геометрії та викладено зміст про вагомий внесок вченими всесвітньовідомої харківської школи теорії дифракції в теорію дифракції електромагнітних хвиль на періодичних структурах. Розглянуто види нелінійності та прояви нелінійних ефектів в оптиці та фотоніці. Обрано керровський тип нелінійності діелектриків для дослідження характеристик нелінійних періодичних структур. Наведено механізми прояву резонансів проходження нелінійних решіток у разі резонансів на запертих або дефектних модах за рахунок спеціальної геометрії структур.

В розділі 2 розглядається нормальне падіння плоскої електромагнітної хвилі на планарні решітки двох різних конфігурацій. Перша решітка виконана з металевих асиметрично-розірваних кілець, періодично розташованих на нелінійній діелектричній підкладці (Рис. 1, а). Друга решітка складається з двох нескінченних решіток типу fish-scale, розташованих з двох сторін нелінійного шару діелектричного матеріалу (Рис. 1, б). Передбачається, що товщина шару h та період $d_x = d_y = d$ кожної решітки менше довжини падаючої хвилі λ .

Як нелінійний діелектрик було розглянуто діелектрик з керровським типом нелінійності, коли значення діелектричної проникності нелінійного діелектрика залежить від квадрата модуля електричного поля всередині нього $|E_{in}|^2$ або прямо пропорційно внутрішній інтенсивності поля I_{in} : $\varepsilon = \varepsilon_l + \varepsilon_n |I_{in}|$, де $|I_{in}| \sim |E_{in}|^2$, ε_l - діелектрична проникність нелінійного матеріалу, ε_n - коефіцієнт нелінійності. Так як розмір елементарної комірки кожної решітки менше довжини хвилі ($d < \lambda$), то було введено такі припущення: за амплітуду струму на елементах бралося середнє значення амплітуди струму $\bar{J}$. Вважалося, що внутрішня інтенсивність поля в підкладці прямо пропорційна квадрату усередненої амплітуди струму на елементах решітки. Нелінійну підкладку було розглянуто як однорідний діелектричний шар незалежно від того, наскільки сильне поле, що падає. Ми враховували втрати в діелектрику, тобто $\varepsilon_l = \varepsilon'_l + i\varepsilon''_l$, де ε'_l - дійсна частина і ε''_l - уявна частина діелектричної проникності шару. Таким чином, діелектрична проникність підкладки залежить від середнього значення струму на елементі: $\varepsilon = \varepsilon'_l + i\varepsilon''_l + \varepsilon_n I_{in}(\bar{J})$.

Елементарна комірка решітки з металевих асиметрично-розірваних кілець складається з двох металевих дуг з однаковою шириною $2w$ та радіусом a . Ці елементи розташовані один навпроти одного так, що правий зазор φ_1 між ними трохи менше лівого φ_2 . Тобто елементарна комірка асиметрична щодо осі Oy (Рис. 1, а). Така асиметрія необхідна для збудження протифазного коливання струмів на елементах в разі, коли вектор напруженості електричного поля, що падає, спрямовано уздовж дуг. При такій поляризації в решітці можуть збуджуватися резонансні коливання струму на замкнених модах. Вважається, що амплітуди струмів на дугах в кожній комірці решітки на резонансній частоті рівні.

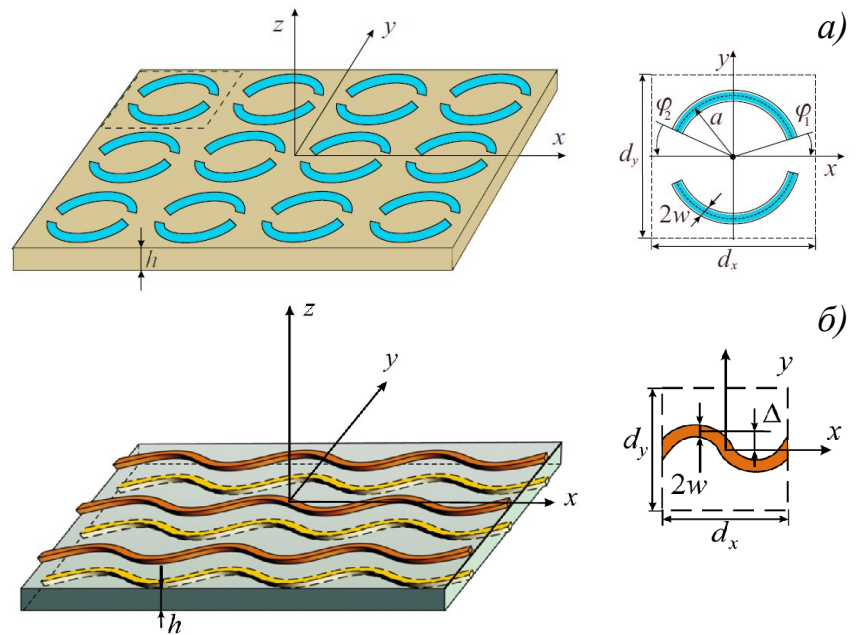


Рисунок 1– Геометрія решітки й її елементарної комірки: з асиметрично-розірваних кілець (а); *mushroom fish-scale* (б).

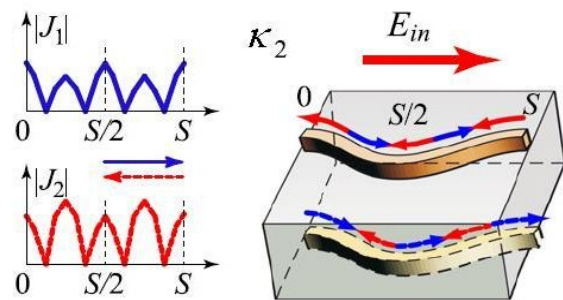


Рисунок 2 – Розподіл поверхневого струму уздовж стрічок, розміщених на верхній і нижній сторонах підкладки в структурі *mushroom fish-scale*.

Усереднене значення струму уздовж поверхні елемента $\bar{J}$ решітки обчислюється чисельно. Параметри структури було обрано наступними: $d = 900$ нм, $h = 0,1d$, $a = 0,4d$, $2w = 0,06d$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $\varphi_2 = 25^\circ$, діелектрична проникність підкладки $\varepsilon_l = 4,0 + i0,02$ і коефіцієнт нелінійності $\varepsilon_n = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кВм}$.

