

Національна Академія Наук України
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я.Усикова

На правах рукопису

УДК 621.317.37:621.385.6:372.413:536.483



ІВАНЧЕНКО Ігор Віталійович

**Малоапертурні відкриті електродинамічні
структури міліметрового діапазону**

01.04.03 - радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків - 1997



00750932 (Q)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної Академії

Науковий консультант:

академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, радник при дирекції Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України, м. Харків
Шестопапов Віктор Петрович

Офіційні опоненти:

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор державного підприємства науково-дослідного інституту "Оріон", м. Київ
Гассанов Лев Гассанович

доктор фізико-математичних наук, професор, завідуючий відділом Радіоастрономічного інституту НАН України, м. Харків
Ваврів Дмитро Михайлович

доктор фізико-математичних наук, завідуючий відділом Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України, м. Харків
Масалов Сергій Олександрович

Провідна організація:

Київський університет ім. Тараса Шевченка, кафедри криогенної та мікроелектроніки і квантової радіофізики

Захист відбудеться 25 червня 1997 року на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 02.29.01 в Інституті радіофізики та електроніки ім.О.Я.Усикова НАН України (310085, Харків-85, вул. Ак. Проскури, 12), початок засідання о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім.О.Я. Усикова НАН України.

Автореферат розісланий "24" травня 1997 р.

Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради
доктор фізико-математичних наук

С.М.Харківський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Практична реалізація радіофізичного підходу до розв'язання широкого кола задач фізики та техніки міліметрового (ММ) і субміліметрового (СММ) діапазонів довжин хвиль як фундаментального, так і прикладного характеру пов'язана з використанням як коливального надвисокочастотного (НВЧ) контура ключової відкритої електродинамічної структури цих діапазонів - відкритого резонатора (ВР). Однак, в таких галузях сучасної науки як НВЧ-електроніка, дефектоскопія, фізика поверхні напівпровідників та спектроскопія електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) при низьких і наднизьких температурах квазіоптичні ВР з характерним параметром $ka > 50$ (де k - хвильове число, a - типовий розмір апертури) в окремих ситуаціях стають малоефективними.

Так вивчення магніторезонансних явищ в умовах $h\nu > kT$ (де h - стала величина Планка, ν - частота накачки НВЧ-сигнала, k - стала величина Больцмана, T - температура у кельвінах) пов'язане з необхідністю розташування електродинамічного модуля в обмеженій заповні надпровідного соленоїда спектрометра, що передбачає використання ВР з $ka < 30$. Ситуація посилюється як при наявності у резонаторі кювет з речовинами, так і в випадку зразків, розміри яких порівняні з довжиною хвилі. В цих умовах необхідної якості спектра ВР та високих показників коефіцієнту заповнення можна добитися в результаті використання сильно сфокусованих резонансних полів.

В діапазоні наднизьких температур ($T < 1K$) в ММ та СММ діапазонах довжин хвиль знаходяться характерні плазмові частоти ряду напівпровідників з низькою концентрацією основних носіїв заряду. Однак, вивчення фундаментальних механізмів переносу заряду в приповерхневому шарі таких напівпровідників є проблематичним внаслідок існуючих обмежень принципового характеру при використанні у цих умовах ефективного метода порушеного повного внутрішнього відбиття (ППВВ). В зв'язку з цим постановка і проведення таких експериментів вимагають як значної модифікації існуючих методик, так само і пошуку нових підходів щодо розв'язання проблеми.

Отримані порівняно недавно нові знання про тонку просторову структуру випромінювання Сміта-Парселла в короткохвильовій частині ММ

діапазона довжин хвиль можуть бути використані при створенні компактних НВЧ-пристроїв дифракційної електроніки широкого функціонального призначення, в тому числі різноманітних багатокаскадних систем з характерною щодо них багатообразністю фізичних ефектів та явищ, що являє собою як науковий, так і практичний інтерес. Вельми перспективними здаються багатокаскадні динамічні системи і в галузі напівпровідникової НВЧ-електроніки в плані побудови оригінальних відкритих електродинамічних структур з новими якостями, тим самим неминуче збагачуючи існуючі уявлення про динаміку нелінійних процесів в багатомодових осциляторах. При цьому достатньо очевидним є той факт, що при створенні таких систем слід виходити з розумних геометричних розмірів останніх, тим самим обумовлюючи необхідність переходу від звичних довгофокусних відкритих структур до їх короткофокусних аналогів. У свою чергу, наявність сильно сфокусованих резонансних полів відкриває нові можливості при розв'язанні таких задач щодо дефектоскопії, як, наприклад, виявлення в об'ємі радіопрозорих лінійних середовищ локальних "фазових" неоднорідностей та областей з слабкою анізотропією діелектричних властивостей.

Незважаючи на очевидну потребу у методах та засобах комплексного дослідження електродинамічних характеристик відкритих структур з високим ступенем локалізації електромагнітного поля, даний перспективний напрямок в теперішній час розвинутий недостатньо. Розглянуте в дисертації коло питань є логічним продовженням багаторічних систематичних досліджень, що проводяться в ІРЕ НАН України в рамках наукової школи Шестопалова В.П. "Теорія дифракції та дифракційна електроніка".

Мета роботи полягає в установленні основних закономірностей електродинамічних властивостей малоапертурних відкритих структур міліметрового діапазону, а також дослідженні нових явищ і ефектів, які виникають в умовах взаємодії істотно локалізованих резонансних електромагнітних полів з електронними пучками, діелектриками, напівпровідниками, парамагнетиками.

При цьому в дисертації розв'язуються такі **основні задачі**:

- 1) розвиток нових експериментальних підходів щодо проблеми дослідження електродинамічних властивостей відкритих резонансних

структур з просторовою локалізацією електромагнітного поля, порівнянню з довжиною хвилі;

2) на основі малоапертурних і короткофокусних відкритих структур створення оригінальних пасивних та активних електродинамічних структур і динамічних систем відкритого типу з новими якостями;

3) застосування малоапертурних і короткофокусних відкритих структур щодо вивчення механізмів електронно - хвильових взаємодій в динамічних системах з нелінійними елементами у вигляді нерелятивістського стрічкового електронного пучка, вузькощілинних напівпровідників, індукційованих парамагнетиків.

Наукова новизна.

Установлені закономірності та особливості амплітудних, фазових і поляризаційних характеристик резонансних електромагнітних полів у малоапертурних відкритих структурах ММ діапазону за допомогою розвинуеного автором нового експериментального методу досліджень - "методу діелектричної антени" (МДА). У короткофокусних малоапертурних ВР з числами Френеля в інтервалі $2 < N < 3.8$ (де $N = a^2 / R\lambda$, R - радіус кривизни сферичного дзеркала) виявлено існування резонансних коливань при відстані між дзеркалами, які відповідають законцентричній геометрії резонатора. Установлено, що форма фазової поверхні резонансного поля в короткофокусному відкритому резонаторі (КВР) змінюється від параболічної всередині резонатора до гіперболічної за межами каустичної поверхні. Запропоновані способи управління просторовими розподілами полів в різних типах малоапертурних ВР, що дозволило створити відкриті електродинамічні структури з новими якостями і застосувати їх у розв'язанні конкретних задач в галузі НВЧ-електроніки, дефектоскопії, низькотемпературної спектроскопії. Вперше експериментально досліджено вплив величини струму електронного пучка на фазу змушених коливань в генераторі дифракційного випромінювання (ГДВ) за допомогою запропонованої автором оригінальної експериментальної методики, що дозволило виявити явище бістабільності в синхронізованому генераторі при струмах пучка, перевищуючих деяке критичне значення, і дослідити режими хаотичної нестійкості. В області низьких та наднизьких температур досліджені високочастотні поверхневі властивості вузькощілинних твердих розчинів $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, що дозволило довести відмінність у рухомостях основних носіїв заряду в приповерхневому шарі кристалів в умовах

металевого та активаційного типів провідності, а також виявити наявність відносного температурного зміщення областей зміни домінуючих механізмів розсіяння на поверхні і в об'ємі напівпровідника. Вперше виявлені і пояснені аномальні зміни параметрів анізотропії та асиметрії форми лінії ЕПР опроміненого аміака в умовах досягнення енергії інверсійних переходів у молекулах сполуки поляризованої ядерної мішені - енергії теплового розупорядкування в її електронній спіновій підсистемі.

Апробація роботи.

