

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. Каразіна

Хе Ши

УДК 537.874

**РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ
НА ВІДОКРЕМЛЕНИХ І ПЕРІОДИЧНИХ
ХВИЛЕВІДНИХ НЕОДНОРІДНОСТЯХ**

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор
Шульга Сергій Миколайович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
декан факультету радіофізики, біомедичної електроніки
та комп'ютерних систем

Офіційні опоненти

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кузьмичов Ігор Костянтинівич,
Інститут радіофізики та електроніки
імені О. Я. Усикова НАН України,
м. Харків, провідний науковий співробітник відділу теорії дифракції
та дифракційної електроніки;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Грибовський Олександр Володимирович,
Радіоастрономічний інституту НАН України,
м. Харків, провідний науковий співробітник відділу теоретичної
радіофізики.

Захист відбудеться «___» _____ 2016 року о _____ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
за адресою: 61022, м. Харків, пл. Свободи 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
за адресою: 61022, м. Харків, пл. Свободи 4.

Автореферат розісланий «___» _____ 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Аркуша Ю. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Вплив періодичних й одиночних детермінованих ідеально провідних і діелектричних анізотропних збурень на поширення електромагнітних хвиль у хвилеводах та їх з'єднаннях доводиться враховувати в широкому колі практичних застосувань.

Важливе місце в радіотехніці серед великої і різноманітної кількості періодичних структур посідають аксіально-симетричні періодичні хвилеводи (АСПХ). Завдяки цінним електродинамічним, тепловим і технологічним властивостям АСПХ знаходять широке застосування в різних галузях техніки. На їхньому використанні базується прискорювальна техніка (резонансні прискорювачі, сепаратори частинок тощо), а також низка перспективних напрямів антенної техніки й електродинаміки великих потужностей, що потребують глибокого вивчення хвиль у цих структурах. Будучи однорідними за азимутом електродинамічними системами, АСПХ дозволяють передавати без спотворень довільний поляризаційний стан електромагнітного поля; іншою їхньою важливою властивістю можна вважати гібридність азимутально-неоднорідних типів хвиль. Ці хвилеводи є технологічними, механічно жорсткими, мають високу електричну міцність.

У прикладній електродинаміці діапазонів надвисоких частот доводиться розглядати задачі для випадків, коли в об'ємному резонаторі або хвилеводі розташовано ідеально провідне або анізотропне включення. У першу чергу такі структури є актуальними при розробці антенно-хвильової техніки, теорії відкритих і закритих резонаторів.

У дисертації запропоновано розв'язання задачі з визначення силових ліній електромагнітного поля у хвилеводі (резонаторі), в якому розташовано довільно анізотропну вставку зі змішаною анізотропією (анізотропією як електричних, так і магнітних властивостей). При цьому головні значення й орієнтація оптичних осей тензорів магнітної і діелектричної проникностей можуть змінюватися у довільний спосіб. Розроблені до цього часу фізико-математичні моделі були обмежені або ізотропією матеріалу, або частинними випадками анізотропії. Розв'язано задачу з визначення матриці розсіяння від зазначеної хвильової анізотропної вставки, якій притаманна змішана анізотропія.

Різноманітні ідеально провідні включення, які розташовані у хвилеводах та їх з'єднаннях використовуються в радіофізиці для оптимізації хвильових трактів. Теоретичний метод досліджень у таких задачах відіграє вирішальну роль. У роботі за допомогою методу, який ґрунтується на теоремі Гріна, розв'язано двовимірну задачу розсіяння LM - електромагнітної хвилі на ідеально провідній сходиці всередині T -подібної області взаємодії двох прямокутних хвилеводів.

Задачі розсіяння електромагнітних хвиль на циліндричних об'єктах є одними з найбільш відомих в електродинаміці. Це пояснюється величезною кількістю фізико-технічних застосувань явищ дифракції на циліндрі. Аналіз дифракційної картини дає можливість отримати інформацію про розмір поперечного перерізу циліндра, його форму, показник заломлення речовини, з якої виготовлено досліджуваний циліндр. Необхідно зазначити, що повністю розв'язано задачу лише для кругового циліндра. Отримано строгий аналітичний розв'язок, і проведені числові розрахунки для великого діапазону значень відношення діаметра циліндра

до довжини хвилі випромінювання. Однак, з'ясувалось, що при взаємодії електромагнітної хвилі з дуже тонким металевим циліндром спостерігається невідомий раніше ефект аномально великого поглинання випромінювання. Цей ефект було досліджено в пропонованій роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Тематика роботи пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки в рамках координаційних планів науково-дослідних работ Міністерства освіти і науки України (п. 7 – «Перспективні інформаційні технології, прилади комплексної автоматизації систем зв'язку»). Матеріали дисертації є складовою частиною держбюджетної НДР, виконаної на кафедрі теоретичної радіофізики (№ ДР 1-14-08; Інв. № 0109U000530).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є побудова й аналіз низки фізико-математичних моделей взаємодії електромагнітного поля з відокремленими (анізотропними діелектричними або провідними) і періодичними включеннями у хвилеводах та їх з'єднаннях. Для досягнення поставленої мети були розв'язані такі **задачі**:

1. Досліджено характерні особливості поведінки симетричних H - і E -хвиль АСПХ. За допомогою діаграм Бріллюена (ДБ) вивчено трансформацію власних мод кожного із симетричних типів хвиль періодичного діафрагмованого круглого хвилеводу (ПДКХ) за достатньо довільних змін геометричних розмірів структури.
2. Відзначено ряд нових принципових особливостей поведінки симетричних E -хвиль ПДКХ, проведено класифікацію власних симетричних H -хвиль.
3. Розв'язано задачу розсіяння електромагнітних хвиль від анізотропної вставки зі змішаною анізотропією в прямокутному закороченому хвилеводі.
4. Розв'язано задачу розсіяння LM – електромагнітних хвиль на включенні у T -подібному з'єднанні двох прямокутних хвилеводів за допомогою теореми Гріна.
5. Експериментально і теоретично підтверджено ефект сильного поглинання і розсіяння випромінювання дуже тонкими металевими дротами.

Об'єктом дослідження дисертації є фізичний процес взаємодії електромагнітного поля з різними видами включень у хвилевідних структурах.

Предметом дослідження пропонованої роботи є характеристики розсіяння електромагнітних хвиль і структура електромагнітних полів у закритих лініях передачі сигналів.

Методи дослідження. Для розв'язку визначених задач у роботі використано такі методи: метод інтегральних рівнянь, метод теореми Гріна, метод власних коливань, метод кінцевих різниць, чисельні методи.

Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним:

1. Вперше проведено строге комплексне дослідження режиму власних хвиль у круглому металевому хвилеводі, який періодично навантажено металевими дисками з отворами в центрі. Досліджено трансформацію власних модов кожного з типів хвиль діафрагмованого хвилеводу при зміні геометричних параметрів хвилеводу.