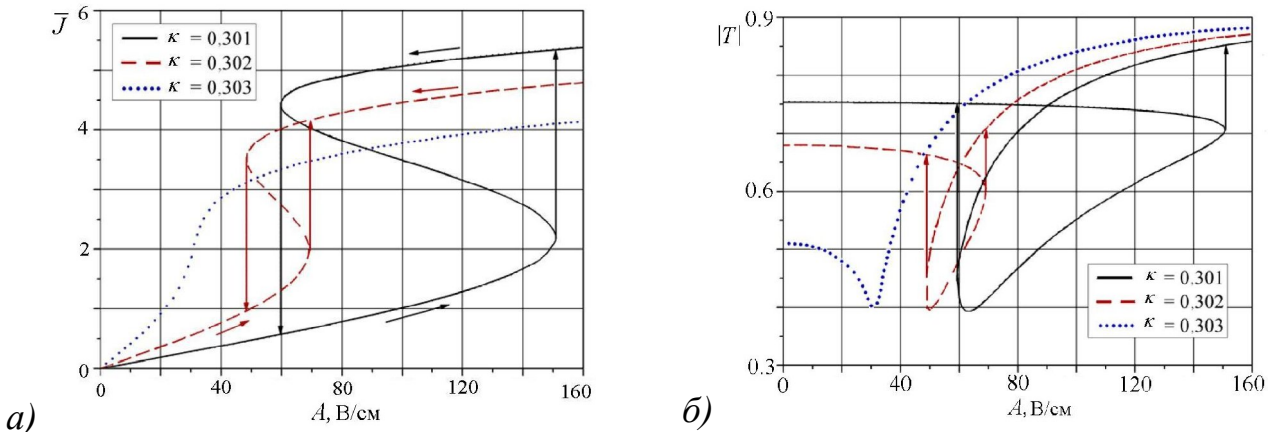


Рисунок 3 – Залежність усередненої амплітуди струму $\bar{J}$ на елементах решітки з металевих асиметрично-розірваних кілець (а) та коефіцієнта проходження $|T|$ (б) від амплітуди поля A , що падає: при $\kappa = 0,301$ (суцільна лінія), $\kappa = 0,302$ (штрихова лінія) і $\kappa = 0,303$ (крапкова лінія).

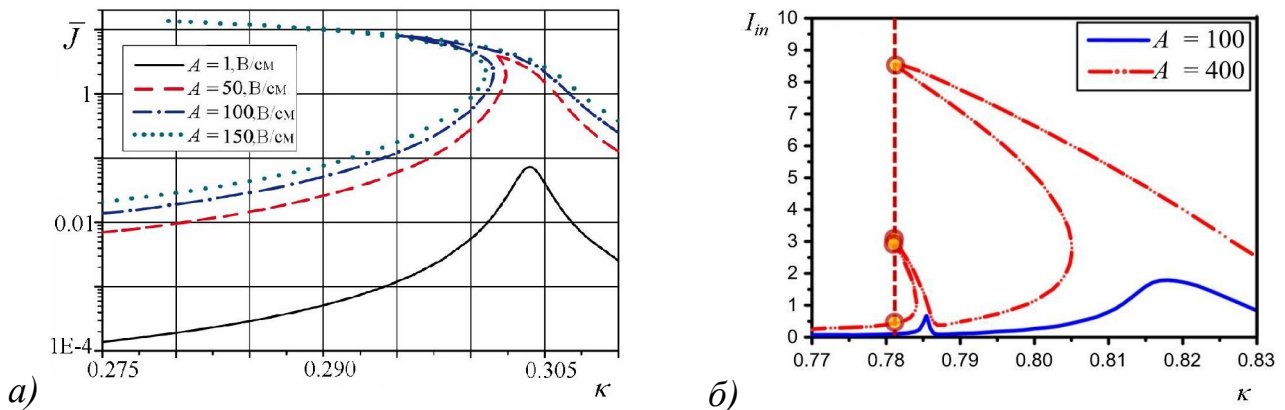


Рисунок 4 – Частотна залежність амплітуди усередненого струму $\bar{J}$ на елементах решітки з металевих асиметрично-розірваних кілець (а) та інтенсивності внутрішнього поля I_{in} решітки типу fish-scale (б).

Кожна решітка типу fish-scale складається з ідеально провідних металевих хвилястих стрічок. Довжину стрічки в комірниці позначено S , ширину металевих стрічок $2w$ і їх відхилення від прямої Δ . Падаюча хвиля поляризована вздовж осі Ox . Розглянуто випадок, коли розподілом струму є протифазні коливання струму в дугах кожної стрічки решітки. При цьому струми протікають в протилежних напрямках на верхній і нижній решітках (Рис. 2). Для верхньої решітки буде прояв резонансу на замкнених модах, який обумовлено за рахунок інтерференції падаючої хвилі та відбитої хвилі від нижньої решітки. Усереднене значення струму уздовж поверхні елемента $\bar{J}$ решітки обчислюється як $\bar{J} = (J_1 + J_2)/2$, де J_1 і J_2 - амплітуди струмів на стрічках верхньої та нижньої решіток. Параметри структури

для розрахунків її характеристик: $2w/d = 0,05$, $h/d = 0,2$, $\Delta/d = 0,25$, $\varepsilon_l = 3,0 + i0,01$ і $\varepsilon_n = 5 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кВм}$.

На Рис. 3, а показано залежності амплітуди усередненого струму $\bar{J}$ на елементах решітки з металевих асиметрично-розірваних кілець від амплітуди поля A , що падає, в нелінійному випадку на фіксованих частотах. При $\kappa = 0,301$ проявляється найбільш широкий гістерезис, коли амплітуда поля, що падає, змінюється з 60 В/см до 150 В/см . При $\kappa = 0,302$ гістерезис вузький на інтервалі $A = 49 - 70 \text{ В/см}$. При $\kappa = 0,303$ гістерезисна петля амплітуди усередненого струму не утворюється внаслідок слабкого струму на елементах.

На Рис. 3, б представлено залежність коефіцієнта проходження $|T|$ структури від зміни амплітуди поля A , що падає. Так як значення коефіцієнта проходження решітки залежить від амплітуди усередненого струму на її елементах, то зміна амплітуди струму від високого до низького значення приводить до стрибкоподібної зміни перепускності решітки. Профіль побудованих кривих для коефіцієнтів проходження також має гістерезисну петлю при $\kappa = 0,301$ і $\kappa = 0,302$. Стрілки на графіках вказують на стрибкоподібну зміну коефіцієнта проходження при циклічній поведінці амплітуди поля, що падає, яка відповідає бістабільному режиму роботи решітки. Було отримано частотні залежності амплітуди усередненого струму на елементах решітки (Рис. 4, а) при фіксованих значеннях амплітуди поля, що падає: $A = 1 \text{ В/см}$ (суцільна лінія), $A = 50 \text{ В/см}$ (штрихова лінія), $A = 100 \text{ В/см}$ (штрих-пунктирна лінія), $A = 150 \text{ В/см}$ (крапкова лінія). При великих амплітудах поля ($100 - 150 \text{ В/см}$), що падає, відбувається деформація профілю піку резонансу так, що частотна залежність амплітуди усередненого струму стає багатозначною внаслідок збудження режиму замкнених мод в решітці.

У міру збільшення амплітуди поля, що падає, лінії графіка частотної залежності інтенсивності внутрішнього поля решітки типу fish-scale набувають форму вигнутих резонансних кривих (Рис. 4, б). Коли цей зсув наближає збудження до резонансного стану, в системі локалізується більш сильне поле, яке підсилює зміщення резонансу. Цей позитивний зворотний зв'язок приводить до формування петлі гістерезису в інтенсивності внутрішнього поля щодо амплітуди поля, що падає, і, як результат, при деякій амплітуді поля, що падає, частотні залежності інтенсивності внутрішнього поля набувають вигляду вигнутих резонансних кривих. Очевидно, що в деяких смугах (Рис. 4, б) відбувається явище бістабільності, тобто частотна залежність коефіцієнта проходження є багатозначною функцією.