Основні результати та положення роботи були представлені на VIII Всесоюзній науково-технічній конференції з неруйнуючих фізичних методів та засобів контролю (1977, Кишинів), на III Всесоюзній конференції з голографії (1978, Ульяновськ), на Всесоюзних симпозиумах по міліметровим та субміліметровим хвилям (1978, Харків; 1980, Горький), на IV Всесоюзній нараді "Изучение механизмов нетеплового влияния миллиметрового излучения на биологические объекты и биологически активные соединения" (1981, Фрязіно), на X Всесоюзній конференції "Электроника сверхвысоких частот" (1983, Мінськ), на науково-технічній конференції "Проблемы математического моделирования и реализации радиоэлектронных систем СВЧ на объемных интегральных схемах" (1987, Москва), на Всесоюзній науково-технічній конференції "Проектирование радиоэлектронного оборудования на диэлектрических волноводах и резонаторах" (1988, Тбілісі), на Всесоюзній науково-технічній конференції "Оптический, радиоволновой и тепловой методы неразрушающего контроля" (1989, Могилів), на Робочих нарадах з спінових явищ в фізиці високих енергій "СПІН-89" та "СПІН-91" (1989, 1991, Протвіно), на Міжнародних конференціях з інфрачервоних та міліметрових хвиль (1989, Китай; 1991, Лозанна; 1994, ICMWFST'94, Китай; 1994, Сендай; 1994, Каліфорнія), на Міжнародній конференції з вичислювального електромагнетизму та його застосуванням (1994, Китай), на Міжнароднім симпозиумі з антенних технологій та застосуванню електромагнетизму (1994, Оттава), на Міжнароднім симпозиумі PIRS-95 (1995, Вашингтон), на 25-й Європейській конференції (1995, Болонія).

Робота виконана у 1975-1997 роках в ІРЕ НАН України. Результати дисертаційної роботи знайшли практичне впровадження в ІРЕ НАН України, в ННЦ ХФТІ (Харків), в ЦНДІМ (Санкт-Петербург), в МРТІ (Москва), в НДІ "Оріон" (Київ), у Чернівецькому державному університеті.

Особистий внесок дисертанта

Основні результати та висновки щодо дисертації надруковані в роботах, список яких наводиться в кінці автореферату [1-38]. В дисертації зібрані і узагальнені матеріали систематичних досліджень в галузі експериментальної радіофізики, що є підсумком багаторічної самостійної роботи автора, а також його спільної праці з колегами. Особистий внесок автора в спільні з співавторами роботи полягає в наступному.

В [1,5] автором вивчено вплив ефекту двопримієзаломлення на спектральні характеристики й амплітудно-фазову структуру полів у ВР з анізотропними діелектриками, визначені діагональні елементи тензора діелектричної проникності ϵ і $\text{tg}\delta$ монокристалічного кварцу та орієнтованих лавсанової й поліетіленової плівок на частоті 75ГГц. В [2] автором підготовлені експерименти й проведені дослідження амплітудних, фазових і поляризаційних характеристик внутрішніх резонансних полів у двохдзеркальних ВР, систематизовані й обґрунтовані отримані результати; виявлені й дані пояснення особливостям впливу магнітного і електричного диполей на поляризаційну структуру полів в об'ємі ВР [3]. В [4] автором запропоновані й реалізовані методика дослідження та способи управління поляризацією поля у малоапертурному ВР з напівпровідниковим кристалом в одному з дзеркал, дані практичні рекомендації щодо використання такого резонатора як стабілізуючого коливального НВЧ-контура напівпровідникового лазера на циклотронному резонансі. У серії робіт [6,7,9] автором проведені дослідження щодо "холодного" моделювання випромінювання Сміта-Парселла. Він приймав безпосередню участь в проведенні "гарячих" експериментів, обміркованні й поданні результатів досліджень. У роботах [8,10] автором проведений порівняльний аналіз електродинамічних властивостей короткофокусних та довгофокусних ВР. Установлені загальні й відмітні ознаки даних класів відкритих структур і дано практичні рекомендації щодо використання короткофокусних ВР як коливального контура зворотнього зв'язку малогабаритного ГДВ. Автор приймав участь у створенні генератора, дослідженні його характеристик та обміркованні отриманих результатів. В роботі [11] автором поставлена й експериментально розв'язана задача збудження пасивного дисперсійного відкритого хвилевода з заданим розподілом поля вздовж його осі. Визначені умови синфазного випромінювання утворюючих відкритих хвилеводів короткофокусних апертур

й способи керування просторовою структурою його ближнього поля. Проведені дослідження відкритої системи, що дозволило оптимізувати її електродинамічні характеристики. Дано практичні рекомендації відносно використання такого відкритого хвилевода в аналізаторі електронно-хвильових процесів та широкополосному підсилювачі - лампі бігучої хвилі на ефекті Сміта-Парселла. У циклі робіт по низькотемпературній спектроскопії [12,13,23] внесок автора визначається його безпосередньою участю у створенні наднизькотемпературного комплексу "БУРАН", дослідженні й оптимізації електродинамічних характеристик двохдзеркальних короткофокусних ВР та використанні їх як резонансних чарунок спектрометра. Автором розроблена система фазової автоматичної підстройки частоти (ФАПЧ) для проведення досліджень на радіоспектрометрі комплексу "БУРАН" [18], зроблені розрахунки й аналіз температурних залежностей параметрів анізотропії та асиметрії форми лінії ЕПР дейтерированого аналога опроміненого аміаку [17,23]. В даних роботах автор на рівних правах брав участь у підготовці й проведенні експериментів. В результатах робіт [14,16] автором установлений й обґрунтований закон зміни фазового розподілу поля у зоні Френеля короткофокусних ВР, а також вивчені особливості фазової синхронізації коливань у багатомодовій динамічній системі послідовного підсумовування потужностей корпусних стабілізованих діодних генераторів. Автором розроблені, досліджені й оптимізовані антени поверхневих хвиль, які були використані у малоапертурному перетворювачі поверхневих електромагнітних хвиль щодо вивчення поверхневих властивостей напівпровідникових кристалів в умовах $h\nu > kT$ [19-21]. В рамках моделі флуктуаційного потенціалу ним обґрунтовані високі значення рухомостей основних носіїв заряду у приповерхевому шарі вузькощілинних твердих розчинів телуридів кадмію n-типу в умовах активаційної провідності напівпровідника й пояснені відносні температурні зсуви областей зміни домінуючих механізмів розсіяння на поверхні й в об'ємі кристалів [22]. В роботі [24] визначені області застосовності амплітудних, фазових і поляризаційних радіохвильових методів дослідження твердих діелектриків. За допомогою розробленого автором комплексу експериментальних методик виявлені й ідентифіковані локальні нерегулярності в оптично непрозорих діелектриках. Вивчені питання просторового узгодження фазових фронтів у ВР з локальними неоднорідностями, сформульовані рекомендації відносно використання оптимізованих ВР в електроніці НВЧ

[25]. В [38] автором поставлена й чисельно розв'язана задача про горизонтальний електричний диполь у діелектричному напівпросторі поблизу плоскої межі поділу двох лінійних середовищ. З врахуванням результатів й висновків розв'язаної модельної задачі вивчені й оптимізовані характеристики розробленої діелектричної антени як нового елемента збудження ВР, що дозволило за допомогою методу МДА досліджувати електродинамічні властивості відкритих структур з просторовою локалізацією електромагнітного поля, порівняно з довжиною хвилі.

Фізичні ідеї, наукові висновки та положення, які виносяться на захист, належать особисто автору. Основні результати досліджень, що наведені в дисертації, подані у 29 наукових статтях, одному препринті та у восьми авторських свідоцтвах на винахід. Опубліковано 5 робіт особисто автором [15, 26-29] у наукових фахових виданнях.

Обґрунтування та достовірність результатів забезпечена коректною постановкою проведених експериментів, доброю відповідністю експериментальних та розрахункових характеристик електромагнітних полів у ключових відкритих електродинамічних структурах міліметрового діапазону, а також визначенням меж довірчих інтервалів вимірюваних величин. Основні фізичні результати отримані відомими методами (ЕПР, ППВВ, метод Холпа) і не суперечать існуючим моделям.

Обсяг та структура дисертаційної роботи

Робота складається з вступної частини, п'яти розділів та заключної частини. Загальний об'єм дисертації складає 393 сторінки, включаючи 147 рисунків та 3 таблиці на 96 сторінках, а також 242 назви бібліографічних джерел на 25 сторінках. Кожен розділ дисертації закінчується короткими висновками, у яких сформульовані основні результати досліджень.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У Вступній частині описаний стан проблем, до яких має безпосереднє відношення дисертація, сформульовані мета її задані дисертаційної роботи, розглянуто коло питань, вивчення яких лягло в основу дисертації. Коротко викладено зміст роботи, сформульовані основні її результати та положення, що виносяться на захист.