2. Математично строго розв'язано задачу на власні значення в діафрагмованому хвилеводі, розв'язок представлено у вигляді дисперсійних залежностей на діаграмах Бріллюена H_{0i} - і E_{0i} -хвиль за довільних геометричних розмірів структури.
3. У роботі вперше запропоновано алгоритм з визначення коефіцієнтів матриці розсіяння від довільної діелектричної хвилеводної вставки зі змішаною анізотропією, що розташована у прямокутному хвилеводі. Показано, що анізотропія досліджуваного матеріалу вставки істотно впливає на поширення електромагнітних хвиль в прямокутному хвилеводі.
4. Розв'язано задачу розсіяння електромагнітної хвилі на металевому включенні довільного поперечного перерізу в області взаємодії Т-подібного з'єднання хвилеводів за допомогою теореми Гріна, що дозволило визначити хвильову матрицю розсіювання для довільної кількості хвилеводних мод.
5. Вперше досліджено взаємодію електромагнітних хвиль у хвилеводі з дуже тонкими дротами.
6. Виміряні фактори ефективності послаблення, розсіяння і поглинання циліндричного включення.
7. Проведено порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень взаємодії електромагнітної хвилі з тонкими дротами у хвилеводі. Експериментально доведено, що фактори ефективності розсіювання і поглинання електромагнітного випромінювання дуже тонкими металевими дротами досягають чималих величин.

Практичне значення одержаних результатів.

Виявлені фізичні закономірності, які отримані при числово-аналітичному розв'язанні задачі з дослідження режиму власних хвиль періодичного діафрагмованого круглого хвилеводу, можуть бути використані при розробці електровакуумних приладів НВЧ (наприклад, у ЛБХ міліметрового діапазону), опромінювачів дзеркальних антен, що дозволяють ефективно керувати діаграмою спрямованості.

Запропонована в роботі доволі реалістична фізико-математична модель взаємодії електромагнітного поля з анізотропними матеріалами в резонаторах і хвилеводах дозволяє з контрольованою точністю знайти розподіл електромагнітного поля в довільно анізотропному і довільно неоднорідному матеріалі, обмеженому провідною поверхнею. Важливість дослідження таких структур пов'язана з унікальними електродинамічними властивостями застосованих матеріалів і можливістю миттєвого безконтактного керування цими властивостями за допомогою зовнішнього електричного поля.

На практиці необхідно знати, як ідеально провідні включення різного вигляду, що розташовуються у хвилеводах та їх з'єднаннях, впливають на електродинамічні характеристики, і як їх можна використовувати в радіофізиці для оптимізації хвилеводних розгалужувачів, подільників потужності, помножувачів, фільтрів.

Особистий внесок здобувача.

У роботах, які опубліковані зі співавторами, особистий вклад автора полягає в наступному: розв'язанні задач збудження і визначенні електродинамічних властивостей хвилеводів та їх з'єднань з детермінованими і періодичними

збуреннями, розробці числових алгоритмів і програмного забезпечення, числових розрахунках й аналізі отриманих результатів, теоретичному й експериментальному дослідженні фізико-математичних моделей взаємодії електромагнітного поля з анізотропними та ідеально провідними включеннями у хвилеведучих структурах.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи обговорювались на наукових семінарах кафедри теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, на конференції молодих учених радіофізичного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, а також доповідались на наукових конференціях:

- 6th International Conference on «Antenna Theory and Techniques» (ICATT'07), Sevastopol (Ukraine), September 17-21, 2007.
- International Kharkov Symposium on «Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves» (MSMW'2010), Kharkov (Ukraine), June 21-26, 2010.
- VIII Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника, Биофизика», Харьков, 25-27 ноября 2008 г.

Публікації за темою дисертації.

Дисертація являє собою викладення й узагальнення статей [1, 3], [5-7], [9, 10] у спеціалізованих наукових журналах, а також тез доповідей на наукових конференціях [2, 4, 8].

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатка. Її загальний обсяг становить 160 сторінок. Дисертація містить 54 рисунку та 3 таблиці. Список використаних джерел на 15 сторінках нараховує 146 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, наведено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів роботи.

У розділі 1 «Аналітичний огляд літератури» розглянуто питання теоретичного й експериментального досліджень електродинамічних властивостей хвилеводів та їх з'єднань з детермінованими і періодичними ідеально провідними і діелектричними анізотропними включеннями. Показано, що серед періодичних структур у питаннях теорії електромагнетизму і практичних застосуваннях достатньо важливе місце посідають аксіально-симетричні структури, а їх класичним представником може бути періодичний діафрагмований круглий хвилевід. Незважаючи на те, що найбільш загальні з підходів і положень теорії періодичних структур існують уже достатньо давно, електродинамічна теорія ПДКХ є далекою від завершення навіть у задачі на власні хвилі. Це пояснюється складним характером поведінки останніх, а також об'ємними і строгими числовими розрахунками у зв'язку з цим. Відзначено, що при розв'язанні задач збудження хвилеводів з анізотропними включеннями необхідно застосовувати адекватну фізико-математичну модель взаємодії електромагнітного поля з анізотропними матеріалами в замкнених об'ємних резонаторах і хвилеводах, яка

повинна забезпечити можливість швидкого та високоточного розрахунку розподілу електромагнітного поля у довільно анізотропному і довільно неоднорідному матеріалі. Розглянуто числово-аналітичні методи дослідження електромагнітного поля, розсіяного металевими перешкодами, що розташовані у хвилевідних з'єднаннях. Часто в даному випадку застосовується метод частинних областей, який, однак, за наявності включення в області взаємодії двох хвилеводів наштовхується на значні математичні труднощі. Альтернативним методом при розв'язанні вказаної задачі є метод інтегральних рівнянь. Розглянуто методи розв'язання задач дифракції на циліндрах з різною формою поперечного перерізу і для великого діапазону значень відношення діаметра циліндра до довжини хвилі.

У розділі 2 «Режими власних симетричних хвиль періодичного діафрагмованого круглого хвилеводу» отримано строгий розв'язок задачі на власні значення в діафрагмованому хвилеводі, який представлено дисперсійними залежностями на діаграмах Бріллюена. Проаналізовано вплив зміни геометричних параметрів структури на вказані розв'язки.

Для розв'язання задачі про власні хвилі періодичного діафрагмованого круглого хвилеводу, який представлено на рис. 1, застосовано відомий метод частинних областей з поздовжнім розділенням.

