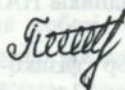


ПОПЕНКО Ніна Олексіївна

УДК 621.317.37:372.417:536.483



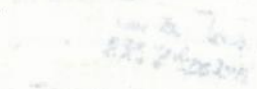
**Розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль
міліметрового діапазону в резонансних системах**

01.04.03 - радіофізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків - 1997



Дисертацією є рукопис.

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

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

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України,
професор, Литовченко Володимир Григорович, Інститут фізики напів-
провідників НАН України, м. Київ, завідувачий відділом

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України,
Назарчук Зіновій Теодорович, фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка
НАН України, м.Львів, заступник директора

доктор фізико-математичних наук, професор, Третьяков Олег
Олександрович, Харківський державний університет, м.Харків, завідувачий
кафедрою

Провідна установа:

Харківський державний технічний університет радіоелектроніки, кафедри
мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв; основ радіотехніки,
Міністерство освіти України, м. Харків

Захист відбудеться "10" квітня 1998 р. о "14" годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д64.051.02 в Харківському державному
Університеті (310077, м.Харків, м. Свободи, 4). ауд. III - 9

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці
Харківського державного університету (310077, м.Харків, м. Свободи, 4).

Автореферат розісланий "3" березня 1998 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

В.І.Чеботарьов

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00742933 (S)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Електромагнітні хвилі міліметрового (мм) діапазону мають широке використання: в радіоастрономії, радіолокації, неруйнівному контролі, медицині, радіоспектроскопії, дистанційному зондуванні. Створені унікальні експериментальні комплекси дозволили отримати нову інформацію про будову Всесвіту та фізичні процеси, що проходять у мікросвіті. Подальше поглиблення знань про структуру речовин та прогнозування їх нових властивостей засновано на вивченні поглинання електромагнітних хвиль спектральними методами. І в цьому випадку однією з головних задач є розвиток радіофізичних методик, які дозволяють отримувати з масиву експериментальних даних достовірну інформацію про фізичні властивості об'єкту, що вивчається.

Вибір напрямку досліджень, що представлені у даній роботі, був зумовлений необхідністю проведення експериментального вивчення фізичних явищ, які проявляються при опроміюванні твердого тіла, зокрема, речовин поляризованих ядерних мішеней та вузькозонних напівпровідників електромагнітними хвилями мм діапазону в області наднизьких температур ($0.3\text{K} < T < 4.2\text{K}$). Для парамагнетиків - це подальше дослідження лінійної та нелінійної спінової динаміки в умовах перевищення енергії кванта електромагнітного випромінювання над енергією теплового розупорядкування - $h\nu/kT > 1$ (де h - стала Планка, ν - частота електромагнітної хвилі, k - стала Больцмана, T - температура), де теоретично передбачено можливість спостереження таких нелінійних явищ як бістабільність електронної та ядерної поляризацій, вузьке фонове горло. Для напівпровідників - це визначення умов переходів («метал - діелектрик», «парамагнетик - спінове скло»), а також вивчення лінійних та нелінійних явищ на поверхні та в об'ємі напівпровідника з метою встановлення механізмів переносу заряду у поверхневому шарі.

Ефективність вирішення задачі створення спектрометричних комплексів для вимірювання фізичних параметрів парамагнетиків (методами магнітного резонансу) та напівпровідників (методом порушеного повного внутрішнього відбиття) визначається правильним вибором резонансної комірки - головного елемента вимірювальної системи. В мм діапазоні хвиль для великої кількості експериментів є характерним використання відкритого резонатора (ВР) - резонансної структури, що забезпечує високу чутливість та розділювальну здатність вимірювань та дозволяє при визначених умовах розмістити в його об'ємі об'єкти дослідження без істотного порушення резонансних



властивостей. В свою чергу ВР є унікальним електродинамічним об'єктом дослідження, оскільки формування його резонансних коливань здійснюється у результаті дифракції електромагнітних хвиль на дзеркалах ВР, а також на розташованих в його об'ємі функціональних елементах, наприклад, сповільнювальній структурі, напівпровідниковому діоді, кюветі з речовиною та інше. І в кожному конкретному випадку необхідно вирішувати задачу створення вимірювальної резонансної комірки з наперед заданими характеристиками. При цьому складність електродинамічної структури зумовлює труднощі, які виникають при побудові математичних теорій, що описують коливання у відкритих резонансних системах, та, відповідно, призводить до зсуву акцентів в область експериментальних досліджень. В зв'язку з цим необхідною є розробка методик вимірювання та постановка експериментів з вивчення розсіяння електромагнітних хвиль в ВР з вищезгаданими елементами.

Таким чином, незважаючи на велику інформаційну цінність даних про властивості речовин в умовах $h\nu/kT > 1$, експерименти у цьому діапазоні частот та температур потребують проведення широкого спектру додаткових досліджень та створення потужної експериментальної бази, відсутність яких і зумовлює недостатній розвиток цього напрямку фізики.

Дисертаційна робота є частиною досліджень в області мм хвиль, що проводяться в ІРЕ НАН України у науковій школі академіка НАН України В.П. Шестопалова «Теорія дифракції та дифракційна електроніка».

Мета та задачі дисертаційної роботи.

Метою дисертаційної роботи є експериментальний пошук ефектів, що виникають при поглинанні електромагнітних хвиль мм діапазону в ВР з нелінійним середовищем в умовах $h\nu/kT > 1$, та створення електродинамічних систем, що забезпечують проведення даних експериментів, на основі встановлення закономірностей поведінки характеристик розсіяння хвильових пучків у ВР.

В дисертації вирішувались такі основні наукові задачі:

1. Розвиток експериментальних методик вивчення розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль мм діапазону у відкритих резонансних системах та створення систем, що забезпечують вимірювання характеристик речовин поляризованих ядерних мішеней та вузькозонних напівпровідників при наднизьких температурах.

2. Встановлення закономірностей формування полів дифракції хвильових пучків у складних відкритих резонансних системах, які є основними елементами вимірювальних комплексів та пристроїв.

3. Вивчення лінійних та нелінійних властивостей тридзеркальних ВР, утворених двома металевими та одним діелектричним дзеркалом - гранню повного внутрішнього відбиття (ПВВ) діелектричного напівсегмента, який розташований поміж дзеркалами ВР, та використання даного ВР при дослідженні поверхневих явищ у вузькозонних напівпровідниках.

4. Дослідження динаміки спінової взаємодії в режимі динамічної поляризації ядер при виконанні умов низькотемпературного наближення - $h\nu/kT > 1$ в речовинах поляризованих ядерних мішеней.

Наукова новизна.

В роботі представлено результати експериментальних досліджень, що об'єднані загальним методологічним підходом, який визначається використанням відкритих резонансних систем для дослідження взаємодії електромагнітних хвиль мм діапазону з твердим тілом в умовах $h\nu/kT > 1$.

Визначені загальні закономірності формування розсіяних полів при дифракції хвильових пучків у складних резонансних системах. Одержані результати дозволили запропонувати ряд фізичних моделей, що описують поведінку даного класу об'єктів, та виробити комплекс рекомендацій для практичних використань ВР.

Вивчені характеристики тридзеркальних ВР мм діапазону, утворених двома металевими дзеркалами та одним діелектричним дзеркалом: гранню ПВВ діелектричного напівсегмента, розташованого поміж дзеркалами. Визначені умови існування мультистабільних станів для тридзеркального ВР з нелінійною межею, що утворюється діелектричним дзеркалом та розташованим поблизу нього напівпровідником при збудженні на його поверхні магнітоплазмової хвилі.

Показано, що для вузькозонних напівпровідників p -типу $Cd_xHg_{1-x}Te$ температурні залежності поверхневої концентрації основних носіїв струму, на відміну від аналогічних залежностей для об'ємної концентрації, мають мінімум у температурній області переходу від домішкової провідності до власної. Положення цього мінімуму залежить від ступеня легування напівпровідника. Для напівмагнітних напівпровідників p -типу $Mn_xHg_{1-x}Te$ визначений вплив технологічних умов вирощування на температуру переходу в фазу спінового скла.

При експериментальних дослідженнях речовин поляризованих ядерних мішеней методами електронного парамагнітного резонансу (ЕПР), ядерного магнітного резонансу (ЯМР) в умовах динамічної поляризації ядер були вперше зареєстровані такі нелінійні явища як бистабільність ядерної поляризації та низькотемпературний «стрибок» лінії ЕПР. Встановлено, що

для речовин поляризованих ядерних мішеней з парамагнітним комплексом Cr^{V} при вимкненні СВЧ потужності насичення часова залежність величини ядерної поляризації описується «повільною» та «швидкою» експонентами.

Апробація роботи.

Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на Всесоюзній науково-технічній конференції «Проектирование радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах» (Тбілісі, 1988), International Conference of MM and Far-Infrared Technology (China, 1989), 111 Робоча нарада зі спінових явищ у фізиці високих енергій «Спин 1989», (Протвіно, 1990), 111 Всесоюзна конференція «Матеріалознавство халькогенідних напівпровідників» (Чернівці, 1991), IV семінар зі спінових явищ у фізиці високих енергій (Протвіно, 1991), 16-th International Conference of Infrared and MM Waves, (Switzerland, 1991), 18-th International Conference of Infrared and MM Waves, (UK, 1993), 20-th International Conference of Infrared and MM Waves, (USA, 1995), 25-th European Microwave Conference (Italy, 1995), 40-th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (Philadelphia, 1995).