В Розділі 1 "Метод діелектричної антени" викладені основні принципи побудови нового експериментального метода дослідження електродинамічних властивостей малоапертурних відкритих резонансних структур міліметрового діапазону з просторовою локалізацією електромагнітного поля, порівняно з довжиною хвилі [2,15,25,29,30,31,38].

Поставлена і чисельно розв'язана задача про горизонтальний електричний диполь, розташований в діелектричному напівпросторі поблизу плоскої межі поділу двох лінійних однорідних середовищ. Розраховані амплітудні, фазові та поляризаційні характеристики полів розсіяння такої структури в зоні Френеля та вивчений характер їх поведінки в залежності від діелектричного проникнення середовища ϵ , у якому розташований диполь, і відстані d останнього від межі поділу. Установлено, що з ростом параметра d інтенсивність дифракційного поля в обох середовищах зменшується, а з ростом ϵ - зростає. Останній результат має принципове значення відносно можливості підвищення роздільної здатності (для даної добротності резонатора) розвиваємого в дисертації нового метода МДА, порівняно з відомим "методом пробного тіла" (МПТ).

З метою доказу відповідності результатів розв'язаної модельної задачі характеристикам реальної антени, остання являла собою планарний одномодовий діелектричний хвилевод із полістирола з розташованою в його геометричному центрі металевою сферою діаметром $\emptyset \cong 0.2\lambda$. Отримана добра відповідність експериментальних даних з розрахунковими. Із врахуванням висновків і рекомендацій розв'язаної модельної задачі оптимізована антена використана у наступних дослідженнях як новий елемент збудження малоапертурних і короткофокусних відкритих резонаторів, а у складі автоматизованого радіофізичного комплексу - для дослідження просторових розподілів резонансних полів. Показано, що метод МПТ, стосовно до КВР, стає малоефективним внаслідок низької роздільної здатності. Приведені амплітудні розподіли полів вищих типів коливань у КВР, що отримано методами МПТ і МДА, які наглядно ілюструють переваги останнього.

В результаті проведеного аналізу інтерференційних явищ у КВР при наявності в його об'ємі електричного і магнітного диполей установлений взаємозв'язок спектральних характеристик сигналу на виході резонатора з параметрами зонда, його місцеположенням у полі стоячої хвилі, а також

амплітудами і фазами інтерферуючих хвиль в точці розташування зонда. Показані способи керування просторовою структурою резонансного поля в області аналізованих радіоголограм. За допомогою розвинутого в дисертації метода МДА вперше експериментально досліджені фазові розподіли полів у малоапертурних КВР (див. рис.1).

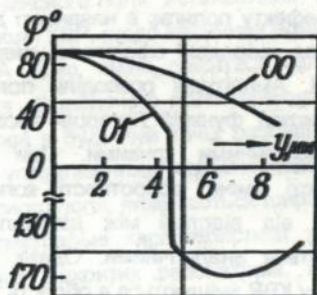


Рис.1 Фазові розподіли полів TEM_{00q} і TEM_{01q} типів коливань в напівсферичному КВР у поперечному перерізі резонансного поля, що розташований на відстані 2.9λ від плоского дзеркала

Контроль стану поляризації поля у КВР здійснюється при роботі комплексу в режимі трьохканального інтерферометра в умовах збудження в планарному діелектричному хвилеводі двох крос-поляризованих основних мод Н-типу. Установлена більш яро виражена еліптичність резонансного поля у порівнянні з квазіоптичними ВР при наближенні до меж каустичної поверхні внаслідок зростаючого впливу у КВР крайових ефектів.

Поряд з висновками і рекомендаціями щодо використання метода МДА на практиці розраховані його основні похибки з врахуваннями кінцевих розмірів зонда.

В Розділі 2 "Особливості електродинамічних властивостей малоапертурних і короткофокусних відкритих резонаторів" вивчені закономірності формування просторової структури полів і способи керування ними у ВР з різноманітними елементами всередині [3,4,8,25,29], умовно класифікованих в літературі як "амплітудні", "фазові" і "поляризаційні" неоднорідності.

В результаті узагальнення основних електродинамічних властивостей малоапертурних КВР і проведення порівняльного аналізу

даного класу резонаторів з квазіоптичними аналогами установлені їх загальні і відмітні ознаки. При зменшенні параметра ка спектр коливань розряджається, а їх добротність зменшується. При цьому в КВР установлено існування резонансних коливань при відстанях між дзеркалами, що відповідають законцентричній геометрії резонатора. Причина виявленого ефекту полягає в наявності додаткової концентрації електромагнітного поля всередині сферичних дзеркал з малим радіусом кривизни їх поверхні. Амплітудні розподіли полів у КВР з круглими дзеркалами мають вигляд функцій Лагерра-Гаусса, а фазові розподіли апроксимуються параболічними кривими. При зменшенні апертури дзеркал закономірності зміни добротності коливань і резонансного коефіцієнту передачі від відстані між дзеркалами для обох класів резонаторів залишаються аналогічними. Однак, максимальні значення добротності коливань у КВР зміщуються в область параметрів системи, які відповідають конфокальній геометрії резонатора, внаслідок зростання у КВР дифракційних збитків.

Досліджено вплив на властивості КВР вузької металевої стрічки. Розглянуті два характерні положення стрічки у полі стоячої хвилі: в першому вузлі електричної компоненти поля і безпосередньо у поверхні плоского дзеркала - в умовах збудження в системі резонанса на "поршневій" хвилі. Вивчені особливості поведінки амплітудних і фазових просторових розподілів полів при зміні управляючого параметра δ - відстані від стрічки до плоского дзеркала резонатора. Установлено, що при приближенні стрічки до значення $\delta = \delta_{\text{поршн.}}$ чиниться корекція фазового фронту. При цьому розподіли полів стають близькими по своїй просторовій структурі до розподілів полів КВР без неоднорідності у резонансному об'ємі. Установлені основні закономірності в поведінці електродинамічних характеристик резонатора як при підході до "поршневого" резонанса, так і в умовах подвійного резонанса у КВР.

Вивчена поведінка фазового фронту у КВР при зміні положення рухомого циліндричного коректора у плоскому дзеркалі резонатора. Показано, що при переміщенні коректора всередину дзеркала резонансне поле немов прямує слід за ним в утворюючися порожнину, що приводить до загальної фокусування резонансного пучка. І навпаки, підняття коректора над поверхнею дзеркала супроводжується зміною знака кривизни фазового фронту на протилежний і розфокусуванням резонансного пучка. Обгрунтована необхідність у проведенні таких

досліджень з метою оптимізації характеристик малоапертурних резонаторів, які використовуються як резонансні чарунки магнітних криогенних радіоспектрометрів.

Розглянуто вплив магнітного диполя у вигляді хвилеводної щілини зв'язку в дзеркалі квазіоптичного резонатора на поляризаційні характеристики резонансного поля. Установлено, що еквівалентний вплив на стан поляризації поля КВР, щодо величини ефекту, має вузька щілина в одному з дзеркал. А саме, зміна орієнтації щілини відносно напрямку електричного вектора збуджуючого поля приводить до зміни параметрів поляризаційного еліпса в будь-якій точці резонансного об'єму. Показано, що для такого КВР управляючими параметрами, які впливають на стан поляризації резонансного поля, виявляються ширина і глибина щілини.

Досліджено спектральні характеристики та просторова структура полів малоапертурних відкритих резонаторів, які мають вісь симетрії. Показано, як шляхом зміни спектрального параметра системи - частоти - можна ефективно керувати розмірами внутрішньої каустики збуджуваних коливань. Дані практичні рекомендації щодо використання таких резонаторів для діагностики релятивістських електронних пучків.

В Розділі 3 "Колівальні та хвильові процеси в оригінальних пасивних і активних системах відкритого типу" подані результати досліджень малоапертурних відкритих структур з розташованими в їх об'ємі дисперсійними елементами у вигляді відбивних дифракційних ґрат (ВДГ) та антен поверхневих хвиль, а також різними діелектриками, і застосування таких відкритих структур в задачах НВЧ-електроніки та дефектоскопії [1,5,10,11,16,24,25,35,36].