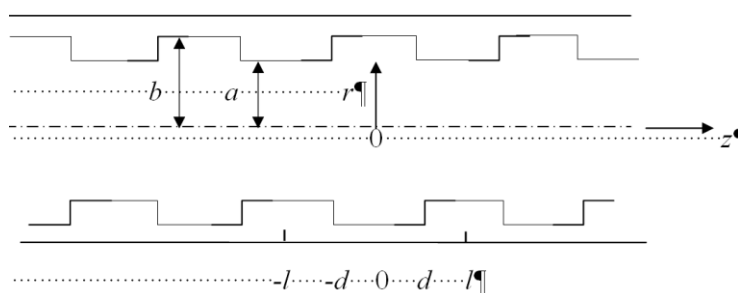


Рис. 1

Є дві частинні області: (I) – область $r < a$, яка зветься областю поширення, й область (II) – $a \leq r < b$, що зветься областю періодичності. Користуючись, як зазвичай, теоремою Флоке для періодичних структур, електромагнітні поля, представляємо в кожній з цих областей у вигляді рядів Фур'є і підкоряємо їх граничним умовам на границі розділу областей $r = a$. Як результат, маємо систему функціональних рівнянь для визначення невідомих. Далі шляхом застосування процедури перерозкладань система функціональних рівнянь перетворюється на нескінченну однорідну систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно невідомих сталих коефіцієнтів – амплітуд просторових гармонік в області (I) й стоячих хвиль в області (II).

Так для випадку H_{0i} -хвиль така система має вигляд:

$$\begin{cases} a_{0m} q_m^2 Q_{0m}^M - \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{0n} p_n^2 J_0 R_{mn} = 0, \\ A_{0n} p_n J_0' - \sum_{m=1}^{\infty} a_{0m} q_m Q_{0m}^M P_{mn} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Тут A_{0n} – невідомі амплітуди просторових гармонік в області (I), a_{0m} – невідомі амплітуди стоячих хвиль в області (II),

$$p_n^2 = k^2 - h_n^2, \quad h_n = k\alpha + \pi n l, \quad q_m^2 = k^2 - (\pi m / 2d)^2,$$

$$P_{mn} = -m\theta S_{mn} \exp[i(m+1)\pi / 2], \quad R_{mn} = 2mS_{mn} \exp[i(1-m)\pi / 2],$$

$$S_{mn} = 2 \sin[\pi((\xi_n^2 - m^2)), \quad \xi_n = 2\theta(\kappa\alpha + n),$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 2, & m > 0 \end{cases}, \quad \theta = d / l,$$

$$Q_{om}^M = J_0(q_m r) - H_0^{(1)}(q_m r) J_0'(q_m a) / H_0^{(1)'}(q_m a), \quad \kappa\alpha = k\alpha l / \pi,$$

$$\kappa - kl / \pi, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

$m = 0, 1, 2, \dots, k$ – стала поширення у вільному просторі, $k\alpha$ – стала поширення у хвилеводі.

Для випадку E_{0i} -хвиль система має схожий вигляд.

У підрозділі 2.2 за допомогою діаграм Бріллюена (ДБ) досліджується трансформація власних мод кожного з типів хвиль діафрагмованого хвилеводу при зміні внутрішнього радіуса a структури. При цьому у випадку найпростішого типу власних хвиль хвилеводу – H_{0i} -хвиль спостерігається достатньо повна варіація $a \in (0, b)$ на двох характерних значеннях періоду – великому $l = 3$ і малому $l = 0.75$.

У розділі з'ясовані й проаналізовані характерні особливості поведінки симетричних і несиметричних H -хвиль.

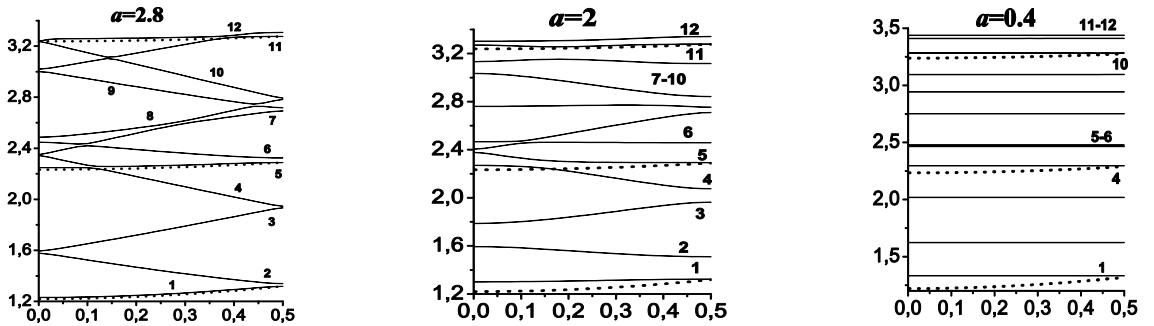


Рис. 2

На рис. 2 представлені ДБ для $l = 3$, $d = 2.8$ (випадок великого періоду і широкої щілини) при $a \in \{2.8; 2; 0.4\}$. При $a = 2.8$ чітко спостерігається ефект початкової періодичності дисперсії (п.п.д), а моди H_{01} , H_{04} діафрагмованого хвилеводу – це його регулярні моди, що породжуються модами H_{01}^r і H_{02}^r гладкого хвилеводу $r = 3$ відповідно (тут верхній індекс r відповідає англійському «regular»). Усі інші з представлених мод є періодичними модами ПДКХ, які породжуються регулярними модами. Із зменшенням радіуса a від $a = 2.8$ до

$a = 2$ всі старші з представлених мод зберігають складовий характер, хоча типова п.п.д.-картинка достатньо швидко зникає. Слід відзначити, що при малому радіусі прольотного каналу $a = 0.4$ заперті моди H_{05} , H_{06} , а також моди H_{011} і H_{012} розташовуються дуже близько одна до одної за частотою.

На рис. 3 представлені ДБ для $l = 3$, $d = 2.8$ (випадок великого періоду і широкої щілини) при $a \in \{2.8, 2.0, 0.4\}$ і розглянуті 12 молодших мод E_{0i} , $i = 1, 2, \dots, 12$.

При $a = 2.8$ має місце достатньо чітко виражений ефект п.п.д., а моди E_{01} , E_{04} , E_{011} – це регулярні моди ПДКХ, що породжуються модами E_{0i}^r , $i = 1, 2, 3$ гладкого хвильоводу $r = 3$ відповідно. Всі інші з наявних мод – це періодичні моди ПДКХ, породжені регулярними.

Зокрема, стрілками « $\uparrow\downarrow$ » всюди на рисунку позначена реакція критичних (і найближчих до них) частот на зменшення значення радіуса a (тобто знак похідної $\partial\kappa / \partial a$) Очевидно, що зі зміною a ця реакція змінюється: $\partial\kappa / \partial a < 0$, $\partial\kappa / \partial a > 0$, $\partial\kappa / \partial a \approx 0$ для всіх $\kappa a \in [0, 0.5]$.