Особистий внесок дисертанта.

Основні результати та висновки дисертаційної роботи надруковані в наукових працях, список яких розташований у кінці автореферату [1 - 47]. Узагальнені в дисертації матеріали наукової роботи виконані в галузі експериментальної квазіоптики і є підсумком досліджень, що проведені автором самостійно та сумісно з колегами на протязі 1981 - 1997 років. Особистий внесок автора у сумісних роботах полягає в наступному.

У циклі робіт [1 - 5] з дослідження дифракції хвильових пучків автором розвинена методика вимірювання розсіяних полів у вільному просторі, проведені виміри, аналіз отриманих результатів та сформульовані висновки. В [6 - 8] автором виконані експериментальні дослідження дифракційних полів, спектрів коливань дифракційно - пов'язаних ВР, виявлені області параметрів, при яких забезпечується максимальний дифракційний зв'язок ВР, вивчені питання синхронізації коливань напівпровідникового генератора, який навантажений на пасивну резонансну систему. При безпосередній участі автора проведені експерименти з вивчення характеристик генератора - підсумовувача. Автором була поставлена та розв'язана задача визначення характеристик тридзеркальних ВР (ВР з діелектричним заповненням, ВР із зразком, розташованим поблизу грані ПВВ), проведені експериментальні дослідження характеристик тридзеркального ВР [9 - 12]. В результаті аналізу

отриманих даних були видані рекомендації відносно вибору параметрів ВР при вимірюванні діелектричної проникливості зразків з великими втратами та розроблена експериментальна методика. Запропоновані засоби збереження високих електродинамічних властивостей ВР (дводзеркального та тридзеркального) при їх застосуванні у спектрометрі ЕПР, що призначається для вивчення напівмагнітних напівпровідників [13 - 14]. У процесі створення низькотемпературної комірки для дослідження напівпровідників [15 - 17] автором проведені експерименти з вивчення вимірювальної комірки з призмою ПВВ; розрахований коефіцієнт відбиття плоскої електромагнітної хвилі від напівпровідника при збудженні на його поверхні магнітоплазмової хвилі; визначені оптимальні параметри вимірювальної комірки в залежності від високочастотної діелектричної постійної напівпровідника та його коефіцієнта зв'язку з вимірювальною коміркою. При участі автора виконано програму обробки експериментальних результатів та всі низькотемпературні експерименти з дослідження характеристик серії вузькозонних напівпровідників типу $Cd_xHg_{1-x}Te$ та $Mn_xHg_{1-x}Te$ [18 - 19]. Автором був виконаний аналіз результатів вимірювання поверхневої концентрації основних носіїв струму для $Cd_xHg_{1-x}Te$ та запропонована модель, що пояснює температурні зміни поверхневої концентрації на основі аналізу температурних залежностей поверхневого потенціалу та об'ємної концентрації основних носіїв струму. Автор безпосередньо приймала участь у створенні радіофізичного комплексу «БУРАН» [20 - 23] та двочастотного спектрометру, в експериментах з вимірювання спектрів ЕПР речовин поляризованих ядерних мішеней [24, 25]. Автором проведений порівняльний аналіз серії речовин поляризованих ядерних мішеней з парамагнітним комплексом Cr^V [24]. Автору належить фізична модель, що пояснює низькотемпературний «стрибок» лінії ЕПР на основі уявлень про утворення двох сталих динамічних станів системи електронних спінів [26 - 27]. Автором сформульована постановка експериментів з дослідження речовин поляризованих ядерних мішеней в умовах динамічної поляризації ядер та проведений аналіз отриманих результатів [26, 28 - 30].

Основні ідеї, наукові висновки та положення, що виносяться на захист, належать особисто автору.

Достовірність результатів дисертаційної роботи забезпечуються коректністю та досконалістю експериментальних методик, що використовуються, розрахунком похибок вимірів усіх величин, порівнянням одержаних експериментальних результатів з відомими теоретичними даними, коректними постановкою та методами розв'язання теоретичних задач.

Структура та об'єм дисертації.

Дисертація складається з вступної частини, п'яти глав, основних результатів та висновків. Об'єм роботи вміщує 253 сторінки машинописного тексту, 125 рисунків, 4 таблиці. Перелік цитованої літератури складається з 177 найменувань.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **Вступній частині** обґрунтовано актуальність постановки та проведення дисертаційної роботи. На основі аналізу результатів, одержаних на початок виконання даної роботи, формулюється її мета. Виділено нові результати, одержані в дисертації, та намічені напрямки подальшого розвитку. Визначено авторський внесок у сумісних роботах.

У **Першому розділі** «Постановка задачі. Вибір експериментальних методик дослідження» в результаті детального аналізу літературних даних обґрунтована постановка експериментальних досліджень.

В дисертації вивчені явища, що пов'язані з експериментальним дослідженням взаємодії електромагнітних хвиль мм діапазону з твердим тілом в умовах $h\nu/kT > 1$. У цьому випадку теоретичне описання динаміки спінової системи твердого тіла під впливом змінного НВЧ поля засноване на виділенні з гамільтоніана диполь - дипольної взаємодії частини, відповідальної за встановлення рівноваги всередині системи. Величина власної частоти коливань системи електронних спінів при насиченні одного з електронних переходів НВЧ полем визначається нелінійним рівнянням, коефіцієнти якого залежать від властивостей твердого тіла та електромагнітного випромінювання. В таких умовах можлива поява більш ніж одного розв'язку рівняння, що означає можливість спостереження електронної бістабільності. Експериментальна перевірка висунутої теоретичної моделі для парамагнетиків із спіном $s = 1/2$ може бути проведена в умовах $h\nu/kT > 1$: при температурах $T \cong 1\text{К}$ та частотах $\nu \cong 70\text{ГГц}$. Постановка даних експериментів потребує розробки методик та вимірювальних систем, які забезпечують отримання методами ЕПР та динамічної поляризації ядер достовірної інформації про фізичні параметри парамагнетиків при опромінюванні їх електромагнітними хвилями мм діапазону при наднизьких температурах. При цьому однією з головних задач є створення електродинамічної системи спектрометра, яка буде забезпечувати високу чутливість та роздільовальну здатність.

Дослідження взаємодії електромагнітних хвиль з магнітоактивною напівпровідниковою плазмою дозволяє отримати якісно нову інформацію про її характеристики. Енергетичні, дисперсійні та поляризаційні властивості

магнітоплазмових хвиль залежать від величини та орієнтації постійного магнітного поля відносно межі розподілу. При взаємно перпендикулярній орієнтації вектора постійного магнітного поля - H_0 та хвильового вектора електромагнітної хвилі - k (геометрія Фойгта) збуджуються тільки хвилі ТМ типу, що істотно спрощує інтерпретацію отриманих результатів. Вплив постійного магнітного поля на електронну напівпровідникову плазму визначається співвідношенням циклотронної та плазмової частот (ν_H / ν_p), яке у короткохвильовій області мм діапазону ($\lambda \cong 2\text{мм}$) для чистих вузькозонних напівпровідників $\nu_H / \nu_p < 1$, що свідчить про ефективність використання даного методу вивчення поверхневих властивостей напівпровідників.

Цілком природно, що вивчення властивостей твердих тіл завершується дослідженням нелінійних взаємодій. І тут нелінійні поверхневі поляритони дають нові можливості як для вивчення поверхні, так і для реалізації пристроїв, що використовують оптичну бістабільність: перемикачів, дискримінаторів тощо.

Одним із ефективних засобів експериментального дослідження спектрів поверхневих поляритонів є метод порушеного повного внутрішнього відбиття. При рівних значеннях частот поверхневої хвилі та затухаючої електромагнітної хвилі взаємодія між ними проходить в зазорі між гранню ПВВ та зразком. В експерименті спектр поверхневих поляритонів спостерігається за зміною коефіцієнта відбиття електромагнітної хвилі при її падінні на тришарову структуру: діелектрик - зазор - зразок. Тому у даному випадку використання традиційних ^{сод}дзеркальних ВР для створення контуру зворотного зв'язку при побудові пристроїв, які використовують нелінійні поверхневі поляритони, стає проблематичним. І подальший ефективний розвиток підходу, що був використаний в оптиці при вивченні бістабільності у ВР з нелінійним елементом в об'ємі, для вирішення задачі про нелінійні властивості резонансної системи з нелінійною межею (нелінійним поверхневим поляритоном) - можливий при використанні ВР нового типу - тридзеркального ВР з діелектричним дзеркалом - гранню ПВВ, розташованої поміж двома металевими дзеркалами діелектричної призми або напівсегмента. Поява такого ВР суттєво розширює клас явищ, що можуть бути досліджені резонансними методами, а також створює передумови для розробки генераторів та підсилювачів з розподіленою взаємодією, які використовують нелінійні властивості поверхневих хвиль.