У розділі представлено короткий опис використання нелінійного діелектричного матеріалу як нелінійний шар, що входить до складу нелінійної планарної магнітооптичної хвилевідної системи. Система складається з нелінійного направляючого шару, розміщеного на магнітооптичній підкладці, яка намагнічується струмом, що протікає N тонкими провідними дротами. Така система здатна підтримувати та здійснювати керування дисипативними солітонами, тобто стійкими відокремленими хвилями. Поширення солітонів та вплив на їх форми було реалізовано за допомогою просторово-неоднорідного зовнішнього магнітного поля, яке індукується набором прямих провідних дротів, розташованих на шарі.

В розділі 3 розв'язано задачу дифракції плоскої електромагнітної хвилі на решітці, яка складається з ідеально провідних металевих (PEC) брусів прямокутного профілю (Рис. 5). Щілини між брусами заповнено з N -числа однорідних шарів з однаковою товщиною Δ , та кожен шар має власне значення діелектричної проникності ε_j при $j=1..N$. Геометричні параметри решітки: період решітки d , її товщина a та ширина щілин δ . Падаюча плоска монохроматична хвиля є поляризованою в напрямку осі Ox . Ми припускаємо, що період решітки d менше довжини падаючої хвилі λ . Задачу розв'язано методом часткових областей у багатоводному режимі.

Мета задачі - дослідження частотних характеристик решітки на дефектній моді. Перший крок - дослідження властивостей решітки з періодичним заповненням щілин з кварцу з діелектричною проникністю $\varepsilon_c = 2,1$ (непарні шари) і з кремнію з діелектричною проникністю $\varepsilon_s = 12,8$ (парні шари). Другий крок - вивчення властивостей решітки, коли середній шар (дефектний шар) в заповненні щілин представлено діелектриком з діелектричною проникністю ε_d , відмінною від кремнію.

Для розрахунків було обрано $N = 15$ -шарове заповнення. Параметри решітки: $\delta = 0,5d$, $a = 4,5d$, $\Delta = 0,3d$. Довжина хвилі, що падає, $\lambda = 1,5$ мкм. Кількість хвильових мод $m = 0, 1, 2$ і просторових гармонік $n = 0, \pm 1, \pm 2$. Зі збільшенням порядку усічення спектра, отримані спектральні характеристики решітки залишаються незмінними в межах 1%, подальше збільшення кількості врахованих гармонік є недоречним.

Графіки на Рис. 6 відповідають трьом типам заповнень щілин решітки. Перший тип - періодичне заповнення (Рис. 6, чорна штрих-пунктирна лінія). На частотах 0,237 і 0,416 є два резонанси, які розташовані поблизу меж забороненої зони, яка займає частотний діапазон $0,254 < \kappa < 0,384$.

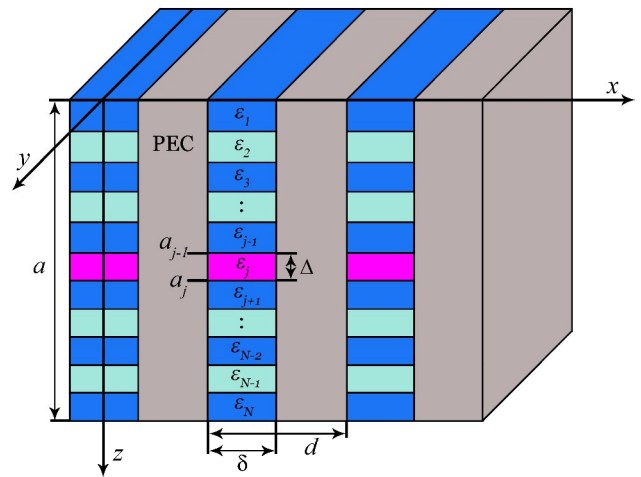


Рисунок 5 – Геометрія решітки з PEC брусів з неоднорідним заповненням щілин. Дефектний шар розташований між межами a_{j-1} і a_j .

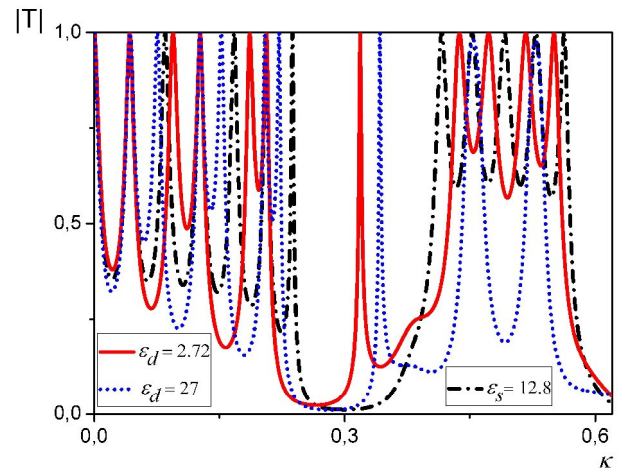


Рисунок 6 – Спектр пропускання для решітки з трьома значеннями діелектричної проникності середнього шару в щілинах: $\varepsilon = 12,8$ - періодичне заповнення (чорна штрих-пунктирна лінія), $\varepsilon_d = 2,72$ (червона суцільна лінія) і $\varepsilon_d = 27$ (синя крапкова лінія).

Другий ($\varepsilon_d < \varepsilon_s$) і третій ($\varepsilon_d > \varepsilon_s$) типи заповнення щілин відповідають решітці з дефектом. Криві відповідають випадку, коли другий і третій типи щілинного заповнення мають дефектний шар з епоксидного компаунду з $\varepsilon_d = 2,72$ (Рис. 6, червона суцільна лінія) і рутил компаунду $\varepsilon_d = 27$ (Рис. 6, синя крапкова лінія) відповідно. Коли діелектрична проникність дефектного шару зменшується, резонанси решітки з дефектом зміщуються в область коротких довжин хвиль щодо спектральних характеристик решітки без дефекту. При збільшенні діелектричної проникності дефектного шару відбувається зміщення резонансів в довгохвильову область. Ми бачимо два добротних резонанси на дефектних модах на частотах 0,318 і 0,341 в межах ширини зони запирання решітки без дефекту. Добротності першого та другого резонансів складають 66,25 і 83,21. Слід зазначити, що в досліджуваному варіанті заповнення щілин решітки центральне розташування дефектного шару є важливим моментом в керуванні положенням резонансу в смузі зони запирання. При будь-якому іншому розміщенні дефекту в щілинах резонанс на дефектній моді в межах зони запирання регулярної решітки не спостерігається.

