

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Харківський національний університет радіоелектроніки

БОНДАРЕНКО ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 537.312.62: 621.372.834

**ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПРИСТРОЇВ МІКРОХВИЛЬОВОЇ ТЕХНІКИ
НА БАЗІ ВИСОКОДОБРОТНИХ РЕЗОНАНСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Гордієнко Юрій Омелянович,
Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Черпак Микола Тимофійович,
Інститут радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова
НАН України,
старший науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, професор
Горобець Микола Миколайович,
Харківський національний університет
ім. В.Н. Каразіна,
завідувач кафедри прикладної електродинаміки;

доктор технічних наук, професор
Гімпілевич Юрій Борисович,
Севастопольський національний технічний
університет,
завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікацій.

Захист відбудеться "18" 10. 2012 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: м. Харків, пр. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки

Автореферат розісланий "15" 09. 2012 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б.Г. Бородін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток космічного, тропосферного зв'язку і глобального віщання в діапазоні НВЧ, радіолокації, радіоастрономії, радіоспектроскопії, методів дослідження матеріалів і середовищ постійно вимагає створення мікрохвильових пристроїв з поліпшеними характеристиками.

Оскільки до складу більшості радіоелектронних систем, систем діагностики матеріалів і середовищ, пристроїв НВЧ діапазону входять резонансні коливальні елементи їхнє вдосконалювання напряму пов'язане з поліпшенням характеристик використовуваних резонаторів.

Дослідження в області фізики твердого тіла, явища надпровідності, досягнення фізики низьких температур і криогенної техніки привели до створення цілої серії низькотемпературних кріоелектронних пристроїв, які за своїми характеристиками значно перевершують використовувані при нормальних температурах. У їхнє число входять також і пристрої на основі охолоджуваних і надпровідних резонаторів, що мають добротність на кілька порядків більшу, ніж у звичайних резонаторах. Застосування таких пристроїв має приводити до поліпшення характеристик відповідних радіоелектронних систем, а в ряді випадків і до якісної зміни їх можливостей.

Однак, до теперішнього часу сформувався значний розрив між великою кількістю теоретичних і експериментальних результатів, накопичених при дослідженні різних кріоелектронних пристроїв з одного боку, і одиничними прикладами практичного використання таких пристроїв з іншого. Особливо явним цей розрив стає при вирішенні питання щодо застосування кріоелектронних і охолоджуваних пристроїв та елементів у вже існуючих радіоелектронних вимірювальних системах і комплексах.

Зняття зазначеного протиріччя можливо або шляхом корінної переробки радіоелектронних систем під максимальне використання всіх можливостей кріоелектронних і охолоджуваних пристроїв і елементів, або шляхом оптимізації параметрів кріогенних пристроїв за рахунок спрощення їхніх схем і конструкцій, можливого погіршення граничних характеристик, але при мінімальних схемотехнічних і конструктивних змінах систем і комплексів, у яких вони застосовуються.

Перший шлях виправданий, якщо мова йде про одержання принципово нових результатів або досягнення унікальних характеристик і може бути реалізований тільки в одиничних екземплярах, оскільки припускає значний обсяг досліджень і матеріальних витрат.

Другий варіант переважніше, оскільки вимагає істотно менших витрат, але виправданий тільки в тому випадку, якщо веде до якісного поліпшення основних характеристик систем і припускає досить широке впровадження таких пристроїв.

У той же час специфічним фактором для напрямку, пов'язаного зі створенням і застосуванням мікрохвильових пристроїв з високо- і

надвисокодобротними резонансними елементами, є також потреба в розробці методик дослідження як самих пристроїв, так і їхніх компонент, оскільки в більшості випадків існуючі методи не забезпечують необхідну точність і чутливість при тих високих параметрах, які досягаються в таких пристроях.

Активний розвиток в останні роки методів, систем і пристроїв мікрохвильової діагностики матеріалів і середовищ, значна частина яких також ґрунтується на використанні резонансних чутливих елементів-датчиків, припускає в ряді випадків серйозні конструктивні зміни резонуючих елементів у порівнянні з їхніми канонічними реалізаціями з метою максимальної адаптації до умов вимірів і досліджень, що виконуються. При цьому також необхідно проведення досліджень процесів формування і перетворення сигналів у таких пристроях і системах з метою визначення умов досягнення максимальної чутливості вимірів.

Таким чином, існує нагальна потреба в проведенні системного теоретичного і експериментального аналізу реальних можливостей різних типів високодобротних резонансних елементів НВЧ діапазону і пристроїв на їхній основі з метою визначення найбільш перспективних напрямків їх побудови і використання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наведені в дисертації результати досліджень використовувалися в ході виконання ряду НДР, які проводилися в Спеціальному конструкторсько-технологічному бюро з криогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур НАН України, на кафедрах фізики і антенно-фідерних пристроїв Харківського військового університету, на кафедрі авіаційних засобів зв'язку Харківського інституту ВПС відповідно до постанов СМ СРСР, науковими програмами НАН України, МО України, МОН України, а також з 2004 року на кафедрі мікроелектроніки, електронних приладів і пристроїв Харківського національного університету радіоелектроніки в ряді НДР, які проводилися по пріоритетних напрямках розвитку науки й техніки України і затверджені постановами Кабінету Міністрів України, Верховної Ради України, Законами про держбюджет і наказами Міністерства освіти і науки України: „Розробка нових безеталонних засобів експресного контролю вологості сипучих матеріалів для будівельних і агропромислових технологій” (№ 0106U009108, виконавець); „Розробка методів і технічних засобів НВЧ мікродіагностики матеріалів, середовищ і структур” (№ 0106U003287, виконавець); „Мікрохвильова діагностика і модифікація матеріалів в нанотехнологіях” (№ 0107U006676, виконавець); „Апаратно-програмний комплекс для визначення молекулярних механізмів розвитку патології організму людини і оптимізації процесу лікування кардіологічних захворювань різної етіології” (№ 0108U007614, відповідальний виконавець); „Розробка методів здійснення експрес-контролю за якістю напівпровідникових багаточарових наноструктур і наноматеріалів у процесі виробництва з використанням засобів скануючої мікрохвильової мікроскопії” (№ 0110U006453, відповідальний виконавець).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка основ створення мікрохвильових пристроїв на базі високодобротних резонансних елементів, що дозволить розширити їхні функціональні можливості і забезпечити більш ефективне використання для якісного поліпшення селективних властивостей, спектральних характеристик НВЧ сигналів і чутливості вимірів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові задачі:

1. Розробити критерії оцінки реальних можливостей різних типів високодобротних резонансних систем у досягненні максимальної добротності і стабільності резонансної частоти з урахуванням фізичних, технологічних і конструктивних обмежень.

2. Обґрунтувати теоретично і експериментально основні напрямки використання різних типів високодобротних резонансних елементів у вимірювальній і експериментальній техніці з урахуванням їхніх реальних можливостей.

3. Провести теоретичне і експериментальне обґрунтування практичного використання накопичувальних властивостей високодобротних об'ємних резонаторів.

4. Провести теоретичне і експериментальне дослідження систем стабілізації частоти мікрохвильових генераторів за допомогою високодобротних резонаторів, призначених для поліпшення спектральних характеристик сигналів, що генеруються.

5. Розробити методи виміру спектральних характеристик квазімонохроматичних сигналів біля несучої частоти.

6. Провести теоретичне і експериментальне дослідження вибіркової здатності мікрохвильових пристроїв з високодобротними резонансними елементами.

7. Провести теоретичне і експериментальне дослідження мікрохвильових пристроїв на основі високодобротних планарних структур.

8. Розробити і дослідити резонаторні вимірювальні перетворювачі (РВП) на основі високодобротних резонаторів для мікрохвильової діагностики матеріалів і середовищ.

9. Розробити методи і пристрої для формування сигналів вимірювальної інформації при використанні РВП на основі високодобротних резонаторів.

Об'єктом дослідження є процеси формування і перетворення сигналів у пристроях на основі високодобротних резонансних систем.

Предметом дослідження є мікрохвильові пристрої генерації й фільтрації, а також резонаторні вимірювальні перетворювачі на основі високодобротних, у тому числі надпровідних елементів, і методи виміру їхніх характеристик.

Методи дослідження. При теоретичному аналізі використовуваних фізичних процесів і явищ, а також методів, що пропонуються для побудови й

функціонування пристроїв НВЧ із високочастотними елементами, використовувалися методи електродинаміки, теорії довгих ліній, радіотехніки, фізики твердого тіла, феноменологічних і мікроскопічної теорій надпровідності, фізики плазми, низькотемпературної теплотехніки. При розробці і дослідженні експериментальних пристроїв враховувалися вимоги техніки НВЧ, кріогенної й вакуумної техніки, особливості технології виготовлення і використання охолоджуваних і надпровідних елементів. Практично всі отримані результати підтверджено експериментальними дослідженнями, проведеними автором.

Наукова новизна. При виконанні роботи вперше отримані наступні наукові результати:

1. Фізично обґрунтовано можливості різних типів високочастотних резонансних систем у досягненні максимальних значень добротності і стабільності резонансної частоти, що дозволяє визначати області застосування високочастотних резонансних елементів:

1.1. Розроблено критерії оцінки можливостей досягнення максимальної добротності і стабільності резонансної частоти з урахуванням фізичних, технологічних і конструктивних обмежень.

1.2. Запропоновано модель формування амплітудно-частотних характеристик високочастотних резонансних систем, як результат суперпозиції ансамблю когерентних коливань, що дозволяє виявити тонку структуру коливань, які виникають у високочастотній коливальній системі.

1.3. За допомогою послідовного фізичного чисельного моделювання і експериментальних досліджень розроблено ряд високочастотних вимірювальних перетворювачів для скануючої мікрохвильової мікроскопії.

2. На основі фізичного аналізу та експериментальних досліджень процесів функціонування мікрохвильових пристроїв з надпровідними резонаторами виявлені специфічні властивості і запропоновано методи їх побудови, удосконалення та вимірювання характеристик, зокрема:

2.1. Експериментально виявлено різну ступень поліпшення спектра сигналу біля несучої частоти для НВЧ генераторів з різними типами систем стабілізації частоти на основі високочастотних надпровідних резонаторів і запропоновані нові напрямки удосконалення таких систем стабілізації.

2.2. Обґрунтовано концепцію створення формувань когерентних імпульсних сигналів на основі надпровідних структур.

2.3. Розроблено основи побудови вузькосмугових загороджувальних НВЧ фільтрів з унікальними характеристиками по глибині (~ 90 дБ) і смузі режекції (одиниці-десятки герц).

2.4. Проведено експериментальні дослідження, запропоновані й обґрунтовані напрямки вдосконалювання вимірювальних систем для аналізу частотних флуктуацій квазімонохроматичних сигналів мікрохвильового діапазону.

3. За допомогою створених вимірювальних систем на основі надпровідних мікрохвильових резонаторів і розроблених методик їх

застосування при експериментальних дослідженнях електрофізичних характеристик діелектричних матеріалів при низьких температурах виявлено аномальну залежність тангенса кута діелектричних втрат кераміки СТ 32-1.

4. Запропоновано й фізично обґрунтовано концепцію побудови резонаторних вимірювальних перетворювачів, яка відкриває шлях до створення вимірювальних перетворювачів для дослідження резонаторними методами матеріалів з великими втратами і вимірювальних високочутливих датчиків на основі високоомних напівпровідників.

5. Запропоновано, розроблено і досліджено системи формування сигналів вимірювальної інформації в пристроях з резонаторними вимірювальними перетворювачами, що дозволяють проводити одночасний вимір основних інформаційних сигналів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Результати експериментальних досліджень систем стабілізації частоти НВЧ генераторів високочастотними резонаторами надають можливість аргументованого вибору оптимального схемного рішення відповідно до практичних вимог. Запропоновані в роботі схемні рішення систем стабілізації дозволяють поєднати переваги різних систем з метою максимального зниження частотних шумів.

2. Запропоновані методи виміру спектральних характеристик дозволяють робити виміри частотних флуктуацій у спектрах квазімонохроматичних сигналів НВЧ діапазону біля несучої частоти, що відкриває додаткові можливості в розробці і удосконалюванні надвисокостабільних НВЧ генераторів.

3. Запропоновані методи синтезу загороджувальних НВЧ фільтрів на основі хвилевідно-коаксіальних структур і схем з амплітудно-фазовою компенсацією, у яких використовуються високочастотні резонатори, не тільки підвищують ефективність фільтрації сигналів завад, але і відкривають нові можливості в керуванні спектром сигналів високостабільних НВЧ генераторів.