Тут необхідно відмітити, що фундаментальною властивістю відкритої резонансної системи, яка використовується в мм діапазоні довжин хвиль як вимірювальна комірка спектрометрів магнітного резонансу та порушеного повного внутрішнього відбиття, є зв'язок коливань з вільним простором. Тому

використання ВР в спектрометрах та інших приладах мм діапазону визначило постановку задачі з вивчення розсіяння хвильових пучків у ВР. Складність представлених електродинамічних структур: резонансні системи з розташованими в об'ємі різними функціональними елементами (кюветою з речовиною, напівпровідником, діелектриком) обумовила необхідність проведення модельних експериментів з дифракції хвильових пучків у ВР та на тілах простих геометричних форм - напівплощині, клині, диску.

Таким чином, вирішення задачі експериментального вивчення поглинання електромагнітних хвиль мм діапазону у твердому тілі нерозривно пов'язана з дослідженням властивостей відкритих електродинамічних структур. Створення резонансних систем, що використовуються в подальших експериментах, починається з вивчення розсіяння хвильових пучків у ВР з розташованими в об'ємі функціональними елементами та визначення засобів формування високодобротних коливань.

У Другому розділі «Дослідження розсіяння хвильових пучків в мм діапазоні» розвинуті експериментальні методики вимірювання дифракційних полів, що виникають при розсіянні електромагнітних хвиль мм діапазону на перепонах простих геометричних форм та у ВР із локальними включеннями, та визначені закономірності формування дифракційних полів у структурах, що вивчаються [1 - 8, 31, 36].

Вимірювання характеристик розсіяного поля у ближній зоні виконані на радіофізичному комплексі, що дозволяє отримувати інформацію про величину амплітуди та фази у кожній точці заданої площини у вигляді файлів даних. В результаті аналізу амплітудних та фазових розподілів електромагнітного поля у ближній зоні, діаграм направленості та коефіцієнта пропускання σ , в залежності від характерного розміру об'єкту, а саме: для отвору $4.1 < ka < 9.9$ (a - радіус отвору, $k = 2\pi/\lambda$), для напівплощини $0 < kd < 2.0$ (d - радіус заокруглення краю напівплощини) та для щілини $0.16 < kd < 6.8$ (d - ширина щілини) визначено особливості та закономірності в формуванні розсіяного поля. Розподіл полів у тінювій області визначається суперпозицією об'ємних та поверхневих хвиль, що дифрагували на перелоні, і при зміні характерного параметра (кута розхилу клина; радіуса заокруглення напівплощини, діаметра отвору, ширини кільцевої щілини) спостерігається зміна їх відносного внеску у розсіяне поле. Встановлено, що максимальна інтенсивність дифракційного поля у тінювій області має місце при визначених параметрах об'єктів. Так, наприклад, для кільцевої щілини - $kd = 3.2$; для напівплощини - $kr = 1.4$.

У зв'язку з наступним вивченням розсіяння в ВР першочергове значення має виділення впливу краю отвору на характеристики розсіяного поля та встановлення співвідношення між реальною ситуацією та теоретичним

розглядом краю отвору як джерела «крайових хвиль». У модельних експериментах було визначено, що починаючи із значення параметра отвору $ka = 4.5$ джерелом випромінювання стає край отвору. Тому при подальших розрахунках дифракції хвильового пучка на дзеркалах ВР при $ka > 4.5$ використання наближення «крайових хвиль» є правомірним.

Представлені результати використовуються при аналізі властивостей більш складного об'єкту - ВР, утвореного двома металевими дзеркалами з розміщеною в об'ємі локальною неоднорідністю. Теоретичні розрахунки поля дифракції хвильового пучка на дзеркалах ВР (для дальньої зони) та експериментальні дослідження розподілу дифракційного поля у просторі навколо ВР при різному співвідношенні радіусів хвильового пучка та дзеркала дозволили встановити наступне: 1) у дальній зоні випромінювання сконцентроване за дзеркалами ВР у головному напрямку вздовж вісі ВР; 2) для основної компоненти електромагнітного поля джерелом випромінювання є центральна край дзеркала (рис.1а); 3) для крос-компоненти електромагнітного поля джерела випромінювання розташовані під кутом 45° відносно джерела максимального випромінювання для основної компоненти (рис.1б). Теоретичні та експериментальні дані знаходяться у гарному узгодженні.

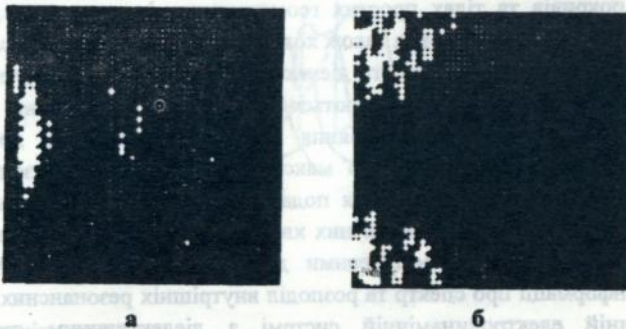


Рис.1 Амплітудний розподіл електромагнітного поля у ближній зоні:
а - основна компонента; б - крос-компонента.

Розташування в об'ємі ВР локальної неоднорідності призводить до зміни структури внутрішніх та зовнішніх резонансних полів. В залежності від типу неоднорідності в спектрі ВР спостерігаються різні модифікації коливаний напівсиметричного резонатору і, згідно з цим, змінюється структура зовнішнього резонансного поля. Так, наприклад, для ВР з діелектричною неоднорідністю у розподілі дифракційного поля у дальній зоні збільшується

рівень випромінювання поза віссю, а у ближньому полі джерело випромінювання зсувається з краю дзеркала у напрямку розташування неоднорідності.

Результати дослідження дифракційних полів ВР та дифракції хвильового пучка на клині були використані при створенні оригінальних генераторів - підсумовувачів, а саме: оптимальним чином було сформовано периферію дзеркала ВР з метою забезпечення максимального коефіцієнта зв'язку одиночних генераторних комірок. Останні були ВР (дводзеркальними чи тридзеркальними: третє дзеркало діелектричне), навантаженими на хвилеводну камеру з ЛПД. В обох конструкціях вивід енергії відбувався через діелектричний хвилевід, а зв'язок між резонаторами - за дифракційним полем. Визначено умови синхронізації коливань в представлених генераторах - підсумовувачах та здійснено підсумовування потужності п'яти генераторів ЛПД.

У результаті дослідження просторової структури поля, розсіяного на елементах та фрагментах рослинного покриву, складено каталог амплітудно - фазових портретів таких об'єктів: стрічка, циліндр, листя сходів, колосся злакових культур та інше. Спільний аналіз амплітудних, фазових та поляризаційних характеристик поля, розсіяного на окремих елементах рослинних покривів та тілах простих геометричних форм, показав, що до довжини хвилі $\lambda = 2\text{мм}$ листок, а також колос злакових можна апроксимувати класичними об'єктами: стрічкою та діелектричним циліндром, діелектрична проникливість яких та розмір визначаються згідно з вологістю рослин.

Таким чином, вивчення розсіяння в дводзеркальних ВР дозволило визначити умови мінімального (або максимального) зв'язку резонансного коливання з вільним простором. Для поданих у роботі тридзеркальних ВР результати з розсіяння електромагнітних хвиль можуть бути використані при аналізі зовнішніх полів за металевими дзеркалами резонатора. Але для отримання інформації про спектр та розподіл внутрішніх резонансних полів у такій складній електродинамічній системі з діелектричним дзеркалом необхідне проведення спеціальних досліджень.

У Третьюму розділі «Теоретичне та експериментальне дослідження характеристик тридзеркального ВР» вивчені характеристики тридзеркальних ВР, утворених двома металевими дзеркалами та одним діелектричним дзеркалом - гранню ПВВ призми, що розташована між дзеркалами [9-14, 32 - 33, 41].

Розглянуті такі модифікації: ВР з діелектричним заповненням; ВР з плоскими металевими дзеркалами, діелектричною призмою та зразком, що знаходиться біля грані ПВВ; ВР з діелектричними напівсегментом та

напівплощиною біля грані ПБВ; ВР із сферичними металевими дзеркалами та напівпровідниковим зразком біля грані ПБВ призми. Розрахунки характеристик ВР виконані у наближенні параксіальних хвильових пучків та плоских хвиль. Оскільки розрахунки проводяться наближеними методами та в них не враховується обмеженість апертур дзеркал та зразка, то виникла потреба у проведенні експериментальних досліджень.

У результаті розрахунків амплітудних розподілів полів в тридзеркальному ВР з діелектричним напівсегментом встановлено, що у площині, перпендикулярній вісі резонатора, для s- та p-поляризацій амплітудний розподіл найнижчого типу коливань описується функцією Гауса, максимум якої зсунений відносно центра дзеркал. Розраховані залежності величини цього зсуву від радіусу хвильового пучка та діелектричної проникливості напівсегмента. При зміні кута падіння хвильового пучка на діелектричне дзеркало - грань ПБВ у тридзеркальних ВР спостерігається трансформація амплітудного розподілу резонансного поля (рис.2), що обумовлена просторовою фільтрацією хвиль кутового спектру. Отримані результати співпадають з вимірними значеннями у межах похибки експерименту.

