

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

**БАРАННИК ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК. 537.86

**КВАЗІОПТИЧНІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ РЕЗОНАТОРИ З ЕЛЕМЕНТАМИ  
НЕЗВИЧАЙНИХ НАДПРОВІДНИКІВ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертація на правах рукопису

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

**Науковий консультант:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Черпак Микола Тимофійович**  
Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків,  
провідний науковий співробітник відділу  
радіофізики твердого тіла

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Айзацький Микола Іванович**  
Науково-дослідний комплекс НДК  
"Прискорювач" Національного наукового  
центру "Харківський фізико-технічний  
інститут" НАН України, м. Харків,  
заступник директора з наукової роботи

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Бондаренко Ігор Миколайович**  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, м. Харків,  
завідувач кафедри мікроелектроніки,  
електронних приладів та пристроїв

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Маслов Вячеслав Олександрович**  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна, м. Харків,  
завідувач кафедри квантової радіофізики

Захист відбудеться "06" лютого 2020 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

Автореферат розісланий "28" грудня 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Мікрохвильова радіофізика надпровідників становить науковий напрям, в якому нероздільними є як фундаментальні дослідження надпровідників в мікрохвильових полях, так і розвиток наукових підходів до створення нових, унікальних радіофізичних пристроїв і приладів. Особливої актуальності цей напрям набув після відкриття в 1986 р. явища високотемпературної надпровідності в купратних металооксидах-речовинах, які стали називатися високотемпературними надпровідниками (ВТНП) [1]. Найбільш відомим ВТНП став  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  – перше з'єднання з критичною температурою  $T_c$ , яка перевищує температуру кипіння рідкого азоту 77 К [2]. Ця особливість викликала великий інтерес не тільки у фізиків, включаючи радіофізиків, але також у інженерів-розробників мікрохвильової техніки [3-5]. Унікальність явища надпровідності в цих речовинах і низці нових речовин з відносно високою критичною температурою викликала безпрецедентну активність дослідників, що працюють у різних галузях науки, спрямовану на встановлення природи цього унікального явища, котре, як показав аналіз численних експериментальних досліджень, уже не могло знайти пояснення в рамках створеної раніше мікроскопічної теорії Бардіна-Купера-Шриффера (БКШ) (див., наприклад, [6]).

Відкриття нової групи надпровідних речовин-пніктидів і халькогенідів з досить високою  $T_c$ , незвичайність яких підкреслювалася також наявністю магнітних іонів Fe, викликало нову хвилю активних досліджень, що пояснюється очевидною близькістю низки їх фізичних властивостей до властивостей купратів, у яких іони Fe відсутні. Це давало перспективу глибшого розуміння фізики незвичайної надпровідності в напрямку порівняння властивостей різних груп надпровідників, які отримали загальну назву незвичайних (див. наприклад, [7, 8]).

Велика розмаїтість методів досліджень ВТНП і інших речовин, які разом з ВТНП утворюють сімейство незвичайних надпровідників, і їх технічної реалізації викликала специфічну проблему сумісності результатів вимірювань, отриманих різними методами, при дослідженні одних і тих же речовин і явищ в них [9-15]. Серед найбільш надійних методів дослідження незвичайних надпровідників є мікрохвильові методи [3, 4, 5]. З двох мікрохвильових методів, заснованих, відповідно, на використанні резонаторів і ліній передачі, перевага віддається резонаторним методам, коли пріоритетом в дослідженнях стає вивчення фізичних властивостей надпровідників з надійними кількісними характеристиками [16]. В силу специфіки відгуку надпровідників на мікрохвильові поля чутливість мікрохвильових методів зростає з ростом частоти, тому актуальним частотним діапазоном в мікрохвильовій радіофізиці надпровідників стає міліметровий (мм) діапазон довжин хвиль [17].

Найважливішою електродинамічною характеристикою всіх резонаторів є добротність  $Q$ , яка залежить від усіх втрат мікрохвильової енергії в резонаторній

структурі, а саме, від втрат в провідних елементах, в діелектриках та втрат на випромінювання в навколишній простір (радіаційні втрати). У резонаторі, як складовій частині мікрохвильових структур, мають місце також втрати в елементах зв'язку. З ростом частоти парціальні втрати всіх видів резонаторів з основними типами коливань (мод) зростають. При цьому, при збільшенні робочої частоти необхідно зменшувати розміри резонаторів, тому на частотах вище 25 ГГц застосування таких резонаторів значно ускладнюється [17].

Прогрес радіофізики в діапазоні мм і субміліметрових (субмм) довжин хвиль безпосередньо пов'язаний з розвитком відповідних наукових і технічних підходів, приладів і технологій. Досвід роботи з квазіоптичними технологіями дає можливість розвивати техніку пасивних і активних елементів мм і субмм діапазонів довжин хвиль на основі високодобротних квазіоптичних резонаторів типу Фабрі-Перо [20\*]. Діелектричні резонатори, що збуджуються на вищих модах типу шепочучої галереї (ШГ), також є квазіоптичними пристроями [18, 19]. Квазіоптичні діелектричні резонатори (КДР) можуть: 1) містити провідні елементи, які є досліджуваними зразками, при цьому не містити інші провідні елементи; 2) бути виготовленими із діелектричних монокристалів з гранично малим значенням тангенса кута втрат ( $10^{-7}$  у лейкосапфіра в 8-мм діапазоні довжин хвиль при температурі 77 К) [20]; 3) мати низький рівень радіаційних втрат [21].

Перспективність застосування КДР з хвилями типу ШГ для дослідження мікрохвильових імпедансних властивостей надпровідників була показана на прикладі КДР Хаккі-Коллемана в низці робіт за участю автора [22]. Однак для проведення фундаментальних мікрохвильових досліджень незвичайних надпровідників актуальними стали питання створення КДР, призначених для дослідження індивідуальних властивостей плівок великої площі (на відміну від КДР Хаккі-Коллемана), а також монокристалів або плівок малих розмірів. Для створення таких резонаторів необхідним стає подальше дослідження електродинамічних властивостей КДР відповідної форми і особливостей мікрохвильового відгуку КДР з елементами надпровідника.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертаційну роботу виконано у відділі радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України відповідно до планів наступних НДР:

– «Дослідження регулярних і стохастичних явищ, які обумовлені взаємодією електромагнітних хвиль і потоків заряджених частинок з речовиною», шифр «Кентавр-3» (2002-2006 р.), № державної реєстрації 0103U002260);

– «Дослідження лінійних та нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених часток», шифр «Кентавр-4» (2007-2011 р.), № державної реєстрації 0106U011978;

– «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами», шифр «Кентавр-5» (2012-2016 р), № Державної реєстрації 0112U000211;

– «Дослідження взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з наноструктурами та метаматеріалами», шифр «Кентавр-6» (2017-2021 р), № Державної реєстрації 0117U004038;

– «Дослідження поверхневого імпедансу ВТНП плівок в мм діапазоні хвиль за допомогою сапфірового квазіоптичного конічного резонатора» (шифр «Конус», № державної реєстрації 0107U003984).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток основ електродинаміки КДР з елементами незвичайних надпровідників в мм діапазоні хвиль, обґрунтування можливості дослідження фізичних властивостей плівок і монокристалів незвичайних надпровідників з використанням мікрохвильового відгуку КДР і встановлення властивостей поверхневого імпедансу низки незвичайних надпровідників, які містять залізо.

Для досягнення мети даної роботи необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити спектральні та енергетичні характеристики КДР з елементами незвичайних надпровідників, а саме напівсферичного, конічного і асферичного КДР, що дозволяють локалізувати електромагнітне (ЕМ) поле поблизу торцевої поверхні, які є досліджуваними зразками, а також у формі диска з радіальною щілиною і досліджуваним зразком в ній.

2. Провести дослідження мікрохвильового відгуку КДР з елементами незвичайних надпровідників в залежності від температури і показати на цій основі можливість експериментального дослідження поверхневого імпедансу незвичайних надпровідників.

3. Провести дослідження фізичних властивостей незвичайних надпровідників з використанням мікрохвильового відгуку КДР, в тому числі незвичайних надпровідників малих розмірів, які містять залізо.

*Об'єкт дослідження* – коливальні процеси в квазіоптичних діелектричних резонаторах з незвичайними надпровідниками і взаємодія електромагнітного поля мод шепочучої галереї з незвичайними надпровідниками в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

*Предмет дослідження* – моди шепочучої галереї і мікрохвильовий відгук квазіоптичних діелектричних резонаторів з елементами незвичайних надпровідників, які характеризуються поверхневим імпедансом у міліметровому діапазоні довжин хвиль.

**Методи досліджень.** У роботі використовуються радіофізичні методи визначення відгуку квазіоптичних діелектричних резонаторів з елементами незвичайних надпровідників. Спектральні та енергетичні характеристики структур визначалися за амплітудно-частотною характеристикою резонаторної структури, що вимірювалася, і проведенням чисельним моделюванням

резонансних структур за допомогою програм CST Microwave Studio і Comsol MULTIPHYSICS. В даних програмах реалізовано розв'язання рівнянь Максвелла методом кінцевих елементів. Результати чисельних і експериментальних досліджень добре збігаються, що свідчить про достовірність отриманих результатів.