4. Спільне використання розроблених у ході виконання роботи високостабільних НВЧ генераторів з поліпшеним спектром і вузькосмугових загороджувальних НВЧ фільтрів дозволяє створити одноантенну доплерівську РЛС безперервної дії зі значно підвищеною в порівнянні з існуючою роздільною здатністю по вторинним доплерівським складовим відбитого сигналу.

5. Дослідження можливостей створення пристроїв формування імпульсних НВЧ сигналів на основі використання накопичувальних властивостей високочастотних резонаторів, що проведені в роботі, дозволяють порушувати питання про створення багаторазових генераторів потужних електромагнітних імпульсів малої тривалості і опорних генераторів когерентних імпульсних НВЧ сигналів.

6. Результати дослідження електрофізичних характеристик діелектричних матеріалів за допомогою охолоджуваних надпровідних

структур доводять ефективність освоєних методів для проведення високочутливих вимірів електрофізичних властивостей різних матеріалів, а отримані при вимірах характеристики можуть бути використані як довідкові при розробці охолоджуваних радіоелектронних пристроїв.

7. Результати, що отримані при дослідженні мікрохвильових пристроїв на основі високодобротних планарних структур, визначають напрямки їх практичного використання і створюють базу для подальших перспективних розробок.

8. Розроблені і досліджені в ході виконання роботи схемотехнічні реалізації напівпровідникових вимірювальних НВЧ генераторів з розширеними можливостями по механічній і електричній перебудові частоти можуть бути використані як активні елементи в електронних системах різного призначення.

9. Розроблені системи формування сигналів вимірювальної інформації, що дозволяють проводити одночасний вимір основних інформаційних сигналів, стали базовими при проведенні вимірів методами ближньопольової мікрохвильової мікроскопії в ХНУРЕ.

10. Результати дисертації використовувалися у навчальному процесі в ХНТУ “ХП” при викладанні дисциплін: “Прилади і техніка НВЧ” і “Криогенна радіофізика” студентам інженерно-фізичного факультету, використовуються під час проведення науково-дослідних робіт і в навчальному процесі ХНУРЕ при викладанні дисциплін: “Мікроелектроніка НВЧ”, “Вимірювальні датчики й перетворювачі”, “Технологія НВЧ ІС”, а також студентами факультету електронної техніки під час виконання дипломних проектів, магістерських і дипломних робіт.

11. Ряд розроблених при виконанні роботи пристроїв і методик були впроваджені в ІРЕ НАН України й СКТБ ФТІНТ НАН України.

Особистий внесок здобувача. Внесок автора в проведення досліджень і одержання результатів, наведених у дисертаційній роботі, є визначальним. Основні теоретичні положення і результати дисертації розроблені і отримані автором самостійно. З робіт, опублікованих зі співавторами, у дисертації використані ті матеріали, які отримані автором особисто або в одержанні яких автор брав безпосередню участь, а саме:

- у роботі [1] автором сформульована задача, визначені методи рішення, проведений аналіз отриманих результатів;

- у роботах [2-4, 6, 32] автором обґрунтовані основні ідеї, сформульовані задачі, визначені методи рішення, прийнято участь у проведенні експериментів, проведений аналіз отриманих результатів;

- у роботах [5, 13] автором обґрунтовані основні напрямки досліджень, розроблені методики досліджень, прийнято участь у проведенні експериментів, проведений аналіз отриманих результатів;

- у роботах [20] автором проведена оцінка очікуваних критичних параметрів, прийнято участь у постановці задачі, плануванні і проведенні експерименту, аналізі отриманих результатів;

- у роботах [21-24] автором визначена задача дослідження, розроблені методи досліджень, проведений аналіз результатів;

- у роботах [25-27] автором розроблена концепція створення високодобротних резонаторних вимірювальних перетворювачів;

- у роботах [28-31] автором прийнято участь у виборі методів рішення, проведенні експериментів і формулюванні формул винаходів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень по темі дисертації доповідалися і обговорювалися на 16-ті міжнародних і міжрегіональних науково-технічних конференціях.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 54 наукові праці, з яких 27 статей (13 без співавторів) у національних і міжнародних наукових журналах і збірниках, які входять у перелік ВАК України, 4 депоновані статті (1 без співавторів), 18 статей і тез доповідей у матеріалах і працях конференцій (6 без співавторів), а також отримано 5 авторських свідоцтв на винаходи.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, семи розділів, висновку і переліку використаних джерел. Загальний обсяг роботи 402 с., включаючи 139 рисунків і 30 таблиць, перелік використаних літературних джерел містить 267 найменувань на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дана загальна характеристика роботи, розкрито стан досліджуваної проблеми, показано актуальність і доцільність проведення досліджень, сформульовано мету, проблему і задачі досліджень, коротко описано об'єкти і методи досліджень, наведено конкретні наукові результати і положення, які виносяться на захист, а також дані про структуру дисертаційної роботи, науковій новизні, практичному значенні, впровадженні, апробації і публікації основних результатів.

У **першому розділі** аналізуються фактори, що визначають добротність і стабільність параметрів НВЧ резонансних елементів, а також фізичні аспекти використання низьких температур для підвищення добротності і стабільності параметрів НВЧ резонансних елементів. Проведено оцінку значень добротності різних типів резонаторів НВЧ діапазону, розглянуто характер зміни поверхневого імпедансу нормальнопровідних металів і надпровідників при зниженні температури. Проаналізовано результати, які отримані при дослідженнях таких типів високодобротних НВЧ резонансних систем, як охолоджувані об'ємні резонатори з нормальнопровідних металів, надпровідні об'ємні резонатори (НПР), надпровідні резонатори з діелектричним заповненням, охолоджувані діелектричні резонатори (ОДР), мікрострічкові резонатори (МСР), умови досягнення граничних значень їх основних характеристик, можливості практичного застосування. Проведено огляд використання високотемпературних надпровідників (ВТНП) для створення НВЧ резонансних систем і фільтрів. Проаналізовано результати, які отримані при використанні охолоджуваних і надпровідних резонансних

систем НВЧ діапазону в таких пристроях як фільтри і НВЧ генератори безперервних та імпульсних електромагнітних коливань. Розглянуто вимоги до резонаторних вимірювальних перетворювачів (РВП) для систем мікрохвильової діагностики матеріалів і середовищ.

Основними факторами, що визначають перспективність застосування кріогенних резонаторів, є низький рівень теплових шумів, малі втрати, високі селективні властивості, що на порядки переважають властивості «звичайних» (неохолоджуваних) резонансних елементів, висока стабільність параметрів. З урахуванням цього, основними типами пристроїв, у яких досягається максимальний ефект у результаті використання кріогенних резонансних елементів, будуть пристрої фільтрації і генерації електромагнітних сигналів і коливань.

Однак при вирішенні задачі створення пристроїв НВЧ діапазону на основі високодобротних резонансних елементів, виготовлених з надпровідних матеріалів, необхідно врахувати і оцінити вплив основних негативних факторів, які можуть проявлятися в умовах їхньої практичної експлуатації далеких, як правило, від «теплих» умов експериментів, спрямованих на досягнення граничних параметрів. У першу чергу це фактори, які пов'язані з фізичними процесами, що проявляються при взаємодії надпровідників з електромагнітними полями, які створюються у високодобротних резонансних структурах, негативно впливають на характеристики надпровідників і, як наслідок, на характеристики резонаторів.

З урахуванням проведеного аналізу можливостей і результатів, досягнутих при дослідженнях високодобротних резонансних елементів НВЧ діапазону, можна виділити ряд взаємозалежних перспективних напрямків, у яких їх застосування дає значний вигоду у підвищенні якості електронних та радіотехнічних систем і розширенні можливостей експериментальних досліджень у НВЧ діапазоні.

При розробці фільтруючих пристроїв НВЧ діапазону на основі охолоджуваних резонансних елементів, а також НВЧ генераторів з поліпшеними характеристиками сигналів, головною умовою має стати максимальне використання і збереження переваг кріогенних резонансних елементів у порівнянні з неохолоджуваними і, у першу чергу, високої добротності.

При створенні пристроїв для дослідження, контролю і діагностики різних матеріалів, середовищ і структур умови максимальної початкової добротності РВП і адекватності використовуваної вимірювальної системи є визначальними у досягненні високої чутливості і точності вимірів.

У цьому зв'язку представляється доцільним проведення розробки й дослідження РВП на основі високодобротних резонаторів і НВЧ систем формування інформаційних сигналів для мікрохвильової діагностики електрофізичних параметрів матеріалів і середовищ; дослідження факторів, що обмежують граничні характеристики надпровідних резонансних структур

в умовах їхньої практичної експлуатації; розробки методів побудови НВЧ пристроїв фільтрації і генерації з високодобротними резонансними елементами; розробки і дослідження діючих макетів і прототипів пристроїв на основі високодобротних резонаторів, включаючи розробку методик і експериментальних установок для дослідження як самих пристроїв, так і їхніх елементів.

З урахуванням цього визначено і обґрунтовано основні напрямки досліджень і розробок, зміст яких розкривається в наступних розділах дисертаційної роботи.

Другий розділ дисертації присвячений питанням розробки і дослідження резонаторних вимірювальних перетворювачів для скануючої мікрохвильової мікроскопії (СММ).

Датчики, що використовують як первинний перетворювач резонаторний вимірювальний перетворювач, дозволяють зв'язати зміни їхньої резонансної частоти і добротності зі змінами відповідно нерівності поверхні, діелектричної проникності і тангенса діелектричних втрат досліджуваного об'єкта. Формування інформаційних сигналів у такій системі виконується на основі аналізу вимірюваних значень змін резонансної частоти і добротності РВП. При цьому, чим вище добротність РВП, тим точніше можуть бути обмірені його резонансна частота і добротність, і відповідно, їхні зміни.

Максимальні значення власної добротності звичайно досягаються за допомогою об'ємних НВЧ резонаторів ($\sim 10^3 \dots 10^4$ залежно від виду коливань і використовуваного матеріалу).

Однак необхідно мати на увазі, що наведені оцінки величин добротностей не враховують особливості реальних конструкцій і технології виготовлення резонаторів, які приводять до росту втрат і, відповідно - зниження добротності в порівнянні з ідеальним випадком за рахунок неминучої присутності стикових з'єднань, шорсткості (неідеальної гладкості) робочих поверхонь, наявності мікрODEфектів у реальних робочих поверхнях. Реальні практичні значення добротностей можуть відрізнятися від оцінних у два-три рази навіть при високій якості виготовлення резонаторів.

Функціонально РВП для СММ можна представити у вигляді наступних елементів: резонатора, елементів зв'язку резонатора з вимірювальною схемою, відрізка коаксіальної лінії, що має з однієї сторони елемент зв'язку з резонатором, а з іншого боку – зондову структуру для формування необхідного розподілу поля, взаємодіючого з локальною ділянкою досліджуваного об'єкта. Відповідно характеристики РВП у цілому будуть визначатися параметрами і конструкцією його елементів, а також методами їх сполучення і узгодження.

Таким чином, аналіз і дослідження повинні бути проведені для складених конструкцій РВП, що включають резонаторну частину, зондову структуру, елементи зв'язку з вимірювальною схемою.

Задачами аналізу є:

– визначення умов забезпечення максимальної добротності РВП;

- оцінка впливу конструктивних параметрів елементів зв'язку на передатну функцію і добротність РВП;
- оцінка впливу параметрів об'єкта дослідження на характеристики складених РВП;
- зміни характеристик складених РВП залежно від конструктива і геометрії мікрозондової структури.

Результати аналізу дозволять визначатися з набором можливих варіантів побудови конструкцій РВП і їхніх складових частин.

З урахуванням використання коаксіальної мікрозондової структури для аналізу були обрані:

- РВП на основі резонаторів на видах коливань E_{01n} ;
- РВП на основі конусного чвертьхвильового резонатора;
- РВП на основі призматичних прямокутних резонаторів на видах коливань H_{10n} ;
- РВП на основі циліндричного резонатора на виді коливань H_{011} ;
- РВП на основі нерегулярних коаксіальних структур.

Розробка РВП для СММ проводилася шляхом чисельного моделювання відповідних конструкцій РВП, чисельного аналізу впливу конструктивних, геометричних і зовнішніх (параметри досліджуваного матеріалу) факторів на метрологічні характеристики РВП, наступного виготовлення макета з урахуванням проведених модельних досліджень і експериментального дослідження виготовлених макетів вимірювальних перетворювачів.