В результаті проведених досліджень КВР з локальною ВДГ на плоскому дзеркалі встановлено, що на відміну від квазіоптичних ВР в дисперсійному КВР в усьому робочому інтервалі відстань між дзеркалами поряд з TEM_{02q} і TEM_{20q} типами коливань є присутній основний TEM_{00q} тип коливання. Проаналізовані спектральні характеристики, а також амплітудні і фазові розподіли полів цих коливань поблизу періодичної структури при зміні параметра Δ - положення розвиненої поверхні ВДГ відносно поверхні плоского дзеркала. Показано, що коректуюча дія рухомої ВДГ зводиться до зменшення кривизни фазового фронту при її піднятті над поверхнею дзеркала ($\Delta > 0$) і до зростання кривизни при переході до області значень $\Delta < 0$. Визначені оптимальні значення параметра Δ для кожного з типів коливань. Отримані результати використані при створенні

малогабаритного ГДВ і дослідженнях його характеристик. Визначені відзначні особливості генератора в порівнянні з базовим ГДВ, які полягають: 1) в зростанні пускових струмів внаслідок зменшення об'єму простору взаємодії; 2) в значному розширенні діапазона генерації (42ГГц - 98ГГц) із-за подавлення коливань поверхневих хвиль; 3) в зростанні крутизни електронної і механічної перестройок.

Експериментально розв'язана задача збудження дисперсійного відкритого хвилеводу, що утворений двома циліндричними короткофокусними дзеркалами з розташованими в їх центральній частині антенами поверхневих хвиль, в загальному випадку різними. В результаті досліджень ефектів перетворювання поверхневих і об'ємних хвиль в даній електродинамічній системі визначені умови синфазного випромінювання двох дзеркал-антен, необхідні для підтримки хвильового процесу у такому відкритому хвилеводі.

Електродинамічні властивості пасивного відкритого хвилеводу і запропоновані способи керування розподілом поля вдовж його осі використані при дослідженні процесів підсилення та поглинання електромагнітних хвиль у такому хвилеводі, навантаженому електронним пучком (ЕП). У діючому макеті електронного аналізатора вивчені процеси взаємодії ЕП з прямою та зворотною хвилями, які показують, зокрема, можливість виділення повільної і швидкої хвиль просторового заряду шляхом перетворювання їх в поверхневі хвилі діелектричного хвилевода. Такий механізм багаторазової взаємодії ЕП з НВЧ-полем використаний при створенні нового типу широкополосного електронного підсилювача - лампи бігучої хвилі на ефекті Сміта-Парселла. Показано, що у такій автоколивальній системі (АС) встановлюється стаціонарний процес зростання амплітуд як об'ємної хвилі вдовж осі системи, так і поверхневої електромагнітної хвилі діелектричного хвилевода, за допомогою якого підсилений сигнал надходить до навантаження. Коефіцієнт підсилення даної АС має типову для нерезонансного підсилювача залежність від величини струму пучка. Полоса пропускання складає 1ГГц в чотирьох-міліметровому діапазоні довжин хвиль.

За допомогою методу МДА проведені комплексні дослідження малоапертурного ВР з напівпровідниковим кристалом, розташованим в вузькій щілині плоского дзеркала. Показані способи керування станом поляризації резонансного поля шляхом відповідних змін параметрів щілині і її орієнтації відносно Е-компоненти вектора збуджуючого НВЧ-поля.

Визначені фізичні параметри відкритої електродинамічної структури, що задовольняють необхідним умовам щодо її використання як коливального контура напівпровідникового лазера на циклотронному резонансі.

Експериментальні дослідження характеристик полів КВР в зоні Френеля показали, що їх просторова структура має вигляд інтерферограм, які формуються полями випромінювання другоразових джерел, зосереджених на кромках дзеркал. В результаті доброї відповідності розрахункових і експериментальних фазових розподілів полів зроблено висновок про гіперболічний закон зміни кривизни фазових фронтів в ближньому полі КВР за межами каустичної поверхні коливачів.

Вивчені електродинамічні властивості КВР з локальними ВДГ на плоскому дзеркалі свідчили про можливість об'єднання декількох КВР з дисперсійними елементами у вигляді антен поверхневих хвиль в упорядковані відкриті електродинамічні структури. Проведені дослідження однієї з таких структур, яка утворена сукупністю еквідистантно розташованих відносно одне до одного дисперсійних КВР з загальною хвилеведучою структурою у вигляді планарного діелектричного хвилевода, показали, що в умовах фазової синхронізації зв'язаних резонансних контурів досягається ефект когерентного підсумовування потужностей парціальних коливачів у такій системі.

Досліджено вплив локальних нерегулярностей в лінійних діелектричних середовищах на характеристики сильно сфокусованих зондуючих хвильових пучків. Приведені результати модельних експериментів щодо виявлення і класифікації штучно введених у двошарову діелектричну матрицю локальних неоднорідностей у вигляді порожнин, діелектричних і металевих об'єктів, які імітували можливі сторонні включення в матеріалах. Показані переваги використання КВР, в порівнянні з квазіоптичними ВР, щодо розв'язання проблеми виявлення захованих у товщині оптично непрозорих діелектриків локальних "фазових" неоднорідностей та областей з слабкою анізотропією діелектричних властивостей. Приведені радіозображення керамічних зразків на частотах 72ГГц і 130ГГц, в об'ємі яких були виявлені локальні нерегулярності.

В Розділі 4 "Електронно-хвильові процеси в ГДВ на основі ВХР" досліджені динамічні процеси у новій модифікації ГДВ прохідного типу з контуром зворотнього зв'язку у вигляді малоапертурного відкритого хвилеводного резонатора (ВХР) [6,7,9,26,28].

За допомогою модифікованого методу МДА встановлено, що в такому ВХР поруч з розподілами полів з високою просторовою частотою можуть збуджуватися коливання з розподілами полів вдовж періодичної структури, які близькі до розподілів полів у ВР базового ГДВ. Саме такий неоднорідний розподіл НВЧ - поля вдовж простору взаємодії АС обумовлює наявність в спектрі генерації частково розщеплених зон. Розглянуті переваги нової АС у порівнянні з базовим ГДВ щодо використання кола зовнішнього додаткового зворотнього зв'язку (ЗДЗЗ). Приведені енергетичні характеристики генератора, які ілюструють ефективність керування ними шляхом зміни модулю та фази НВЧ-сигнала у колі ЗДЗЗ без впливу на узгодження коливального контура із навантаженням з боку виходу приладу.

В незбудженій АС при наявності НВЧ-сигнала зовнішнього впливу досліджені лінійні та нелінійні процеси підсилювання. Отримані залежності коефіцієнта підсилювання від параметра нелінійності системи - струму електронного пучка - корелюють з аналогічними залежностями щодо резонансних підсилювачів даного класу із звичним ВР. Встановлено, що при сумірних величинах коефіцієнтів підсилювання нова АС є більш широкополосною в порівнянні з базовою. Показана можливість подавлення автоколивань в нелінійному режимі підсилювання. Вперше у неавтономному ГДВ експериментально вивчено вплив нелінійності системи на фазу змушених коливань. Показано, що величина фазового зсуву зростає при збільшенні потужності підсилюємого сигналу. Введення в схему негативного ЗДЗЗ наближає форму амплітудно - частотної характеристики до ідеальної - прямокутної, зменшує крутизну фазо-частотної характеристики, а також розширює динамічний діапазон підсилювача, що є принциповим при його роботі в області критичних значень струму електронного пучка.

Проведений детальний аналіз сценаріїв взаємних переходів між синхронними і асинхронними змушеними коливаннями в АС при одночастотному та бігармонічному зовнішніх впливах. Приведені біфуркаційні діаграми, які ілюструють вплив неізохронності системи на зовнішній вигляд полос синхронізації. Встановлено, що завдяки оригінальній електродинамічній системі НВЧ-контура зворотнього зв'язку полоса синхронізації нової АС значно перевищує полосу синхронізації базових ГДВ.

Електродинамічні особливості контура зворотнього зв'язку забезпечили можливість досліджувати вплив нелінійності системи в продовж зростання струму електронного пучка на фазу змушених коливань синхронізованого ГДВ, розглядаючи його з точки зору двохканального інтерферометра. В результаті, при величинах струму електронного пучка, перевищуючих деяке критичне значення, було виявлено явище бістабільності коливань в АС (див. рис.2).