### **Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному**

1. Вперше отримано електродинамічні характеристики низки нових КДР з торцевими провідними стінками, а саме напівсферичного, конічного і асферичних КДР, які лягли в основу структур, що дозволили провести дослідження індивідуальних мікрохвильових імпедансних характеристик плівок високотемпературних надпровідників. Виявлено, що залишковий поверхневий опір епітаксильної  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  плівки має частотну залежність  $\omega^{3/2}$ , при цьому експерименти підтверджують наявність  $d$ -хвильової симетрії параметра порядку надпровідника.

2. Вперше отримано електродинамічні характеристики, включаючи радіаційні втрати, дискового КДР з малим надпровідним зразком в радіальній щілині, який є основою структури, що дозволила провести дослідження незвичайних надпровідників малих розмірів з використанням мікрохвильового відгуку КДР в мм діапазоні довжин хвиль.

3. Встановлено особливості температурної залежності мікрохвильового поверхневого імпедансу і комплексної провідності незвичайних надпровідників, що містять залізо:

3.1. Вперше досліджено мікрохвильові імпедансні властивості монокристалів пніктиду  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  в 8-мм діапазоні довжин хвиль; при цьому отримано температурні залежності комплексної провідності, глибини проникнення і часу квазічастинкового розсіювання.

3.2. Вперше виявлено ефект орієнтації плівки надпровідника складу  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$  щодо мікрохвильового поля в діелектричному резонаторі з  $\text{TE}_{011}$  модою на температурній залежності добротності резонатора.

3.3. Шляхом комплексного дослідження (двочастотний підхід, різні склади незвичайних надпровідників, широкий температурний інтервал, включаючи критичну температуру  $T_c$ ) імпедансних властивостей і комплексної провідності пніктиду  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  встановлено, що квазічастинкова провідність зростає зі зниженням температури, що обумовлено різким зниженням швидкості розсіювання квазічастинок.

4. Вперше запропоновано і реалізовано мікрохвильові пристрої на основі плівок високотемпературних надпровідників:

- Мікросмужковий резонатор з хвилями ШГ, локалізованими під диском надпровідника, розташованого на діелектричній підкладці;
- смугопроникний фільтр з Е-площинною вставкою в хрестоподібному хвилеводі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Вся сукупність основних результатів по дослідженню електродинамічних особливостей КДР із надпровідними елементами, техніці зв'язку з ними і її регулюванню в криогенних умовах, вибору оптимальних мод в умовах складного спектру КДР і відкритості електродинамічної структури складає основу техніки вимірювання поверхневого імпедансу незвичайних надпровідників, що має важливе значення не тільки для фундаментальної науки, а й для створення мікрохвильових пристроїв на основі КДР і надпровідників.

Запропоновані, досліджені і реалізовані в роботі КДР з надпровідними елементами становлять основну частину сенсорів поверхневого імпедансу незвичайних надпровідників у мм діапазоні довжин хвиль, які дозволяють знаходити фундаментальні властивості електронної системи незвичайних надпровідників за допомогою вимірювань мікрохвильового відгуку КДР з надпровідними елементами в залежності від температури.

Запропоновані нові модифікації КДР можуть бути використані для вимірювання безконтактним методом провідності надтонких провідних плівок нанометрової товщини. Цей підхід може стати перспективним при розробці апаратури для безконтактного тестування і моніторингу зазначених плівок.

Мікросмужковий КДР на основі плівки високотемпературних надпровідників (ВТНП) має певну перспективу для створення планарних структур міліметрового діапазону довжин хвиль.

Смугопропускний фільтр з Е-площинною ВТНП вставкою в хрестоподібному хвилеводі може бути використаним у вхідних лініях передачі високочутливих мікрохвильових приймальних систем, а також/або в колах зворотного зв'язку генераторів з низьким рівнем фазових шумів.

**Особистий внесок здобувача.** Публікації, які складають основу дисертаційної роботи, виконано у співавторстві. Автор брав участь у постановці задач і проведенні експериментальних досліджень, в створенні моделей для чисельного розрахунку резонаторних структур, а також в проведенні чисельних досліджень, аналізі та обговоренні отриманих результатів, написанні статей, а саме: в роботах [1\*,3\*,4\*,7\*,26\*,27\*] брав участь в постановці задач і обговоренні отриманих результатів; в роботах [2\*,5\*,6\*,10\*-19\*,22\*,23\*] брав участь в постановці задач, проведенні експериментальних досліджень та обговоренні отриманих результатів; в роботах [8\*,9\*,20\*,21\*,24\*,25\*] брав участь в постановці завдань, створенні моделей для чисельного розрахунку резонаторних структур, проведенні експериментальних досліджень і обговоренні отриманих результатів досліджень.

Матеріали публікацій [3\*–5\*, 7\*, 19\*, 28\*, 30\*, 35\*] були використані співавторами дисертанта в таких кваліфікаційних роботах:

- Буняев С.О. Квазіоптичні діелектричні резонатори з локалізацією мікрохвильового поля біля провідної площини. – дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2007.

- Проценко І. О. Мікрохвильовий відгук квазіоптичних діелектричних резонаторів із сильнопоглинаючою рідиною. – дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2017.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідалися на таких конференціях і симпозіумах: European Microwave Conferences в 2005 р. (Париж, Франція), в 2007 р. (Мюнхен, Німеччина), в 2008 р. (Амстердам, Нідерланди), в 2011 р. (Манчестер, Великобританія), Міжнародний радіоелектронний форум "Прикладна електроніка: стан і перспективи розвитку" (МРФ-2005), в 2005 р. (Харків, Україна), International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW) в 2007 р., 2010 р., 2013 р. та в 2016 р. (Харків, Україна), Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS 2008) в 2008 р. (Київ, Україна), International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" в 2009 р. (Севастополь, Україна), International Conference On Superconductivity and Magnetism в 2010 р. (Анталія, Туреччина), International Microwave Symposium в 2012 р. (Монреаль, Канада), European Conference on Applied Superconductivity в 2013 р. (Генуя, Італія), International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON 2014) в 2014 р. (Гданськ, Польща) та International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductivity (M<sup>2</sup>S-2018), (Пекін, КНР).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 25 статтях у наукових закордонних і вітчизняних виданнях, які належать до переліку МОН України, 2-х патентах і в матеріалах 11 наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, 6 розділів, висновків, переліку використаних джерел наукової літератури та додатка. Обсяг дисертації становить 309 сторінок. Дисертація містить 129 рисунків. Список використаних джерел наукової літератури містить 237 найменувань.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукову новизну роботи, показано практичну цінність отриманих результатів.

**Розділ 1** «Квазіоптичні діелектричні резонатори в сучасній радіофізиці та мікрохвильовій фізиці надпровідників» присвячено огляду літератури за темою дисертації, а саме розглянуто електродинамічні особливості квазіоптичних діелектричних резонаторів у міліметровому діапазоні довжин хвиль і деякі історичні факти, показано зв'язок мікрохвильового відгуку резонаторів, в тому числі квазіоптичних діелектричних резонаторів, з надпровідними елементами і



поверхневим імпедансом надпровідників, та описано стан незвичайних надпровідників у мікрохвильовій радіофізиці і техніці.

У розділі 2 розглянуто КДР з ТПС, а саме напівсферичні, конічні та асферичні резонатори. Проведено дослідження спектральних та енергетичних характеристик цих резонаторів. Всі КДР характеризуються локалізацією ЕМ поля поблизу ТПС. Для прикладу на рис. 1 приведено розподіл поля ( $E_z$ -компоненти) в сапфіровому напівсферичному КДР з мідною ТПС.