У результаті проведених досліджень виявлено, що найбільш перспективними з погляду високої добротності є РВП на основі призматичних прямокутних резонаторів на видах коливань H_{10n} , циліндричних резонаторів на видах коливань H_{011} і нерегулярних коаксіальних структурах, що збуджуються на вищих видах коливань.

На експериментальних зразках РВП на основі регулярних хвильоводних структур (рис. 1,а) отримані добротності: $\sim 1,7 \cdot 10^3$ на частоті 9,89 ГГц і виді коливань H_{103} , $\sim 2,7 \cdot 10^3$ на частоті 35,88 ГГц на виді коливань H_{107} . При експериментальному дослідженні РВП, показаного на рис.1,б на частоті 9,9955 ГГц отримана добротність $\sim 9,52 \cdot 10^3$. Для РВП, наведеного на рис.1,в, отриманий резонанс виду коливань квазі- H_{112} на частоті 9,5 ГГц із добротністю $\sim 4 \cdot 10^3$.

Перевірка працездатності розроблених РВП на макеті СММ показала їхню високу чутливість до змін характеристик (профілю, провідності, діелектричній проникності) об'єктів, що досліджувалися, і підтвердила ефективність запропонованих методів їхньої розробки.

У **третьому розділі** дисертації проводиться аналіз факторів і фізичних процесів, що впливають на отримання граничних характеристик об'ємних НПП, розглядаються особливості функціонування високодобротних НПП при підвищених рівнях потужності, а також характер установа коливань із урахуванням перехідних процесів. Пропонуються методи побудови таких криогенних пристроїв імпульсної техніки як формувачі потужних НВЧ

імпульсів і когерентний накопичувач на основі НПР, аналізуються вимоги, необхідні для їхньої реалізації, пропонуються схемотехнічні рішення таких пристроїв, приводяться результати експериментальних досліджень, аналізуються перспективи і проблеми їхнього практичного застосування.

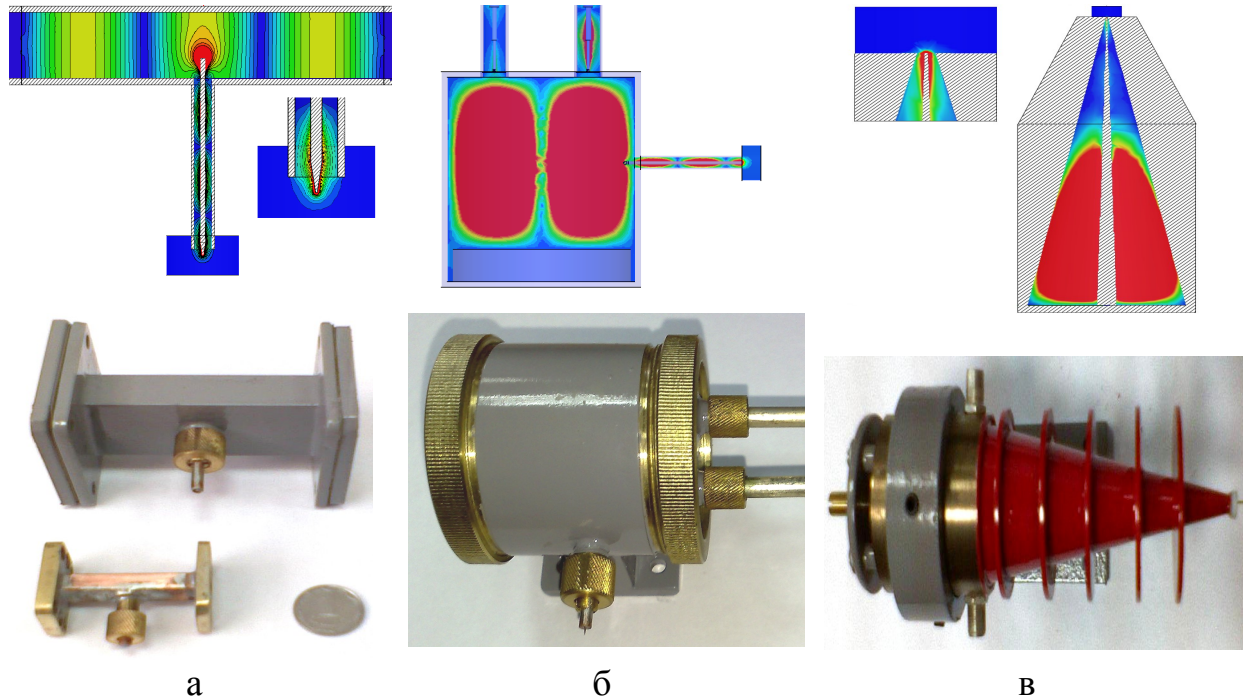


Рис. 1. Структура полів і зовнішній вигляд макетів РВП: а – на основі призматичних прямокутних резонаторів на видах коливань H_{10n} ; б – на основі циліндричного резонатора на виді коливань H_{011} ; в – на основі нерегулярної коаксialьної структури

Для напруженості електричної і магнітної складових полів коливань E_{010} в циліндричному резонаторі можна записати:

$$E_z = A_{010} I_0 \left(\frac{\eta_{01}}{r_0} r \right); \quad H_\phi = -j A_{010} \frac{\omega \varepsilon_0 r_0}{\eta_{01}} I'_0 \left(\frac{\eta_{01}}{r_0} r \right), \quad (1)$$

де A_{010} – амплітудний множник; I_0 і I'_0 – функція Бесселя і похідна функції Бесселя; η_{01} – корінь функції Бесселя; r_0 – радіус резонатора; ω – робоча частота; r – поточна радіальна координата; ε_0 – діелектрична проникність вакууму.

Для амплітудного множника A_{010} у випадку прохідного резонатора можна одержати співвідношення:

$$A_{010} = \sqrt{\frac{4P_{\text{вх}} Q_H \beta_1}{G_{E_{010}} (1 + \beta_1 + \beta_2) \pi r_0 \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left[h + r_0 I_1^2(\eta_{01}) \right]}}, \quad (2)$$

де $P_{\text{вх}}$ – потужність сигналу на вході резонатора; Q_n – навантажена добротність; G – геометричний фактор (для коливань E_{010} – $G = 302$ Ом при $2r_0 = h$, для H_{011} при $2r_0 = h$ – $G = 780$ Ом); h – висота резонатора; β_1, β_2 – коефіцієнти зв'язку резонатора по входу і виходу; μ_0 – магнітна проникність вакууму.

Для коливань H_{011} :

$$\begin{aligned} H_z &= B_{011} I_0 \left(\frac{\mu_{01}}{r_0} r \right) \sin \left(\frac{\pi}{h} z \right); & H_r &= B_{011} \frac{\pi r_0}{h \mu_{01}} I'_0 \left(\frac{\mu_{01}}{r_0} r \right) \cos \left(\frac{\pi}{h} z \right); \\ E_\phi &= j B_{011} \frac{\omega \mu_0 r_0}{\mu_{01}} I'_0 \left(\frac{\mu_{01}}{r_0} r \right) \sin \left(\frac{\pi}{h} z \right), \end{aligned} \quad (3)$$

де μ_{01} – корінь похідної функції Бесселя.

Відповідно для амплітудного множника B_{011} :

$$B_{011} = \sqrt{\frac{4P_{\text{вх}} Q_n \beta_1}{G_{H_{011}} (1 + \beta_1 + \beta_2) \pi r_0 \left[\frac{1}{4} I_0^2(\mu_{01}) h + \frac{\pi r_0^3}{(h \mu_{01})^2} I_1^2(\mu_{01}) \right]}}. \quad (4)$$

Оцінки, проведені за допомогою (1) – (4) для НПР трьохсантиметрового діапазону, показують, що напруженості магнітних і електричних складових досягають значних величин ($10^4 - 10^7$ В/м, $10^3 - 10^6$ А/м) при добротності $10^6 - 10^9$ і порівняно невеликих рівнях потужності вхідного сигналу ($10^{-3} - 1$ Вт). При цьому в НПР починає проявлятися цілий ряд таких небажаних ефектів і явищ, як магнітний, термомагнітний і тепловий пробої, ВЧ розряд у залишковому газі, автоелектронна емісія, електронний резонансний розряд та інші, які ведуть до руйнування надпровідності, і, відповідно, до погіршення параметрів НПР.

Пропонується теоретична модель процесів руйнування надпровідності в об'ємних НПР при великих значеннях електромагнітних полів, на основі якої виконується оцінка впливу на граничні значення параметрів певних ефектів і явищ.

Доведено, що магнітний пробій може початися в НПР при вхідній потужності $\sim 0,1$ Вт, $\beta_1 = \beta_2 = 1$, $Q \sim 10^{10}$. Мікронерівності на поверхні резонатора з радіусом порядку 10^{-6} м (8–10 клас чистоти обробки) можуть привести до розвитку магнітного, термомагнітного пробоїв і автоелектронної емісії при параметрах у кілька разів менших. Низька теплопровідність стінок резонатора або недостатній тепловідвід веде до розвитку термомагнітного пробою при наявності на робочих поверхнях “слабких” місць (наприклад,

при значеннях поверхневого опору для Nb вище ніж $1-7 \cdot 10^{-6}$ Ом навіть при роботі зі надтекучим гелієм, $T_{He} \leq 2,172$ K). Величина поверхневого опору $R'_{сп}$, при якій починається термомагнітний пробій, може бути розрахована за допомогою наступної формули:

$$R'_{сп}(T) \geq \frac{8(T_{кр} - T_{II})}{\left(\frac{d}{k} + R_k\right) H_{кр}^2}, \quad (5)$$

де $T_{кр}$ – температура переходу в надпровідний стан (або, що теж саме, у нормальнопровідний стан); T_{II} – температура надтекучого гелію; d – товщина стінок резонатора; k – теплопровідність матеріалу стінок резонатора; R_k – опір Капіці, що характеризує стрибок температури на границі гелій – метал стінки резонатора; $H_{кр}$ – критичне значення магнітного поля надпровідника.

На рис.2 наведено графік залежності опору надпровідної поверхні від температури переходу в надпровідний стан для ніобієвого резонатора з товщиною стінок $d = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

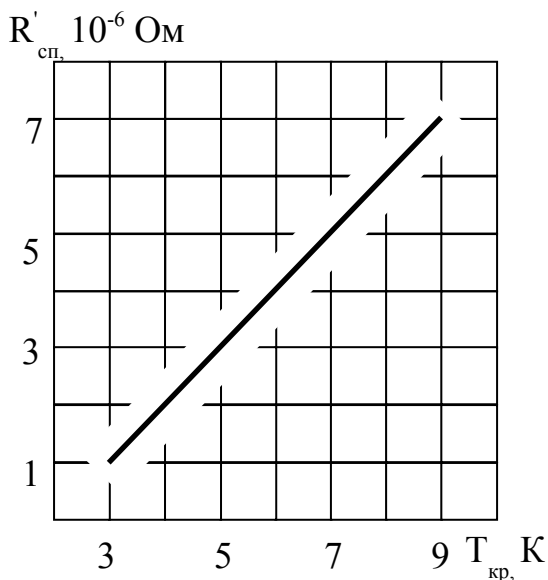


Рис.2

При роботі з добротностями $\sim 10^7 - 10^9$, які досягнуті в охолоджуваних резонаторах при температурах 4,2; 77 K, вхідна потужність, що вводиться в резонатор, може бути збільшена на порядки. Робота в імпульсному режимі також дозволяє на порядки підвищити рівень потужності, що вводиться в резонатор. Реальним є рівень вхідного імпульсного сигналу від одиниць ватт до одиниць кіловатт залежно від параметрів імпульсів і добротності НПР, що виготовляються з таких матеріалів, як Pb, Nb, Nb₃Sn.

Розрахунки за допомогою співвідношень (3) і (4) доводять, що в

НПР можна забезпечити накопичення електромагнітної енергії із щільністю від одиниць до десятків Дж/дм³. Ця якість НПР дозволяє розглянути додаткові можливості їхнього застосування.

Одним з таких застосувань є створення на основі НПР формувачів потужних НВЧ імпульсів. Принцип дії таких формувачів полягає в тому, що за допомогою малопотужного джерела НВЧ коливань робиться накачування НПР електромагнітною енергією, а потім швидко перемикає її в навантаження. Аналіз показує, що коефіцієнт збільшення значення пікової потужності, залежно від швидкодії перемикаючого пристрою, може сягати величин $10^3 - 10^4$, а значення пікової потужності сигналів, які

випромінюються таким формувачем можуть бути в інтервалі від 30 до 10^4 кВт. Найважливішим вузлом такого пристрою, що головним чином визначає параметри формувача НВЧ імпульсів, є криогенний перемикач. У зв'язку із цим, у роботі розглянуті і проаналізовані вимоги до такого перемикача, доведено, що він може бути виконаним тільки на основі газових або електронних розрядників. Розглянуто варіант використання пристроїв на основі поза межних хвильоводів і коаксіальних ліній для створення таких розрядників, які мають переваги в порівнянні з перемикачами інтерференційного типу, запропоновано схемотехнічні рішення формувачів потужних НВЧ імпульсів на основі НПР із такими розрядними пристроями.