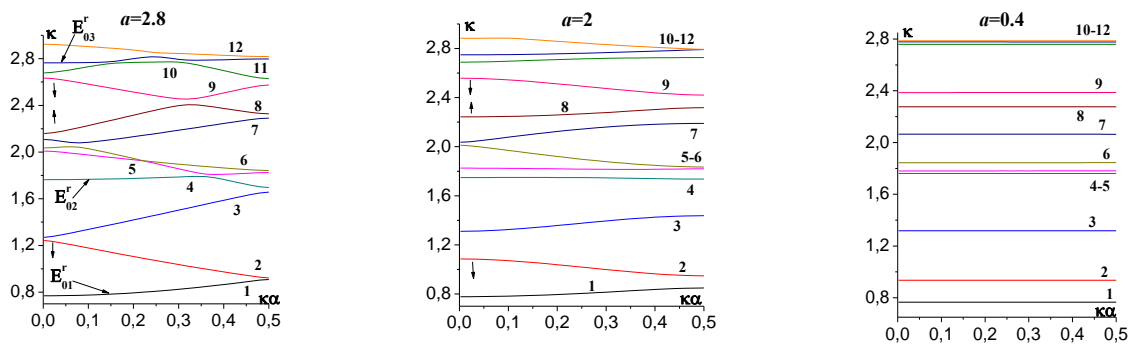


Рис. 3

Видно, що E_{0i} -хвилі, на відміну від H_{0i} -хвиль, при зміні радіуса a набагато активніше “взаємодіють” між собою і трансформуються; часто спостерігається “квазі-кросинги” дисперсійних кривих мод, тобто “квазі-п.п.д.” умови, коли зникаюче малі зворотні парціали хвиль у відповідних бреггівських хвильових точках.

У розділі 3 «Розсіяння електромагнітних хвиль у хвильоводах з відокремленими ідеально провідними й діелектричними анізотропними включеннями» побудовані числово-аналітичні розв’язання для визначення матриць розсіяння електромагнітних хвиль для двох хвильоводних електродинамічних задач: про збудження анізотропного неоднорідного включення в прямокутному хвильоводі, якому притаманна змішана анізотропія і про розсіяння електромагнітних хвиль на ідеально провідному включенні в Т-подібному з’єднанні двох прямокутних хвильоводів.

У підрозділі 3.1 спочатку розв’язано задачу про знаходження силових ліній тривимірного електричного поля за допомогою метода скінченних різниць для

ситуації, коли в прямокутному хвилеводі розташована анізотропна вставка з анізотропією електричних і магнітних властивостей. При цьому головні значення й орієнтація оптичних осей тензорів магнітної та діелектричної проникностей середовищ можуть довільно змінюватися. Прикладом такого матеріалу, що проявляє бігіротропні властивості, є монокристалічний залізо-ітрієвий гранат $Y_3Fe_5O_{12}$ і його різні модифікації із заміщенням частини іонів ітрію на іони рідкоземельних металів Bi, Lu, Tb .

Структура, що розглядається, являє собою анізотропний прямокутний паралелепіпед, розташований у прямокутному хвилеводі. Розіб'ємо паралелепіпед на N елементарних комірок, кожен з яких будемо характеризувати власними тензорами магнітної і діелектричної проникності. Бокові стінки вставки, прилеглі до стінок хвилеводу, вважаються ідеально провідними.

Дискретизуємо рівняння Максвелла в інтегральній формі (будемо вважати, що джерела відсутні). Часова залежність всюди береться у вигляді $\exp(-i\omega t)$:

$$\int_L \vec{E} \cdot \vec{\tau} dl - ik_0 \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} ds = 0, \quad (2)$$

$$\int_L \vec{H} \cdot \vec{\tau} dl - ik_0 \int_S \vec{D} \cdot \vec{n} ds = 0. \quad (3)$$

Тут S – довільна поверхня, обмежена контуром L ; \vec{n} – зовнішня нормаль до поверхні S , $\vec{\tau}$ – вектор дотичної до L ; \vec{E} і \vec{H} – напруженість електричного і магнітного полів відповідно, $k_0 = \omega / c$ – хвильове число у вакуумі, ω – циклічна частота, c – швидкість світла у вакуумі. Матеріальні рівняння для випадку анізотропного середовища мають вигляд:

$$\vec{B} = \hat{\mu} \cdot \vec{H}, \quad (4)$$

$$\vec{D} = \hat{\varepsilon} \cdot \vec{E}. \quad (5)$$

Тут $\hat{\mu}, \hat{\varepsilon}$ – тензори магнітної та діелектричної проникностей середовища.

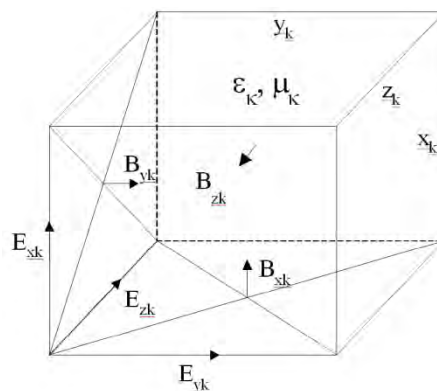


Рис. 4

Розглянемо комірку k , заповнену середовищем з матеріальними

параметрами $\hat{\mu}_k, \hat{\varepsilon}_k$. У цій комірці знайдемо сталі величини $E_{xk}, E_{yk}, E_{zk}, B_{xk}, B_{yk}, B_{zk}$ (рис. 4). Розміри комірки позначимо x_k, y_k, z_k . Компоненти електричного поля E_k будемо визначати в середині ребер, а компоненти магнітної індукції B_k – по центру граней комірки. Комірки, суміжні з коміркою k , позначимо так: верхня комірка (*above*) у подальшому буде позначатися першою буквою a , ліва (*left*) – буквою l і так далі.

Проінтегруємо рівняння Максвелла (2), (3) в трьох взаємно ортогональних площинах для k -ї комірки і застосуємо дискретизацію за методом скінченних різниць. У нашому випадку змішаної анізотропії отримуємо таку систему дискретизованих алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} (2P_{xx} - k_0^2 S_{xx})E_{xk} - (2P_{xy} - k_0^2 S_{xy})E_{yk} - (2P_{xz} - k_0^2 S_{xz})E_{zk} &= 2F_x, \\ -(2P_{yx} - k_0^2 S_{yx})E_{xk} + (2P_{yy} - k_0^2 S_{yy})E_{yk} - (2P_{yz} - k_0^2 S_{yz})E_{zk} &= 2F_y, \\ -(2P_{zx} + k_0^2 S_{zx})E_{xk} - (2P_{zy} + k_0^2 S_{zy})E_{yk} + (2P_{zz} - k_0^2 S_{zz})E_{zk} &= 2F_z. \end{aligned} \quad (6)$$

Матричні коефіцієнти $P_{xx} \dots P_{zz}, S_{xx} \dots S_{zz}$ і праві частини визначаються розмірами комірок і їх матеріальними параметрами.