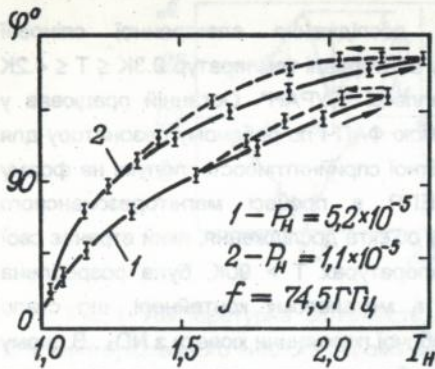


Рис.2

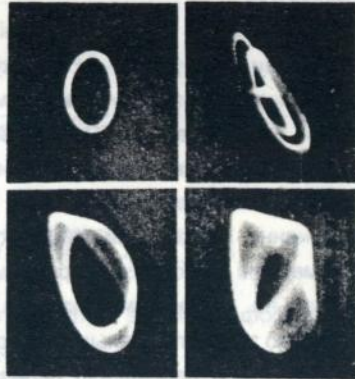


Рис.3.

Рис.2 Струміві залежності фази змушених коливань у синхронізованому ГДВ для двох нормованих значень потужностей сигналу зовнішнього впливу

Рис.3 Еволюція фазових портретів двохмодової динамічної системи з парціальними частотами контурів $f_1 \equiv f_2 \equiv 71 \text{ ГГц}$ при переході від регулярних коливань до хаотичних

Установлена наявність двох стійких станів в синхронізованому ГДВ дозволила визначити області параметрів системи і умови, при яких виникають режими хаотичної нестійкості. Приведені на рис.3 фазові портрети ілюструють один з сценаріїв переходу від регулярних коливань до хаотичних при резонансній взаємодії активного контура генератора з навантаженням на його вихід пасивним НВЧ-контуром у вигляді КВР.

Отримані результати свідчать про те, що в умовах сильного зв'язку ГДВ з навантаженням у вигляді пасивного коливального контура слід

враховувати можливість виникнення хаотичних нестійкостей поблизу меж зон синхронізації.

Розділ 5 "Низькотемпературна спектроскопія" присвячений дослідженням електронної спінової підсистеми дейтерированого аналога опроміненого аміаку (ND_3) методом ЕПР [12,13,17,18,23,33,34], а також об'ємних та поверхневих властивостей вузькощілинних твердих розчинів телуридів кадмію п - типу ($(\text{n-Cd}_x\text{Hg}_{1-x})\text{Te}$) методом порушеного повного внутрішнього відбиття (ППВВ) [19-22,37] в області низьких та наднизьких температур.

Проведені спектроскопічні дослідження електронної спінової підсистеми дейтерированого аміаку в інтервалі температур $0.3\text{K} \leq T \leq 4.2\text{K}$ на наднизькотемпературному комплексі "БУРАН". Останній працював у режимі спектрометра ЕПР з системою ФАПЧ по робочому резонатору для виключення впливу дисперсії магнітної сприйнятливості сполуки на форму неоднорідно розширеної лінії ЕПР в процесі магніторезонансного поглинання. Враховуючи специфіку об'єкта дослідження, який втрачає свої парамагнітні властивості при температурах $T > 90\text{K}$, була розроблена спеціальна діелектрична ковчеза в металевому контейнері, що стало причиною значного зменшення робочої порожнини ковчези з ND_3 . В цьому випадку стала необхідною сильна фокусування резонансного поля для забезпечення потрібної величини коефіцієнту заповнення малого об'єму речовини поляризованої ядерної мішені високочастотним полем. Показано, що таким вимогам, щодо резонансного НВЧ-контурі спектрометра, задовольняє малоапертурний двохдзеркальний КВР прохідного типу. Використання отриманих за допомогою метода МДА даних про амплітудні і фазові розподіли полів у КВР поблизу поверхні ковчези-контейнера дозволило оптимізувати характеристики резонансної чарунки, забезпечивши необхідну для проведення спектроскопічних досліджень високу чутливість методу ЕПР.

В результаті аналізу експериментальних спектрів поглинання опроміненого аміаку у чотирьох-міліметровому діапазоні довжин хвиль установлені закономірності у поведінці параметрів ліній ЕПР при зниженні температури зразків. Зроблений висновок про необхідність підстройки частоти сигналу НВЧ - накачки в процесі поляризації речовини мішені.

При залученні методів аналізу асиметричних ліній ЕПР з слабкою аксіальною анізотропією g-фактора спектроскопічного розщеплення, до яких відносяться лінії ЕПР опроміненого аміаку, визначені основні

параметри лінії і простежена їх поведінка від температури. Установлена наявність екстремумів на температурних залежностях параметрів анізотропії та асиметрії форми лінії поглинання (див. рис.4) поблизу температури $T \cong 1\text{K}$. Показано, що причиною виявлених низькотемпературних ефектів може бути вплив на електронну структуру парамагнетика інверсійних переходів у молекулах сполуки поляризованої ядерної мішені.

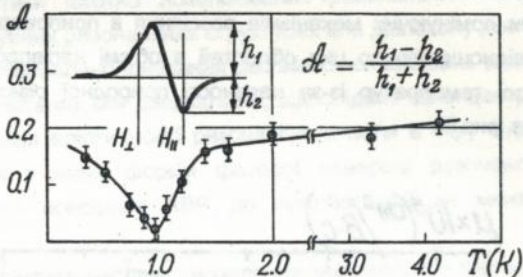


Рис.4 Температурна залежність параметра асиметрії форми лінії ЕПР дейтерізованого аналога опроміненого аміаку

Результати досліджень двох дифракційно-пов'язаних апертур з дифракційними ґратами і діелектричними хвильоводами, що описані в розділі 3, були використані при створенні малоапертурного перетворювача поверхневих електромагнітних хвиль (ПЕХ) з прийнятно-передаючими елементами у вигляді антен поверхневих хвиль. Це дозволило застосувати метод ППВВ для вивчення поверхневих властивостей напівпровідників в широкому інтервалі температур, в тому числі в умовах $h\nu > kT$. Спеціально розроблена касета і перетворювач ПЕХ являли собою компактний електродинамічний модуль спектрометра, що забезпечило можливість проведення одночасових досліджень кінетичних коефіцієнтів як в об'ємі (методом Холла), так і в приповерхневому шарі (методом ППВВ) твердих розчинів $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ у відзначеному вище діапазоні температур.

З метою установлення типів провідності напівпровідників (з різними концентраціями носіїв заряду) в умовах збудження поверхневого поляритона були визначені критичні значення магнітних полів, які задовольняють вимогам індукційованого переходу "метал-діелектрик". Для усіх зразків поблизу переходу виявлена осциляція коефіцієнта Холла, що

пов'язана з резонансним характером локалізації електронів, які знаходяться вище дна підзон Ландау і мають малу кінетичну енергію, в ямах флукуаційного потенціалу домішкових атомів.

Проведений співвідносний аналіз поведінки концентрації і рухомості основних носіїв заряду в об'ємі і в приповерхневому шарі кристалів. Показано, що в умовах домішкової провідності поверхнева концентрація носіїв струму перевищує концентрацію в об'ємі, що свідчить про наявність донорних станів на поверхні, а поверхнева рухомість нижче холловської внаслідок проявлення ефекту дифузного розсіяння. Установлено, що області зміни домінуючих механізмів розсіяння в приповерхневому шарі зміщені по відношенню до цих областей в об'ємі напівпровідника в бік більш високих температур із-за наявності природної окисної плівки на поверхні (див. рис.5).

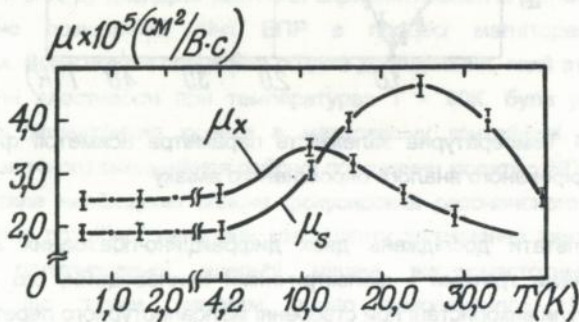


Рис.5 Типові температурні залежності рухомостей основних носіїв заряду в об'ємі (μ_x) та приповерхневому шарі (μ_s) твердих розчинів n-Cd_xHg_{1-x}Te з композиційним складом $x \approx 0.2$

Експериментально підтверджена різниця у величинах рухомостей носіїв заряду у приповерхневому шарі кристалів в умовах металевого і активаційного типів провідності. При цьому встановлено, що внаслідок перевищення просторового розміру крупномасштабних ям флукуаційного потенціалу відповідних областей локалізації електронів на окремих домішкових центрах спостерігається незначне зменшення високочастотної рухомості носіїв заряду після переходу "метал-діелектрик".