Здатність НПР накопичувати і зберігати за рахунок малих втрат електромагнітну енергію дозволяє значно розширити можливості використання, таких пристроїв, наприклад, як “луна”-резонатори. Як показано в роботі, сигнал на виході резонатора при його частоті, рівній резонансній частоті ω_p , може бути описаний співвідношенням:

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{вх}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau \omega_p}{2Q_n}} \right) \cdot e^{-\frac{\omega_p t_1}{Q_n}} \cdot \frac{4\beta_1 \beta_2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)^2}, \quad (6)$$

де τ – тривалість імпульсу; $t_1 = 0$ при $0 < t < \tau$; $t_1 = t - \tau$ при $t > \tau$.

Числові оцінки, проведені за допомогою співвідношення (6) при частоті 10 ГГц і добротності резонаторів 10^5 , 10^6 , 10^7 і 10^8 , показують, що величина сигналу в резонаторі, яка відрізняється від максимального значення не більше ніж на 1 %, може бути досягнута при тривалості імпульсу, рівної, відповідно $2 \cdot 10^{-5}$, $1,8 \cdot 10^{-4}$, $2 \cdot 10^{-3}$ і $2 \cdot 10^{-2}$ с. У цей же час зменшення сигналу, що випромінюється з резонатора після припинення імпульсу, до величин 10^{-3} – 10^{-4} від максимального значення відбудеться протягом інтервалів часу $1 \cdot 10^{-5}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$ і $1 \cdot 10^{-2}$ с відповідно. Для $\tau \sim 4 \cdot 10^{-6}$ с, $P_{\text{вх}} = 10^3$ Вт, $Q_n = 10^7$, $\beta_1 = \beta_2 = 1$, $f = 10$ ГГц вихідна потужність сигналу резонатора після 10^{-3} с із часу закінчення імпульсу складе $\sim 10^{-4}$ Вт. При використанні підсилювача для вихідного сигналу резонатора величини τ і $P_{\text{вх}}$ можуть бути зменшені. Стабільність частоти випромінюваного сигналу визначається стабільністю параметрів НПР.

Експериментальне дослідження режиму імпульсного накачування НПР відбувалося на частоті 9450 МГц, навантаженої добротності НПР $\sim 10^7$, вхідної потужності $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ Вт, тривалості імпульсів $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$ с. При цьому зменшення амплітуди сигналу в 10 разів фіксувалося через $3 \cdot 10^{-4}$ с послі закінчення імпульсу.

На основі аналізу результатів, отриманих у третьому розділі, можна зробити такі висновки:

- здатність НПР зберігати накопичену енергію протягом часу $\sim Q_n/\omega_p$ дозволяє створювати на їхній основі пристрої формування потужних НВЧ імпульсів, а також джерела гетеродинних когерентних сигналів;
- головною проблемою реалізації формувачів потужних імпульсів на НПР є створення швидкодіючого низькотемпературного перемикача;
- низькотемпературний перемикаючий пристрій може бути побудований з використанням розрядників, увімкнених у відрізки коаксіальних ліній;
- формувачі потужних НВЧ імпульсів на основі НПР можуть стати базовими пристроями при створенні перспективних РЛС із потужними зондувальними імпульсами наносекундної тривалості, а також активних засобів радіоелектронної боротьби.

У четвертому розділі розглядаються питання, що пов'язані з розробкою і дослідженням НВЧ генераторів з поліпшеними спектральними характеристиками сигналів.

Як показують оцінки, за допомогою НПР можна забезпечити зниження потужності шумів (насамперед, частотних) у спектрі сигналу генераторів НВЧ коливань на 80-100 дБ при високій довгостроковій стабільності частоти. Для дослідження таких квазімонохроматичних сигналів пропонується ряд методів виміру їх спектральних характеристик.

В основу запропонованих методів покладено використання високих коефіцієнтів перетворення частотних флуктуацій НВЧ сигналу в амплітудні або у фазові, які забезпечуються за рахунок високої крутизни амплітудно-частотних (АЧХ) і фазочастотних (ФЧХ) характеристик високودобротних кріогенних резонаторів. Ріст коефіцієнтів перетворення, як і чутливості вимірів, визначається при цьому добротністю резонатора і може сягати декількох порядків.

Доведено, що використання кріогенних резонаторів у відомих методах частотного і фазового детектування у НВЧ діапазоні дозволяє значно підвищити чутливість виміру частотних флуктуацій (в $Q_{кр}/Q_{зр}$ раз, де $Q_{кр}$, $Q_{зр}$ – добротності кріогенного і звичайного резонаторів).

Пропонуються вимірювальні схеми з перетворювачами частоти на основі кріогенних резонаторів, у яких здійснюється перенесення флуктуацій частоти НВЧ діапазону в низькочастотний діапазон без використання додаткового високостабільного гетеродинного НВЧ генератора. При цьому використовується ефект порушення автоколивань у замкнутому ланцюзі елементів, які настроєні на різні частоти, при виконанні амплітудних і фазових умов самозбудження. Це забезпечує перенесення частотних флуктуацій зі НВЧ діапазону на низькі частоти з коефіцієнтом перетворення, близьким до одиниці в широкому діапазоні аналізованих частот, або з коефіцієнтом перетворення значно більшим одиниці у вузькій смузі частот, що визначається смугою пропускання резонатора, використаного при вимірах.

Розрізненість і неадекватність експериментальних даних, які були отримані раніше, вимагали проведення коректних порівняльних експериментальних досліджень спектральних характеристик різних систем стабілізації частоти НВЧ генераторів з НПР. Коректність здійснених досліджень полягає в тому, що в різних системах стабілізації частоти різних джерел НВЧ коливань використаний той же самий надпровідний резонатор, а

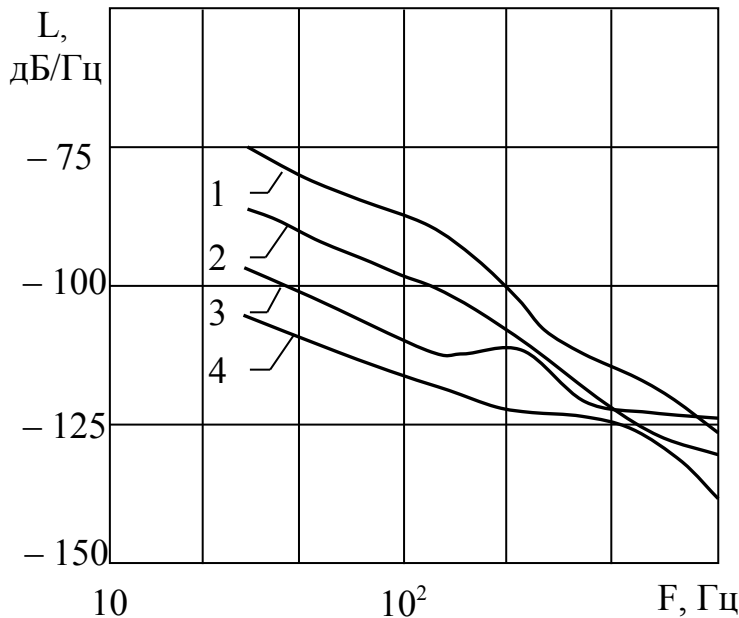


Рис. 3

виміри виконувалися на одній і тій же установці одним методом. На рис.3 наведено результати експериментальних досліджень спектральних характеристик відбивного клістрона, стабілізованого методом затягування частоти (крива 1), автогенератора на ЛБХ з НПР у ланцюзі зворотного зв'язку (крива 2) і відбивного клістрона, стабілізованого системою АПЧ з НПР (крива 3). Надпровідний резонатор, що був використаний для

стабілізації частоти, збуджувався на виді коливань H_{011} , мав навантажену добротність $\sim 10^7$ при робочій температурі 4,2 К. Вимір частотних флуктуацій здійснювався за допомогою методу прямого частотного детектування. НПР із перебудовою частоти і $Q_n \sim 10^7$ використовувався як частотний дискримінатор. Такий дискримінатор забезпечував чутливість вимірів $\sim -(130 - 150)$ дБ/Гц на частотах аналізу 20–1000 Гц. Відношення потужності частотної шумової складової в одній бічній смузі до потужності несучої частоти складало для клістрона, стабілізованого методом затягування частоти $-(75 - 130)$ дБ/Гц, автогенератора на ЛБХ з НПР $-(90 - 135)$ дБ/Гц, клістрона, стабілізованого АПЧ з НПР $-(95 - 120)$ дБ/Гц на частотах аналізу від 30 до 10^3 Гц. Зниження частотних шумів порівняно із шумами генераторів НВЧ, стабілізованих системами зі звичайними резонаторами, становить ~ 30 –40 дБ, що, однак ще далеко від теоретичних оцінок. Очевидно, у даних випадках була досягнута межа, яка обумовлена амплітудними шумами генераторів, що досліджувалися, для зменшення яких ніяких додаткових заходів не приймалося.

Аналіз результатів, отриманих при експериментальному дослідженні систем стабілізації частоти НВЧ генераторів з НПР (рис.3), привів до необхідності проведення додаткових досліджень, які спрямовані, по-перше, на перевірку впливу на граничні значення шумів в енергетичному спектрі сигналу стабілізованого НВЧ генератора їх амплітудних складових, а, по-

друге, на реалізацію можливості одержання в одному стабілізованому НВЧ генераторі мінімальних значень ЧМ шумів, які досягаються за допомогою різних систем стабілізації.

Для цього були проведені дослідження спектральних характеристик відбивного клістрона, стабілізованого одночасно системою стабілізації частоти методом затягування з НПР і системою АПЧ з НПР. Отримані значення (рис.3, крива 4) свідчать, що дійсно, граничні величини зниження шумів в енергетичному спектрі генератора визначаються амплітудними шумами, а не потенційними можливостями систем стабілізації. Однак, було досягнуто додаткове зниження частотних шумів порівняно з окремими системами стабілізації. Це дозволяє вважати варіант подвійної стабілізації частоти досить продуктивним у плані зниження частотних шумів. Для спрощення схемного рішення системи подвійної стабілізації було запропоновано простіше рішення, що дозволяє використовувати один резонатор, збуджуючи його на різних видах коливань.

На основі проведених досліджень була розроблена конструкція високостабільного НВЧ генератора зі зниженими частотними шумами для макета доплерівського вимірювача, що мала в спорядженому стані вагу ~ 45 кг і розміщала на рухливій частині антенної системи. Частотні шуми генератора на частотах 30 – 1000 Гц були знижені на $\sim 30\text{--}40$ дБ порівняно з аналогом, що використовувався раніше. Виміри здійснені на доплерівському макеті показали зростання його потенціалу, обмежене вже не ЧМ шумами генератора, що задає значення частоти, а власними шумами приймального пристрою. Якщо на вході приймальної частини поставити вузькосмуговий режекторний фільтр, розробка і параметри якого описані у п'ятому розділі, то характеристики такого доплеровського вимірювача можуть бути додатково значно підвищені.

П'ятий розділ присвячено питанням розробки принципів і методів побудови фільтруючих пристроїв НВЧ діапазону на основі високодобротних резонансних елементів.

Аналіз, який проведено у п'ятому розділі показує, що за допомогою кінцево увімкненого резонатора можливе забезпечення високих режекторних характеристик:

$$L = 10 \lg \left\{ 1 - \frac{4\beta}{(1 + \beta)^2} \left[\frac{1}{1 + Q_H^2 (2d\omega / \omega_0)^2} \right] \right\}, \text{ дБ}, \quad (7)$$

де L – придушення сигналу; β – коефіцієнт зв'язку; $d\omega$ – відхилення частоти сигналу від частоти резонатора ω_0 .

Однак, із (7) витікає, що для забезпечення режекції ~ -50 дБ необхідно, щоб величина β була близька до одиниці з точністю до $\pm 0,5\%$, а відхилення частоти $d\omega$ не перевищувало $0,002\Delta\omega_0$, де $\Delta\omega_0$ – напівширина смуги пропуску

резонатора, тобто значно зростають вимоги до пристроїв настроювання зв'язку і стабільності частоти режесуємого НВЧ сигналу. У кріогенному варіанті ці вимоги ще жорсткіші, тому що зростають як добротність, так і складність технічної реалізації. Крім того, традиційні засоби підключення кінцевого резонатора до передавальної лінії ведуть до значного погіршення його характеристик.