На Рис. 7 представлено розподіли модулів величин внутрішнього електричного поля по товщині структури всередині щілин решітки з дефектним шаром $\varepsilon_d = 2,72$ на резонансній частоті $\kappa = 0,318$ (суцільна лінія) і решітки з дефектним шаром $\varepsilon_d = 27$ на резонансній частоті $\kappa = 0,341$ (крапкова лінія). Розподіл внутрішнього електричного поля по товщині решітки вздовж z/d при $\kappa = 0,318$ має тільки один глобальний максимум зі значенням 165,42, який розташований в середині товщини дефектного шару. Це пов'язано з розподілом непарної моди, коли довжина хвилі нижчої моди відповідає товщині щілини. Розподіл внутрішнього електричного поля при $\kappa = 0,341$ має два максимальних значення, приблизно 92,91, внаслідок поширення парної моди, так як в цьому випадку середнє значення діелектричної проникності в щілині більше, ніж в попередньому випадку. Тут максимумами поля зосереджені на краях дефектного шару. Таким чином показано, що наявність дефекту в решітці приводить до концентрації електромагнітного поля в області, яку займає дефектний шар, і до гострого резонансу на дефектній моді.

В розділі 4 наведено дослідження характеристик решітки, яка складається з металевих брусів прямокутного поперечного перерізу, щілини якої заповнено нелінійним діелектричним матеріалом з керровським типом нелінійності. По суті, кожна щілина є хвилевідною областю взаємодії падаючої електромагнітної хвилі з нелінійним середовищем. В розділі представлено опис бістабільних властивостей

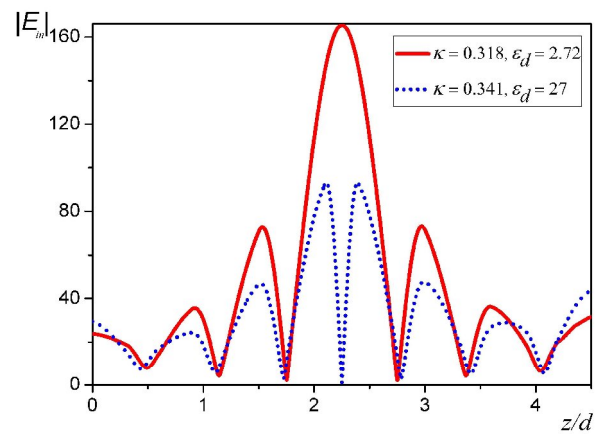


Рисунок 7 – Розподіл модуля внутрішнього електричного поля $|E_{in}|$ уздовж z/d решітки з дефектом на резонансних частотах: 0,318 (суцільна лінія) і 0,341 (крапкова лінія).

фрагменту решітки з металевих брусів, а саме щілини в ідеально провідному металевому екрані, яку заповнено нелінійним діелектриком керровського типу. Це є відповідним кроком в дослідженні задачі дифракції плоскої електромагнітної хвилі на нелінійній решітці з брусів. Далі розглядалось нормальне падіння плоскої електромагнітної хвилі на нелінійну решітку з брусів. Розглянуто два випадки заповнення щілин решітки нелінійним діелектриком.

Перший варіант - нелінійне однорідне діелектричне заповнення щілин решітки (Рис. 8). Тут продемонстровано спосіб оцінки значень інтенсивності поля падаючої хвилі для прояву бістабільних або мультістабільних характеристик структури в довгохвильовому наближенні. Решітку виконано зі срібних (Ag) брусів з прямокутним поперечним перерізом, періодично розташованих на плоскій підкладці з діоксиду кремнію (SiO_2). Щілини між брусами заповнено нелінійним діелектриком - арсенідом галію (GaAs). Таким чином, структура є періодичною системою та складається з елементів двох матеріалів, які чергуються з лінійними та нелінійними властивостями. Період решітки позначено d і її товщина a , ширина щілин θ . На довжині хвилі $\lambda = 1240$ нм відносна діелектрична проникність срібла має величину $\varepsilon_a = -81,5 + i5,1$. Відносна діелектрична проникність арсеніду галію залежить від інтенсивності електричного поля $\varepsilon_b = \varepsilon_{b1} + \varepsilon_{b2}|E|^2$, де діелектрична проникність $\varepsilon_{b1} = 11,0$, коефіцієнт нелінійності $\varepsilon_{b2} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кВм}$. Діелектрична проникність діоксиду кремнію має величину $\varepsilon_3 = 2,1$. Передбачалося, що решітку виконано з надтонких шарів металу та нелінійного діелектрика. Період структури d набагато менше довжини електромагнітної хвилі λ , що падає, в матеріалах решітки ($d \ll \lambda$). Для розрахунку нелінійного відгуку досліджуваної структури використано підхід, в якому решітку розглянуто як шар з ефективного неперервного анізотропного середовища з ефективним тензором нелінійної діелектричної проникності:

$$\hat{\varepsilon}_{eff} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}.$$

Отримано вирази для компонент тензора ефективної діелектричної проникності $\hat{\varepsilon}_{eff}$ в разі, коли вектор напруженості електричного поля $\vec{E}$ паралельний до брусів (Е-поляризація)

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = \eta \varepsilon_b + (1 - \eta) \varepsilon_a,$$

і для випадку, коли вектор $\vec{E}$ перпендикулярний до брусів (Н-поляризація)

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_a \varepsilon_b / (\eta \varepsilon_a + (1 - \eta) \varepsilon_b),$$

де $\eta = \theta/d$ - коефіцієнт заповнення діелектриком. Задачу розв'язано методом комплексних амплітуд.

Коли інтенсивність поля, що падає, велика (нелінійний режим), діелектрична проникність арсеніду галію в щілинах решітки істотно залежить від напруженості електричного поля E_{in} , та тому решітка стає неоднорідною вздовж осі Oz . В такому самоузгодженому підході було нехтувано впливом цієї неоднорідності на електродинамічні властивості досліджуваної структури, та розв'язання задачі нелінійної дифракції будувалося шляхом усереднення квадратичної величини електричного поля всередині решітки по її товщині, аналогічно до розділу 2. Потім усереднене значення поля застосовували для визначення фактичної діелектричної проникності всередині щілин $\varepsilon_b = \varepsilon_{bl} + \varepsilon_{bn} |E_{in}|^2$ для ефективної діелектричної проникності ε_e еквівалентного шару. Нелінійне рівняння пов'язано з середнім значенням квадрата амплітуди електричного поля:

$$E_{in}(A) = A Q \left(\varepsilon_e |E_{in}(A)|^2 \right),$$

де $\varepsilon_e = \varepsilon_{xx}$ і $\varepsilon_e = \varepsilon_{yy}$ є ефективними діелектричними проникностями для Н-поляризації та Е-поляризації відповідно. Амплітуда поля A , що падає, де $\varepsilon_e = \varepsilon_{xx}$ і $\varepsilon_e = \varepsilon_{yy}$ є ефективними діелектричними проникностями для Н-поляризації та Е-поляризації відповідно. Амплітуда поля A , що падає, є параметром цього нелінійного рівняння. Було застосовано формули переходу від значень електричного поля до значень інтенсивності поля $I = n |E|^2 / 240\pi$ [Вт/см²], де n - показник заломлення. Параметри решітки для всіх розрахунків було взято $\eta = 0,8$ і $a/\lambda = 0,5$.