Для числового розв'язання системи рівнянь (6) було застосовано метод спряжених градієнтів, який є найбільш прийнятним методом для систем, що містять великі розріджені матриці. Як приклад наведемо результати розрахунку силових ліній полів для випадку, коли хвилеводній вставці притаманна змішана анізотропія (тобто анізотропія електричних і магнітних властивостей одночасно). Розглянемо одновісне середовище. На рис. 5а наведено поле хвилі TE_{11} , а рис. 5б відповідає хвилі TM_{11} . При цьому параметри анізотропної вставки обрано такими: $\varepsilon_{\perp} = 1, \varepsilon_{\parallel} = 2, \mu_{\perp} = 1, \mu_{\parallel} = 2, \theta = 0^{\circ}, \varphi = 30^{\circ}, k_0 = 3$.

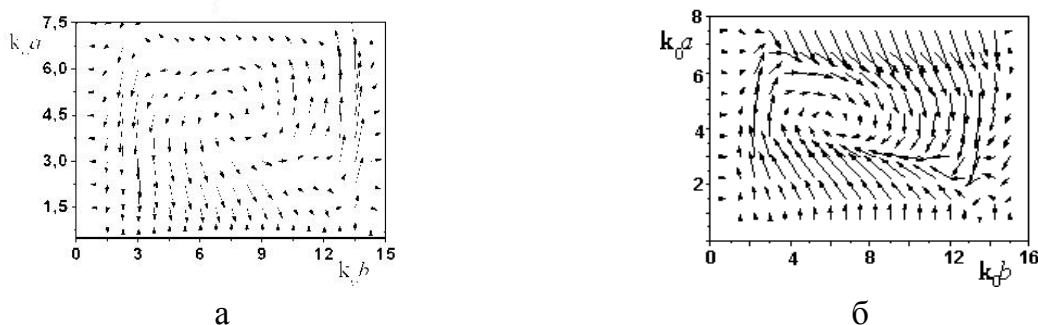


Рис. 5

Розглянемо напівнескінченний прямокутний хвилевід $0 < z < +\infty$, закорочений у перерізі $z = 0$ з анізотропним, в загальному випадку неоднорідним, включенням, яке займає область $0 < z < c$ (див. рис. 6).



Рис. 6

Припустимо, що неоднорідне анізотропне включення займає не всю область $0 < z < c$, а меншу ділянку $0 < z < c - \Delta$, в той час як область $c - \Delta < z < c$ (назвемо її областю взаємодії) фактично є продовженням регулярного хвилеводу. Вважатимемо також, що торець анізотропної вставки при $z = c$ межує з порожнім хвилеводом, в якому присутні власні моди, поперечні складові поля яких відомі. Знаючи розподіл полів всередині анізотропної вставки, визначимо коефіцієнти розкладання в формулах

$$\begin{aligned}\vec{E}_{\perp}(\vec{R}) &= \sum_{\nu} (b_{\nu}^{in} \exp(-ih_{\nu}z) + b_{\nu}^{sc} \exp(ih_{\nu}z)) \vec{E}_{\nu}(x, y), \\ \vec{H}_{\perp}(\vec{R}) &= \sum_{\nu} (-b_{\nu}^{in} \exp(-ih_{\nu}z) + b_{\nu}^{sc} \exp(ih_{\nu}z)) \vec{H}_{\nu}(x, y)\end{aligned}$$

за допомогою нелокального модового спряження полів в перерізах хвилеводу площинами $z = c$ і $z = c - \Delta$. Через лінійність задачі мають місце лінійні співвідношення між амплітудами розсіяних b_{ν}^{sc} і падаючих b_{ν}^{in} мод:

$$b_{\nu}^{sc} = \sum_{\nu'=1}^{N_B} S_{\nu\nu'} b_{\nu'}^{in},$$

$S_{\nu\nu'}$ – елементи шуканої матриці розсіяння S .

На рис. 7 наведено приклад розрахунку залежності елемента матриці $|S_{10}|$ від $k_0 a$ для випадку, якщо включенню, розташованому в хвилеводі, притаманна змішана анізотропія. Криву 1 розраховано для параметрів $\varepsilon_{\parallel} = 4.0$, $\varepsilon_{\perp} = 2.0$, $\mu_{\parallel} = 4.0$, $\mu_{\perp} = 2.0$; криву 2 – для $\varepsilon_{\parallel} = 8.0$, $\varepsilon_{\perp} = 4.0$, $\mu_{\parallel} = 8.0$, $\mu_{\perp} = 4.0$. Аналізуючи наведені графічні результати, можна зробити висновок, що анізотропія досліджуваного матеріалу вставки має помітний вплив на поширення електромагнітних хвиль у прямокутному хвилеводі.

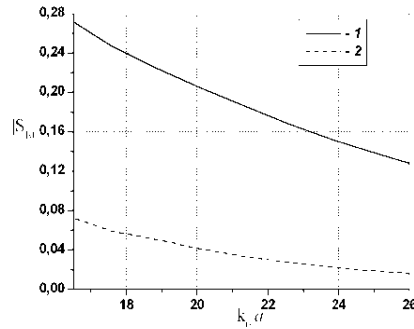


Рис. 7

У другій частині розділу 3 наведено строге розв'язання задачі розсіяння електромагнітних LM -хвиль на включенні в Т-подібному з'єднанні двох прямокутних хвилеводів за допомогою теореми Гріна. Така модель може бути використана для оптимізації передаючих властивостей хвилевідних пристроїв із застосуванням стрижнів або сходинок, розташованих в області з'єднання хвилеводів.

Досліджувана структура представлена на рис. 8. Область взаємодії обмежена відрізками L_0, L_1, L_2 і L_3 , поверхня включення - L_S .

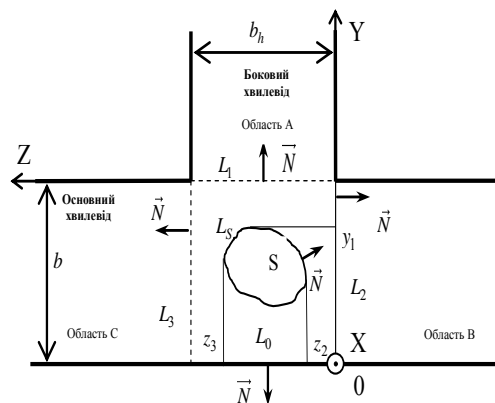


Рис. 8

У рамках даного методу розв'язок задачі розсіяння визначався з відповідного інтегрального рівняння

$$\int_L dL \left(\tilde{W} \frac{\partial W}{\partial N} - W \frac{\partial \tilde{W}}{\partial N} \right) = 0$$

шляхом обрання вагових функцій, які тотожно задовольняють рівнянню Гельмгольца в області взаємодії хвилеводів. При цьому вагові функції повинні автоматично враховувати присутність ідеально провідного включення. Для цього система вагових функцій визначається за допомогою розв'язання трьох допоміжних задач розсіяння на включенні в закороченому хвилеводі. У вказаному інтегральному рівнянні $\partial / \partial N$ – нормальна похідна до поверхні, а W - невідомий розв'язок рівняння Гельмгольца в неоднорідній області, який також задовольняє граничним умовам на ідеально провідних поверхнях L_0 і L_S . За \tilde{W} послідовно беруться розв'язки трьох допоміжних задач для головного і бокового хвилеводів. У результаті отримуємо систему алгебраїчних рівнянь відносно

амплітуд розсіяних хвиль в одному з плечей хвилеводного з'єднання. Зауважимо, що метод трьох закороток дає розв'язок поставленої задачі в одномодовому режимі, в той час як метод, заснований на застосуванні теореми Гріна, дозволяє визначити всехвильову матрицю розсіяння для довільної кількості хвилеводних мод.