Запропонований метод синтезу режесуємних фільтрів на основі хвилевідно-коаксіальних структур дозволяє, якоюсь мірою, вирішити проблему ввімкнення до передавальної лінії високодобротних режесуємих НВЧ елементів. Його основою є використання тонкого центрального штиря як елемента зв'язку передавальної хвилеводної лінії з високодобротним резонансним елементом коаксіального або хвилеводного типу. Отримані в роботі співвідношення, які описують запропоновані пристрої як систему зв'язаних резонансних і передавальних НВЧ елементів, показують можливість досягнення значень режесує ~ -60 дБ на центральній частоті настроювання при смузі режесує на рівні -3 дБ порядку декількох десятків МГц у неохолоджуваному варіанті, що підтверджується проведеними експериментальними дослідженнями макетів цих пристроїв, виготовлених з урахуванням запропонованих рішень. Розроблені пристрої становлять інтерес і в неохолоджуваному варіанті, хоча їхнє впровадження обмежується невеликими рівнями режесуємих сигналів, оскільки наявність у хвилеводі центрального штиря веде до зниження його електричної стійкості.

Можливості вузькосмугової фільтрації, які надають одноконтурні фільтри з характеристиками кінцево включеного резонатора (7), найбільш повно реалізуються в запропонованих в роботі системах з амплітудно-фазовою компенсацією. При цьому використовується підключення резонатора до передавальної лінії за допомогою феритового циркулятора, а компенсація сигналу, що безпосередньо просочується із входу пристрою на

його вихід (для масових феритових циркуляторів ця величина порядку 20 дБ від вхідного сигналу), здійснюється шляхом відгалуження і перетворення частини сигналу із входу пристрою, або використанням частини сигналу, відбитого від кінцево включеного резонатора (рис.4). Цифрами на рис.4 позначені: 1 – джерело НВЧ коливань; 2 – феритовий циркулятор; 3 – резонатор; 4 – навантаження; 5 – атенюатор, що перебудовується; 6 – фазообертач, що перебудовується; 7 – пристрій перебудови зв'язку.

Експериментальною перевіркою запропонованих принципів побудови

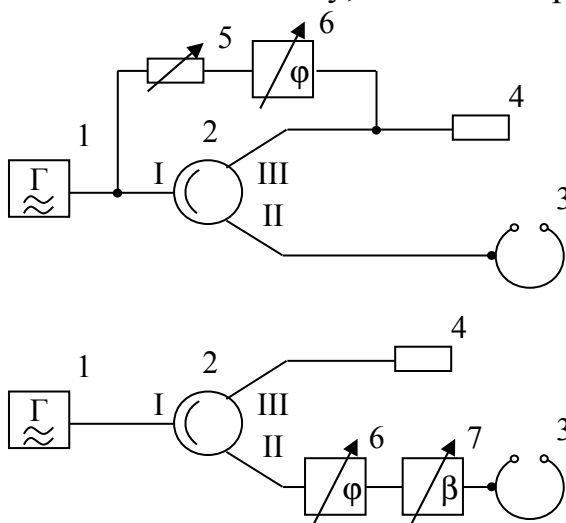


Рис.4

режектуючих пристроїв доведена можливість досягнення величин режекції ~ -95 дБ на частоті настроювання 3, 30, 50 і 60 дБ у смугах $4 \cdot 10^6$, $1,5 \cdot 10^5$, $1,6 \cdot 10^4$ і $8 \cdot 10^3$ Гц при навантаженій добротності резонатора $3 \cdot 10^3$.

Для реалізації запропонованого пристрою в кріогенному варіанті з використанням НПР були проведені дослідження зі створення низькотемпературного регульованого пристрою зв'язку на основі нерегулярного позамежного хвилеводу, що забезпечував регулювання зв'язку з точністю не гірше $\sim 0,1\%$, а також розроблена схема вимірювальної установки для дослідження фільтрів з НПР.

Експериментально була отримана величина режекції на частоті настроювання (9450 МГц) фільтра ~ -90 дБ і 3, 30, 50 і 60 дБ у смугах $2 \dots 3 \cdot 10^3$, $1,5 \cdot 10^2$, 16 і 8 Гц при навантаженій добротності НПР $\sim 3 \cdot 10^6$. Нестабільність частоти настроювання фільтра склала $\sim 10^{-9}$. У конструкції фільтра була передбачена можливість перебудови частоти в межах декількох десятків МГц. На частоті ~ 7 ГГц подібний фільтр забезпечував послаблення сигналу ~ 90 дБ і 3, 30, 50 і 60 дБ у смугах $1,5 \cdot 10^3$, 60, 9 і 3 Гц відповідно, при навантаженій добротності $\sim 6 \cdot 10^6$.

Такі режекторні фільтри можуть бути застосовані для фільтрації вузькосмугових перешкод на вході приймальних пристроїв, корекції спектральних характеристик випромінюваних НВЧ сигналів, а також для формування спектрів сигналів у вимірювальних радіотехнічних системах. Одночасно при цьому їх вузькосмуговість має потребу в додаткових, досить жорстких вимогах до стабільності частоти завади, що послабляється, або сигналу, що корегується ($d\omega \sim 0,002\Delta\omega_0$). Ця проблема може бути вирішена як шляхом використання стабільних джерел НВЧ коливань, включаючи стабілізовані за допомогою кріогенних резонаторів, так і з використанням систем автоматичного настроювання частоти резонатора на частоту сигналу, що режектується.

Одним із прикладів можливого застосування режектуючих пристроїв на основі високодобротних резонаторів є рішення задачі мінімізації сигналу несучої частоти, що попадає на вхід приймача РЛС безперервного випромінювання в результаті неповної розв'язки передавальної і приймальної антен і відбиття від близько розташованих нерухливих і малорухомих об'єктів при послабленні сигналів на доплерівських частотах не більше ніж на 3-10 дБ.

У п'ятому розділі пропонується також метод формування АЧХ одиночних високодобротних резонансних фільтрів, що заснований на розгляді процесів формування АЧХ в об'ємних резонаторах як суперпозиції великої кількості додавань коливань. Вираження для такого процесу у випадку одномірного напівхвильового резонатора буде виглядати так:

$$S(t, f) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n e^{-(n+1-k)\alpha} \cos \frac{2\pi k l p}{\lambda} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n e^{-(n+1-k)\alpha} \cos \frac{2\pi k f}{f_p}. \quad (8)$$

де α – постійна загасання, що характеризує втрати в сигналі за час одного коливання хвилі в резонаторі; λ – довжина хвилі у вільному просторі або у хвилеводі, на основі якого побудований резонатор; λ_p , f_p – резонансні довжина хвилі і частота; n – загальна кількість коливань і додавань коливань, які можуть складатися в резонаторі (залежить від його добротності).

Типове графічне зображення цього процесу в певний момент часу показане на рис.5.

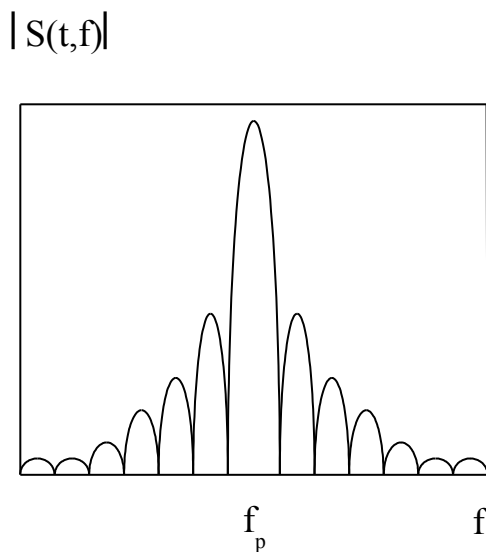


Рис. 5

Час устанавлення коливань у резонаторі залежить від його добротності ($\tau \sim Q/\omega_p$). Протягом перехідного процесу кількість максимумів збільшується, амплітуда центрального максимуму зростає, бічних максимумів зменшується. АЧХ такого резонатора сприймається як обгинаюча функції $S(t, f)$. Такий розгляд підкреслює, що в процесі встановлення коливань у резонаторах більшу роль грають фазові умови, які, у свою чергу, залежать від характеру відбиття електромагнітної хвилі від поверхонь резонатора. У реальних резонаторах, які мають за рахунок шорсткуватих поверхонь стінок неідеальну форму, завдяки великій кількості складних коливань цей процес буде носити статистичний характер. При цьому з'являється можливість впливати на форму функції, що обгинає, $S(t, f)$ певним характером профілювання поверхні

резонатора.

Такий підхід дозволяє формувати задану АЧХ одиночного високодобротного резонатора, при значному спрощенні конструкції такого фільтруючого пристрою, однак він має потребу в додатковій експериментальній перевірці.

У шостому розділі визначаються основні проблеми на шляху мініатюризації кріоелектронних пристроїв, у тому числі і тих з них, у яких використовуються резонансні елементи. Виявляється, що однією із проблем є недостатня дослідженість електрофізичних характеристик діелектричних матеріалів при низьких температурах, що, у свою чергу, тісно пов'язано із проблемою відсутності досить ефективних методик проведення цих

досліджень. У зв'язку із цим пропонуються методики, що засновані на використанні кріогенних резонансних структур, які дозволяють проводити такі дослідження у НВЧ діапазоні. Приводяться результати експериментального дослідження електрофізичних характеристик низки діелектриків при низьких температурах з використанням експериментальних установок, що побудовані на основі запропонованих методик. Аналізуються особливості створення мікροстрічкових надпровідних НВЧ елементів; експериментально досліджуються макетні прототипи надпровідних ліній затримки, мікροстрічкових резонаторів (МСР), пристроїв захисту від потужних електромагнітних імпульсів. Аналізуються перспективи і напрямки розвитку розробок мініатюрних охолоджуваних кріоелектронних пристроїв.

За допомогою надпровідних об'ємних резонаторів, охолоджуваних і надпровідних мікροстрічкових резонаторів проведено дослідження високочастотних втрат діелектриків при низьких температурах на частотах 1 і 10 ГГц.

Для досліджень були вибрані такі матеріали, як фторопласт, полікор (алюмооксидна кераміка, 99,7% Al_2O_3), лейкосапфір (монокристалічна окис алюмінію) і ситал СТ 32-1.

У результаті досліджень отримано: для фторопласта – $\epsilon \sim 1,95$ і $\text{tg } \delta \sim 3,56 \cdot 10^{-5}$; $3,2 \cdot 10^{-5}$ при 4,2; 1,7 К на частоті ~ 10 ГГц; для полікора – $\epsilon \sim 10,8$ і $\text{tg } \delta \sim 8,27 \cdot 10^{-5}$; $5,72 \cdot 10^{-5}$ при 4,2; 1,7 К на частоті ~ 10 ГГц; $\epsilon \sim 10,5$ і $\text{tg } \delta \sim 2,6 \cdot 10^{-5}$; $1,5 \cdot 10^{-5}$ при 4,2; 1,8 К на частоті ~ 1 ГГц; для лейкосапфіра – $\epsilon \sim 9,5$ і $\text{tg } \delta \sim 7 \cdot 10^{-6}$; $3,5 \cdot 10^{-6}$ при 4,2; 1,7 К на частоті ~ 10 ГГц.

При дослідженнях був виявлений ефект аномальної залежності тангенса кута діелектричних втрат ситала СТ 32-1 при зниженні температури. На частоті ~ 10 ГГц $\text{tg } \delta$ при зниженні температури до 100–70 К спочатку зменшується від значення $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-4} , а потім зростає до величин $\sim 1,38 \cdot 10^{-2}$ і $3,71 \cdot 10^{-2}$ при 4,2 і 1,7 К; на частоті ~ 1 ГГц характер змін такий: $1,3 \cdot 10^{-4}$; $1,6 \cdot 10^{-3}$; $1,4 \cdot 10^{-3}$; $2,3 \cdot 10^{-3}$ при 293; 77; 20,4; 4,2 К. Питання щодо фізичного характеру таких змін у втратах залишається відкритим.

Отримані результати дали можливість вибору полікору як підкладки при виготовленні прототипів кріогенних мікροстрічкових НВЧ пристроїв. На досліджених макетах напівхвильових мікροстрічкових резонаторів були отримані добротності $\sim 3 \dots 7 \cdot 10^4$, а для макетів меандрових мікροстрічкових ліній – затримки сигналу ~ 10 нс, втрати $\sim 2 \dots 4$ дБ на частоті ~ 1 ГГц і довжині лінії $\sim 1,2$ м. Удосконалювання технології і конструкцій мікροстрічкових охолоджуваних пристроїв дозволяє сподіватися на значне поліпшення їхніх характеристик.