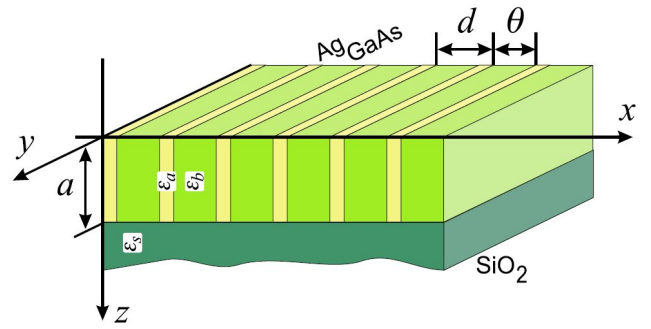


Рисунок 8 – Геометрія решітки з металевих прямокутних брусків.

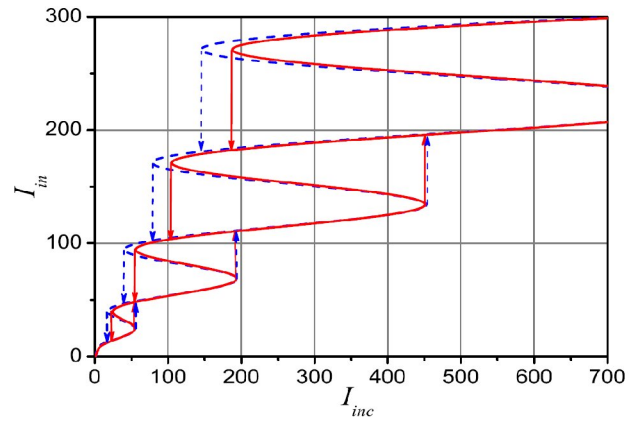


Рисунок 9 – Залежність інтенсивності внутрішнього поля I_{in} від інтенсивності поля I_{inc} , що падає, Н-поляризованої хвилі для решітки у вільному просторі (суцільна лінія) та решітки на підкладці (штрихова лінія).

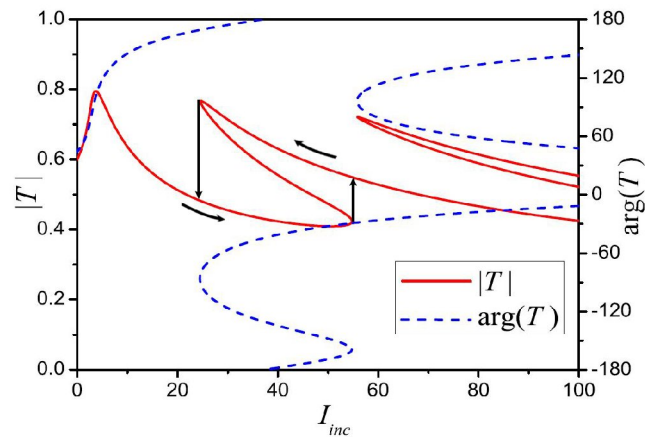


Рисунок 10 – Модуль (суцільна лінія) і фаза (штрихова лінія) коефіцієнта проходження відносно інтенсивності поля I_{inc} , що падає, Н-поляризованої хвилі для решітки, розміщеної на підкладці.

Характерні криві залежності інтенсивності внутрішнього поля I_{in} від інтенсивності поля I_{inc} , що падає, показано на Рис. 9 в разі Н-поляризованої хвилі. У міру збільшення амплітуди падаючої хвилі функція $I_{in}(I_{inc})$ стає двозначною, а потім багатозначною. Величина інтенсивності внутрішнього поля має різкі стрибки між різними станами, коли величина поля, що падає, монотонно збільшується/зменшується. Залежність внутрішньої інтенсивності від інтенсивності поля, що падає, при її зменшенні виявляється іншою порівняно з випадком при зростанні. Ці переходи відзначено вертикальними стрілками, які вказують на мультистабільний режим роботи решітки.

Залежність модуля коефіцієнта проходження $|T|$ від інтенсивності поля I_{inc} , що падає, в разі Н-поляризованої падаючої хвилі представлено на Рис. 10 (суцільна лінія). Основна хвилевідна мода плоского хвилеводу з металевими боковими стінками ефективно збуджується всередині щілин решітки при будь-якій її ширині. В результаті відбиття основної хвилевідної моди від відкритих кінців плоских хвилеводів на площинах $z = 0$ і $z = a$ в кожній щілині утворюється поле стоячої хвилі. На певній довжині хвилі відбувається резонанс. Резонансна довжина хвилі залежить від діелектричної проникності заповнення щілин, яка, в свою чергу, визначається інтенсивністю внутрішнього поля. Таким чином, залежність величин коефіцієнта проходження/відбиття від інтенсивності поля, що падає, проявляються як максимуми та мінімуми, які чергуються. Це пов'язано з конструктивною та деструктивною інтерференцією хвиль всередині структури, характеристики інтерференційних процесів для цих хвиль змінюються при зміні внутрішньої інтенсивності I_{in} . Фазова зміна коефіцієнта проходження $\arg(T)$ решітки також характеризується стрибкоподібною поведінкою при збільшенні та зменшенні інтенсивності поля, що падає (Рис. 10, штрихова лінія).

Другий варіант - $N=15$ -шарове діелектричне заповнення щілин решітки з РЕС брусів, тільки середній шар виконано з нелінійного діелектричного матеріалу керровського типу нелінійності. В такому разі бістабільні характеристики решітки отримано на дефектній моді в резонансному діапазоні. Опис постановки задачі та параметри решітки для розрахунків повністю ідентичні з випадком, який наведено в Розділі 3. Восьмий шар у щілинах є дефектний шар, який розташовано між межами a_7 і a_9 . Постійна діелектрична проникність дефектного шару $\varepsilon_{dl} = 2,72$ та коефіцієнт нелінійності діелектрика $\varepsilon_{dn} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кВм}$. Передбачається, що період решітки d менше довжини падаючої хвилі λ . Розв'язання цієї нелінійної задачі засновано на розв'язанні задачі розсіяння плоскої електромагнітної хвилі на решітці з РЕС брусів з лінійним кусково-однорідним діелектричним заповненням щілин (розділ 3; Рис. 6, червона суцільна лінія). З ростом інтенсивності поля, що падає, буде зростати значення діелектричної проникності ε_d дефектного шару в щілинах. Для знаходження дефектної діелектричної проникності застосовується той же підхід з використанням усередненого значення квадрата модуля поля всередині тонкого ($\Delta < \lambda$) дефектного шару уздовж осі Oz , як у дослідженні характеристик решітки зі срібних брусів з заповненням щілин арсенідом галію.