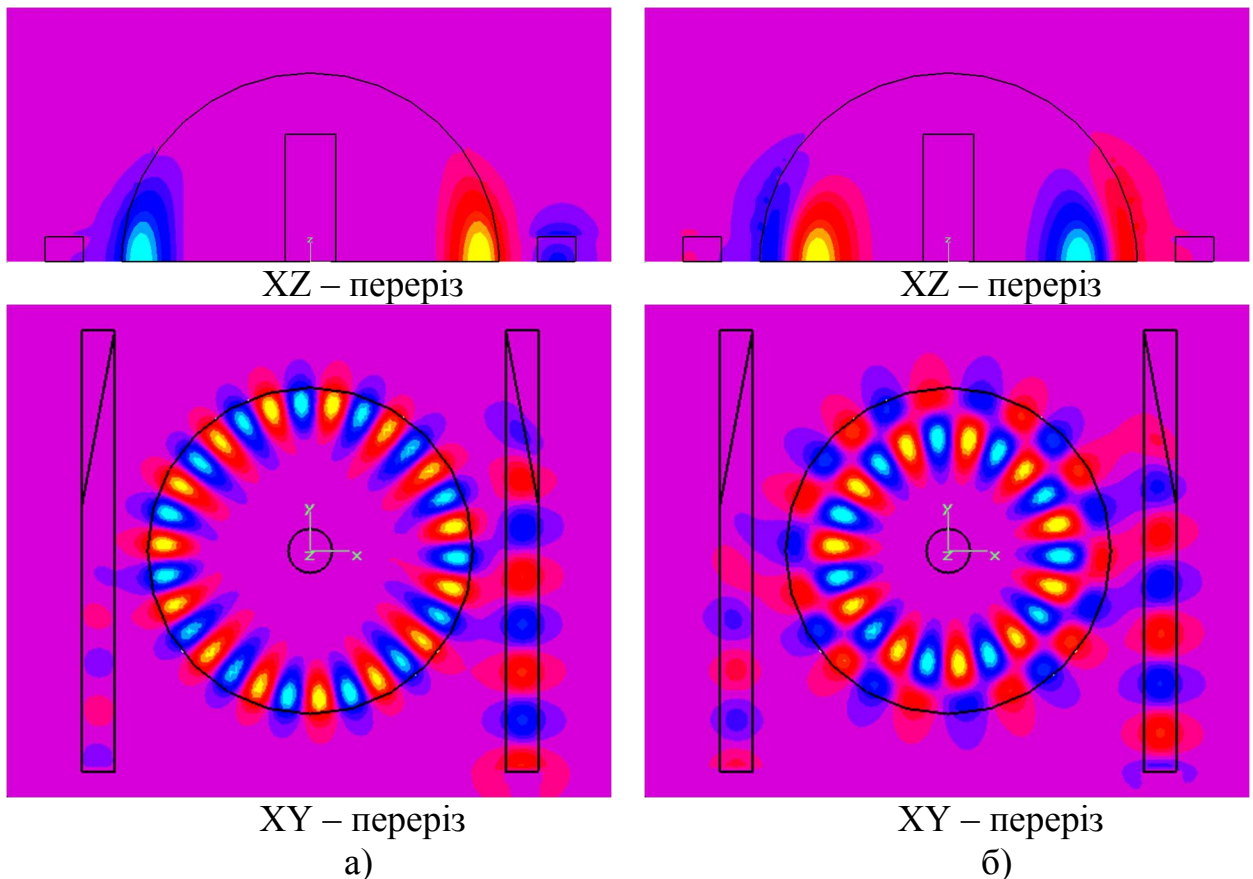


Рисунок 1 – Розподіл поля ( $E_z$ -компоненти) в сапфіровому напівсферичному КДР з мідною ТПС для  $TE_{1511}$  моди (а) і для  $TE_{1121}$  моди (б)

Конічні та асферичні резонатори мають подібний розподіл ЕМ поля. Дослідження КДР проводилися як шляхом чисельного моделювання, так і експериментально. За результатами аналітичного розв'язку електродинамічної задачі для ізотропної напівсфери з ТПС отримано також відповідні характеристики резонатора. Добрий збіг спектральних і енергетичних характеристик ізотропної напівсфери, які отримані експериментально, шляхом чисельного моделювання і за результатами аналітичного розв'язку, показав правомірність використання чисельного моделювання для дослідження КДР, які не мають аналітичного розв'язання електродинамічної задачі. Дослідження спектральних і енергетичних характеристик ізотропних і анізотропних КДР з ТПС показало можливість використання резонаторів різних форм, які досліджувалися в даній роботі, для вивчення мікрохвильових властивостей незвичайних надпровідників.

Частину цього розділу присвячено вивченню радіаційної добротності КДР з ТПС і вибору оптимальної форми резонатора для дослідження мікрохвильових властивостей незвичайних надпровідників. Радіаційна добротність, тобто добротність, яка обумовлена втратами на випромінювання, є дуже важливою характеристикою КДР. Ці втрати практично неможливо точно виміряти і дуже складно врахувати при використанні КДР для проведення прецизійних мікрохвильових досліджень надпровідників. Тому, як правило, прагнуть, щоб радіаційні втрати були набагато менше всіх інших втрат, і цими втратами можна було б знехтувати. В даній роботі для обчислення спектрів КДР використовувався програмний продукт CST Microwave studio, тому що КДР, які досліджувалися, не допускають можливості аналітичного розв'язку електродинамічної задачі. Однак, даний програмний продукт не дозволяє враховувати радіаційні втрати, тому для оцінки цих втрат було використано інший програмний продукт, а саме, Comsol Multiphysics. Напівсферичний КДР має найбільшу радіаційну добротність, тому він є оптимальним для прецизійних вимірювань індивідуальних значень поверхневого опору надпровідників. Конічний КДР може бути використаний як для попередніх вимірювань, так і для вимірювань, у яких не потрібна висока точність. Асферичні КДР мають радіаційну добротність вищу, ніж у конічного резонатора, але нижчу, ніж у напівсферичного резонатора. У той же час коефіцієнт включення для конічного КДР вищий, ніж у напівсферичного, і близький до коефіцієнта включення для конічного резонатора. Таким чином, асферичні КДР займають проміжне положення і можуть в деяких випадках використовуватися як для прецизійних, так і для попередніх вимірювань. Однак, незважаючи на нижчий коефіцієнт включення, напівсферичний резонатор є більш пріоритетним для прецизійних вимірювань, що обумовлено його меншими радіаційними втратами. Виготовлення асферичних КДР є також складною технологічною задачею, як і виготовлення напівсферичного резонатора, отже, простіший у виготовленні конічний резонатор є найбільш прийнятним для попередніх вимірювань.

У розділі 3 розглянуто КДР з елементом незвичайного надпровідника малих розмірів. Досліджуваний резонатор становить диск з радіальною щілиною і з двома ТПС. В радіальній щілині безпосередньо розташовується надпровідний зразок (рис. 2). Діаметр і висота диска становлять:  $D = 14,53$  мм і  $L = 2,55$  мм, відповідно. Ширина щілини  $t = 0,3$  мм обрана з урахуванням геометричних розмірів досліджуваних зразків (монокристалів пніктидів, халькогенідів, YBCO), а також з точки зору мінімізації радіаційних втрат. При виготовленні сапфірового диска відхилення оптичної осі від геометричної осі диска складало не більше 1-градуса. В роботі досліджувалися моди ТМ поляризації. Розрахований і експериментальний спектри в діапазоні 30-40 ГГц дискового резонатора з ТПС і з зразком, вставленим в радіальну щілину, представлено на рис. 3. Даний розрахунок спектра, як і всі наступні, виконано за допомогою CST Microwave studio.

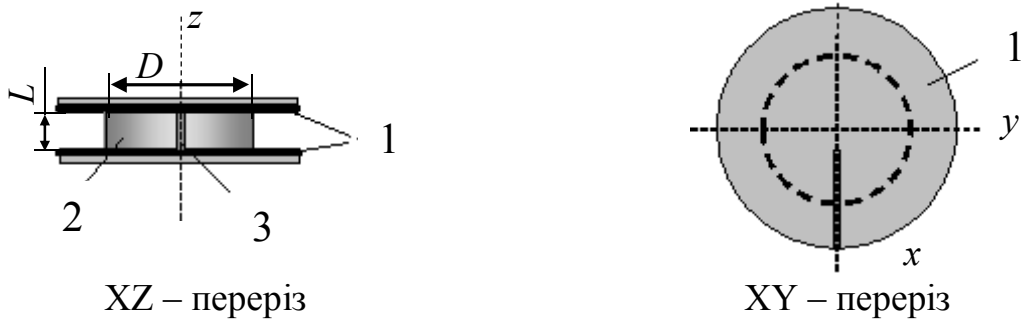


Рисунок 2 – КДР з ТПС, радіальною щілиною і з надпровідним зразком в ній:  
1-ТПС, 2-сапфіровий диск, 3-досліджуваний зразок

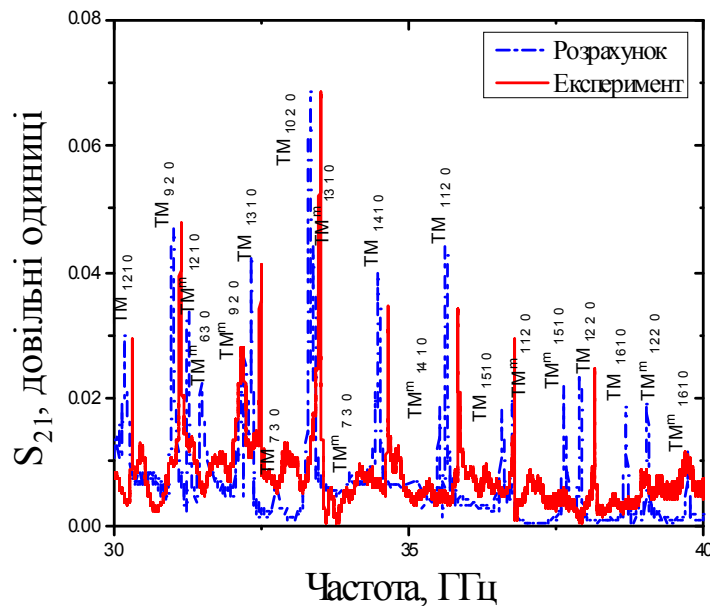


Рисунок 3 – Розрахований і отриманий експериментальним шляхом спектри сапфірового резонатора з мідними ТПС і мідним зразком. Розміри резонатора приведено у тексті

В спектрі можна виділити чотири основних сімейства мод  $TM_{nsl}$  ( $n$ -кількість довжин хвиль ЕМ поля в азимутальному напрямку вздовж циліндричної поверхні диска,  $s$ -кількість варіацій ЕМ поля в радіальному напрямку,  $l$ -кількість варіацій ЕМ поля в аксіальному напрямку):  $TM_{n10}$ ,  $TM_{n20}$ ,  $TM_{n10}^m$ ,  $TM_{n20}^m$ . Перші два сімейства мають розподіл ЕМ поля аналогічний розподілу в дисковому резонаторі з ТПС без щілини (рис. 4 а, б). Моді, помічені верхнім індексом ( $m$ ), характеризуються симетричним (дзеркальним) розподілом поля щодо зразка (рис. 4 в, г). Слід зазначити відсутність даних мод в дисковому резонаторі. Всі  $TM$  моди мають квазіеквідистантний спектр. Ефективність збудження мод, які мають радіальний індекс  $s = 2$ , трохи вища, ніж мод з радіальним індексом  $s = 1$ , що обумовлено радіальним розподілом ЕМ поля. Для всіх мод в роботі отримано залежності резонансної частоти і добротності від товщини щілини. Проведено вибір оптимальної моди КДР з радіальною щілиною і елементом незвичайного

надпровідника для дослідження поверхневого імпедансу. Також слід зазначити, що значення відповідних коефіцієнтів включення для  $TM_{n10}$  і  $TM^m_{n10}$  мод мають близькі значення.