У **Заключній частині** сформульовані основні результати дисертації і виходячі з них висновки та практичні рекомендації. Зазначені перспективні напрямки наукових досліджень.

ВИСНОВКИ

1. Розвинут новий експериментальний "метод діелектричної антени", який дозволяє досліджувати просторові амплітудні, фазові і поляризаційні характеристики істотно локалізованих резонансних полів у відкритих малоапертурних резонансних структурах ММ діапазону довжин хвиль.

2. Установлено існування резонансних коливань в двохдзеркальних КВР при відстанях між дзеркалами, відповідних законцентричній геометрії ВР, зростання еліптичності резонансного поля в міру віддалення від осі резонатора і зміна форми фазової поверхні резонансного поля від параболічної всередині КВР до гіперболічної за межами каустичної поверхні.

3. Грунтуючись на установлених властивостях малоапертурних КВР, в тому числі при наявності в резонансному об'ємі "амплітудних", "фазових" та "поляризаційних" локальних неоднорідностей, створені відкриті електродинамічні структури і динамічні системи з новими якостями, а саме: короткофокусний ГДВ, аналізатор електронно-хвильових процесів, лампа бігучої хвилі на ефекті Сміта-Парселла, ГДВ з контуром зворотнього зв'язку у вигляді відкритого хвилеводного резонатора, багатокаскадний суматор потужності коливань, малоапертурний перетворювач поверхневих хвиль.

4. Установлені фізичні причини зростання пускових струмів та істотного розширення діапазону частот генеруємих НВЧ-коливань, а також зростання крутизни механічної та електронної перестройок у короткофокусному ГДВ в порівнянні з базовими автогенераторами.

5. Експериментально розв'язана задача збудження дисперсійного відкритого хвилевода, утвореного короткофокусними циліндричними дзеркалами з антенами поверхневих хвиль. Показані способи виділення швидких і повільних хвиль просторового заряду у такому хвилеводі при заміні однієї з антен нерелятивістським електронним пучком, а також вивчені особливості механізмів підсилення і поглинання електромагнітних хвиль у створеному на його основі діючому макеті лампи бігучої хвилі на ефекті Сміта-Парселла.

6. Показано, що в багатокаскадній відкритій електродинамічній системі, яка утворена сукупністю еквідистантно розташованих дисперсійних КВР з загальною навантаженістю у вигляді антени поверхневої хвилі, в умовах фазової синхронізації зв'язаних резонансних контурів досягається ефект когерентного підсумовування потужностей парціальних коливань.

7. Вивчено вплив локальних нерегулярностей в лінійних діелектричних середовищах на характеристики зондувочої електромагнітної хвилі. Показано, що використання сильно сфокусованих резонансних полів з високою щільністю енергії, які формуються у КВР, дозволяє виявляти в об'ємі оптично непрозорих діелектриків локальні "фазові" неоднорідності з роздільністю, визначаємою релєвським критерієм.

8. Вивчені особливості електронно-хвильової взаємодії в новій модифікації генератора дифракційного випромінювання прохідного типу з контуром зворотнього зв'язку у вигляді відкритого хвильового резонатора. Вперше у ГДВ експериментально досліджені залежності фази змушених коливань від параметра нелінійності системи - струму електронного пучка. Показано, що однією з переваг нового генератора є можливість ефективно керувати його характеристиками за допомогою управляючого НВЧ-сигналу в контурі зовнішнього додаткового зворотнього зв'язку без впливу на узгодження резонатора з навантаженням.

9. Установлені причини викривлення зон синхронізації неавтономного ГДВ в умовах одночастотного і бігармонічного зовнішніх впливів при зростанні величини струму електронного пучка. Вивчені сценарії взаємних переходів між синхронними та асинхронними змушеними коливаннями. Установлено, що полоса синхронізації в новому генераторі майже на порядок перевищує полосу синхронізації базових ГДВ. Показано зростаючий вплив неізохронності коливань на структуру основної зони синхронізації генератора з ростом нелінійності системи.

10. В синхронізованому ГДВ виявлено явище бістабільності коливань при величинах струмів електронного пучка, перевищуючих деяке критичне значення. Показано, що в цій області значень параметра нелінійності автоколивальної системи в умовах її резонансної взаємодії з навантаженням на вихід генератора пасивним коливальним НВЧ-контуром можуть розвиватися хаотичні нестійкості поблизу меж полос синхронізації.

11. Вивчені особливості й установлені закономірності в поведінці рухомостей основних носіїв заряду в об'ємі і в приповерхневому шарі

вузькощілинних твердих розчинів телуриду кадмію $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ з композиційним складом $x \cong 0.2$. Установлено, що області переходу від домішкової провідності до власної зміщуються в бік більш високих температур з ростом вихідної концентрації основних носіїв заряду. При цьому наявність на поверхні кристалів природного окису обумовлює відносно температурне зміщення областей зміни домінуючих механізмів розсіяння в приповерхневому шарі і в об'ємі напівпровідника. В рамках моделі флуктуаційного потенціалу обґрунтовані високі значення високочастотної рухомості носіїв заряду у приповерхневому шарі в умовах активаційного типу провідності напівпровідника.

12. Вивчені спектральні характеристики дейтерированого аналога опроміненого аміаку ND_3 в області параметрів $h\nu > kT$. В умовах, далеких від насичення, установлений ефект розширення лінії ЕПР при зниженні температури зразка від $T = 4.2\text{K}$ до $T = 0.3\text{K}$ та визначено час електронної спин-спінової релаксації в сполучі поляризованої ядерної мішені. Установлено аномальний характер температурних залежностей параметрів анізотропії і асиметрії лінії магніторезонансного поглинання поблизу температури $T \cong 1\text{K}$. Показано, що причиною істотного зменшення величин анізотропії електронного фактора Ланде і асиметрії форми лінії ЕПР може бути вплив на електронну структуру парамагнетика інверсійних переходів у сполучі мішені.

На захист виносяться такі положення та результати

1. Розвинуто експериментальний метод дослідження резонансних електромагнітних полів, що просторово локалізовані в області значень параметра $3 < ka < 30$, який дозволив установити закономірності їх формування у малоапертурних відкритих структурах міліметрового діапазону довжин хвиль з різними класами неоднорідностей. На цій основі створені оригінальні пасивні та активні відкриті структури з заданими електродинамічними властивостями, які необхідні щодо застосувань у конкретних фізичних експериментах.

2. Вивчено динамічні процеси у генераторі дифракційного випромінювання з електродинамічною системою нового типу у вигляді малоапертурного відкритого хвилеводного резонатора з двома автономними елементами зв'язку з навантаженням. Експериментально виявлені теоретично передбачені раніше явища бістабільності у

синхронізованому генераторі та виникнення хаотичних нестійкостей поблизу меж полоси синхронізації в умовах резонансної взаємодії автоколивальної системи з навантаженням на неї пасивним коливальним надвисокочастотним контуром. Запропоновані необхідні щодо практики способи вимірювання фази змушених коливань у неавтономних режимах роботи автогенератора.

3. Вивчено поверхневі кінетичні властивості вузькощілинних твердих розчинів $n - \text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в інтервалі температур $0.3\text{K} < T < 50\text{K}$ з використанням малоапертурного перетворювача поверхневих електромагнітних хвиль. Установлено, що перехід від домішкового до власного типів провідності в приповерхневому шарі відбувається при більш високих температурах, ніж в об'ємі напівпровідника. При цьому зі збільшенням вихідної концентрації основних носіїв заряду величина зміщення області температур, в якій відбувається зміна домінуючих механізмів розсіяння, в приповерхневому шарі перевищує величину аналогічного зміщення в об'ємі напівпровідникових кристалів.

4. Вивчено парамагнітні властивості сполуки поляризованої ядерної мішені - дейтерированого аналога опроміненого аміаку - в умовах $h\nu > kT$ з використанням малоапертурного короткофокусного відкритого резонатора як резонансного контура магнітного радіоспектрометра. Установлено, що вистроювання електронної спінової підсистеми парамагнетика при понижуванні температури зразка в інтервалі $0.3\text{K} \leq T \leq 4.2\text{K}$ супроводжується розширенням лінії електронного парамагнітного резонансу. При цьому виявлено явища зменшення анізотропії електронного фактора Ланде та зростання симетрії лінії магніторезонансного поглинання поблизу температури $T \cong 1\text{K}$.