Для ідеально провідного включення у вигляді прямокутної сходинок з шириною t і висотою h , яка розташована, для визначеності, посередині (вздовж осі Oz) області взаємодії двох порожніх хвилеводів (див. вставку до рис. 9а), розраховані елементи матриці розсіяння SIJ ($I, J = A, B, C$).

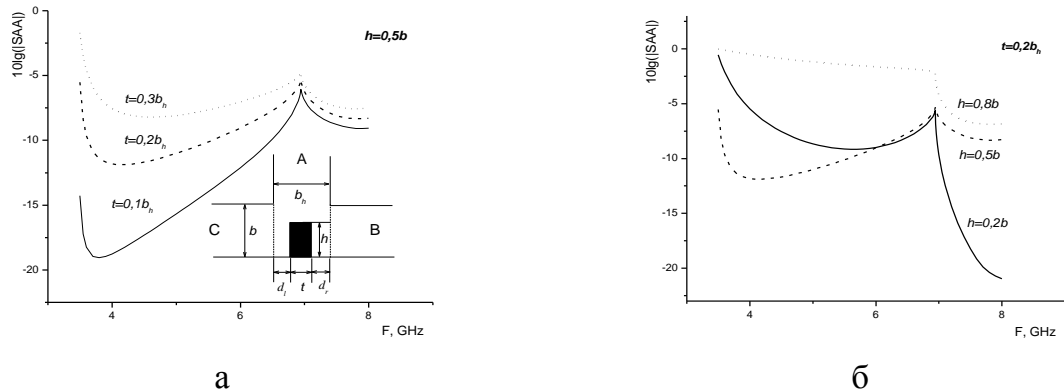


Рис. 9

На рис. 9 представлені частотні залежності абсолютної величини комплексних коефіцієнтів розсіяння хвилі LM_{01} , що падає з області А хвилеводного з'єднання, для різних геометричних розмірів включення t і h . Розміри хвилеводів дорівнюють $a = 8.64$ см, $b = b_h = a / 2$. На рис. 9а сходинок має розмір $h = 0.5b$, на рис. 9б - $t = 0.2b_h$.

У розділі 4 «Взаємодія електромагнітних хвиль з дуже тонкими металевими дротинками» розглянуто поглинання і розсіяння НВЧ випромінювання тонкими металевими циліндричними дротинками. Досліджено ефект аномально сильного розсіяння та поглинання випромінювання тонкими дротинками у вільному просторі та у хвилеводі. Наведено рішення задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на циліндрі в прямокутному хвилеводі. Проведено вимірювання поглинання і відбиття хвилі в хвилеводі тонкими металевими дротинками. Отримано експериментальне підтвердження того, що фактори ефективності розсіяння та поглинання електромагнітного випромінювання дуже тонкими металевими дротинками сягає кількох сотень.

Взаємодія електромагнітної хвилі з об'єктом характеризується безрозмірними факторами: $Q_{sca} = P_{sca} / P$ – фактор ефективності розсіяння; $Q_{abs} = P_{abs} / P$ – фактор ефективності поглинання; $Q = Q_{sca} + Q_{abs}$ – фактор ефективності ослаблення. Тут P – потужність випромінювання, що потрапило на циліндр; P_{sca} – потужність розсіяного випромінювання; P_{abs} – потужність поглиненого випромінювання.

Залежності факторів Q , Q_{sca} , Q_{abs} від параметра ρ , що характеризує співвідношення діаметра циліндра і довжини хвилі, наведені на рис. 10а для E -хвилі та на рис. 10б для H -хвилі.

Суттєвою особливістю залежності $Q_{abs}(\rho)$ для E -хвилі є наявність максимуму при деякому значенні ρ . При цьому Q_{abs} може набувати дуже великих значень. Положення і величина максимуму залежить від довжини хвилі випромінювання. За її збільшення максимум зсувається в бік менших значень ρ , і його висота збільшується. Так для довжини хвилі $\lambda = 1$ мкм максимум розташований при $\rho = 0,02$ і досягає значення 11 (рис. 4.2а), а для $\lambda = 10,6$ мкм він розташовується при $\rho = 0,0054$, а величина його дорівнює 33,3 (рис. 10а). На рис. 10б показано залежність $Q_{abs}(\rho)$ при $\lambda = 10,6$ мкм для H -хвилі. Максимуму, подібного до зображеного на рис. 10а, тут не спостерігається.

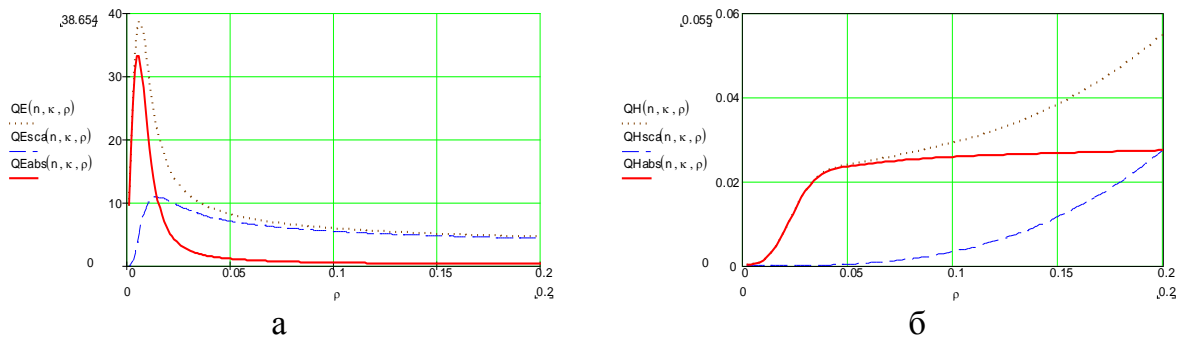


Рис. 10

Експериментальне дослідження взаємодії електромагнітного випромінювання з тонкими дротинками проводилось за допомогою виміральної лінії Р1-4. Для порівняння з теоретичними даними необхідно розв'язати задачу про взаємодію електромагнітної хвилі з дротом у хвилеводі. Це доволі складна задача, оскільки переріз хвилеводу є прямокутним, а об'єкт – циліндричним. Тому результати експерименту порівнювались з результатами розрахунку для плоскої хвилі у вільному просторі.