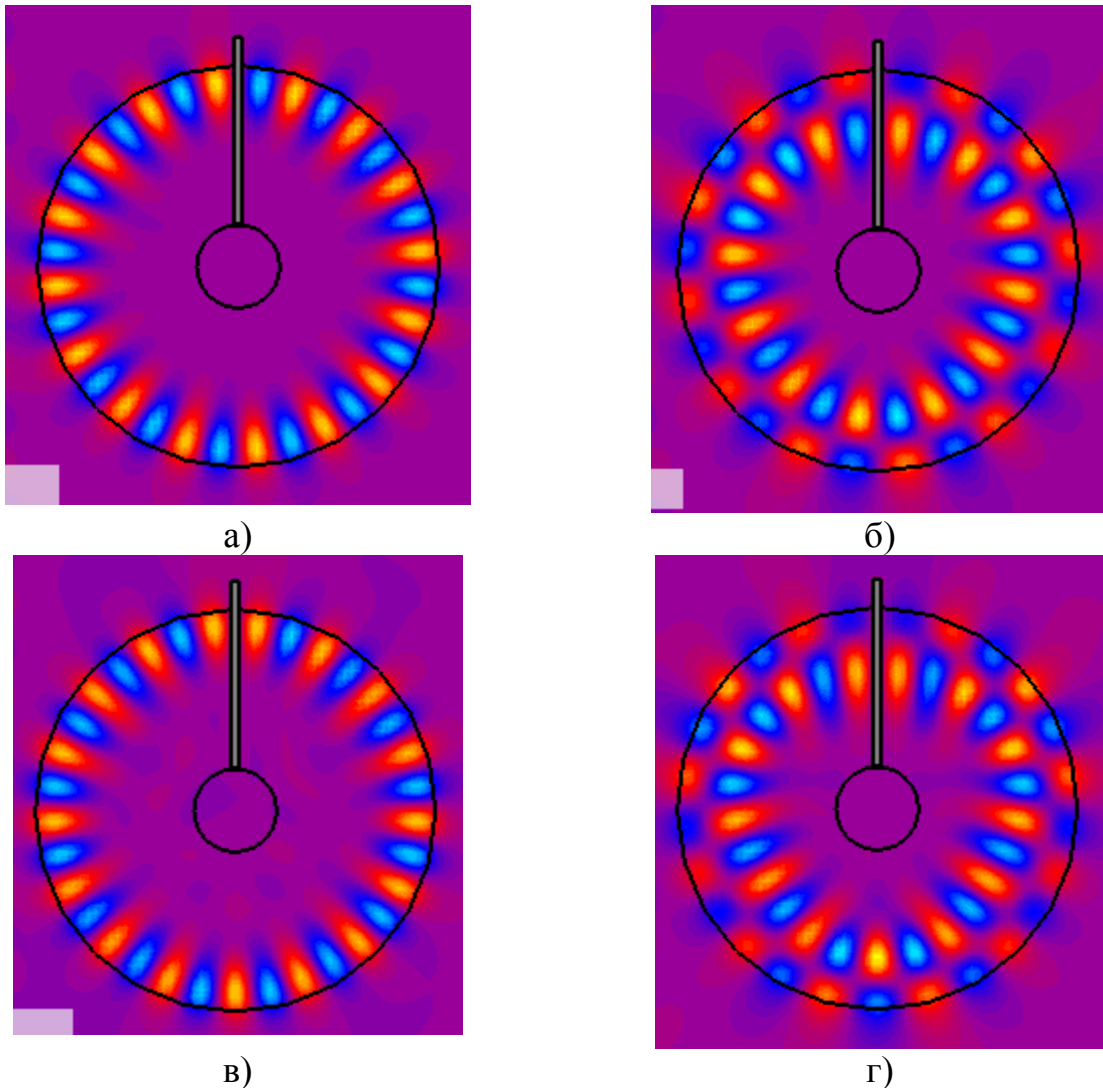


Рисунок 4 – Розподіл  $E_z$  – компоненти ЕМ поля для  $TM_{1610}$  (а),  $TM_{1220}$  (б),  $TM^m_{1610}$  (в) та  $TM^m_{1220}$  (г) мод

Однак, у зв'язку з меншими радіаційними втратами, для використання з метою вимірювання більш придатними є  $TM_{n10}$  моди.

Проведено аналіз радіаційних втрат в КДР з надпровідним зразком при різних положеннях зразка щодо діелектричного диска, включаючи положення зразка поза диском. Показано, що найбільш оптимальним для дослідження надпровідників малих розмірів є КДР з ТПС і елементом незвичайного надпровідника, розташованого в радіальній щілині.

Проведено дослідження спектральних та енергетичних характеристик КДР діаметром  $d_{out}$  з внутрішнім циліндричним елементом діаметром  $d_{in}$  незвичайного надпровідника. Визначено, що радіаційні втрати в межах похибки рівні для КДР з і без ТПС, принаймні, для  $n \leq 9$ . Запропонований підхід дозволить вимірювати поверхневий опір  $R_s$  об'ємних зразків надпровідників і інших провідників

помірних розмірів з досить високою точністю, проте в разі застосування резонатора з торцевими стінками стають необхідними ТПС з надпровідника з уже відомими властивостями і з  $T_c$  вищою, ніж  $T_c$  досліджуваного надпровідника. При цьому виявлено, що необхідно вибирати резонатор зі співвідношенням діаметрів  $d_{in}/d_{out} = 0,6$ , де збуджуються коливання шепочучої галереї ТМ типу з високими азимутальними індексами  $n$ .

У розділі 4 описано експериментальну техніку для дослідження спектральних та енергетичних характеристик КДР у широкому температурному інтервалі, представлено загальну схему цієї техніки. З метою отримання результатів, які становлять основу даної роботи, розроблено та використано декілька варіантів температурних приладів. Перший варіант засновано на базі пристроїв, що застосовувалися раніше для проведення температурних досліджень мікрохвильових властивостей купратних ВТНП [22]. Цей варіант не передбачає використання нагрівача і теплового моста для стабілізації температури. Охолодження здійснювалося парами рідкого кріоагента (рідкий азот або гелій). Вимірювання проводились в квазістатичному режимі, тобто при природному нагріванні резонатора з досліджуваним зразком при малій швидкості. Швидкість нагрівання підбиралася таким чином, щоб за час запису амплітудно-частотної характеристики резонатора його властивості практично не змінювались. Другий варіант температурного приладу передбачав використання нагрівача і наявність теплового моста для стабілізації температури.

У даному розділі наведено результати досліджень поверхневого опору високоякісної епітаксialної плівки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  товщиною 600 нм (виготовлена фірмою THEVA), нанесеної на монокристалічну підкладку  $\text{MgO}$ . Вимірювання проведені в інтервалі температур від  $T_c$  до 2 К із застосуванням нової техніки, а саме, з використанням сапфірового напівсферичного резонатора з хвилями шепочучої галереї у 8-мм діапазоні довжин хвиль. Ця техніка вимірювань дозволяє досягти високої чутливості вимірювань, до 10 мкОм, при низьких температурах. Температурна залежність поверхневого опору наведена на рис. 5, на вставці відображена її низькотемпературна частина. Вона має вигляд, типовий в основному для плівок цього складу. При цьому можна відзначити деталь, яка полягає в практичній відсутності широкого максимуму, який відзначається в монокристалах і деяких плівках. Замість цього спостерігається широке плато поблизу 50 К. Проведене порівняння з даними вимірювань інших авторів представлено у формі  $R_s(T)/\omega^2$ , яке показує, що за аналогією з монокристалами в області температур  $T/2$  і нижче для плівок також спостерігається тенденція до зниження  $R_s(T)/\omega^2$  з ростом  $\omega$ . При цьому підтверджується висновок [23, 24] про те, що високоякісні плівки незалежно від підкладки і товщини (в межах 300-600 нм) мають близькі характеристики. Найважливішим висновком, що впливає з цієї залежності в даній роботі, є лінійний закон зміни в області  $T < 10\text{K}$  (див. вкладинку до рис. 5). Відсутність експоненційної залежності при низьких температурах, що спостерігається в даній роботі, узгоджується з уявленнями про  $d$ -хвильову симетрію параметра порядку.