Наукове та практичне значення дисертаційної роботи полягає в розвинутому радіофізичному підході до проблеми дослідження резонансних малоапертурних відкритих структур ММ діапазону і запропонованих способах керування просторовими характеристиками їх полів. Це дозволяє оптимізувати параметри даного класу відкритих структур з метою їх ефективного використання у фундаментальних та прикладних дослідженнях. А саме: для вивчення нелінійної динаміки в автоколивальних системах і коливальних процесів у багатомодових осциляторах, для створення нових перспективних речовин поляризованих ядерних мішеней, для вивчення фундаментальних механізмів переносу

заряду у приповерхневому шарі напівпровідників і напівпровідникових плівак, для виявлення локальних нерегулярностей у радіопрозорих лінійних середовищах, при розробці нових приладів та обладнання ММ і СММ діапазонів довжин хвиль.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ

1. Вертий А.А., Иванченко И.В., Шестопапов В.П. Экспериментальное исследование квазиоптического открытого резонатора с анизотропным заполнением. // Радиотехника и электроника. - 1981. - 26. - N 2. - С.294-298.
2. Вертий А.А., Иванченко И.В., Шестопапов В.П. Сканирующий резонансный квазиоптический поляриметр миллиметрового диапазона. // Приборы и техн. эксперимента. - 1981. - N 1. - С.155-157.
3. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Щель связи открытого резонатора - поляризационная неоднородность. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1981 - 24. - N 12. - С.1508-1513.
4. Вертий А.А., Иванченко И.В., Кошечкина С.В., Пустыльник О.Д., Шестопапов В.П. Экспериментальное исследование электродинамической системы полупроводникового лазера на циклотронном резонансе. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1982. - 25. - N 7. - С.827-832.
5. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Попков Ю.П., Шестопапов В.П. Исследование анизотропных пленок резонансным методом. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1983. - 26. - N 5. - С.616-624.
6. Вертий А.А., Иванченко И.В., Нестеренко А.В., Попенко Н.А., Цвык А.И., Цвык Л.И., Шестопапов В.П. Исследование тонкой структуры дифракционного излучения миллиметрового диапазона. I. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1985. - 28. - N 10. - С.1274-1283.
7. Вертий А.А., Иванченко И.В., Нестеренко А.В., Попенко Н.А., Цвык А.И., Цвык Л.И., Шестопапов В.П. Исследование тонкой структуры дифракционного излучения миллиметрового диапазона. II. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1985. - 28. - N 11. - С.1443-1449.
8. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Нестеренко А.В., Цвык А.И., Шестопапов В.П. Исследование короткофокусных открытых резонаторов, применяемых в дифракционной электронике. // Радиотехника и электрон. - 1986. - 31. - N 1. - С.126-134.
9. Вертий А.А., Иванченко И.В., Лопатин И.В., Нестеренко А.В., Попенко Н.А., Худайберганов А.Х., Цвык А.И., Цвык Л.И., Шестопапов В.П.

- Квазиоптический комплекс для исследования радиационных эффектов в миллиметровом диапазоне. // Укр. физ. журн. - 1986. - 31. - N 3. - С.347-350.
10. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Цвык А.И., Шестопалов В.П. Исследование поляризационных характеристик генераторов дифракционного излучения // Изв. вуз. Радиофизика. 1987. - 30. - N 1. - С.104-113.
11. Вертий А.А., Воробьев Г.С., Иванченко И.В., Нестеренко А.В., Попенко Н.А., Цвык А.И. Экспериментальные исследования преобразования поверхностных волн в объемные в открытом волноводе. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1988. - 31. - N 6. - С.717-724.
12. Вертий А.А., Звягина Г.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Тарапов С.И., Шестопалов В.П. Резонансные ячейки радиоспектрометра миллиметрового диапазона, работающие при $T < 1\text{К}$. // Приборы и техн. эксперимента. - 1988. - N 2. - С.107-110.
13. Vertiy A.A., Ivanchenko I.V., Popenko N.A., Tarapov S.I., Shestopalov V.P. A millimeter wave radiospectrometer for material analyses below $T < 1\text{K}$. // Intern. Journ. of I&MMW. - 1989. - 10. - N 3. - P.395-404.
14. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Исследование дифракционно-связанных открытых резонаторов в коротковолновой области мм диапазона длин волн. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1989. - 32. - N 8. - С.788-792.
15. Иванченко И.В. Автоматический измеритель амплитудно - фазовой структуры поля в ОР. // Приборы и техн. эксперимента. - 1979. - N 3. - С.135-136.
16. Вертий А.А., Дворниченко В.П., Иванченко И.В., Карушкин Н.Ф., Попенко Н.А. Экспериментальное исследование характеристик дифракционного генератора - сумматора мощности. // Изв. вуз. Радиоэлектроника. - 1990. - N 5. - С.85-86.
17. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Тарапов С.И., Шестопалов В.П., Беляев А.А., Гетьман В.А., Дзюбак А.П., Карнаухов И.М., Луханин А.А., Сорокин П.В., Споров Е.А., Толмачев И.А. Исследование спектральных характеристик аммиака, облученного при $T = 90\text{К}$. // Докл. АН СССР. - 1990. - 314. - N 6. - С.1389-1391.
18. Вертий А.А., Гаврилов С.П., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Тарапов С.И., Чумаченко С.Г. Искажение формы неоднородно уширенной линии ЭПР резонансной квазиоптической системой. // Оптика и спектроскопия. - 1991. - 70. - вып.5. - С.1049-1053.

19. Vertiy A.A., Ivanchenko I.V., Popenko N.A., Shestopalov V.P. High-frequency module and semiconductor research at low temperature. // Intern. Journ. of I&MMW. - 1991. - 12. - N 10. - P.1229-1238.
20. Вертий А.А., Иванченко И.В., Кусайкин А.П., Попенко Н.А., Пустыльник О.Д., Тарапов С.И., Шестопалов В.П. Радиофизический модуль для исследования магнитоплазменных поверхностных волн в полупроводниках при $T < 77\text{K}$. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1992. - 35. - 5. - С.458-465.
21. Алексеев Е.А., Белецкий Н.Н., Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Тарапов С.И. Дифракционный квазиоптический модуль для исследования полупроводниковых материалов. // Приборы и техн. эксперимента. - 1992. - N 5. - С.192-197.
22. Вертий А.А., Горбатько И.Н., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Пустыльник О.Д., Раренко И.М., Тарапов С.И. Исследование объемных и поверхностных кинетических свойств кристаллов $n - \text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в области температур $0.5\text{K} < T < 50\text{K}$. // Физика и техн. полупроводников. - 1992. - 26. - вып.4. - С.585-591.
23. Вертий А.А., Иванченко И.В., Орлов В.Д., Воробьева Н.П., Колос Н.Н., Попенко Н.А., Тарапов С.И., Арустамова М.Е. ЭПР спектроскопия стабильных комплексов Cr^{V} . // Журн. прикладной спектроскопии. - 1994. - 60. - N 5. - С.473-477.
24. Вертий А.А., Гудым И.Я., Иванченко И.В., Карелин Ю.В., Попенко Н.А. Радиофизический комплекс для исследования внутренних дефектов в радиопрозрачных образцах. // Приборы и техн. эксперимента. - 1995. - N 3. - С.102-106.
25. Ivanchenko I.V., Popenko N.A. The features of application of open resonator in original structures in millimeter wavelength range. / Proc. of 25-th European Microwave Conf., 1995, Bologna (Italy). - Vol.1. - P.146-150.
26. Иванченко И.В. Экспериментальное исследование электронно-волновых процессов в неавтономном квазиоптическом генераторе, работающем на эффекте Смита-Парселла. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1996. - 39. - N 4. - С.14-21.
27. Ivanchenko I.V. EPR-spectra analysis of irradiated ammonia under $h\nu > kT$ conditions. // Intern. Journ. of I&MMW. - 1996. - 17. - N 11. - P.1907-1916.
28. Иванченко И.В. Экспериментальное исследование нелинейных динамических процессов в генераторе дифракционного излучения. // Доповіді НАН України. - 1997. - N 3. - С.91-95.