Для експериментальної оцінки можливостей створення захисного пристрою як об'єкт дослідження була обрана копланарна лінія (КПЛ) з меандровою топологією, виконана на основі малодфектної плівки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на підкладці Al_2O_3 . Проведені оцінки показують, що вже при

рівнях потужності порядку 10^{-3} Вт може починатися процес проникнення в плівку ВТНП абрикосовських вихорів, утворених НВЧ полем, а, отже, можуть проявлятися нелінійні ефекти і формуватися області зниженої провідності. На рис. 6 наведені результати зміни загасання в лінії при зміні імпульсної входної потужності від 10^{-3} до 10^{-1} Вт. Видно, що зі збільшенням вихідної потужності до 200 мВт (точка 1) втрати в структурі практично не міняються. Збільшення $P_{\text{вх}}$ до 350 мВт (точка 2) приводить до росту втрат ΔL майже у два рази, що можна зв'язати з руйнуванням надпровідності в самій КПЛ НВЧ струмом. Подальше збільшення $P_{\text{вх}}$ до значення 1080 мВт (точка 3) приводить до досить різкої зміни втрат у КПЛ (до 20 разів).

Результати проведених у шостому розділі досліджень і розробок доводять, що говорити про створення практичних складних інтегральних

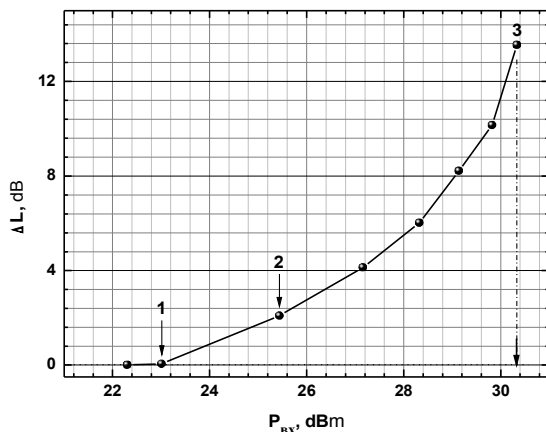


Рис. 6

також ефективно використані при високочутливих дослідженнях інших матеріалів.

У **сьомому розділі** проведено аналіз особливостей функціонування систем формування первинних інформаційних сигналів скануючої мікрохвильової мікроскопії (СММ), наведено результати досліджень різних варіантів систем. Аналізуються також можливості побудови компенсаційних систем при використанні РВП для діагностики матеріалів з великими втратами.

У СММ на основі резонаторних мікрозондів сигнали сканування формуються з фундаментальних сигналів вимірювальної інформації РВП, які проявляються через зміни його добротності δQ і резонансної частоти δf при скануванні об'єкта.

Для цього використовуються різні схеми включення РВП у НВЧ тракт (на прохід або відбиття), а також різні способи виділення зазначених змін.

У ході виконання роботи були апробовані різні варіанти формування сигналів сканування, які розрізняються функціонуванням НВЧ пристрою СММ і післядетекторною обробкою.

кріоелектронних схем НВЧ діапазону зараз передчасно, але створення та удосконалення пристроїв типу надпровідних мікстрічкових резонаторів, фільтрів, ліній передачі, захисних пристроїв від потужних електромагнітних імпульсів і ліній затримки є задачею сьогодення. Апробовані експериментальні методи і розроблені вимірювальні установки, які призначені для дослідження електрофізичних характеристик діелектриків при низьких температурах можуть бути

У результаті проведених досліджень перспективною була визначена система формування інформаційних сигналів, у якій використовується АПЧ вимірювального НВЧ генератора по РВП із частотною модуляцією НВЧ генератора. При цьому, як показано в роботі, при її функціонуванні після детектування на частоті модуляції і подвоєній частоті модуляції формуються сигнали, що містять інформацію про зміни резонансної частоти δf і добротності δQ РВП при його взаємодії з досліджуванним об'єктом.

При цьому сигнал сканування, що пов'язаний з $\delta f/f_0$, виділяється у вигляді сигналу помилки після фазового детектора.

Величина його в загальному випадку визначається співвідношенням

$$\frac{\delta f}{f_0} \cong \frac{\delta f_a}{f_0} \cong \frac{\delta U(\delta f_0) \chi S}{f_0}, \quad (9)$$

де $\delta U(\delta f_0)$ – напруга сигналу помилки, що використовується для підстроювання частоти вимірювального генератора; S – крутість перебудови частоти вимірювального генератора.

При $Q_{n1} \sim Q_{n2}$ або $\delta Q_n \ll Q_{n1}, Q_{n2}$

$$\frac{\delta U_a^{2\Omega}}{U_a^{2\Omega}} \approx \frac{2\delta Q_i}{Q_{i1}} \quad \text{або} \quad \frac{\delta Q_i}{Q_{i1}} \approx \frac{\delta U_a^{2\Omega}}{2U_a^{2\Omega}}. \quad (10)$$

Величину відносної зміни добротності також, як для $\delta f/f_0$ (9), можна нормувати по каліброваній зміні добротності для еталонного об'єкта дослідження.

Особливістю розглянутої схеми формування сигналів є те, що автопідстроювання частоти вимірювального НВЧ генератора і робота в режимі підтримання його частоти рівної резонансної частоті РВП дають можливість знизити вплив на інформаційний сигнал шумів, обумовлених частотними флуктуаціями генератора, а використання інформаційного сигналу на частоті 2Ω дозволяє зменшити складову шуму детектора, пропорційну $1/f$, а селективне посилення – смугу посилюваних шумів.

У результаті взаємодії електромагнітних полів РВП або безпосередньо з об'єктом, що тестується, або за допомогою елементів зв'язку, його добротність, особливо у випадку тестування об'єктів з досить високими втратами, значно зменшується, що веде до зменшення чутливості і точності при вимірі відповідних змін.

Зазначену проблему можна вирішити за допомогою використання активних резонаторів хвилі, що біжить (АРБХ), що являють собою схему кільцевого резонатора біжучої хвилі, у якій крім чутливого вимірювального резонатора ввімкнені додаткові елементи, що забезпечують односпрямоване поширення хвилі і додаткове її посилення з метою компенсації втрат, які внесені вимірювальним резонатором.

Для ослаблення впливу характеристик резонансного підсилювача на АЧХ АРБХ і збереження більш сильного зв'язку характеристик РВП і АРБХ кращим уявляється використання в схемі РБХ нерезонансного підсилювача.

У цьому випадку АЧХ РБХ може бути представлена виразом:

$$E(f) = \sum_k e^{-\alpha l k} \cdot (K)^k \cdot \left[\frac{4\beta_1\beta_2}{(1+\beta_1+\beta_2)^2} \right]^k \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{2Q_n(f-f_0)}{f_0} \right]^2}} \right]^k \times \cos \left[\frac{2\pi k l}{\lambda_s(f)} + k \cdot \arctg \left[\frac{2Q_n(f-f_0)}{f_0} \right] + k \cdot \varphi_{yc} \right]. \quad (11)$$

де φ_{yc} – зрушення фази сигналу в підсилювачі (в ідеальному випадку $\varphi_{yc} = 2\pi f\tau$, (τ – час затримки сигналу в підсилювачі)).

Графіки АЧХ АРБХ для даного випадку наведено на рис.7 і рис.8.

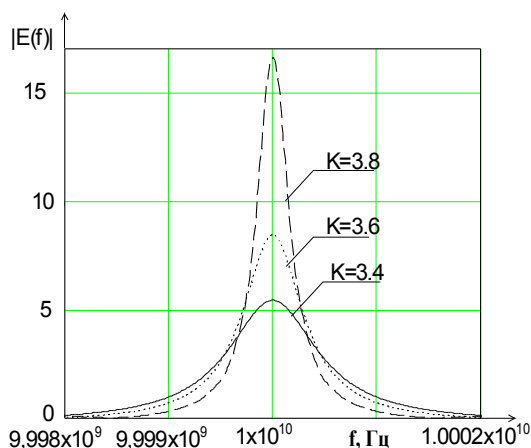


Рис. 7. Залежність АЧХ АРБХ від К нерезонансного підсилювача при $\varphi_{yc} = 0$

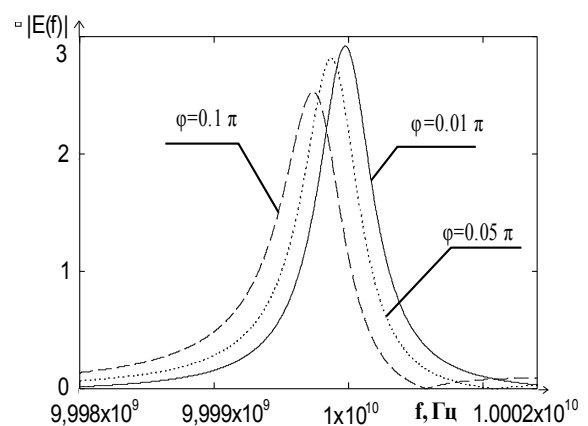


Рис. 8. Залежність АЧХ АРБХ від різних величин набігу фази в нерезонансному підсилювачі

Характер зміни форми АЧХ АРБХ при зростанні коефіцієнта підсилення нерезонансного підсилювача підтверджує збільшення еквівалентної добротності АРБХ зі збільшенням коефіцієнта підсилення. При цьому вплив параметрів РВП на еквівалентну характеристику залишається визначальним.

Компенсаційні схеми на основі АРБХ відкривають можливості створення високочутливих вимірювальних систем НВЧ діапазону для дослідження матеріалів з великими втратами, а також радіаційних датчиків на основі РВП з високоомними напівпровідниками типу CdTe і CdZnTe.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішена проблема розробки основ створення мікрохвильових пристроїв на базі високодобротних резонансних елементів, що дозволяє розширити їхні функціональні можливості і забезпечити більш ефективне використання для якісного поліпшення селективних властивостей, спектральних характеристик НВЧ сигналів і чутливості вимірів.

У рамках поставленої мети і рішення зазначеної проблеми виконані наступні наукові дослідження і розробки:

1. Проведено системний теоретичний і експериментальний аналіз реальних можливостей різних типів високодобротних резонансних елементів НВЧ діапазону і пристроїв на їхній основі з метою визначення найбільш перспективних напрямків їхньої побудови і використання.

2. Розроблено критерії оцінки реальних можливостей різних типів високодобротних резонансних систем у досягненні максимальної добротності і стабільності резонансної частоти з урахуванням фізичних, технологічних і конструктивних обмежень. Показано, що при умовах виготовлення і експлуатації охолоджуваних і надпровідних резонансних систем НВЧ діапазону на технічному рівні, доступному для широкого застосування ($T \sim 4,2; 77 \text{ K}$), забезпечується досягнення достатньо високих значень добротності ($10^5 - 10^9$) і величин ТКЧ ($10^{-6} - 10^{-9} \text{ K}^{-1}$). Аналіз можливостей використання НПР на підвищених рівнях потужності показує, що при забезпеченні якісного тепловідводу від стінок резонаторів і високій якості надпровідних поверхонь у них можна вводити сигнали потужністю до 1 кВт (при $Q \sim 10^7$) і накопичувати електромагнітну енергію до рівнів від 0,6 до декількох десятків Дж/дм³ залежно від застосовуваного надпровідного матеріалу. Це підтверджує можливість забезпечення високих селективних і еталонних характеристик високодобротних резонаторів при реально доступних у практичних пристроях умовах експлуатації.

3. Запропоновано методи побудови імпульсних кріогенних НВЧ пристроїв, розроблено схемні рішення генераторів потужних НВЧ імпульсів на основі високодобротних резонаторів як накопичувачів електромагнітної енергії, визначено вимоги до кріогенних перемикачів для забезпечення малих втрат у режимі накопичення енергії і малого тепловиділення в режимі виводу енергії в навантаження; експериментально досліджено схему гетеродина на основі когерентного накопичувача на НПР, що дозволяє забезпечити збереження сигналу генератора протягом часу до 10^{-3} с після його закінчення. Формувачі потужних імпульсів НВЧ з НПР як накопичувачі енергії можуть послужити основою для створення високоекономічних генераторів потужних зондувальних імпульсів у когерентно-імпульсних системах, а також систем радіоелектронної боротьби з радіотехнічними засобами.