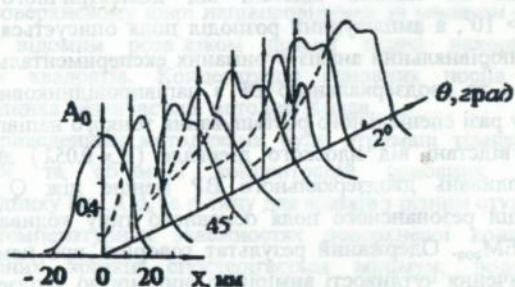


Рис.2 Амплітудний розподіл поля резонансного коливання при різних кутах між дзеркалами ВР (експеримент).

Оскільки особливістю розглянутого ВР є наявність регульованого зв'язку із зразком, то з допомогою такого ВР успішно вирішуються задачі вимірювання діелектричної проникливості зразків з великими втратами ($\text{tg } \delta > 10^{-3}$) та спектральних характеристик напівмагнітних напівпровідників методом ЕПР. У цьому разі при розрахунках характеристик ВР із зразком до параметрів резонатора (кута між дзеркалами, діелектричної проникливості напівсегмента), що визначають зміну умов просторової фільтрації хвиль

кутового спектру, та, відповідно, властивостей ВР, додаються параметри зразка (його діелектрична проникливість та відстань між гранню ПВВ та зразком). Отримані теоретичні та експериментальні результати для тридзеркального ВР із зразком були використані при створенні таких пристроїв як резонансна комірка спектрометра ЕПР та діелектрометр. Розвинута експериментальна методика визначення діелектричної проникливості та показана правомірність її використання на прикладі діелектриків з відомою діелектричною проникливістю (фторопласт, гетинакс, кварц) та її ефективність при дослідженні вузькозонних напівпровідників. Похибки вимірів діелектричних постійних зразка дорівнюють: $\Delta \xi = 0.3\%$; $\Delta tg \delta = 1\%$.

Для дослідження напівмагнітних напівпровідників як зразків з великими значеннями комплексної діелектричної проникливості створена резонансна комірка спектрометра ЕПР у вигляді тридзеркального ВР та вивчені її електродинамічні характеристики. Визначений кут між дзеркалами, при якому виключаються викривлення лінії ЕПР, що обумовлені резонансним парамагнітним обертанням площини поляризації. Показано, що при розташуванні зразка на заданій відстані від діелектричного дзеркала добротність ВР $Q > 10^3$, а амплітудний розподіл поля описується функцією Гауса. Проведений порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних для тридзеркального та дводзеркального ВР з напівпровідниковим зразком показав, що навіть у разі спеціального розташування тонкого напівпровідника ($\delta \ll \lambda$) на малій відстані від плоского дзеркала ($\Delta = 0.05\lambda$) добротність основного типу коливань дводзеркального ВР менше ніж $Q = 10^3$, а амплітудний розподіл резонансного поля основного типу коливань значно відрізняється від TEM_{00q} . Одержаний результат говорить про неможливість отримати високі значення чутливості вимірів за допомогою дводзеркального ВР, тому використання тридзеркального ВР є у даному випадку безальтернативним.

Таким чином, виконані у попередніх двох розділах дослідження відкритих резонансних систем дозволили створити електродинамічні структури для проведення досліджень парамагнетиків та вузькозонних напівпровідників при наднизьких температурах.

У Четвертому розділі «Дослідження характеристик потрібних напівпровідникових сполук при наднизьких температурах» подані результати дослідження напівпровідникових сполук типу $Hg_{1-x}Cd_xTe$ та $Mn_xHg_{1-x}Te$ [15 - 19, 34 - 35, 42].

Вимірювання були проведені за допомогою спеціального блока апаратури та радіофізичного модуля, призначеного для вимірювання

поверхневих та об'ємних кінетичних коефіцієнтів при температурах $0.3\text{K} < T < 77\text{K}$. Суть розвинутої експериментальної методики визначення поверхневих концентрації та рухливості основних носіїв струму полягає в наступному. У результаті розв'язання задачі дифракції плоскої електромагнітної хвилі на системі трьох діелектричних шарів, останній з яких є напівпровідник, визначається коефіцієнт відбиття, що є функцією таких характеристик напівпровідника як концентрація та рухливість основних носіїв струму, їх ефективної маси, а між діелектричними сталими діелектрика - ξ_1 та щільності між першим середовищем та напівпровідником - ξ_2 виконуються такі співвідношення: $\xi_1 > \xi_2$. У даному методі важливим параметром, від якого з одного боку залежить чутливість, а з другого - похибка методу, є величина щільності. При її малих значеннях спотворюється інформація про характеристики поверхневої хвилі, а при великих - падає чутливість вимірів. Достовірна інформація про спектр поверхневого поляритона забезпечується при контрасті вимірювання коефіцієнта відбиття 10% - 20%. В експерименті при дискретній зміні магнітного поля на виході радіофізичного модуля реєструється значення коефіцієнта передачі, величина якого обернено пропорційна до амплітуди магнітоплазмової хвилі, що збуджується на поверхні напівпровідника. Для розрахунку концентрації та рухомості носіїв струму в поверхневому шарі напівпровідника за масивом експериментальних даних та відомим розв'язком прямої задачі використовується метод найменших квадратів. Концентрація основних носіїв струму в об'ємі напівпровідника визначається методом Холла.

За приведеними методиками були отримані температурні залежності поверхневої та об'ємної концентрацій основних носіїв струму у напівпровіднику $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ n-типу для зразків з різним ступенем легування.

На температурних залежностях поверхневої концентрації для всіх досліджуваних зразків спостерігається мінімум, положення якого на температурній вісі визначається ступенем легування зразка (рис.3). Для пояснення одержаного результату побудована наступна фізична модель. Відомо, що поверхнева концентрація основних носіїв струму n_s пов'язана з об'ємною n_x , поверхневим потенціалом ϕ_s , та температурою T таким співвідношенням

$$n_s = n_x \exp(e\phi_s / kT) \quad (1)$$

Як витікає з результатів цього експерименту, на поверхні напівпровідника утворюється збагачений шар та позитивний поверхневий потенціал ϕ_s . За формулою (1) та експериментальними даними про

поверхневу та об'ємну концентрації основних носіїв струму було розраховано температурну залежність поверхневого потенціалу. До температур $T < 4.2\text{K}$ останній мало залежить від температури. При подальшому рості температури зміна величини поверхневого потенціалу стає істотною та в інтервалі температур $10\text{K} < T < 40\text{K}$ спостерігається його збільшення в 3 - 12 разів у залежності від ступеню легування напівпровідника. Оскільки до $T < 15\text{K}$ об'ємна концентрація є практично постійною, то на цьому інтервалі температур зменшення поверхневої концентрації визначається поведінкою поверхневого потенціалу. Починаючи з температур $T \cong 15\text{K}$, для зразка з найменшим ступенем легування відбувається перехід від домішкової провідності до власної і при цьому об'ємна концентрація основних носіїв струму значно збільшується. Відповідно до (1) починає збільшуватись і поверхнева концентрація. При збільшенні ступеню легування зразка перехід до власної провідності відбувається при значно вищих температурах, тому на приведених залежностях мінімум поверхневої концентрації зсувається в область більших температур (рис.3).

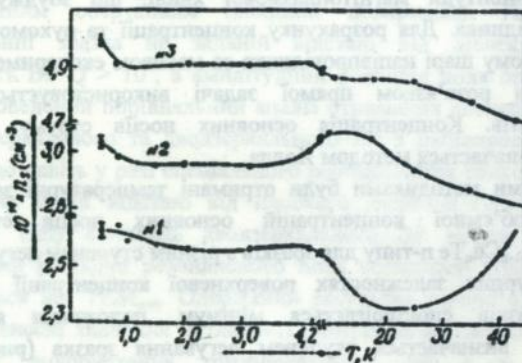


Рис.3 Температурна залежність поверхневої концентрації для зразків напівпровідника $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ з різним ступенем легування.

В області температур $T < 1\text{K}$ спостерігається характерна для даних напівпровідників аномальна зміна величини коефіцієнта Холла, що обумовлена переходом «метал - діелектрик», природа якого пов'язана з локалізацією електронів у ямах флуктуаційного потенціалу.

У даних експериментах при збільшенні амплітуди предметного пучка був зареєстрований ефект самовпливу поверхневої хвилі, який проявлявся у збільшенні амплітуди поверхневої хвилі та зсуві області її збудження в

сторону менших магнітних полів. Зсув мінімуму коефіцієнта відбиття у даному випадку може бути пов'язаний із зміною функції розподілу електронів в області простору, де їх енергія є меншою за енергію повздовжнього оптичного фонона. При цьому розширення кривої, що описує залежність коефіцієнта відбиття від магнітного поля, пов'язане зі збільшенням інтенсивності розсіяння на оптичних фононах. Ці результати стимулювали теоретичне дослідження нелінійних ефектів у тридзеркальному резонаторі, утвореному металевими дзеркалами та розташованою між ними діелектричною призмою з нелінійною межею, що являє собою грань ПІВВ призми з розташованим поблизу неї напівпровідниковим зразком, на поверхні якого збуджено магнітоплазмову хвилю. Задача поставлена у наближенні середнього поля. Для плоских хвиль, що розповсюджуються між дзеркалами ВР, сформульовані граничні умови на дзеркалах та одержано рівняння, яке пов'язує інтенсивності предметного пучка на вході ВР з резонансним полем у середині.