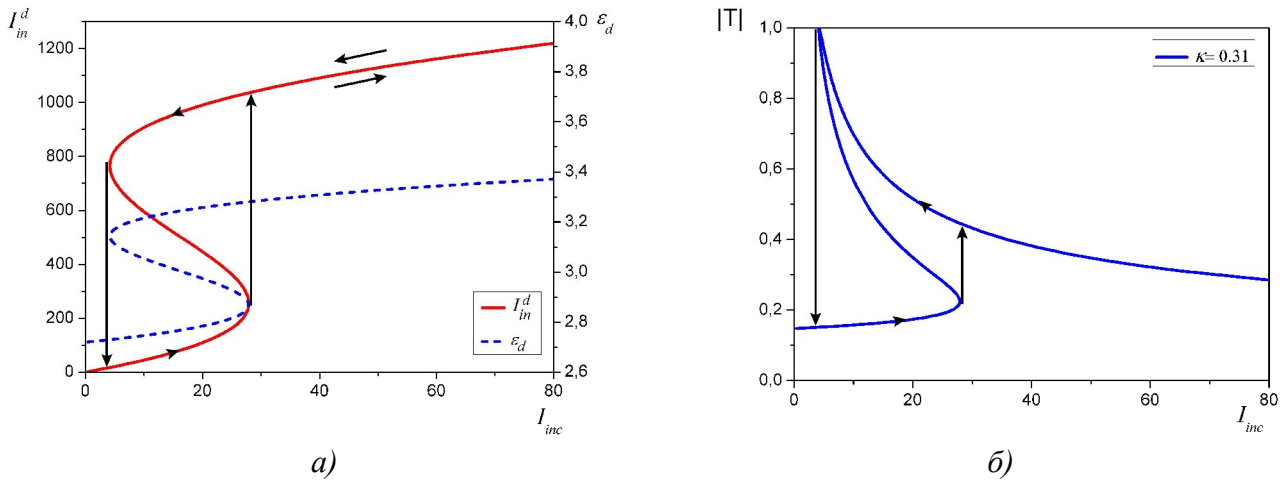


Рисунок 11 – Залежність внутрішньої інтенсивності дефектного шару I_{in}^d (суцільна лінія) і діелектричної проникності дефектного шару ε_d (штрихова лінія) (а) та коефіцієнтів проходження (б) від інтенсивності поля I_{inc} , що падає.

На Рис. 11, а показано залежності змін значень інтенсивності електричного поля всередині дефектного шару I_{in}^d решітки та його діелектричної проникності ε_d при збільшенні/зменшенні інтенсивності поля I_{inc} , що падає, при нормованій частоті $\kappa = 0,310$ ($\kappa = d/\lambda$). Коли інтенсивність поля, що падає, зростає та досягає значення 27,897, внутрішня інтенсивність в дефектному шарі I_{in}^d стрибкоподібно перебудовується зі значення 255,714 на 1036,118, що відповідає зміні діелектричної проникності дефекту з $\varepsilon_d = 2,868$ на $\varepsilon_d = 3,281$. У зворотному напрямку стрибок спостерігається при $I_{inc} = 4,179$, інтенсивність електричного поля всередині дефекту змінюється з $I_{in}^d = 765,082$ на $I_{in}^d = 17,195$, в той час як значення його діелектричної проникності є $\varepsilon_d = 3,143$ і $\varepsilon_d = 2,730$ відповідно. Таке різке збільшення внутрішньої інтенсивності електричного поля в решітці при досить невеликих значеннях інтенсивності поля, що падає, обумовлено здатністю структури концентрувати поле всередині дефектного шару в результаті обраної її геометрії з 15-шаровим заповненням щілин.

На Рис. 11, б побудовано залежність модуля коефіцієнта проходження $|T|$ від інтенсивності поля, що падає. Тут також відбувається бістабільний режим роботи решітки в прямому напрямку при $I_{inc} = 27,897$ та зворотному напрямку при $I_{inc} = 4,179$. Коли відбувається збільшення інтенсивності поля, що падає, система відчуває стрибок з $|T| = 0,224$ на $|T| = 0,446$. При зменшенні інтенсивності поля стрибок сильніший у порівнянні з варіантом при збільшенні I_{inc} . Максимальний коефіцієнт проходження структури $|T| = 1,000$ стає $|T| = 0,151$. Особливістю резонансу коефіцієнта проходження решітки є те, що його отримано на дефектній моді.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вивчено актуальну задачу радіофізики - дослідження бістабільних властивостей нелінійних структур з сильною локалізацією поля з метою створення ультракомпактних оптичних пристроїв, властивості яких змінюються за допомогою зміни інтенсивності поля, що падає.

Основні результати роботи зводяться до наступного:

1. Продемонстровано бістабільний режим роботи решітки з асиметрично-розірваних металевих кілець, яку розташовано на підкладці з нелінійного діелектрика керровського типу, на запертих модах в інфрачервоному діапазоні.

2. Отримано бістабільний режим роботи подвійної планарної решітки типу fish-scale, розташованої на підкладці з нелінійного діелектрика керровського типу, на запертих модах в інфрачервоному діапазоні.

3. Доведено можливість збудження та керування поширенням дисипативних солітонів в планарній магнітооптичній хвилевідній системі.

4. Побудовано новий ефективний алгоритм на основі методу часткових областей та методу матриць передачі для дослідження багатомодової дифракції електромагнітних хвиль на об'ємній решітці з ідеально провідних брусів з N -шаровим діелектричним заповненням щілин в лінійному випадку. Даний алгоритм дозволяє проводити розрахунки властивостей решітки з заповненням щілин різними діелектричними матеріалами. Показано, що ІЧ частотні спектри резонансів решітки мають чіткі смуги запирання та проходження при $N=11$ - і $N=15$ -шаровому заповненні щілин кварцом і кремнієм, що чергуються, з мінімальною товщиною решітки 4,5 періоду. Досліджено використання восьмого (середнього) шару як дефектного діелектричного шару з меншою/більшою діелектричною проникністю ніж у кремнію в $N=15$ -шаровому заповненні щілин решітки попарно кварцом і кремнієм з товщиною решітки 4,5 періоду як спосіб збільшення добротності резонансу коефіцієнта проходження решітки на дефектній моді.

5. Отримано та досліджено мультистабільний режим роботи структури, яка складається з ідеально провідного металевого екрану зі щілиною, заповненою нелінійним діелектриком (арсенідом галію) керровського типу нелінійності в ІЧ діапазоні.

6. Досліджено мультистабільний режим роботи решітки зі срібних прямокутних брусів із заповненням щілин нелінійним діелектриком (арсенідом галію) керровського типу нелінійності, розміщеної на тонкій діелектричній підкладці в ІЧ діапазоні.