29. Иванченко И.В. Особенности электродинамических свойств малоапертурных двухзеркальных ОР с неоднородностями. - // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электр. - 1996. - С.25-36.
30. А.с. N 710006 СССР, G 01 R 29/08. Устройство для измерения характеристик электромагнитного поля открытого резонатора / А.А.Вертий, И.В.Иванченко, В.П.Шестопапов. - Опубл. 15.01.80. Бюл. N 2.
31. А.с. N 1062619 СССР, G 01 R 29/08. Устройство для измерения характеристик электромагнитного поля открытого резонатора / А.А.Вертий, И.В.Иванченко, В.П.Шестопапов. - Опубл. 23.12.83. Бюл. N 47.
32. А.с. N 1294194 СССР, H 01 J 25/00. Лампа бегущей волны / А.А.Вертий, Г.С.Воробьев, И.В.Иванченко, А.В. Нестеренко, А.И.Цвык, В.П.Шестопапов. - 1986.
33. А.с. N 1300356 СССР, G 01 N 24/10. Резонансная ячейка спектрометра / А.А.Вертий, И.В.Иванченко, Н.А. Попенко, С.И.Тарапов, В.П.Шестопапов. - Опубл. 30.03.87. Бюл. N 12.
34. А.с. N 1368753 СССР, G 01 N 24/10. Резонансная ячейка спектрометра / А.А.Вертий, И.В.Иванченко, А.А.Луханин, Н.А.Попенко, С.И.Тарапов, В.И.Троценко, В.П.Шестопапов. - Опубл. 23.01.88. Бюл. N 3.
35. А.с. N 1426395 СССР, H 03 B 9/12. Генератор сверхвысоких частот / А.А.Вертий, Г.А.Звягина, И.В.Иванченко, Н.А.Попенко, В.П.Шестопапов. - 1988.
36. А.с. N 1433351 СССР, H 03 B 7/14. Генератор / А.А.Вертий, И.В.Иванченко, Н.А.Попенко. - 1988.
37. А.с. N 1733986 СССР, G 01 N 22/00. Устройство для измерения параметров полупроводников / А.А.Вертий, И.Я.Гудым, И.В.Иванченко, Н.А.Попенко, О.Д.Пустыльник, С.И.Тарапов, В.П.Шестопапов. - Опубл. 15.05.92. Бюл. N 18.
38. Гаврилов С.П., Гудым И.Я., Иванченко И.В. Исследование поля рассеяния элемента возбуждения ОР в виде диэлектрической антенны. / Препринт N 10, ИРЭ НАН Украины, Харьков, 1995. - 31с.

Літературні джерела

- Шестопапов В.П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур.-Киев: Наук. думка, 1987. - 288с.
- Шестопапов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г. Дифракция волн на решетках. -Харьков: Вища школа, 1973. - 231с.
- Ronold W.P.King, Glenn S.Smith, Margaret Owens, Tai Tsun WU. Antennas in matter. - The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, and London, England, 1981. - 408р.
- Ваврив Д.М., Третьяков О.А. Теория резонансных усилителей 0 - типа.- Киев: Наук. думка, 1989. - 152с.
- Генераторы дифракционного излучения. / Под ред. В.П.Шестопапова. - Киев: Наук. думка, 1991. - 317с.
- Емельянов Б.Н., Кошевая С.В., Гассанов Л.Г., Омеляненко М.Ю. Физические основы создания интегральных схем миллиметрового диапазона длин волн (обзор). // Изв. вуз. Радиоэлектроника. - 1982. - 25. - N 10. - С.5-14.
- Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Стрижевский В.Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках и диэлектриках. - Киев: Наукова думка, 1989. - 375с.
- Таунс Ч., Шавлов А. Радиоспектроскопия. -М.: Ин. литература, 1959. - 756с.
- Дж.Вертц, Дж.Болтон. Теория и практические применения метода ЭПР. - М.: Мир, 1975. - 548с.

Автор вдячний академіку НАН України В.П.Шестопапову за плідні дискусії, що надали розуміння багатьом питанням, розв'язаним в дисертаційній роботі, своєму першому вчителю, доктору фіз.-мат. наук О.О.Вертію, спілкування з яким завжди стимулювало пошук оригінальних рішень наукових проблем, а також колегам-співавторам Н.О.Попенко, В.М.Деркачу, С.І.Тарапову, С.П.Гаврилову, І.Я.Гудим за тривалі години спільної праці, постійні і плідні дискусії, обміркування і подання результатів досліджень.

АННОТАЦИЯ

Иванченко И.В. Малоапертурные открытые электродинамические структуры миллиметрового диапазона.

Диссертационная работа (рукопись) на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины, Харьков, 1997.

Защищается 29 научных статей, один препринт и 8 авторских свидетельств на изобретение, в которых отражены установленные закономерности электродинамических свойств малоапертурных открытых структур миллиметрового диапазона, а также изученные физические процессы в таких структурах в условиях взаимодействия резонансных полей с электронными пучками, диэлектриками, полупроводниками, парамагнетиками. Исследованы динамические процессы в новой модификации генератора дифракционного излучения с контуром обратной связи в виде малоапертурного открытого волноводного резонатора. Экспериментально обнаружено явление бистабильности в данной автоколебательной системе и определены условия возбуждения в системе хаотических колебаний, проведен анализ зависимостей фазы вынужденных колебаний в неавтономном генераторе от параметра нелинейности системы - тока электронного пучка. Установлено отличие в величинах подвижности носителей тока в приповерхностном слое узкощелевых твердых растворов теллурида кадмия в условиях металлического и активационного типов проводимости полупроводника. Установлен температурный сдвиг области перехода от примесной проводимости к собственной в сторону более высоких температур на поверхности кристаллов относительно такого перехода в объеме полупроводника. Установлено, что в облученном дейтерированном аммиаке линия ЭПР в условиях далеких от насыщения уширяется в процессе понижения температуры образца в интервале $0.3\text{K} \leq T \leq 4.2\text{K}$. Обнаружены эффекты резкого уменьшения величин анизотропии электронного фактора Ланде и параметра асимметрии формы линии вблизи температуры $T \cong 1\text{K}$.

Ключові слова: відкриті електродинамічні структури, міліметровий діапазон, електронний пучок, вузькощілинний напівпровідник, електронний парамагнітний резонанс, дейтерирований опромінений аміак

ABSTRACT

Ivanchenko I.V. Millimeter-band small-aperture open electromagnetic structures. Dissertation (a manuscript) is applied on adjudge for research degree doctor of Physical and Mathematical Sciences on speciality 01.04.03 - "Radiophysics". A.Usikov Institute of Radiophysics and Electronics National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, 1997.

The dissertation contains 29 journal papers and 1 preprint, and 8 patents involving the well-established regularities of the electromagnetic properties of millimeter-band small-aperture open structures as well as the studied physical processes in such structures under the interaction conditions of the resonance fields with the electron bunches, the dielectrics, the semiconductors, the paramagnetics. The dynamic processes in a new modification of the diffraction radiation oscillator with the reverse feed-back loop formed by a small-aperture waveguide open resonator have been investigated. The oscillations bistability phenomenon in the autooscillating system has been discovered, the chaotic oscillation conditions for such a system have been determined and the analysis of the forced oscillations phase as a function of the system nonlinearity - electron bunch current - has been carried out. The difference in the mobilities of the current carriers in the near-surface layer of the narrow-split solid solutions of telluride cadmium, under the conditions of the metal and activation conductivities, has been established. It has been found that the transition from the admixture conductivity to the self-conductivity on the crystal surface is observed for higher temperatures in relation to the semiconductor volume. The ESR-line in the irradiated deuterium ammonia is found to broaden under the conditions hardly achievable for the saturation when the sample temperature decreases over in the interval of $0.3K \leq T \leq 4.2K$. A relatively-rapid decrease in the electron Lande-factor anisotropy and the asymmetry parameter of the ESR-line shape at the temperature of nearly $T \approx 1K$ has been revealed.

Key words: open electromagnetic structures, millimeter band, electron bunch, narrow-split semiconductor, electron spin resonance, irradiated deuterium ammonia

432473

Ав 38.121

Ав 38.121

Наукове видання

ІВАНЧЕНКО Ігор Віталійович

МАЛОАПЕРТУРНІ ВІДКРИТІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ СТРУКТУРИ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Відповідальний за випуск С.О.Масалов

Підп. до друку 15. 05. 97. Формат 60x84/16

Пап.офс. Офс.печ. Ум.-печ.арк.1.5. Уч.-вид.арк.1.5.

Тираж 100 прим. Зам. 32. Без ціни.

Ротапринт ІРЕ НАН України
Харків - 85, вул. Академіка Проскури, 12