В результаті пошуку розв'язків отриманого рівняння для представленого ВР при збудженні на поверхні напівпровідника $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ магнітоплазмової хвилі були визначені області існування нелінійних режимів. Керуючими параметрами задачі є амплітуда предметної хвилі, величина асинхронізму, коефіцієнт зв'язку ВР з напівпровідником: його зменшення призводить до одночасного збільшення добротності резонатора та зменшення амплітуди поверхневої хвилі. Встановлено, що при зміні добротності ВР шляхом збільшення коефіцієнта зв'язку, а саме при зменшенні відстані між діелектричним дзеркалом та напівпровідником, у системі спостерігається перехід у мультистабільний стан. При даних умовах ВР може бути використаний як транзистор, частотний дискримінатор, перемикач.

В результаті аналізу температурної залежності коефіцієнта Холла для напівмагнітних напівпровідників р-типу $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, вирощених у різних технологічних умовах, було показано, що найкращі електричні характеристики мають зразки, які були вирізані з центральної області злитку. Для зразків, що знаходилися ближче до краю злитку, спостерігається немонотонна зміна коефіцієнта Холла при збільшенні температури. У результаті аналізу отриманих залежностей були визначені температури фазового переходу у стан спінового скла для даних зразків.

У П'ятому розділі «Спектроскопія речовин поляризованих ядерних мішеней» представлено результати експериментального дослідження речовин поляризованих ядерних мішеней методами ЕПР, ЯМР та динамічної поляризації ядер в умовах $h\nu/kT > 1$, що отримані на двочастотному

спектрометрі (частота ЕПР $\nu_s \approx 126$ ГГц, частота ЯМР $\nu_J \approx 190$ МГц) та спектрометрі ЕПР $\nu_s \approx 75$ ГГц, $0.3\text{К} < T < 4.2\text{К}$) [20 - 30, 43 -47].

Розвинуті у другому розділі методики вимірювання характеристик резонансних полів були використані при створенні резонансних комірок наднизькотемпературного спектрометра ЕПР та двочастотного спектрометра. В ході дослідження різних модифікацій відкритих електродинамічних структур були вирішені такі задачі: зменшення рівня випромінювання з ВР, узгодження полів, розсіяних кюветою з речовиною, та поля ВР; виключення впливу резонансного парамагнітного обертання площини поляризації на форму лінії ЕПР; узгодження височастотного резонансного контуру двочастотного спектрометра - ВР з розміщеною у його об'ємі котушкою індуктивності резонансного контура спектрометра ЯМР. Результатом проведених досліджень було створення серії резонансних комірок, які забезпечують високу чутливість вимірювань та отримання достовірної інформації про спектральні характеристики речовин.

Вивчення динаміки електронно-ядерних взаємодій при насиченні електронного переходу у речовині $\text{HMBA}(\text{Cr}^{\text{V}})\text{Na}^+$ проводилося на двочастотному спектрометрі. У відповідності з механізмом «динамічного охолодження», що притаманний даній речовині, збільшення ядерної поляризації досягалось при насиченні одного з дозволених електронних переходів поблизу центра лінії ЕПР. Підсилення ядерної поляризації визначалось за відношенням сигналів ЯМР в умовах динамічної поляризації ядер та теплової рівноваги з ґраткою. При досягненні максимальної поляризації дія СВЧ поля припинялася та процес ядерної релаксації спостерігався за зменшенням сигналу ЯМР. У даних умовах експерименту процес ядерної релаксації описується у вигляді суми двох експонент

$$p(t) = p_s + p_6 \exp(-t/\tau_6) + p_M \exp(-t/\tau_M), \quad (2)$$

де p_s , p_6 , p_M - початкова поляризація та відносні амплітуди; τ_6 , τ_M - характерні часи «швидкої» та «повільної» експонент відповідно. Тут τ_6 - відповідає за встановлення рівноваги між зееманівською підсистемою та диполь - дипольним резервуаром, а τ_M - за встановлення рівноваги між диполь - дипольним резервуаром та ґраткою.

В даних експериментах вперше було зареєстровано типово нелінійний ефект - бістабільність ядерної поляризації. Як відомо, для систем з динамічним зсувом частоти при насиченні лінії ЯМР у поперечному радіочастотному полі можливе існування двох стаціонарних станів ядерної намагніченості. В розглянутій ситуації для речовин поляризованих ядерних

мішеної бистабільності проявляється в умовах динамічної поляризації ядер: пониження температури зеєманівської підсистеми (збільшення ядерної поляризації) проходить за рахунок електронно - ядерних взаємодій при насиченні лінії ЕПР.

Одним з підходів до термодинамічного описання спінової системи при низьких температурах є виділення з підсистеми диполь - дипольного резервуара частини, що відповідає за встановлення рівноваги в системі. При цьому із пониженням температури розмагнічує поле, що виникає в результаті диполь - дипольних взаємодій, призводить до зміни енергії спіна та до появи зсуву резонансної частоти. Цей ефект може бути експериментально зареєстрований за зміною положення лінії ЕПР при зменшенні температури в область $T \cong 1\text{К}$. Насичення електронного переходу суттєво ускладнює процеси в електронній спіновій системі речовини і в цій ситуації величина основної власної частоти χ коливань системи електронних спінів визначається рівнянням типу

$$\alpha x / \alpha + Ax + Bx^3 + C = 0, \quad (3)$$

де величини A , B , C - визначаються властивостями речовини (величиною внутрішніх взаємодій та характером їх температурної залежності) та зовнішніми умовами (частотою та інтенсивністю СВЧ поля, температурою). При відповідному співвідношенні між коефіцієнтами A , B , C рівняння (3) має більш ніж один розв'язок, що обумовлює появу декількох стабільних станів системи. Тоді при насиченні електронного переходу буде спостерігатися «стрибок» лінії ЕПР. Роль параметра системи, який призводить до появи нелінійності у рівнянні (3), відіграє час спин - граткової релаксації t_1 , що збільшується при зниженні температури.

В експериментах з вимірювання положення лінії ЕПР, проведених при наднизьких температурах на комплексі «БУРАН», для речовини $\text{HMBA}(\text{Cr}^{\text{V}})\text{Na}^+$ та ND_3 - парамагнетиків із спином $s = 1/2$ - вперше експериментально був зафіксований «стрибок» у положенні лінії ЕПР при насиченні електронного переходу НВЧ полем при температурах $T \cong 1\text{К}$. Згідно з описаною вище фізичною моделлю така поведінка електронної спінової системи пов'язана з утворенням «локального» мінімуму у розподілі енергетичних рівнів згідно з розв'язком рівняння (3).

В **Заключній частині** сформульовані висновки та перспективні напрямки подальших досліджень, запропоновані варіанти їх практичного використання.

Висновки

1. Розвинута експериментальна методика вимірювання амплітудних та фазових розподілів електромагнітних полів, які виникають при дифракції хвильового пучка на клині, отворі та кільцевій щілині в екрані. Показано, що при опромінюванні клина та напівплощини обмеженої товщини хвильовим пучком, інтенсивність та розподіл розсіяного поля у тінювій області визначається суперпозицією об'ємних та поверхневих хвиль, що дифрагували на перепоні, а їх відносний вклад у загальне поле залежить від характерного розміру об'єкта, наприклад, кута розхилу для клина, радіуса закруглення для напівплощини. При цьому залежності від вказаних вище характерних розмірів об'єкта для інтенсивності випромінювання мають максимум, а кута максимального випромінювання - мінімум.

2. Визначені основні властивості зовнішнього резонансного поля ВР: основна частина випромінювання розповсюджується вздовж вісі ВР, рівень випромінювання в інших напрямках залежить від індексу резонансного коливання та співвідношення радіусів резонансного пучка та апертури дзеркала. Виділення областей максимальної інтенсивності поля у ближній зоні для двох ортогональних поляризацій та порівняння експериментальних результатів з отриманими для напівплощини дозволяє зробити висновок про правомірність використання концепції «крайових хвиль» при теоретичному описанні дифракції у ВР. Максимум інтенсивності дифракційного поля ВР має місце при відповідному співвідношенні між добротністю коливаний та величиною радіусів резонансного пучка і апертури дзеркала.

3. Встановлені закономірності у формуванні зовнішнього резонансного поля використані при створенні дифракційно зв'язаних ВР. Збільшення коефіцієнта зв'язку за дифракційним полем досягається при виконанні краю дзеркала у вигляді клина з кутом при вершині $\phi = 45^\circ$. Представлені конструкції двох напівпровідникових генераторів - підсумовувачів, в яких синхронізація окремих генераторів здійснюється за рахунок їх зв'язку за дифракційним полем. Наявність стабілізуючого контура у вигляді ВР дозволила отримати тривалу стабільність частоти генератора 8×10^{-6} та зменшити рівень частотного шуму в 5 разів ($s = 0.96$).