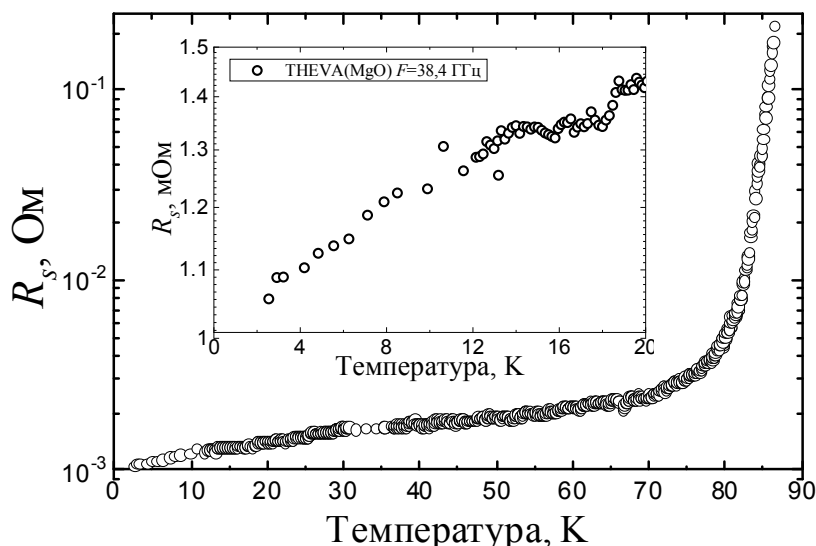


Рисунок 5 – Температурна залежність поверхневого опору для епітаксiальної плівки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  товщиною 600 нм на підкладці MgO та її низькотемпературна частина (вкладинка)

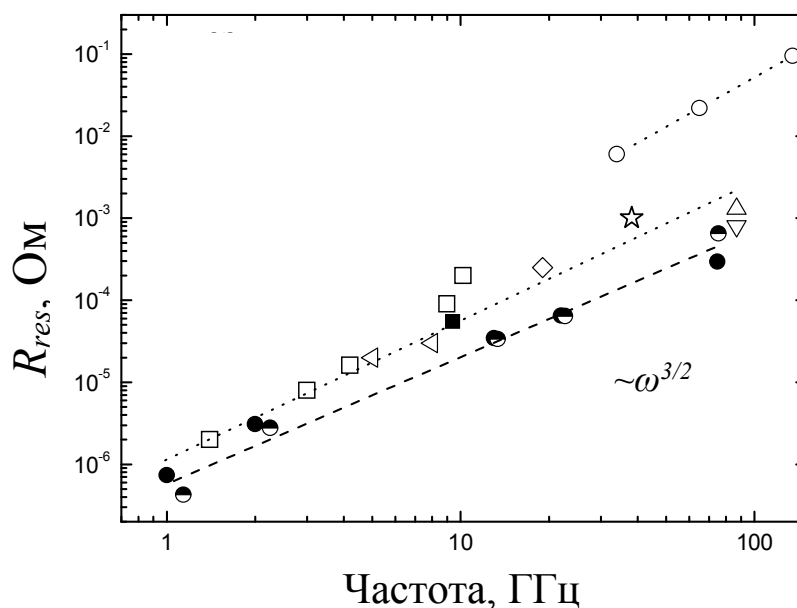


Рисунок 6 – Частотна залежність залишкового поверхневого опору  $R_{res}(\omega)$  для плівок і монокристалів  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  (зірочкою позначено результат, отриманий в цій роботі. Інші символи відображають дані інших авторів)

Проведено оцінку залишкового поверхневого опору, яке склало  $R_{res}(\omega) = 1$  мОм на частоті 38,4 ГГц. Також було проведено порівняння  $R_{res}(\omega)$  з даними вимірювань інших авторів (рис. 6). Як видно з рис. 6, частотна залежність залишкового поверхневого опору  $R_{res}(\omega)$  має частотну залежність у вигляді  $\omega^{3/2}$  як для монокристалів, так і для плівок. Близькість даних  $R_s$ , включаючи залишковий опір  $R_{res}$  для монокристалів і плівок, говорить про те, що виявлена

залежність в цілому визначається внутрішніми властивостями ВТНП. Однак, природа залишається як і раніше неясною. Залежність у вигляді  $\omega^{3/2}$  показує, що залишкові втрати не пов'язані з нормальною провідністю або «діелектричним слідом», тому що внесок останніх був би пропорційний  $\omega^{1/2}$  або  $\omega$ .

У даній роботі також вивчався поверхневий імпеданс плівок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  різної товщини ( $d_f = 75\text{--}600$  нм), які напилялися на монокристалічні підкладки  $\text{MgO}$  товщиною 0,5 мм. Експериментальні вимірювання проводилися також з використанням сапфірового напівсферичного резонатора в Ка-діапазоні. Експериментально показано, що ефективний поверхневий опір  $R_s^{eff}$  зменшується і прагне до мінімуму при  $d_f > 300$  нм, а об'ємні властивості плівок практично не залежать від  $d_f$  в зазначеному діапазоні. Температурна залежність лондонівської глибини проникнення може бути апроксимована при  $T > 20$  К виразом

$\lambda(T)/\lambda_L(0) = 0.165 \cdot e^{\frac{0.028}{T}}$  для всіх значень товщини, крім 75 нм. Залежність для останнього добре апроксимується відомим виразом  $\lambda(T) = \lambda_L(0) / [1 + (T/T_c)^\gamma]^{1/2}$  с  $\gamma = 1$  і  $\lambda_L(0) = 145$  нм. Було виявлено ефект значного зниження  $R_s(T)$  (приблизно в 2 рази при низьких температурах) через рік після синтезу плівки. Цей ефект можна пояснити навмисним передопуванням (передозуванням кисню) плівок у процесі їх синтезу і подальшим процесом «старіння» з певною втратою кисню, коли плівки стають оптимально легованими.

В роботі також проаналізовано еволюцію мікрохвильового відгуку дискового КДР з ТПС (ТМ мода) в залежності від товщини плівки  $d$  в діапазоні від  $d > \delta_s$  до  $d \ll \delta_s$  (включаючи  $d = 0$ ) шляхом чисельного моделювання. Характерна поведінка в залежності від  $d$  визначалася переходом моди  $\text{TM}_{ns0}$  в моду  $\text{TM}_{ns\delta}$  ( $\delta > 0$ ). Експериментально виявлений відгук сапфірового КДР в Ка-діапазоні порівнювався з результатами чисельного моделювання, отриманими з використанням програмного продукту COMSOL. Немонотонну зміну відгуку зі зменшенням  $d$  до нанометрових товщин було пояснено за допомогою моделі, запропонованої в роботі [25], де використовувався резонатор з основною модою і з іншою поляризацією. Штучне порушення суцільності ультратонкої плівки, а саме, використання острівкової структури, привело до різкого збільшення добротності, аналогічного випадку, коли долається поріг перколяції.

У розділі 5 наведено результати досліджень монокристалічного пніктида  $\text{BaFeCoAs}$  в Ка-діапазоні (8-мм діапазон), що отримані за допомогою нової техніки на базі КДР з радіальною щілиною і зразком в ній. Експериментальні температурні залежності поверхневого опору  $R_s(T)$  і поверхневого реактансу  $X_s(T)$ , отримані за допомогою температурних залежностей добротності  $Q(T)$  та зміни резонансної частоти  $\Delta f(T)$  резонатора з монокристалом, представлено на рис. 7. Застосовуючи температурну залежність поверхневого імпедансу, було отримано такі важливі характеристики монокристалу  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ , як лондонівська глибина проникнення для низькотемпературного інтервалу  $T < T_c/2$ , комплексна провідність та швидкість розсіювання квазічастинок як функції температури.

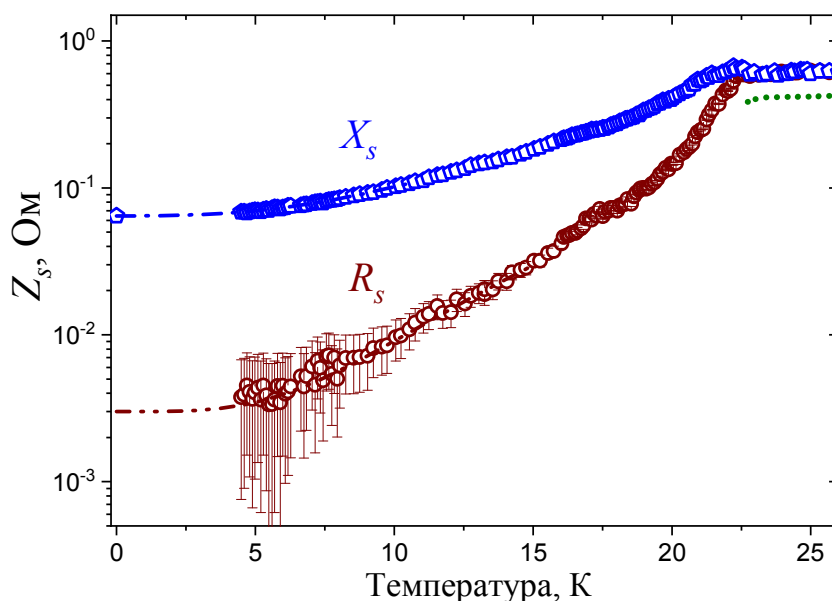


Рисунок 7 – Температурна залежність поверхневого імпедансу оптимально легovanого монокристалу  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ,  $x = 0,074$  (досліджуваний зразок мав форму прямокутного паралелепіпеда з розмірами  $3,50 \times 2,50 \times 0,10 \text{ мм}^3$ )

При дослідженні нових матеріалів важливим є обґрунтування достовірності результатів, особливо, якщо для досліджень використовується нова техніка.