7. Отримано бістабільний режим роботи решітки з ідеально провідних брусів при $5 \leq I_{inc} \leq 50 \text{ Вт/см}^2$ значеннях інтенсивності поля, що падає, у випадку, коли товщина решітки дорівнює 4,5 періоду, щілини заповнено $N=15$ -шарами кварцу і кремнію, що попарно чергуються, де восьмий шар у кожній щілині є нелінійний діелектричний дефектний шар керровського типу з коефіцієнтом нелінійності $1,3 \times 10^{-3} \text{ см}^2 / \text{кВт}$ і з меншою діелектричною проникністю ніж у кремнію в ІЧ діапазоні.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Del Bino, L., Silver, J. M., Woodley, M. T., Stebbings, S. L., Zhao, X., & Del'Haye, P. (2018). Microresonator isolators and circulators based on the intrinsic nonreciprocity of the Kerr effect. *Optica*, 5(3), 279-282.
2. Tajaldini, M., & Jafri, M. Z. M. (2014). Simulation of an ultra-compact multimode interference power splitter based on Kerr nonlinear effect. *Journal of Lightwave Technology*, 32(7), 1282-1289.
3. Lugiato, L., Prati, F., & Brambilla, M. (2015). *Nonlinear optical systems*. Cambridge University Press.
4. Gibbs, H. (2012). *Optical bistability: controlling light with light*. Elsevier.
5. Brovenko, A. V., Melezhik, P. N., Poyedinchuk, A. Y., & Troshchylo, O. S. (2018). A numerical algorithm of solving problems of electromagnetic wave diffraction by a plane layer with the Kerr nonlinearity. *Telecommunications and Radio Engineering*, 76(16), 1405-1415.
6. Angermann, L., & Yatsyk, V. V. (2011). Resonance properties of scattering and generation of waves on cubically polarisable dielectric layers. In *Electromagnetic waves*. IntechOpen.
7. Valovik, D. (2016, August). Nonlinear guided electromagnetic waves in a layer: Revisiting an old problem and new results. In *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)* (pp. 19-22). IEEE.
8. Prosvirnin, S., & Zouhdi, S. (2002). Resonances of closed modes in thin arrays of complex particles. In *Advances in electromagnetics of complex media and metamaterials* (pp. 281-290). Springer, Dordrecht.
9. Fedotov, V. A., Rose, M., Prosvirnin, S. L., Papasimakis, N., & Zheludev, N. I. (2007). Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry. *Physical review letters*, 99(14), 147401.
10. Prosvirnin, S. L., Tretyakov, S. A., & Mladyonov, P. L. (2002). Electromagnetic wave diffraction by planar periodic gratings of wavy metal strips. *Journal of electromagnetic waves and applications*, 16(3), 421-435.
11. Mladyonov, P. L., & Prosvirnin, S. L. (2010). Wave diffraction by double-periodic gratings of continuous curvilinear metal strips placed on both sides of a dielectric layer. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 1(4), 309-320.
12. Litvinenko, L. N., Prosvirnin, S. L., & Shestopalov, V. P. (1977). The diffraction of plane H-polarized electromagnetic wave on a slit in the metallic screen of finite thickness. *Radiotekhnika i elektronika*, (3), 474-484.
13. Шестопалов, В. П., Литвиненко, Л. Н., Масалов, С. А., Сологуб, В. Г. (1973). *Дифракция волн на решетках*. Издательство Харьковского университета.
14. Xiang, Y., Cai, W., Wang, L., Ying, C., Zhang, X., & Xu, J. (2014). Design methodology for all-optical bistable switches based on a plasmonic resonator sandwiched between dielectric waveguides. *Journal of Optics*, 16(2), 025003.
15. Chua, S. J., & Li, B. (Eds.). (2010). *Optical Switches: Materials and Design*. Elsevier.
16. Pezeshki, H., & Ahmadi, V. (2013). All-optical bistable switching based on photonic crystal slab nanocavity using nonlinear Kerr effect. *Journal of Modern Optics*, 60(2), 103-108.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1*. Kochetova, L. A., Prosvirnin, S. L., & Tuz, V. R. (2010). Bistable wave transmission through a metal screen with single slit filled nonlinear dielectric. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 24(16), 2249-2257.
- 2*. Tuz, V. R., Prosvirnin, S. L., & Kochetova, L. A. (2010). Optical bistability involving planar metamaterials with broken structural symmetry. *Physical Review B*, 82(23), 233402.
- 3*. Kochetova, L. A., Prosvirnin, S. L., & Tuz, V. R. (2014). Optical bistability in a grating with slits filled nonlinear media. *Progress In Electromagnetics Research*, 35, 133-139.
- 4*. Tuz, V. R., Kochetov, B. A., Kochetova, L. A., Mladyonov, P. L., & Prosvirnin, S. L. (2015). Two-oscillator model of trapped-modes interaction in a nonlinear bilayer fish-scale metamaterial. *Physica Scripta*, 90(2), 025504.
- 5*. Kochetov, B. A., Vasylieva, I., Kochetova, L. A., Sun, H. B., & Tuz, V. R. (2017). Control of dissipative solitons in a magneto-optic planar waveguide. *Optics letters*, 42(3), 531-534.
- 6*. Kochetova, L. A., & Prosvirnin, S. L. (2018). Diffraction of electromagnetic waves by a metallic bar grating with a defect in dielectric filling of the slits. *Optics Communications*, 412, 214-218.
- 7*. Kochetova, L. A., Prosvirnin, S. L., & Tuz, V. R. (2010, September). Bistable wave transmission through a metal screen with a slit filled nonlinear dielectric. In *Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 2010 Xvth International Seminar/Workshop on* (pp. 110-113). IEEE.
- 8*. Kochetova, L. A., Prosvirnin, S. L., & Tuz, V. R. (2011, May). Bistable wave transmission through a grating of nonlinear dielectric bars. In *Days on Diffraction (DD), 2011* (pp. 54-55).
- 9*. Kochetova, L. A., & Prosvirnin, S. L. (2016, June). Scattering of electromagnetic waves by a PEC bars grating with a broken periodicity of piecewise homogeneous dielectric filling of its slits. In *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), 2016 9th International Kharkiv Symposium on* (pp. 1-3). IEEE.
- 10*. Kochetova, L. A. (2016, July). Scattering of electromagnetic waves by a PEC bar grating with a nonlinear dielectric filling of its slits. In *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 216-217). IEEE.
- 11*. Kochetova, L. A. (2019, September). Bistable Transmission of a Metal Dielectric Grating for Controlling Filter Application. In *2019 URSI-Germany Kleinheubach Conference* (pp. 1-3). IEEE.

Анотація

Кочетова Л. А. Частотно-селективні властивості нелінійних структур із сильною локалізацією поля. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2020.

В дисертаційній роботі досліджено бістабільні характеристики періодичних структур, які містять діелектрик з нелінійністю керровського типу. Розглянуто планарні смужкові й об'ємні решітки. Особливість таких структур полягає в

здатності створювати сильне внутрішнє електромагнітне поле. Для цього запропоновано спеціальну геометрію нелінійних решіток. У разі смужкових структур розглянуто решітку з асиметрично-розірваних металевих кілець та подвійну решітку з провідних елементів типу fish-scale, які розташовані на нелінійній діелектричній підкладці. Показано, що такі планарні структури підтримують режим замкнених мод, що приводить до появи високодобротних резонансів типу Фано у лінійному режимі. У нелінійному режимі графічний вигляд характеристик резонансів на замкнених модах має профіль закручених ліній, які вказують на бістабільний режим роботи решіток.

Що стосується об'ємних структур, то в роботі розглянуто решітку з металевих брусів прямокутного поперечного перерізу. Властивості цієї решітки вивчено при різних варіантах заповнення щілин між брусами. Прототипом взаємодії такої структури з електромагнітною хвилею є розсіяння плоскої електромагнітної хвилі на металевому екрані зі щілиною, яка заповнена нелінійним діелектриком, по суті, це одна комірка решітки. Далі, в довгохвильовому наближенні, розв'язано задачу розсіяння плоскої хвилі на решітці з срібних брусів із нелінійним однорідним заповненням щілин арсенідом галію. Досліджено бістабільний і мультистабільний режими роботи решітки.