4. В результаті вивчення розсіяння плоскої електромагнітної хвилі на елементах рослинних покривів було створено каталог їх амплітудно - фазових портретів. При сумісному аналізі отриманих розподілів полів та амплітудно - фазових розподілів для стрічки та циліндра визначені їх спільні риси та подані рекомендації щодо заміни елемента рослинного покриву елементарним розсіювачем із заданими параметрами.

5. Для тридзеркального ВР, утвореного металевими дзеркалами та діелектричним дзеркалом - гранню ПБВ розташованого між дзеркалами діелектричного напівсегмента амплітудний розподіл нижчого типу коливань описується функцією Гауса, максимум якої зміщений відносно центра дзеркала на величину, яка визначається діелектричною постійною призми та радіусом кривини металевого дзеркала. Зміна кута падіння хвильового пучка на грань діелектричної призми призводить до зміни структури резонансного коливання за рахунок просторової селекції хвиль кутового спектру. Розвинуто експериментальну методику вимірювання діелектричних постійних зразків з високими втратами ($\text{tg } \delta > 10^{-3}$) за допомогою тридзеркального ВР. Показано переваги використання тридзеркального ВР як резонансної комірки спектрометра ЕПР при дослідженні зразків довільної товщини з високими втратами, наприклад, напівмагнітних напівпровідників.

6. Для напівпровідникових зразків n-типу $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ проведено спільний аналіз температурних залежностей поверхневої та об'ємної концентрацій основних носіїв струму в напівпровіднику та експериментально визначена температурна залежність поверхневого потенціалу для зразків з різним ступенем легування. В результаті аналізу температурної залежності коефіцієнта Холла для напівпровідників p-типу $\text{Mn}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, вирощених у різних технологічних умовах, показано, що електричні характеристики зразків, вирізаних з центральної області злитка, відповідають аналогічним характеристикам для крапкових зразків $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$. Визначені температури фазових переходів для згаданих вище зразків.

7. Одержано рівняння, що пов'язує інтенсивності полів на вході системи та збудженого в резонаторі типа коливань для тридзеркального ВР з нелінійною межею, утвореною гранню ПВО та напівпровідником, що розташований поряд з нею, проаналізовано його розв'язок та визначено параметри, при яких ВР проявляє мультистабільні властивості.

8. Проведено порівняльний аналіз основних спектральних характеристик: величини g-фактора, температурних та концентраційних залежностей ширини лінії ЕПР для нових комплексів $\text{HBA}(\text{H})(\text{Cr}^{\text{V}})\text{Na}^+$, $\text{HBA}(\text{D})(\text{Cr}^{\text{V}})\text{Na}^+$, $\text{HMBA}(\text{Cr}^{\text{V}})\text{NH}_4^+$, $\text{HMBA}(\text{Cr}^{\text{V}})\text{Na}^+$ 18 краун 6 з раніш вивченим комплексом $\text{HMBA}(\text{Cr}^{\text{V}})\text{Na}^+$ та показано, що граничні величини ядерної поляризації є однаковими для усіх речовин, а основним механізмом, відповідальним за високий рівень поляризації, є «динамічне охолодження».

9. Вперше експериментально виявлений «стрибок» у положенні лінії ЕПР при пониженні температури до $T \approx 1\text{K}$ для речовин двох типів: розчину комплексу $\text{HMBA}(\text{Cr}^{\text{V}})\text{Na}^+$ в 1,2-пропіленгліколі та дейтерованого аміаку (радикал ND_2). Побудована фізична модель ефекту, яка пояснює отриманий

результат з точки зору виникнення двох стаціонарних станів електронної спінової системи при її насиченні НВЧ полем.

Представлені у дисертаційній роботі методики вимірювання та отримані результати дозволили сформулювати такі напрямки подальших досліджень:

1. Дослідження фундаментальних характеристик вузькозонних напівмагнітних напівпровідників методом ЕПР в умовах $h\nu / kT \gg 1$.

2. Вивчення нелінійної спінової динаміки електронно - ядерних взаємодій в умовах $h\nu / kT \gg 1$: фононного вузького горла в ядерній релаксації, умов виникнення бістабільності в електронній та ядерній підсистемах.

3. Створення НВЧ приладів, що використовують тридзеркальний ВР як базовий елемент: діелектрометрів, напівпровідникових генераторів - підсумовувачів з розподіленним виводом енергії; напівпровідникових генераторів з розподіленою взаємодією, частотних дискриміновачів, транзистора.

На захист вносяться такі положення та результати

1. Розроблені методи вивчення розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль мм діапазону, що засновані на використанні відкритих резонансних систем, та радіофізичні комплекси для вимірювання: характеристик розсіяного поля при дифракції хвильових пучків на тілах різної геометричної форми та у ВР; властивостей твердих тіл у режимі динамічної поляризації ядер при $h\nu / kT \gg 1$; діелектриків з великими втратами.

2. Загальні закономірності у поведінці розсіяного поля при дифракції хвильових пучків на різних об'єктах та у ВР, характерний розмір яких a є співмірним із довжиною хвилі або трохи перевищує її: $0 < ka < 30$. Ефективність використання резонансних дифракційних полів для синхронізації оригінальних твердотільних генераторів - підсумовувачів.

3. Результати теоретичного та експериментального дослідження характеристик тридзеркального ВР, утвореного двома металевими та одним діелектричним дзеркалом: гранню ПІВВ діелектричного напівсегмента з розташованим поблизу нього зразком. Показана роль просторової селекції хвиль кутового спектру при формуванні резонансних коливань та встановлено, що у тридзеркальному ВР розподіл полів описується функцією Гауса, максимум якої зсунутий відносно центрів дзеркал. Ефективність використання тридзеркального ВР в оригінальних приладах мм діапазону.

4. Для речовин поляризованих ядерних мішеней - парамагнетиків із спіном $s = \frac{1}{2}$ - експериментально зареєстровано спінову бістабільність в ядерній та електронній підсистемах при насиченні електронного переходу електромагнітним полем мм діапазону. В умовах динамічної поляризації ядер

при виключенні НВЧ потужності насичення зменшення ядерної поляризації описується «швидкою» та «повільною» експонентами, які визначають час встановлення рівноваги між ядерною зєсманівською підсистемою, диполь - дипольним резервуаром та ґраткою.

5. Відміна в температурних залежностях об'ємної та поверхневої концентрацій основних носіїв струму у напівпровідниках n-типу $Cd_xHg_{1-x}Te$. Експериментально встановлено наявність мінімуму на температурній залежності поверхневої концентрації. Фізична модель, що пояснює одержаний результат на основі аналізу температурних залежностей поверхневого потенціалу та об'ємної концентрації при переході від домішкової провідності до власної. Область параметрів тридзеркального ВР з нелінійною межею - напівпровідником, де резонатор проявляє мультістабільні властивості.

Практична та наукова значущість роботи полягає в створенні комплексу радіофізичних методик та вимірювальних систем, що дозволяють вивчати розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль мм діапазону. Результати, отримані при дослідженні дифракції хвильових пучків, можуть бути використані при створенні резонансних комірок спектрометрів, генераторів - підсумовувачів та при побудові модельних теорій розсіяння мм хвиль рослинними покриттями. Комплекс експериментальних методик для спектроскопічних вимірювань в умовах $h\nu / kT \gg 1$, може бути використаний при проведенні досліджень фундаментальних властивостей речовин та при побудові спектрометрів мм діапазону. Тридзеркальний ВР з нелінійною межею напівпровідником дозволить реалізувати новий клас пристроїв мм діапазону.

Основні результати дисертації опубліковано в роботах

1. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Попков Ю.П., Шестопапов В.П. Исследование излучения из квазиоптических резонаторов. // Изв. ВУЗов Радиофизика. Ч.1 - 1984. - 27, N12. С.1536-1544, Ч.2 - 1985. - 28. - N1. - С.84-92.
2. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Шестопапов В.П. Дифракционная селекция в экранированных квазиоптических резонаторах. // Изв. ВУЗов Радиофизика. - 1988. - 31. - N8.-С.964-973.
3. Вертий А.А., Гудым И.Я., Карелин Ю.В., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Радиофизический комплекс для исследования внутренних дефектов в радиопрозрачных образцах. // Приборы и техника эксперимента, - 1995. - N3. -С.102-106.