Одним із дієвих підходів для підтвердження достовірності результатів є так званий двочастотний підхід.

Суть такого підходу полягає в проведенні досліджень нових матеріалів в різних частотних діапазонах, наприклад, використовуючи техніку, що працює на двох частотах, які відрізняються в 2 і більше разів. Такі дослідження були проведені з використанням відомого сапфірового кільцевого резонатора з модою  $\text{TE}_{011}$  в X-діапазоні. Порівняння температурних залежностей квазічастинкової провідності приведено на рис. 8.

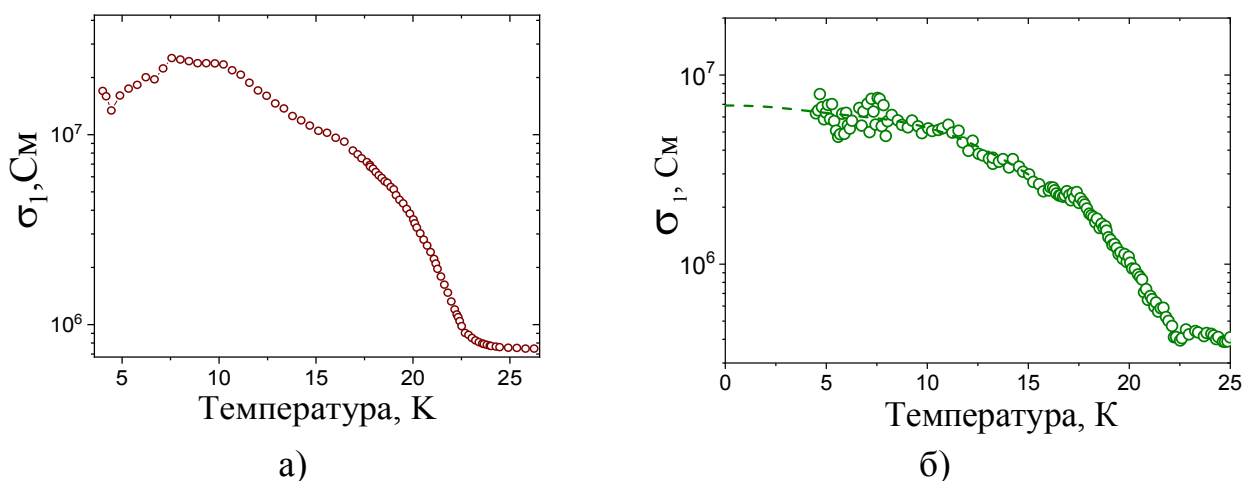


Рисунок 8 – Температурна залежність квазічастинкової провідності  $\sigma_1(T)$  монокристалу  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ : а) в X-діапазоні, б) в Ka-діапазоні



Результати, які отримані в двох діапазонах добре узгоджуються і показують, що квазічастинкова провідність зростає зі зниженням температури, що може бути обумовлено різким зниженням швидкості розсіювання квазічастинок. Також було проведено порівняння температурних залежностей лондонівської глибини проникнення (рис. 9).

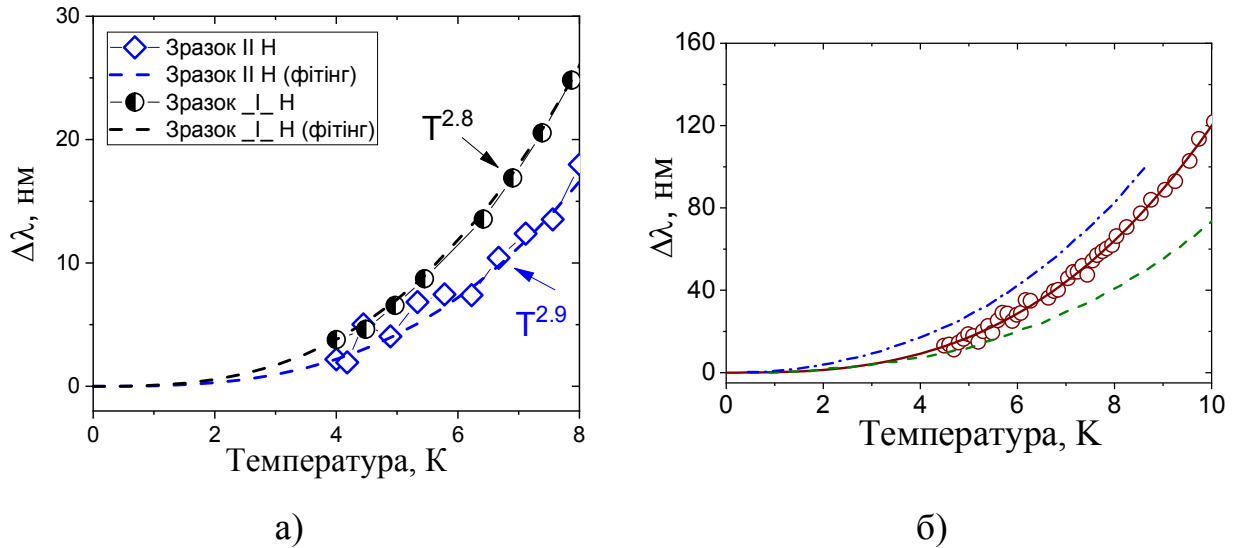


Рисунок 9 – Температурна залежність лондонівської глибини проникнення монокристалу  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  при низьких температурах  $T < T_c/2$ : а) X-діапазон, б) Ка-діапазон

Слід зазначити, що дані, які отримані для двох орієнтацій зразка (X-діапазон), дають дуже близькі значення показника ступеня  $n = 2,8$  і  $n = 2,9$ , які добре узгоджуються зі значеннями, отриманими як в Ка-діапазоні, так і в радіохвильовому діапазоні.

У даному розділі наведено результати мікрохвильових імпедансних досліджень плівки  $\text{FeSeTe}$ , при цьому вперше виявлено ефект орієнтації плівки надпровідника щодо мікрохвильового поля в сапфіровому кільцевому діелектричному резонаторі з  $\text{TE}_{011}$  модою на температурній залежності добротності резонатора. Отримано важливі характеристики плівки  $\text{FeSeTe}$ : лондонівську глибину проникнення для низькотемпературного інтервалу  $T < T_c/2$ , комплексну провідність та швидкість розсіювання квазічастинок як функції температури.

У розділі 6 наведено результати чисельного моделювання та експериментального дослідження перших прототипів, запропонованих в роботі двох нових мікрохвильових пристроїв на основі ВТНП елементів, а саме, планарного квазіоптичного резонатора з хвилями шепочучої галереї і фільтра з E-вставкою в хрестоподібному хвилеводі 8-мм діапазона довжин хвиль.

Резонансна структура у вигляді планарного квазіоптичного резонатора спочатку була змодельована, а потім створена на основі епітаксимальної плівки надпровідника  $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (властивості майже не відрізняються від

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> плівки) товщиною 600 нм з використанням методу фотолітографії. Плівки ( $T_c = 89$  K), нанесені на обидві сторони монокристалічної підкладки MgO товщиною  $h = 0,5$  мм, виготовлено компанією Ceraco Ceramic Coating GmbH, Німеччина, в березні 2014 року. Товщина плівок ВТНП обиралася на основі результатів попередніх досліджень поведінки плівок YBaCuO різної товщини, нанесених на одну і ту ж підкладку (див. розділ 3). Планарний КДР та його спектр представлено на рис. 10.

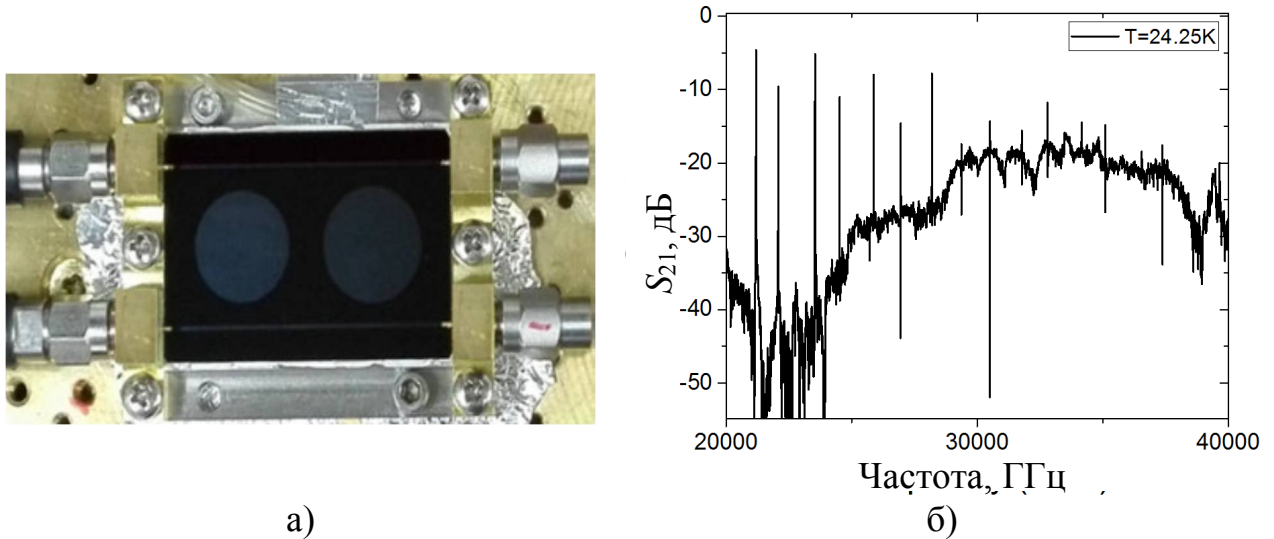


Рисунок 10 – Фотографія експериментального пристрою з двома мікросмушковими КДР на основі ВТНП і двома мікросмушковими лініями (а) та його спектр (б)