4. Проведено порівняльний експериментальний аналіз різних систем стабілізації частоти за допомогою високодобротних резонаторів з метою оцінки їхніх можливостей у поліпшенні спектральних характеристик НВЧ сигналу. Показано, що взагалі може бути забезпечено зниження частотних шумів на величину 80–100 дБ, однак амплітудні шуми обмежують це значення величиною 30–40 дБ. На основі експериментально отриманих результатів розроблені практичні конструкції високостабільних генераторів з рівнем частотних шумів, знижених на 30–40 дБ на частотах, що лежать у діапазоні 30-1000 Гц від несучої.

5. Розроблено методи дослідження спектральних характеристик квазімонохроматичних сигналів високостабільних НВЧ генераторів, засновані на використанні високодобротних резонаторів, які дозволяють вимірювати ЧМ шуми біля несучої частоти сигналу ($F_M \sim 10 - 1000$ Гц) із чутливістю до 150 дБ/Гц і вище.

6. Запропоновано методи синтезу смугових і загороджувальних пристроїв НВЧ діапазону з високодобротними резонансними елементами, розроблено ряд конструкцій і схемних рішень режекторних НВЧ фільтрів, на основі яких створено практичні пристрої з унікальними параметрами (глибина режекції ≥ 90 дБ, смуги режекції $(1 - 10) \cdot 10^3$ Гц, робоча частота ~ 10 ГГц).

7. На прикладі доплерівської РЛС безперервного випромінювання проведено аналіз можливостей використання розроблених пристроїв для поліпшення основних характеристик. Показано, що рухливі цілі, що мають дозвукові радіальні швидкості, можуть бути виявлені при ЕПР, зменшених на порядки, підвищується розрізнення тонкої структури доплерівського спектра. Використання НВЧ генератора з поліпшеними спектральними характеристиками приводить до підвищення потенціалу доплерівського вимірника до рівня, що обмежується вже тільки шумами приймального пристрою; спільна експлуатація такого генератора і режекторного фільтра на основі НПП дозволяє відродити одноантенний варіант безперервного доплерівського радіолокатора. При цьому відкривається перспектива в створенні систем виявлення, які дозволяють ідентифікувати цілі, які мають надзвичайно малі ЕПР і малі радіальні швидкості, не тільки по основному сигналу, відбитому від цілі, але й по вторинним доплерівським складовим, включаючи й збурювання навколишнього середовища, створені об'єктом, що рухається.

8. За рахунок використання високодобротних резонаторів і високостабільних вимірювальних НВЧ генераторів чутливість резонансного методу дослідження діелектричних і напівпровідникових матеріалів підвищена на кілька порядків. Розроблено методики і проведено експериментальні дослідження високочастотних характеристик ряду діелектриків (фторопласт, полікор, лейкосапфір, ситал СТ 32-1) при низьких температурах, виміряно зниження величини $\text{tg} \delta$ при охолодженні

фторопласта, полікора і лейкосапфіра до температур кипіння рідкого гелію на один-два порядки, до значень $\sim 10^{-6}$, виявлено аномальний хід температурної залежності величини $\operatorname{tg} \delta$ СТ 32-1 на частотах 1 і 10 ГГц; $\operatorname{tg} \delta$ зі зниженням температури хвилеподібно зростає і при глибокому охолодженні перевищує значення $\operatorname{tg} \delta$ при кімнатній температурі на один-два порядки (це свідчить про неприпустимість використання ситалу СТ 32-1, що широко застосовується при виготовленні інтегральних схем у мікроелектроніці при низьких температурах).

9. Опрацьовано теоретично і експериментально методи створення високодобротних РВП для мікрохвильової діагностики матеріалів і середовищ. Розроблено і досліджено кілька різних практичних реалізацій РВП з мікрозондовими структурами.

10. Запропоновано і обґрунтовано концепцію побудови резонаторних вимірювальних перетворювачів на основі використання схем складених резонаторів біжучоївилі з активними елементами, що відкриває шлях до створення високочутливих вимірювальних перетворювачів для дослідження резонаторними методами матеріалів з великими втратами (наприклад, різних біооб'єктів) і вимірювальних високочутливих датчиків на основі високоомних напівпровідників (наприклад, радіаційних датчиків).

11. Запропоновано, розроблено і досліджено системи формування сигналів вимірювальної інформації в пристроях з резонаторними вимірювальними перетворювачами, що дозволяють проводити одночасний вимір основних інформаційних сигналів. Розроблені системи на сьогодні стали базовими при проведенні вимірів методами ближньопольової мікрохвильової мікроскопії в ХНУРЕ.

12. Проведено теоретичні і експериментальні дослідження мікрохвильових пристроїв на основі високодобротних планарних структур, що спрямовані на створення мікрострічкових охолоджуваних і надпровідних ліній затримки і резонаторів, а також пристроїв захисту від потужних електромагнітних імпульсів, на макетах отримані затримки сигналів ~ 10 нс при довжині лінії $\sim 1,2$ м і загасанні $\sim 2 \dots 4$ дБ на частоті 1 ГГц, а також добротність МСР $\sim 1 \dots 6 \cdot 10^4$. Результати, отримані при дослідженні мікрохвильових пристроїв на основі високодобротних планарних структур, визначають напрямки їхнього практичного використання і створюють базу для подальших перспективних розробок.

13. Розроблені і досліджені в ході виконання роботи схемотехнічні реалізації напівпровідникових НВЧ генераторів з розширеними можливостями по механічній і електричній перебудові частоти ($\Delta f_{\text{мех}} \sim 1 \dots 1,3$ ГГц, $\Delta f_{\text{ел}_1} \sim 300$ МГц, $\Delta f_{\text{ел}_2} \sim 100$ МГц) можуть бути використані як активні елементи в електронних системах різного призначення.

Розроблені і запропоновані до розробки пристрої і системи можуть знайти широке застосування в різних галузях науки і техніки.

Високостабільні генератори і режекторні фільтри НВЧ можуть бути застосовані для вдосконалювання і підвищення завадозахищеності навігаційних систем і систем зв'язку. Методи дослідження спектрів квазімонохроматичних НВЧ сигналів можуть бути використані при вивченні таких типів високостабільних джерел НВЧ коливань як квантові генератори.

Надпровідні резонатори в сполученні з високостабільними НВЧ генераторами є високочутливим інструментом для дослідження високочастотних характеристик діелектричних і напівпровідникових матеріалів при низьких і наднизьких температурах, прецизійних вимірів змін цих характеристик при різних зовнішніх впливах (магнітні поля, різні випромінювання, температура, електричний струм і т.п.), що, у свою чергу, може стати основою для вивчення фізичних процесів, які протікають у твердих тілах і дати інформацію про їхню структуру та її зміну при впливі збурювань.

Розроблені системи формування інформаційних сигналів разом з високочастотними РВП дозволяють підвищити чутливість і роздільну здатність вимірів при контролі електрофізичних параметрів напівпровідників і діелектриків методами скануючої мікрохвильової мікроскопії.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бондаренко, И.Н. Исследование спектральных характеристик СВЧ генераторов, стабилизированных сверхпроводящими резонаторами / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь, Ф.Ф. Менде // Электронная техника. Сер.1. – 1982. – № 1 (337). – С. 13–16.
2. Бондаренко, И.Н. Режекторные фильтры СВЧ с амплитудно-фазовой компенсацией / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь, В.В. Покусай // Радиотехника. Респ. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков. – 1984. Вып.71. – С. 104–109.
3. Бондаренко, И.Н. Регулируемые элементы связи на основе за-
предельных волноводов / И.Н. Бондаренко, Н.О. Гнесь, А.С. Гнесь // Радиотехника. Респ. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков. – 1986. – Вып.76. – С. 114–119.
4. Бондаренко, И.Н. Сверхпроводящий режекторный фильтр СВЧ диапазона / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь // Радиотехника. Респ. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков. – 1987. – Вып.82. – С. 124–130.
5. Бондаренко, И.Н. Измерение высокочастотных характеристик диэлектриков с помощью сверхпроводящих резонаторов / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь // В сб. «Низкотемпературные процессы и системы». – К.: Наук. думка. – 1987. – С. 39–45.
6. Бондаренко, И.Н. Режекторные фильтры СВЧ на основе волноводно-коаксиальных структур / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь, Н.О. Гнесь // Радиотехника. Респ. межвед. научн.-техн. сб. – Харьков. – 1989. – Вып.89. – С. 77–81.

7. Бондаренко, И.Н. Криогенные резонаторы в доплеровских РЛС непрерывного излучения / И.Н. Бондаренко // Збірник наукових праць. – Харків, ХВУ. – 1999. – Вип.4 (26). – С. 17–26.
8. Бондаренко, И.Н. Исследование диэлектриков с помощью охлаждаемых микрополосковых резонаторов / И.Н. Бондаренко // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 1999. – Вып.112. – С. 62–66.
9. Бондаренко, И.Н. Основные факторы, ограничивающие предельные значения электромагнитных полей в сверхпроводящих резонаторах / И.Н. Бондаренко // Вісник Харківського національного університету. № 467. Радіофізика та електроніка. – 2000. – Вип.1. – С. 124–135.
10. Бондаренко, И.Н. Криогенные резонаторы в системах измерения частотных флуктуаций высокостабильных СВЧ генераторов / И.Н. Бондаренко // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2000. – Вып.113. – С. 53–57.
11. Бондаренко, И.Н. Накопление электромагнитной энергии в сверхпроводящем резонаторе / И.Н. Бондаренко // Збірник наукових праць. – Харків, ХВУ. – 2000. – Вип.2 (28) – С. 24–29.
12. Бондаренко, И.Н. Волноводные головки для полупроводниковых СВЧ генераторов / И.Н. Бондаренко // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2000. – Вып.115. – С. 100–103.
13. Бондаренко, И.Н. Формирование когерентного сигнала с помощью высокодобротных криогенных резонаторов / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2001. – Вып.121. – С. 106–108.
14. Бондаренко, И.Н. Уточнение формы резонансной кривой резонаторов стоячих волн / И.Н. Бондаренко // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2003. – Вып.131. – С. 83–87.
15. Бондаренко, И.Н. О некоторых возможностях формирования амплитудно-частотной характеристики в объемных резонаторах стоячих волн / И.Н. Бондаренко // Радиоэлектроника и информатика. – 2003. – №4. – С. 15–18.
16. Бондаренко, И.Н. Измерение сдвигов резонансной частоты и изменений добротности СВЧ резонаторов с помощью ЧМ сигналов / И.Н. Бондаренко // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2003. – Вып. 132. – С. 46–52.
17. Бондаренко, И.Н. Генерация мощных СВЧ импульсов с помощью устройств на основе сверхпроводящих резонаторов / И.Н. Бондаренко // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2003. – Вып.135. – С. 32–37.
18. Бондаренко, И.Н. Перспективы использования криогеники для совершенствования систем связи / И.Н. Бондаренко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2003. – №3. – С. 73–79.

19. Бондаренко, И.Н. Влияние переходных процессов и микрорельефа поверхности на формирование АЧХ высокочастотных резонаторов стоячих волн / И.Н. Бондаренко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2003. – №4. – С. 6–11.

20. Bondarenko, I.N. Investigation of the Thin-Film High-Temperature Superconductivity Coplanar Line / I.N. Bondarenko, A.A. Lavrinovich // Telecommunications and Radio Engineering. Begell Hous, Inc., NY, (USA). – 2007. – Vol.66, N7. – P. 597–605.

21. Бондаренко, И.Н. Формирование сигналов сканирования в микроволновой микроскопии с резонаторным микрозондом / И.Н. Бондаренко, Ю.Е. Гордиенко, С.Ю. Ларкин // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2009. – Вып. 158. – С. 59–67.

22. Бондаренко, И.Н. Компенсация вносимых потерь в резонаторах бегущей волны с активными элементами / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, О.Н. Ткаченко // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2010. – Вып. 160. – С. 295–301.

23. Бондаренко, И.Н. Применение системы АПЧ измерительного генератора в микроволновой сканирующей микроскопии / И.Н. Бондаренко, Ю.Е. Гордиенко, С.Ю. Ларкин // Радиоэлектроника и информатика. – 2009. – № 3. – С. 3–6.

24. Бондаренко И.Н. Измеритель АЧХ элементов СВЧ тракта мм диапазона / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.С. Жижирий, А.Л. Ищенко // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2010. – Вып. 161. – С. 183–187.

25. Бондаренко, И.Н. Измерительные преобразователи на основе резонансных волноводных регулярных структур / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа, Троицкий С.И. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. – 2011. – Вып. 167. – С. 129–134.