4. Вертий А.А., Попенко Н.А., Кузмичев И.К. Экспериментальное исследование дифракции электромагнитных волн на полуплоскости. // Межд. симп. по мм волнам. Харьков. 1994. - 1. - С.51-52.
5. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Исследование полей дифракции электромагнитных волн мм диапазона на осесимметричных диафрагмах. // Изв. ВУЗов Радиофизика, - 1995. - 38. - N5. - С.719-729.
6. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Исследование дифракционно-связанных ОР в коротковолновой области мм диапазона длин волн. // Изв. ВУЗов Радиофизика. - 1989. - 32. - N8. - С.788-792.
7. Вертий А.А., Дворниченко В.П., Карушкин Н.В., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Экспериментальное исследование характеристик дифракционного генератора-сумматора мощности. // Изв. ВУЗов Радиоэлектроника, - 1990. - 33. - N5. - С.85-86.
8. 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). - 1. - P.146-150.
9. Вертий А.А., Попенко Н.А., Тарапов С.И., Шестопалов В.П. Исследование ОР с призмой полного внутреннего отражения. // Изв. ВУЗов Радиофизика, - 1982. - 25. - N6. - С.684-687.
10. Вертий А.А., Попенко Н.А., Попков Ю.П., Тарапов С.И., Шестопалов В.П. Трехзеркальный ОР мм диапазона. // Изв. ВУЗов Радиофизика, - 1984. - 27. - N6. - С.775-780.
11. Вертий А.А., Звягина Г.А., Попенко Н.А. Квазиоптический резонатор с диэлектрическим заполнением. // Изв. ВУЗов Радиофизика. - 1988. - 31. - N5. - С.591-110.
12. Popenko N.A., Gudim I.Ya., Tarapov S.I. Open Resonator for Measuring High-losses Dielectric. // Inter. Journ.of I&MM Waves. 1996. - 17. - N11. - P.1879-1893.
13. Вертий А.А., Гудым И.Я., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Шестопалов В.П. Экспериментальное исследование квазиоптического металлодиэлектрического резонатора. // Украинский физический журнал. - 1993. - 38. - N10. - С. 1487-1491.
14. Вертий А.А., Гудым И.Я., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Резонансная ячейка спектрометра ЭПР для исследования свойств полумагнитных полупроводников. // Изв. ВУЗов Радиофизика. - 1995. - 38. - N10. - С.1077-1082.
15. Vertiy A.A., Ivanchenko I.V., Popenko N.A., Tarapov S.I. High-Frequency Module and Semiconductor Research at Low Temperature. // Intern. Journal of I&MM Waves. - 1991. 12. - N10. P. 1229-1238.

16. 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 техника эксперимента. - 1992. - N5. - С. 192-197.
17. Вертий А.А., Кусайкин А.П., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Пустыльник О.Д., Тарапов С.И. Радиофизический модуль для исследования магнитоплазменных поверхностных волн в полупроводниках при $T < 77\text{K}$. // Изв. ВУЗов Радиофизика. - 1992. - 35, N5. - С.458-465.
18. Вертий А.А., Горбатьюк И.Н., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Пустыльник О.Д., Тарапов С.И. Исследование объемных и поверхностных кинетических свойств кристаллов n-типа $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ в области температур $0.5\text{K} < T < 50\text{K}$. // Физика и техника полупроводников. - 1992. - 26. - N4. - С.585-591.
19. Боднарук О.А., Вертий А.А., Горбатьюк И.Н., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Раренко И.М., Тарапов С.И. Комплексное исследование узкощелевых полупроводников типа p-Mn₂Hg_{1-x}Te. // Физика и техника полупроводников. - 1996. - 30. - N7. - С.1236-1243.
20. Вертий А.А., Звягина Г.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Тарапов С.И. Резонансные ячейки сверхнизкотемпературного спектрометра. // Приборы и техника эксперимента. - 1988. - N2. - С.107-110.
21. Vertiy A.A., Ivanchenko I.V., Popenko N.A., Tarapov S.I., Shestopalov V.P. A Millimeter Wave Radiospectrometer for Material Analysis below $T > 1\text{K}$. // Intern. Journ. of I&MM Waves. - 1989. - 10. - N3. - P.395-404.
22. Вертий А.А., Гудым И.Я., Иванченко И.В., Попенко Н.А. Двухчастотный радиоспектрометр для исследования парамагнетиков в сильных магнитных полях. // Приборы и техника эксперимента - 1994. - N5. -С.100-105.
23. Vertiy A.A., Ivanchenko I.V., Popenko N.A. Two-Frequency Quasi-Optical Radiospectrometer for Substance Investigations. // Intern. Journal of I&MM Waves. - 1993. - 14. - N11. - P.2339-2344.
24. Вертий А.А., Орлов В.Д., Попенко Н.А., Мовсесян Г.Д., Воробьева Н.П., Тарапов С.И., Иванченко И.В., Колос Н.Н., Арустамова М.Е. ЭПР-спектры стабильных комплексов Cr^{V} . // Журн. прикладной спектроск. - 1994. - 60. - N5-6. - С.473-477.
25. 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 $T = 90\text{K}$. // Докл. АН СССР. - 1990. - 314. - N6. - С.1389-1391.

26. Попенко Н.А., Тарапов С.И. Магниторезонансные процессы в веществах с поляризующимися ядрами при насыщении электронных переходов. // Письма в Журн. exper. и техн. физики. - 1996. - 64. - N3. - С.169-173.
27. Попенко Н.А., Тарапов С.И. Экспериментальное наблюдение низкотемпературного сдвига резонансной линии. // Доповіді НАН України. - 1997. - N1. - С.109 - 112.
28. Вертий А.А., Иванченко И.В., Попенко Н.А., Шестопапов В.П. Наблюдение бистабильности в ядерной системе поляризованной ядерной мишени. - // Докл. АН России. - 1994. - 337. - N2. - С.184-186.
29. Verdiy A.A., Ivanchenko I.V., Popenko N.A. Experimental Investigation of Non-linear Processes in Quasi-Optical Resonator with Paramagnetic. // Intern. Journal of I&MM Waves. - 1994. - 15. - N4. - P.763-767.
30. Попенко Н.А., Тарапов С.И. Спектроскопические исследования ядерной релаксации в условиях динамической поляризации ядер. // Журн. прикладной спектроск. - 1997. - 65. - N3. С. 363-366.
31. Popenko N. A. Experimental Modeling the Millimeter Wave Scattering from Vegetation Canopy. // Intern. Journal of I&MM Waves.- 1996. - 17. - N12. P.2145-2158.
32. Попенко Н.А. Селекция типов колебаний в кольцевом ОР. // Украинский физический журнал. - 1981. - 26. - N3. - С.363-367.
33. Попенко Н.А. О выборе размера зонда при исследовании полей в ОР. // Радиотехника и электроника. - 1975. - 20. - N4. - С.833-834.
34. Popenko N.A. Microwave Semiconductor Oscillator with Extended Interaction. // Microwave and Optical Technology Letters. - 1997. 14. - N2. - P.130-133.
35. Попенко Н.А. Нелинейные эффекты в трехзеркальном ОР с полупроводником. // Радиофизика и радиоастрономия. - 1996. - 1. - N2. С.259-266.
36. Попенко Н.А. Экспериментальное исследование рассеяния электромагнитных волн мм диапазона на объектах с конечным импедансом. // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электроники. - 1997. -2. - N1. - С.47-52
37. А.с. №673069 СССР, Н01 J 25/00. Генератор дифракционного излучения / А.А. Вертий, Н.А. Попенко, В.П. Шестопапов - Оpubл. 1980. Бюл. N.19.
38. А.с. №778605 СССР, Н 01 P 7/06. Открытый резонатор / А.А. Вертий, Н.А. Попенко, В.П. Шестопапов - Оpubл. 1978. Бюл N37.
39. А.с.№ 974454 СССР, Н01 J 23/18. Открытый резонатор / А.А. Вертий, С.А. Масалов, Н.А. Попенко, Ю.К. Сиренко - Оpubл. 15.12.82. Бюл N42.

40. А.с. №1433351 СССР, Н03 В 7/14. Генератор / А.А. Вертий, И.В. Иванченко, Н.А. Попенко - 1988
41. А.с. №11426395 СССР, Н03 В 7/12. Генератор СВЧ / А.А. Вертий, Г.А. Звягина, И.В. Иванченко, Н.А. Попенко, В.П. Шестопапов - 1988.
42. А.с. №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 - Оpubл. 15.05.92. Бюл. N18.
43. А.с. №1062580 СССР, G 01 N 22/00. Резонансная ячейка спектрометра магнитного резонанса / А.А. Вертий, Н.А. Попенко, Ю.П. Попков, В.П. Шестопапов. - Оpubл. 23.12.83. Бюл N47.
44. А.с. №1183876 СССР, G 01 N 24/10. Резонансная ячейка спектрометра ЭПР индукционного типа / А.А. Вертий, Н.А. Попенко, Ю.П. Попков, В.П. Шестопапов. - Оpubл. 07.10.85. Бюл N37.
45. А.с. №1203415 СССР, G 01 N 24/10. Резонансная ячейка спектрометра / А.А. Вертий, Н.А. Попенко, С.И. Тарапов, В.П. Шестопапов. - Оpubл. 07.01.86. Бюл N1.
46. А.с. №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. - Оpubл. 30.03.88. Бюл N3.
47. А.с. №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 - Оpubл. 23.01.88. Бюл. N3.

Літературні джерела

- Джефрис К. Динамическая ориентация ядер. // М.: Мир, 1965. -316с.
- Ацаркин В.А. Динамическая поляризация ядер в твердых диэлектриках. // М. Наука, 1980. -193с.
- Буишвили Л.Л., Фокина Н.П. Теория насыщения магнитного резонанса в твердом теле при низких температурах. // Физика твердого тела. 1983. 25. - N6. С.1761-1767.
- Фокина Н.П., Челидзе Л.Г. Сигналы поглощения СВЧ поля в условиях насыщения неэквидистантных уровней ($s = 3/2$) парамагнетиков при низких температурах. // Изв. вуз. Радиофизика. - 1990. - 33. - N3. - С.290-298.
- Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Стрижевский В.Л. Поверхностные поляритоны в полупроводниках. // Киев: Наукова думка, 1989. - 374с.

Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М. Электромагнитные явления СВЧ диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. // Киев: Наукова думка. - 1991. - 216с.

Брандт Н.Б., Мошалков В.В., Орлов А.О. и др. Исследование электрических и магнитных свойств бесщелевых полумагнитных полупроводников $Hg_{1-x}Mn_xTe$ при низких и сверхнизких температурах. // Журн. exper. и теорет. физики. - 1983. 84. - N3. С.1059-1074.

Шестопапов В.П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур. // Киев: Наук. думка, 1987. - 288с.

Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. // М.: Сов. Радио. 1962. - 242с.

Малюженец Г.Д. Возбуждение, отражение и излучение поверхностных волн на клине с заданными импедансами граней. // ДАН СССР. - 1958. -121. - N3. - С.436-439.

Теплов М.А., Штаудте М., Феллер Г. Ядерная магнитная релаксация в сульфате празеодима при сверхнизких температурах. // Физика твердого тела. - 1980. - 22. - N8. - С.2460-2462.

Тулин В.А. Насыщение ЯМР в условиях сдвига частоты. // Журнал exper. и теорет. физики. - 1980. - 78. - N1. С.149 - 156.

Автор щиро вдячний науковому консультанту академіку НАН України В.П. Шестопапову за постійну увагу та зацікавленість у роботі, плідні дискусії, нетривіальні ідеї та вимогливість. Автор вносить подяку своїм колегам, з якими виконано більшу частину експериментальних робіт, доктору фіз.-мат. наук Вертію О.О. за активне співробітництво та постановку задач з розсіяння електромагнітних хвиль у резонансних структурах, плідні дискусії та допомогу у постановці та виконанні низькотемпературних досліджень; докторам фіз.-мат. наук Тарапову С.І. та Іванченко І.В. за диспути та спільну працю на комплексі «БУРАґ»; докторам фіз.-мат. наук Білецькому М.М., Вавриву Д.М. та кандидату фіз.-мат. наук Гаврилову С.П. за плідні дискусії при обговоренні результатів досліджень поверхневих магнітоплазмових хвиль; молодшому науковому співробітнику Гудим І.Я. за виконання розрахунків та допомогу в оформленні результатів.

АНОТАЦІЯ

Попенко Н.О. Розсіювання та поглинання електромагнітних хвиль міліметрового діапазону в резонансних системах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико - математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - радіофізика. - Харківський державний університет, Харків, 1998.

Захищається 36 наукових праць та 10 авторських свідоцтв, у яких подані результати досліджень, об'єднаних загальним методологічним підходом, що визначається використанням відкритих резонансних систем для вивчення взаємодії електромагнітних хвиль міліметрового діапазону з парамагнетиками та вузькозонними напівпровідниками. Встановлені закономірності у формуванні полів, що виникають при дифракції хвильових пучків на тілах простої геометричної форми та у відкритих резонаторах, лягли в основу створення електродинамічних систем спектрометрів магнітного резонансу та порушеного повного внутрішнього відбиття. Для дослідження лінійних та нелінійних явищ на межі розподілу "діелектрик - напівпровідник" запропоновано тридзеркальний відкритий резонатор, утворений двома металевими дзеркалами та діелектричним дзеркалом - гранню повного внутрішнього відбиття розташованого між дзеркалами діелектричного напівсегмента. Продемонстрована роль просторової селекції хвиль кутового спектру у формуванні коливань у даному резонаторі. Визначені області параметрів тридзеркального резонатора з нелінійним елементом - напівпровідником, де проявляються мультистабільні властивості. В результаті сумісного аналізу температурних залежностей поверхневої та об'ємної концентрацій для вузькозонних напівпровідників p- типу $Cd_xHg_{1-x}Te$ встановлено наявність мінімуму на температурній залежності поверхневої концентрації в області переходу від домішкової провідності до власної. Для речовин поляризованих ядерних мішеней - парамагнетиків із спіном $s = 1/2$ - в умовах динамічної поляризації ядер експериментально зареєстрована спінова бістабільність в ядерній та електронній підсистемах та показано, що процес руйнування ядерної поляризації описується «швидкою» та «повільною» експонентами.

Ключові слова: міліметровий діапазон довжин хвиль, відкритий резонатор, дифракція, напівпровідники, парамагнетики, електронний парамагнітний резонанс, ядерний магнітний резонанс, динамічна поляризація ядер, релаксація, мультистабільність.

АННОТАЦИЯ

Попенко Н.А. Рассеяние и поглощение электромагнитных волн миллиметрового диапазона в резонансных системах. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика. – Харьковский государственный университет, Харьков, 1998.

Звещается 36 научных статей и 10 авторских свидетельств, в которых представлены результаты исследований, объединенные общим методологическим подходом, определяемым применением открытых резонансных структур для изучения взаимодействия электромагнитных волн миллиметрового диапазона с парамагнетиками и узкозонными полупроводниками. Установленные закономерности в формировании рассеянных полей при дифракции волновых пучков на телах простой геометрической формы и в открытых резонаторах легли в основу создания электродинамических систем спектрометров магнитного резонанса и нарушенного полного внутреннего отражения. Для исследования линейных и нелинейных явлений на границе раздела «диэлектрик – полупроводник» предложен трехзеркальный открытый резонатор, образованный двумя металлическими зеркалами и диэлектрическим зеркалом - гранью полного внутреннего отражения расположенного между зеркалами диэлектрического полусегмента. Продемонстрирована роль пространственной селекции волн углового спектра при формировании колебаний в данном резонаторе. Определены области параметров трехзеркального резонатора с нелинейным элементом - полупроводником, где он проявляет мультистабильные свойства. В результате совместного анализа температурных зависимостей поверхностной и объемной концентраций для узкозонных полупроводников типа $Cd_xHg_{1-x}Te$ установлено наличие минимума на температурной зависимости поверхностной концентрации в области перехода от примесной проводимости к собственной. Для веществ поляризованных ядерных мишеней - парамагнетиков со спином $s = 1/2$ - в условиях динамической поляризации ядер экспериментально зарегистрирована спиновая бистабильность в ядерной и электронной подсистемах и показано, что процесс распада ядерной поляризации описывается «быстрой» и «медленной» экспонентами

Ключевые слова: миллиметровый диапазон длин волн, открытый резонатор, дифракция, полупроводники, парамагнетики, электронный парамагнитный резонанс, ядерный магнитный резонанс, динамическая поляризация ядер, релаксация, мультистабильность.

ABSTRACT

Popenko N.A. Scattering and Absorption of Electromagnetic Waves of Millimeter Range in Resonance Systems. – Manuscript.

The dissertation is presented for Doctoral degree in Physics and Mathematics field 01.04.03 - Radiophysics. - The Kharkiv State University, Kharkiv, 1998.

36 scientific publications and 10 patents are defended in the dissertation. The results of investigations are connected by a common methodological approach that can be defined as the usage of open resonance structures for studying the interaction between electromagnetic waves of millimeter range and paramagnetic or narrow-gap semiconductors. The diffraction of wave beams from objects of plain geometrical shape and from complicated open resonance structures has been investigated. Main behavioural patterns of a scattered field have laid the basis of electrodynamic systems of electron spin resonance, of frustrated total internal reflection and of two-frequency spectrometers. For the investigation of linear and non-linear phenomena on the facet «dielectric - semiconductor» three mirror open resonator has been proposed. The resonator is formed by two metal mirrors and a dielectric mirror being the facet of total internal reflection situated between the mirrors of dielectric semisegment. The role of spatial selection of waves of angle spectrum by forming oscillations in the resonator has been shown. For the three-mirror resonator with a non-linear element - semiconductor - the range of parameters by which it shows multistable properties has been determined. As a result of joint analysis of dependences of surface and bulk concentration upon temperature for narrow-gap semiconductors of n-type $Cd_xHg_{1-x}Te$, the existence of a minimum on the chart presenting the dependence of the surface concentration upon temperature in the area of transition from the admixture conductivity to the self-conductivity has been defined. For substance of polarized nuclear targets - paramagnetics with spin $s = 1/2$ - in the conditions of dynamic nuclear polarization spin bistability in nuclear and electron systems has been experimentally registered. It also has been shown that the frustration of nuclear polarization is described by both «quick» and «slow» exponents.

Key words: millimeter wave range, open resonator, diffraction, semiconductor, paramagnetic, electron spin resonance, nuclear magnetic resonance, dynamic nuclear polarization, relaxation, multistability.

Ав 39.641

АВ 39.641

Наукове видання

ПОПЕНКО Ніна Олексіївна

**Розсіяння та поглинання електромагнітних хвиль
міліметрового діапазону в резонансних системах**

Відповідальний за випуск В.М. Деркач

Підп. до друку 24.02.98. Формат 60x84.16

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

Тираж 100 прим. Зам.11. Без ціни

Ротапринт ІРЕ НАН України
310085, м.Харків, вул. АК.Проскури 12