Для обраної моди ( $TM_{810}$ ) були знайдені температурні залежності резонансної частоти  $f$  і власної добротності  $Q$  (рис. 11). При зміні температури від 77K до 24K частота змінилася на 70 МГц, а добротність зросла з 13200 до 67800. Отримані результати показують вищі значення добротності для планарних КДР в порівнянні з відомими ВТНП мікросмушковими резонаторами з більш низькими модами. Моді типу ШГ можуть збуджуватися в режимі не тільки стоячої, але і рухомої хвилі. Тому ці резонатори відкривають перспективи для розробки нових планарних мікрохвильових пристроїв та технологій. Важливим аспектом є можливість збільшення робочої частоти мікросмушкових резонаторів з прийнятними втратами в мікрохвильовому діапазоні.

В даному розділі описано також створений смуго-пропускний фільтр з двосторонньою ВТНП Е-вставкою в прямокутному і хрестоподібному хвилеводах. На початку був спроектований і виготовлений фільтр з двосторонньою ВТНП Е-вставкою в прямокутному хвилеводі. Прототип такого фільтра представлено на рис. 12. ВТНП вставка є монокристалічна підкладка MgO товщиною 0,5 мм, дві поверхні якої вкриті надпровідними плівками YBCO. Методом фотолітографії ідентичні частини вставки надпровідних шарів були видалені з обох сторін підкладки, і, таким чином, були утворені «віконні» ланцюжки з висотою, що дорівнює висоті стандартного прямокутного хвилеводу перерізом  $7,2 \times 3,4$  мм<sup>2</sup>.

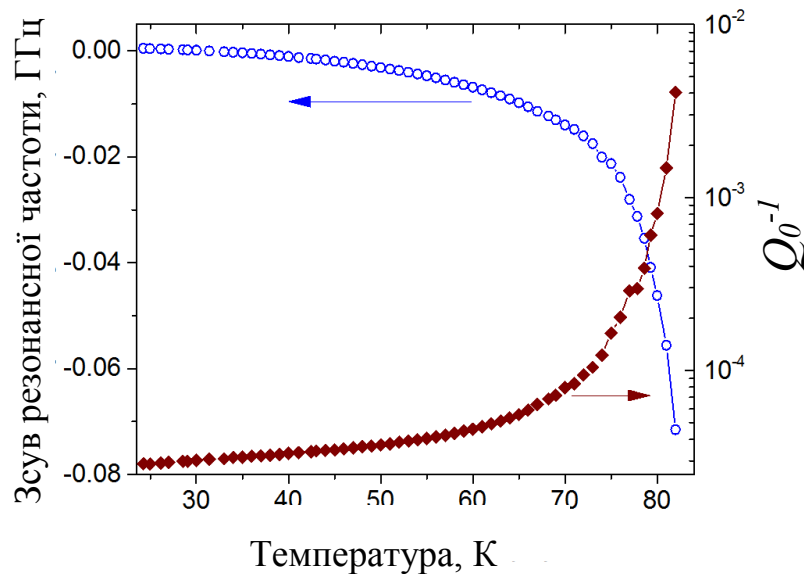
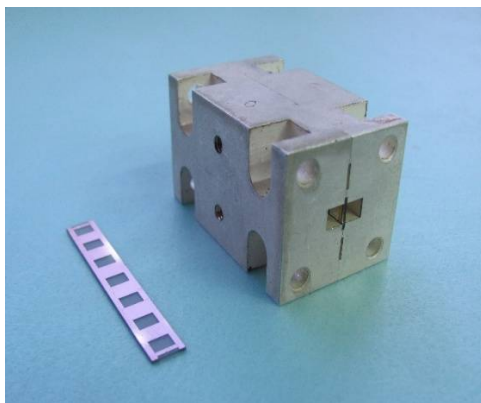
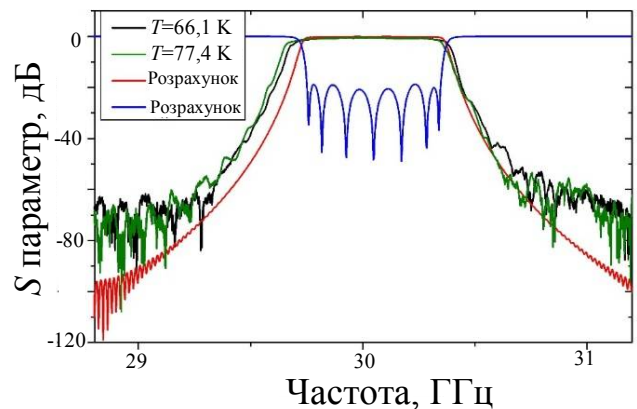


Рисунок 11 – Температурна залежність зсуву резонансної частоти і оберненого значення власної добротності  $Q_0^{-1}$  ВТНП мікросмушкового КДР з модою  $TM_{810}$



а)



б)

Рисунок 12 – Фотографія смуго-пропускного фільтра з двосторонньою ВТНП Е-вставкою в прямокутному хвилеводі (а) і його розрахункова і вимірjana амплітудно-частотна характеристика (б)

Всі "вікна" і відстань між ними по осі  $Z$  були розраховані в процесі проектування фільтра. З рис. 12 (б) видно добрий збіг результатів обчислень і вимірювань. Однак слід зазначити одну технічну проблему, що проявилася при виготовленні цього прототипу. Щоб забезпечити хороший електричний і тепловий контакти, необхідно щільно затискати Е-вставку – досить крихку  $MgO$ -діелектричну підкладку з ВТНП структурою – між двома частинами волноводного корпусу. Це призводить до механічних напруг у вставці  $MgO$  при охолодженні і до її розтріскування. Вирішенням цієї проблеми є використання нового прототипу, а саме фільтра з двосторонньою ВТНП Е-вставкою в хрестоподібному хвилеводі (рис. 13, а). Прямокутний хвилевід з канавками в широких стінках називають в літературі хрестоподібним хвилеводом.

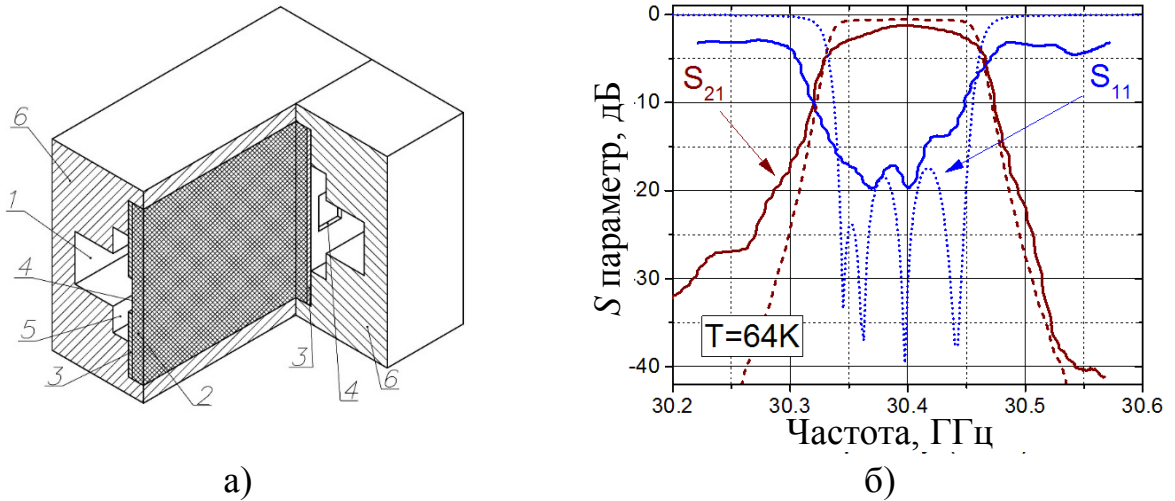


Рисунок 13 – Загальний вигляд смуго-пропускного фільтру: 1 - хвилевід прямокутного перетину, 2 – діелектрична підкладка, 3 – планарні структури на основі ВТНП плівки, 4 – резонансні вікна, 5 – канавки в широких стінках хвилевода, 6 – дві половинки хвилеводного корпусу (а) і його обчислена та виміряна амплітудно-частотна характеристика (б)

Принцип дії запропонованого смуго-пропускного фільтру з Е-площинною ВТНП вставкою в хрестоподібному хвилеводі аналогічний принципу дії смуго-пропускного фільтру з Е-площинною ВТНП вставкою в прямокутному хвилеводі. Відмінності полягають в наявних на сьогодні підходах до електродинамічного синтезу фільтру, а також в можливості поліпшити характеристики фільтру завдяки застосуванню хрестоподібного хвилевода, в Е-площині якого встановлено ВТНП вставку. Вимірні характеристики фільтру підтверджують результати моделювання (рис. 13, б), однак спостерігаються відхилення, які вказують на те, що при виготовленні вузькосмугових фільтрів з ВТНП вставкою в Е-площині необхідно підтримувати точність виготовлення резонансних вікон у вставці в межах  $\pm 0,2$  мкм. Також слід зазначити, що внесені втрати ( $S_{12}$ ) досягають  $\sim 1,2$  дБ в центрі смуги пропускання і є нижчими втрат фільтру з аналогічною мідною вставкою при  $T = 77$  К приблизно на 1,2 дБ.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи розвинено основи електродинаміки КДР з елементами незвичайних надпровідників в мм діапазоні хвиль, що дозволило обґрунтувати можливість дослідження фізичних властивостей плівок і монокристалів незвичайних надпровідників з використанням мікрохвильового відгуку КДР і отримати значення поверхневого імпедансу ряду незвичайних надпровідників, які містять залізо, в зазначеному діапазоні довжин хвиль.