На рис. 11 і 12 товстими суцільними лініями показані теоретичні залежності $Q_{sca}(\lambda)$ і $Q_{abs}(\lambda)$ для довжин хвиль, що використовувались в експерименті з ніхромовим дротом, а тонкими лініями з кружечками, квадратами та хрестиками – експериментальні результати для різних діапазонів довжин хвиль.

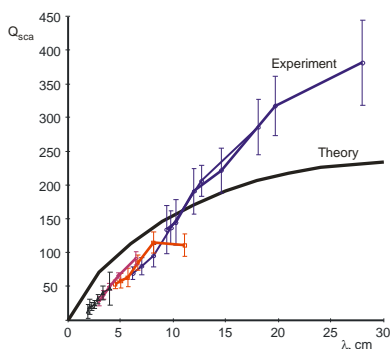


Рис. 11

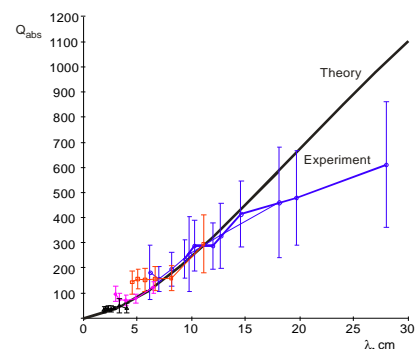


Рис. 12

Вимірювання і теоретичні розрахунки підтвердили той факт, що фактори ефективності поглинання і розсіяння тонких дротинок досягають великих значень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано поставлену задачу, яка полягає в розробці та дослідженні фізико-математичних моделей взаємодії електромагнітного поля з детермінованими і періодичними включеннями у хвилеводах та їх з'єднаннях. Основні результати роботи є такими:

1. За допомогою строгих числових розрахунків діаграм Бріллюена у багатомодовому режимі для довільних розмірів структури досліджено поширення власних H_{0i} - і E_{0i} - хвиль періодичного діафрагмованого круглого хвилеводу.
2. Докладно проаналізовано важливу властивість власних H - і E - мод хвиль періодичного діафрагмованого круглого хвилеводу, а саме екстремальні властивості їх бреггівських смуг.
3. Побудовано числово-аналітичне рішення тривимірної задачі з визначення електромагнітного поля у хвилеводі з анізотропною вставкою, якій притаманна анізотропія електричних і магнітних властивостей.
4. Розраховані коефіцієнти матриці розсіяння від вказаної анізотропної вставки зі змішаною анізотропією в закороченому хвилеводі.
5. У строгій постановці розв'язано задачу розсіяння електромагнітних LM -хвиль на включенні у Т-подібному з'єднанні двох прямокутних хвилеводів за допомогою теореми Гріна.
6. Теоретично та експериментально досліджено поглинання і розсіяння електромагнітного випромінювання дуже тонкими металевими дротинками як у вільному просторі, так і в прямокутному хвилеводі.
7. Розв'язано задачу про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на циліндрі і досліджено ефект аномально сильного розсіяння та поглинання випромінювання тонкими дротинками у вільному просторі і в хвилеводі.
8. Вперше проведено вимірювання ослаблення і відбиття хвилі в хвилеводі тонкими металевими дротинками. Отримано експериментальне підтвердження того, що фактори ефективності розсіяння і поглинання електромагнітного випромінювання дуже тонкими металевими дротинками досягають великих значень.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Katenev S. K. H_{0i} -Eigenwave Characteristics of a periodic iris-loaded circular waveguide / S. K. Katenev, Shi He // J. Electromagnetic Analysis & Applications. – 2010. – № 2. – P. 436-443.
2. Katenev S. K. Stop bandwidth extremums of a periodic iris-loaded circular waveguide / S. K. Katenev, Shi He // Proc. of the 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07), 17-21 September 2007, Sevastopol (Ukraine). – 2007. – P. 471-473.

3. Хе Ши. Влияние радиуса пролетного канала периодического диафрагмированного круглого волновода на взаимную трансформацию собственных модов / Ши Хе, С. К. Катенев, С. Н. Шульга // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка». – 2006. – № 712, вип. 10. – С. 80-83.
4. Хе Ши. Моделирование H_{0i} -волн периодического диафрагмированного круглого волновода / Ши Хе, С. К. Катенев // Тезисы докладов на 8-й Конф. молодых учёных «Радиофизика, Электроника и Биофизика» (YSC 2008), 25-27 ноября 2008, Харьков. – 2008. – С. 142.
5. Багацкая О. В. Рассеяние электромагнитных волн от анизотропной вставки в прямоугольном закороченном волноводе / О. В. Багацкая, В. И. Фесенко, Н. П. Жук, Ши Хе // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка». – 2007. – № 756, вип. 11. – С. 33-37.
6. Хе Ши. Розв'язання задачі розсіяння електромагнітних хвиль на включенні у Т-подібному з'єднанні двох прямокутних хвилеводів за допомогою теореми Грина / Ши Хе, О. В. Багацкая, З. Ф. Назиров, С. М. Шульга // Вісник Київського університету. Серія: «Фізико-математичні науки». – 2007. – №. 1. – С. 301-307.
7. Шульга С. Н. Решение задачи дифракции LM-волн на включении в Т-образном сочленении прямоугольных волноводов методом теоремы Грина / С. Н. Шульга, О. В. Багацкая, Ши Хе // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка». – 2014. – №1115, вип. 24. – С. 95-103.
8. He Shi. Interaction of electromagnetic waves in a waveguide with very thin wires / Shi He, S. N. Shulga, N. G. Kokodiy, N. N. Gorobets, V. I. Kiiko, A. Y. Butrym // Proc. of the 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10), 21-26 June 2010, Kharkov (Ukraine). – 2010. – P. 1-3.
9. He Shi. Interaction of electromagnetic waves in a waveguide with very thin wires / Shi He, S. N. Shulga, N. G. Kokodiy, N. N. Gorobets, V. I. Kiiko, A. Yu. Butrym, and Yu Zheng // Journal of Communications Technology and Electronics. – Volume 56, Issue 10. – P. 1193-1196.
10. Хе Ши. Резонансные явления при дифракции электромагнитной волны на тонком преломляющем цилиндре / Ю. И. Гребенюк, Н. Г. Кокодий, Ши Хе // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Радіофізика та електроніка». – 2008. – №. 806, вип. 12. – С. 33-39.