Також в роботі вивчено властивості решітки з брусів із кусково-однорідним діелектричним заповненням щілин. При цьому використано модель структури з ідеально провідного металу. Побудовано алгоритм розв'язання задачі багатомодової дифракції плоскої електромагнітної хвилі на даній решітці з кусково-однорідним діелектричним заповненням її щілин. Для чисельного аналізу спектральних властивостей решітки розглянуто випадки наявності дефектного шару в 11- і 15-шарових періодичних заповненнях щілин. Показано, що при 15-шаровому заповненні щілин резонанси на дефектних модах мають більшу добротність, ніж резонанси решітки без дефекту. Це свідчить про те, що в області дефекту локалізується сильне електромагнітне поле, наявність якого необхідна для прояву нелінійних властивостей. Таким чином, показано бістабільний режим роботи решітки з ідеально провідних металевих брусів із дефектним шаром з нелінійного діелектрика в 15-шаровому заповненні щілин решітки.

Також в роботі коротко представлено спосіб збудження дисипативного солітону в нелінійному магнітооптичному плоскому хвилеводі.

Ключові слова: планарні смужкові та об'ємні решітки, замкнені моди, нелінійний діелектрик, нелінійність керровського типу, бістабільність і мультистабільність, зони замикавання та проходження, дефектні моди, концентратор електромагнітного поля.

Аннотация

Кочетова Л. А. Частотно-селективные свойства нелинейных структур с сильной локализацией поля. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усыкова НАН Украины, г. Харьков, 2020.

В диссертационной работе исследованы бистабильные характеристики периодических структур, которые содержат диэлектрик с Керровским типом нелинейности. Рассмотрены планарные полосковые и объемные периодические решетки. Особенность таких структур заключается в способности создавать сильное внутреннее электромагнитное поле. Для этого предложена специальная геометрия нелинейных решеток. В случае полосковых структур, представлены: решетка из асимметрично-разорванных проводящих колец и двойная решетка из проводящих элементов типа fish-scale, которые расположены на нелинейной диэлектрической подложке. Показано, что такие планарные структуры поддерживают режим запертых мод, что приводит к появлению высокодобротных резонансов типа Фано. В нелинейном режиме графический вид характеристик резонансов на запертых модах имеет профиль закрученных линий, которые указывают на бистабильный режим работы решеток.

Что касается объемных структур, то в работе рассмотрена решетка из металлических брусьев прямоугольного поперечного сечения. Свойства данной решетки изучены при разных вариантах заполнения щелей между брусьями. Прототипом взаимодействия такой структуры с электромагнитной волной служит рассеяние плоской электромагнитной волны на металлическом экране со щелью, которая заполнена нелинейным диэлектриком, по сути, это одна ячейка решетки. Далее, в длинноволновом приближении решена задача рассеяния плоской волны на решетке из серебряных брусьев с нелинейным однородным заполнением щелей арсенидом галлия. Исследованы бистабильный и мультистабильный режим работы решетки.

Также в работе изучены свойства решетки из брусьев с кусочно-однородным диэлектрическим заполнением щелей. При этом использована модель структуры из идеально проводящего металла. Построен алгоритм решения задачи многомодовой дифракции плоской электромагнитной волны на данной решетке с кусочно-однородным диэлектрическим заполнением ее щелей. Для численного анализа спектральных свойств решетки рассмотрены случаи наличия дефектного слоя в 11- и 15-слойных периодических заполнениях щелей. Показано, что при 15-слойном периодическом заполнении щелей резонансы на дефектных модах обладают большей добротностью, чем резонансы решетки без дефекта. Это свидетельствует о том, что в области дефекта локализуется сильное электромагнитное поле, наличие которого необходимо для проявления нелинейных свойств. Таким образом, показан бистабильный режим работы решетки из идеально проводящих металлических брусьев с дефектным слоем из нелинейного диэлектрика в 15-слойном заполнении щелей решетки.

Также в работе кратко представлен способ возбуждения диссипативного солитона в нелинейном магнитооптическом плоском волноводе.

Ключевые слова: планарные полосковые и объемные решетки, запертые моды, нелинейный диэлектрик, Керровский тип нелинейности, бистабильность и мультистабильность, зоны запираения и прохождения, дефектные моды, концентратор электромагнитного поля.

Abstract

Kochetova L. A. Frequency-selective properties of nonlinear structures with a strong localization of the field. – On the manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, 2020.

In the thesis, the bistable characteristics of periodic structures that contain a dielectric with the Kerr-type nonlinearity are studied. The planar periodic arrays and gratings were considered. A feature of such structures is the ability to create a strong inner electromagnetic field. For this, a special geometry of nonlinear periodic structures was proposed. As for geometry of the arrays, a planar array made of asymmetrically split rings and a bilayer fish-scale array that placed on a nonlinear dielectric substrate were presented. It was shown that such planar structures support the trapped-mode regime, which leads to the appearance of high-Q Fano-type resonances in the linear regime. In the nonlinear regime, the graphical image of the characteristics of the resonances at the trapped modes has a profile with twisted loops that indicate the bistable operating regime of the gratings.

As for geometry of the gratings, a periodic grating which consists of metallic bars of rectangular cross section was considered in the work. The properties of this grating have been studied with different variants of filling slits between the bars. The prototype of the interaction of such structure with an electromagnetic wave is the scattering of a plane electromagnetic wave by a metal screen with a slit, which is filled with a nonlinear dielectric, in fact, this is one lattice cell. Then, the problem of scattering of a plane wave by a grating made of silver bars with a nonlinear homogeneous filling of the slits by gallium arsenide was solved in the long-wave approximation. The bistable and multistable operating regimes of the gratings were investigated.

The properties of a metallic bar grating with piecewise homogeneous dielectric filling of the slits were also studied in the work. A structural model of a perfectly conducting metal was used. The algorithm for solving the problem of multimode diffraction of a plane electromagnetic wave by a given grating with piecewise inhomogeneous dielectric filling of its slits was constructed. The cases of the presence of a defect layer in eleven and fifteen-layer periodic filling of slits for the numerical calculations of the spectral properties of the grating were considered. Thus, it was shown that with fifteen periodic layers filling of the slits, the resonances at the defect modes have a higher quality factor than the resonances of the grating without a defect. This indicates that in the area of the defect a strong electromagnetic field is localized, the presence of which is necessary for the manifestation of nonlinear properties. Thus, a bistable operating regime of the grating of perfectly conducting metal bars with a nonlinear dielectric defect layer in a fifteen-layer filling of the grating slits was shown.

A method of exciting of a dissipative soliton in a nonlinear magneto-optical plane waveguide is presented briefly in the thesis.

Key words: plane arrays and gratings, trapped mode, nonlinear dielectric, Kerr-type nonlinearity, bistability and multistability, stopband and passband, defect mode, electromagnetic field concentrator.