26. Бондаренко, И.Н. Измерительный преобразователь на основе цилиндрического резонатора на виде колебаний H_{011} / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.А. Камышан, Троицкий С.И. // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 2 – С. 3–5.

27. Бондаренко, И.Н. Высокодобротный коаксиальный нерегулярный резонаторный измерительный преобразователь / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2012. – Вып. 168. – С. 108–112.

28. А.с. № 450543 СССР, МКИ Н 03 b 3/04, Н 01 p 1/16. Высокочастотный генератор / Менде Ф.Ф., Пренцлау Н.Н., Трубицын А.В., Бондаренко И.Н., Иевенко И.Б. (СССР). – № 1841989; заявлено 30.09.72; зарегистр. 19.07.74.

29. А.с. № 930694 СССР, МКИ Н 03 L 7/00. Устройство автоподстройки частоты сверхвысокочастотного генератора / Бондаренко И.Н., Гнесь А.С., Менде Ф.Ф. (СССР). – № 2992306/18; заявлено 10.10.80; опубл. 23.05.82, бюл. № 19. – 3 с.

30. А.с. № 1069587 СССР. Генератор СВЧ импульсов / Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Гнесь А.С. (СССР). – № 3277281; Заявлено 09.04.81, Зарегистр. 22.08.83.

31. А.с. № 1102463 СССР. Генератор СВЧ импульсов / Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Гнесь А.С. (СССР). – № 3276701; Заявлено 09.04.81, Зарегистр. 07.03.84.

32. А.с. № 1478931 СССР, МКИ Н 01 Р 5/04. Устройство регулировки связи для сверхпроводящего объемного резонатора / Бондаренко И.Н., Гнесь А.С. (СССР). – № 4123034; заявл. 24.08.86; зарегистр. 08.01.89.

33. Бондаренко, И.Н. Исследование свойств диэлектриков и полупроводников с помощью охлаждаемых и сверхпроводящих резонаторов / И.Н. Бондаренко, Ф.Ф. Менде // Физико-технический институт низких температур АН УССР. – Харьков, 1980. – 72 с. Деп. в ВИНТИ 19.03.80, № 1062-80.

34. Бондаренко, И.Н. Измерение высокочастотных характеристик диэлектриков при низких температурах с помощью микрополосковых резонаторов / И.Н. Бондаренко, В.Г. Чурилов // Физико-технический институт низких температур АН УССР. – Харьков, 1988. – 9 с. Деп. в ВИНТИ 27.01.88, № 775–В88.

35. Бондаренко, И.Н. Исследование охлаждаемых микрополосковых линий задержки / И.Н. Бондаренко, В.Г. Чурилов // Физико-технический институт низких температур АН УССР. – Харьков, 1988. – 14 с. Деп. в ВИНТИ 27.01.88, № 776–В88.

36. Бондаренко, И.Н. Волноводные диодные головки для полупроводниковых СВЧ генераторов с механической и электрической перестройкой частоты / И.Н. Бондаренко // Физико-технический институт низких температур АН УССР. – Харьков, 1988. – 20 с. Деп. в ВИНТИ 26.10.88, № 7678–В88.

37. Бондаренко, И.Н. Прецизионные измерительные СВЧ генераторы со сверхпроводящими резонаторами / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь, Ф.Ф. Менде, Н.Ф. Рыбалка // Труды 21 Всесоюзного совещания по физике низких температур. – Харьков, 1980. – Ч.4. – С. 229–230.

38. Бондаренко, И.Н. Измерение высокочастотных характеристик диэлектриков с помощью сверхпроводящих резонаторов / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь, В.В. Покусай, А.П. Полуяненко // Труды Всесоюзного совещания «Квантовая метрология и фундаментальные физические константы». – Ленинград, 1982. – С. 263–264.

39. Бондаренко, И.Н. Измерение СВЧ потерь в диэлектриках при гелиевых температурах / И.Н. Бондаренко, А.С. Гнесь, В.В. Покусай // Труды XXI Международной конференции стран-членов СЭВ по физике и технике низких температур. – Варна, НРБ, 1983. – С. 451–452.

40. Бондаренко, И.Н. Сверхпроводящие резонаторы в схемах измерения спектральных характеристик маломощных СВЧ генераторов / И.Н. Бондаренко // Труды Всесоюзного совещания «Маломощные генераторы

СВЧ. Состояние разработок и перспективы применения в метрологии». – Иркутск. – 1991. – С. 55–56.

41. Бондаренко, И.Н. Об использовании криогенных резонаторов для снижения ЧМ шумов в СВЧ генераторах / И.Н. Бондаренко // Труды Всесоюзного совещания «Малошумящие генераторы СВЧ. Состояние разработок и перспективы применения в метрологии». – Иркутск. – 1991. – С. 57–58.

42. Бондаренко, И.Н. О некоторых возможностях совершенствования доплеровских РЛС непрерывного излучения с помощью криогенных резонаторов / И.Н. Бондаренко // Труды Междунар. конф. «Современная радиолокация» – Киев. – 1994. – С.39–40.

43. Бондаренко, И.Н. Оценка факторов, влияющих на характеристики СВЧ линий передачи на основе высокотемпературных сверхпроводников / И.Н. Бондаренко – Материалы 1 Международной научн. конф. «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития» - Харьков–Туапсе. – 2006. – С. 519–520.

44. Бондаренко, И.Н. Анализ уменьшения потерь в основных типах планарных линий передачи СВЧ при глубоком охлаждении / И.Н. Бондаренко – Сб. материалов 2-й международной конференции «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», Харьков–Туапсе. – 2007. – С. 32–33.

45. Бондаренко, И.Н. Системы формирования информационных сигналов в резонаторной микроволновой микроскопии / И.Н. Бондаренко, Ю.Е. Гордиенко, С.Ю. Ларкин // Материалы 19 Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина. – 2009. – С. 563–564.

46. Бондаренко, И.Н. Компенсационные свойства резонаторов бегущей волны с активными элементами / И.Н. Бондаренко, О.Н. Ткаченко // Материалы 19 Международной Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина. – 2009. – С. 795–796.

47. Бондаренко, И.Н. Резонансный измерительный преобразователь в схеме резонатора бегущей волны с активным элементом / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, О.Н. Ткаченко // Сб. научн. трудов 2 Международной научн. конф. «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития», Харьков–Кацивели. – 2009. – С. 181–182.

48. Бондаренко И.Н. Свойства охлаждаемых и сверхпроводящих линейных планарных структур микроволнового диапазона / И.Н. Бондаренко // Материалы 20 Международной Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина. – 2010. – С. 691–692.

49. Бондаренко, И.Н. Устройство контроля параметров микроволновых резонаторов / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.С. Жижирий, А.Л. Ищенко // Материалы 20 Международной Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина. – 2010. – С. 969–970.

50. Бондаренко, И.Н. Защитное устройство микроволнового диапазона на основе сверхпроводящей планарной линии передачи / И.Н. Бондаренко // Сб. научн. трудов 3 Международной научн. конф. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники», Харьков–Кацивели. – 2010. – С. 309–313.

51. Бондаренко, И.Н. Коаксиальный резонаторный измерительный преобразователь на виде колебаний H_{01n} / И.Н. Бондаренко, Е.Е. Рострипа // Сб. научн. трудов 3 Международной научн. конф. «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники», Харьков–Кацивели. – 2010. – С. 313–315.

52. Бондаренко, И.Н. Анализ характеристик резонаторного измерительного преобразователя для сканирующего микроволнового микроскопа / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа // Материалы 21 Международной Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина. – 2011. – С. 665–666.

53. Бондаренко, И.Н. Резонаторные измерительные преобразователи на основе регулярных волноводов / И.Н. Бондаренко, Ю.С. Васильев, А.М. Проказа // Сб. научн. трудов 4 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Кацивели. – 2011. – С. 241–244.

54. Бондаренко, И.Н. Высокодобротный резонаторный измерительный преобразователь на основе нерегулярной коаксиальной структуры / И.Н. Бондаренко, А.В. Галич // Сб. научн. трудов 4 Международной научн. конф. «Функциональная база наноэлектроники», Кацивели. – 2011. – С. 245–247.

АНОТАЦІЯ

Бондаренко І.М. Основи створення пристроїв мікрохвильової техніки на базі високодобротних резонансних елементів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012.

В дисертації вирішена проблема розробки основ створення мікрохвильових пристроїв на базі високодобротних резонансних елементів, що дозволить розширити їх функціональні можливості та забезпечити більш ефективне використання для якісного поліпшення вибірових властивостей, спектральних характеристик НВЧ сигналів і чутливості вимірювань.

Запропоновано, розроблено і досліджено резонансні вимірювальні перетворювачі на основі високодобротних резонаторів та системи формування інформаційних сигналів мікрохвильової діагностики матеріалів і середовищ.

Запропоновано методи синтезу загороджувальних і смугопропускних пристроїв НВЧ діапазону з високодобротними резонансними елементами.

Обґрунтована концепція створення формувачів когерентних імпульсних сигналів на основі надпровідних структур.

Запропоновано і обґрунтовано напрямки вдосконалення вимірювальних систем для аналізу частотних флуктуацій квазімонохроматичних сигналів мікрохвильового діапазону.

Теоретично і експериментально обґрунтовано можливості використання охолоджуваних планарних структур для побудови мініатюрних мікрохвильових пристроїв різного призначення.

Ключові слова: резонансний вимірювальний перетворювач, мікрохвильовий, надпровідний, високодобротний, резонатор, фільтр, генератор.

АННОТАЦИЯ

Бондаренко И.Н. Основы создания устройств микроволновой техники на базе высокодобротных резонансных элементов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012.

В диссертации решена проблема разработки основ создания микроволновых устройств на базе высокодобротных резонансных элементов, что позволит расширить их функциональные возможности и обеспечить более эффективное использование для качественного улучшения избирательных свойств, спектральных характеристик СВЧ сигналов и чувствительности измерений.

Предложены, разработаны и исследованы резонансные измерительные преобразователи на основе высокодобротных резонаторов и системы формирования информационных сигналов для микроволновой диагностики материалов и сред.

Предложена и обоснована концепция построения резонаторных измерительных преобразователей, которая открывает путь для исследования резонаторными методами материалов с большими потерями и созданию измерительных высокочувствительных датчиков на основе высокоомных полупроводников.

Предложены методы синтеза заграждающих и полоснопропускающих устройств СВЧ диапазона с высокодобротными резонансными элементами, разработан и исследован ряд конструкций и схемных решений режекторных СВЧ фильтров.

Сравнительные экспериментальные исследования различных систем стабилизации частоты СВЧ генераторов с помощью высокочастотных сверхпроводящих резонаторов позволили выявить специфический для каждой системы характер улучшения спектра сигнала генератора и предложить новые направления совершенствования систем стабилизации.

Теоретически и экспериментально обоснована концепция создания формирователей когерентных импульсных сигналов на основе сверхпроводящих структур.

Проработаны теоретически и экспериментально возможности использования охлаждаемых планарных структур для построения миниатюрных микроволновых устройств.

Проведены экспериментальные исследования, предложены и обоснованы направления совершенствования измерительных систем для анализа частотных флуктуаций квазимонохроматических сигналов микроволнового диапазона.

Экспериментально обоснованы возможности использования сверхпроводящих объемных и микрополосковых резонаторов для высокочувствительных измерений электрофизических характеристик диэлектрических материалов с малыми потерями.

Ключевые слова: резонансный измерительный преобразователь, микроволновый, сверхпроводящий, высокочастотный, резонатор, фильтр, генератор.

ABSTRACT

Bondarenko I.N. Foundations of microwave devices creation based on high-Q resonant elements. – Manuscript.

Doctoral thesis of physico-mathematical sciences on specialty 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, 2012.

The problem of working out of creation principles of microwave devices on high-Q resonant elements that will allow to expand their functionality and to provide more effective utilisation for qualitative improvement of selective properties, spectral characteristics of microwave signals and sensitivity of measurements was solved in the dissertation.

Resonant measuring converters on a high-Q cavities basis and system for formation of information signals of microwave diagnostics of materials and environments are offered, developed and investigated.

Methods of synthesis band-stop and band-pass microwave devices with high-Q resonant elements are proposed.

The concept of creation of shapers of coherent pulse signals on the basis of superconducting structures is proved.

Directions of improvement of measuring systems for the analysis of frequency fluctuations of quasi-monochromatic microwave signals are proposed and proved.

Possibilities of use of cooled planar structures for construction of tiny microwave devices of different function are theoretically and experimentally proved.

Keywords: resonant measuring converter, microwave, superconducting, high-Q, cavity, filter, oscillator.