АНОТАЦІЯ

Хе Ши. Розсіяння електромагнітних хвиль на відокремлених і періодичних хвилевідних неоднорідностях. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному й експериментальному дослідженню електродинамічних структур, які являють собою хвилеводи та їх

з'єднання з детермінованими, періодичними ідеально провідними і діелектричними анізотропними одиночними збуреннями. Задача дослідження таких об'єктів є актуальною для фундаментальної науки, тому що дозволяє отримати фундаментальні результати стосовно збурення і поширення електромагнітних хвиль у вказаних структурах, які містять у тому числі й анізотропні матеріали зі змішаною анізотропією. Для фізико-технічних застосувань і прикладної науки актуальність задачі полягає в можливості створення і розробки нових пристроїв прискорювальної й антенної техніки. У НВЧ техніці ці пристрої можуть бути застосовані для покращення електродинамічних характеристик розгалужувачів, подільників потужності, помножувачів, фільтрів.

У дисертації вивчені фізичні закономірності, отримані при числово-аналітичному рішенні задачі з дослідження режиму власних хвиль періодичного діафрагмованого круглого хвилеводу. Вони можуть бути застосовані при розробці електровакуумних пристроїв НВЧ (наприклад, у ЛБХ міліметрового діапазону), опромінювачів дзеркальних антен, що дозволяють ефективно керувати діаграмою спрямованості.

Запропонована в роботі достатньо реалістична фізико-математична модель взаємодії електромагнітного поля з анізотропними матеріалами в резонаторах і хвилеводах дозволяє з точністю, яку можна контролювати, знайти розподіл електромагнітного поля у довільно анізотропному та довільно неоднорідному матеріалі, обмеженому провідною поверхнею. Важливість дослідження електродинамічних властивостей таких структур пов'язана з унікальними електродинамічними властивостями таких матеріалів і можливістю миттєвого безконтактного керування цими властивостями за допомогою зовнішнього електричного поля.

На практиці необхідно знати як різного роду ідеально провідні включення, розташовані у хвилеводах та їх з'єднаннях, впливають на їх електродинамічні характеристики, і як їх можна використовувати в радіофізиці для оптимізації хвилевідних трактів. У зв'язку з цим в роботі розв'язано задачу розсіяння електромагнітної хвилі на металевому включенні довільного поперечного перерізу в області взаємодії T -подібного з'єднання хвилеводів за допомогою теореми Гріна, а також досліджено взаємодію електромагнітних хвиль у хвилеводі з дуже тонкими дротинками.

Ключові слова: діафрагмований хвилевід, діаграма Бріллюена, змішана анізотропія, метод скінчених різниць, теорема Гріна, фактор ефективності розсіяння і поглинання.

АННОТАЦІЯ

Хе Ши. **Рассеяние электромагнитных волн на уединенных и периодических волноводных неоднородностях.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, 2016.

Диссертационная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электродинамических структур, которые представляют собой волноводы и их соединения с детерминированными, периодическими идеально проводящими и диэлектрическими анизотропными одиночными возмущениями. Задача исследования таких объектов является актуальной для фундаментальной науки, так как позволяет получить фундаментальные результаты о возбуждении и распространении электромагнитных волн в указанных структурах, включающих и анизотропные материалы со смешанной анизотропией. Для физико-технических приложений и прикладной науки актуальность задачи заключается в возможности создания и разработки новых устройств ускорительной и антенной техники. В СВЧ технике эти устройства могут быть использованы для улучшения электродинамических характеристик разветвителей, делителей мощности, умножителей, фильтров.

В диссертации изучены физические закономерности, полученные при численно-аналитическом решении задачи по исследованию режима собственных волн периодического диафрагмированного круглого волновода. Они могут быть использованы при разработке электровакуумных приборов СВЧ (например, в ЛБВ миллиметрового диапазона), облучателей зеркальных антенн, позволяющих эффективно управлять диаграммой направленности.

Предложенная в работе достаточно реалистичная физико-математическая модель взаимодействия электромагнитного поля с анизотропными материалами в резонаторах и волноводах позволяет с контролируемой точностью найти распределения электромагнитного поля в произвольно анизотропном и произвольно неоднородном материале, ограниченном проводящей поверхностью. Важность исследования электродинамических свойств таких структур связана с уникальными электродинамическими свойствами таких материалов и возможностью мгновенного бесконтактного управления этими свойствами с помощью внешнего электрического поля.

На практике необходимо знать как различного рода идеально проводящие включения, помещаемые в волноводы и их соединения, влияют на их электродинамические характеристики, и как их можно использовать в радиофизике для оптимизации волноводных трактов. В связи с этим в работе решена задача рассеяния электромагнитной волны на металлическом включении произвольного поперечного сечения в области взаимодействия T -образного сочленения волноводов с помощью теоремы Грина, а также исследовано взаимодействие электромагнитных волн в волноводе с очень тонкими проволочками.

Ключевые слова: диафрагмированный волновод, диаграмма Бриллюэна, смешанная анизотропия, метод конечных разностей, теорема Грина, фактор эффективности рассеяния и поглощения.

ABSTRACT

He Shi. The scattering of electromagnetic waves on the separate and periodic waveguide inhomogeneities. – Manuscript.

Thesis for Ph. D. degree in physics and mathematics by the speciality 01.04.03 –

radiophysics. – Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to theoretical and experimental study of electrodynamic structures that are waveguides and their junctions with deterministic, periodic perfectly conductive and dielectric anisotropic singular perturbation. Study of these objects is relevant for fundamental science as it allows to obtain fundamental results on excitation and propagation of electromagnetic waves in said structure comprising anisotropic materials with mixed anisotropy. For physical and technical applications and applied science importance of the problem consists in the possibility of creating and development of new devices and antenna technology. In microwave technology, these devices may be used to improve the electromagnetic characteristics of couplers, power dividers, multipliers, filters.

The thesis studies physical laws, obtained by numerical-analytical solution of the problem on the own regime of periodic waves of diaphragm circular waveguide. They can be used in the development of microwave electronic devices (such as millimeter-wave TWT), feed antennas for reflector antennas to effectively manage the radiation pattern.

The proposed physical and mathematical model of the interaction of electromagnetic fields with anisotropic materials in resonators and waveguides is quite realistic, it allows us to find the distribution of electromagnetic field in an arbitrary anisotropic and inhomogeneous material arbitrarily limited by a conducting surface with controlled precision.

In practice, you need to know how different kinds of perfectly conducting inclusions, placed in waveguides and their junctions influence on their electrodynamic characteristics and how they can be used in radio physics to optimize waveguide paths. In this regard, the problem of scattering of electromagnetic waves on metallic inclusions of arbitrary cross-section in the area of interaction shaped T -junction waveguides using Green's theorem, as well as the problem of the interaction of electromagnetic waves with a very thin wire in a waveguide, have been solved.

Key words: disk loaded waveguide, Brillouin diagram, mixed anisotropy, finite difference method, Green's theorem, the efficiency factor of the scattering and absorption.