Відповідно до визначеної мети та вирішення зазначеної проблеми виконано дослідження та отримано наступні наукові результати :

1. Проведено дослідження електродинамічних властивостей ряду запропонованих і модифікованих автором КДР з ТПС, а саме напівсферичного, конічного і асферичного резонаторів, що дозволяють локалізувати ЕМ поле поблизу торцевої поверхні, які є досліджуваними зразками надпровідних плівок, використовуючи чисельні методи моделювання та експериментальну техніку вимірювання.
2. Проведено дослідження електродинамічних властивостей КДР з радіальною щілиною і малим надпровідним зразком в щілині, шляхом чисельного моделювання та експериментальних вимірювань.
3. Проведено дослідження мікрохвильового відгуку: сапфірового напівсферичного КДР з торцевою стінкою, виготовленою з надпровідної плівки YBCO, а також сапфірового дискового КДР з радіальною щілиною і незвичайним надпровідником, який містить залізо, в залежності від температури. Ці дослідження показали можливість експериментального дослідження поверхневого імпедансу незвичайних надпровідників за допомогою КДР у мм діапазоні довжин хвиль.
4. Вперше проведено дослідження мікрохвильових імпедансних властивостей монокристала пніктиду BaFeCoAs в 8-мм діапазоні довжин хвиль, при цьому отримано температурні залежності комплексної провідності, глибини проникнення і часу квазічастинкового розсіювання.
5. Проведено дослідження мікрохвильових імпедансних властивостей плівки халькогеніду FeSeTe, при цьому вперше виявлено ефект немонотонної температурної залежності добротності резонатора, пов'язаний з орієнтацією плівки надпровідника щодо мікрохвильового поля в сапфіровому кільцевому діелектричному резонаторі з TE<sub>011</sub> модою.
6. Проведено комплексне дослідження надпровідників, які містять залізо, із застосуванням двочастотного підходу до вивчення різних складів незвичайних надпровідників в широкому температурному інтервалі, включаючи критичну температуру  $T_c$ . На основі отриманих температурних залежностей імпедансних властивостей і комплексної провідності досліджених надпровідників (BaFeCoAs, FeSeTe) встановлено, що квазічастинкова провідність зростає з пониженням температури, що, можливо, обумовлено різким зниженням швидкості розсіювання квазічастинок.
7. Реалізовано мікрохвильові пристрої на основі купратних плівок ВТНП (YBaCuO), а саме: мікрохвильовий резонатор з хвилями шепочучої галереї, локалізованими під диском надпровідника, розташованого на діелектричній підкладці, і смугасто-проникний фільтр з Е-площинною вставкою в хрестоподібному хвилеводі.

## СПИСОК РОБИТ, ЦИТОВАНИХ В АВТОРЕФЕРАТІ

1. Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O system / J. G. Bednorz, K. A. Müller // *Z. Phys. B: Condens. Matter.* – 1986. – Vol. 64, N. 2. – P. 189-193.
2. Superconductivity at 93K in a new mixed phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure / M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, C. W. Chu // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58, N. 9. – P. 908-910.
3. High-temperature superconducting microwave circuits / Zhi-Yuan Shen. – Artech House, Boston-London, 1994. – 273 p.
4. Passive microwave devices application of high temperature superconductors / M. L. Lancaster. – Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1997. – 344 p.
5. High-temperature-superconductor thin films at microwave frequencies / M. Hein. – Berlin, New York, Heidelberg: Springer, Springer Tracts in Modern Physics, 1999, vol. 155. – 394 p.
6. High temperature superconductivity in the cuprates: materials, phenomena and a mechanism / S. Banerjee, C. Dasgupta, S. Mukerjee, T. V Ramakrishnan, K. Sarkar // arXiv: 1806.03854 v2 [cond-mat.str-el] 12 Jun 2018. – 49 p
7. Unconventional superconductivity / G. R. Stewart // arXiv: 1705.05593, 2017. – 132 p.
8. Electronic band structure of optimal superconductors: from cuprates to ferropnictides and back again / A. A. Kordyuk // arXiv: 1803.01487v1 [cond-mat.supr-con], 5 Mar 2018. – 10 p.
9. High-temperature superconductivity in iron-based materials / J. Paglione, R. L. Greene // *Nat. Phys.* – 2010. – Vol. 6. – P. 645-658.
10. The puzzle of high temperature superconductivity in layered iron pnictides and chalcogenides / D. C. Johnston // *Adv. in Phys.* – 2010. – Vol 59, N. 6. – P. 803-1061.
11. Superconductivity gets an iron boost / I. I. Mazin // *Nature.* – 2010. – Vol. 464, N.7286. – P. 183-186.
12. Gap symmetry and structure of Fe-based superconductors / P. J. Hirschfeld, M. M. Korshunov, I. I. Mazin // *Rep. Prog. Phys.* – 2011. – Vol. 74, N. 12 – P. 124508(1-44).
13. London penetration depth in iron-based superconductors / R. Prozorov, V. G. Kogan // *Rep. Prog. Phys.*, 2011. – Vol. 74, N. 12. – P. 124505 (1-20).
14. Superconductivity in iron compounds / G. R. Stewart // *Rev. Mod. Phys.* – 2011. – Vol. 83, N. 4, 1589-1652.
15. Pairing mechanism in Fe-based superconductors / A. Chubukov // *Annul. Rev. Condens. Matter Phys.* – 2012. – Vol. 3. – P. 57-92.
16. Поверхностный импеданс монокристаллов ВТСП в микроволновом диапазоне / М. Р. Трунин // *УФН.* – 1998. – Т. 168, № 9. – С. 931-952.

17. Accurate microwave technique of surface resistance measurement of large-area HTS films using sapphire quasi-optical resonator / N. T. Cherpak, A. Barannik, Y. Filipov, Y. Prokopenko, S. Vitusevich // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2003. – Vol. 13, N. 2. – P. 3570-3573.
18. Диэлектрические резонаторы / под ред. М.Е. Ильченко. – Москва, «Радио и связь» 1989. – 328 с.
19. Квазиоптические твердотельные резонаторы / А. Я. Кириченко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак. – Наукова думка, Київ, 2008. – 296 с.
20. Аномально малая диссипация электромагнитных волн в ионном кристалле / В. Б. Брагинский, В. И. Панов, А. В. Тимашов // ДАН ССР. – 1982. – Т. 267, № 1. с.74-75.
21. Системы с малой диссипацией / В.Б. Брагинский, В.П. Митрофанов, В.И. Панов. – М.: Наука, 1981. – 144 с.
22. Электродинамические свойства квазиоптического резонатора Хакки-Колемана и его применение для микроволновых исследований сверхпроводников / А. А. Баранник // дис. канд. фіз-мат. наук 01.04.03. – Харків, 2004. – 129 с.
23. In-plane surface impedance of epitaxial  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films: Comparison of experimental data taken at 87 GHz with d- and s-wave models of superconductivity / S. Hensen, G.Muller, C.T. Rick, and Sharuberg // Phys. Rev. B. – 1997. – Vol. 56, – P. 6237.
24. Surface resistance of epitaxial  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  films on various substrates: Effects of pair condensation and quasiparticle scattering / M. Hein, T. Kaiser, and G. Muller // Phys. Rev. B. – 2000. – Vol. 61, – P. 640.
25. Microwave conductivity of very thin graphene and metal films / J. Krupka, W. Strupinski, and N. Kwietniewski // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2011. – Vol. 11, – P. 3358–3362.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

- 1\*. Конический квазиоптический диэлектрический резонатор / А. А. Баранник, С. А. Буняев, Н. Т. Черпак // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, N. 19, – С. 1-5.
- 2\*. Microwave Losses in a Quasioptical Dielectric Resonator as a Function of the Thickness of Ultra-Thin Conducting Endplates / А. А. Barannik, А. N. Stetsenko, N. T. Cherpak // Telecommunications and Radioengineering. – 2006. – V. 65, N. 19, – P. 1783-1788.
- 3\*. Cone-shaped quasioptical dielectric resonators / А. А. Barannik, S. A. Bunyaev, N. T. Cherpak // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – V. 66, N. 7, – P. 577-586.
- 4\*. On a Quality factor of Whispering-Gallery-Mode Dielectric Resonators in the Form of a Cone / А. А. Barannik, S. A. Bunyaev, N. T. Cherpak // Microwave and Optical Technology Letters. – 2007. – V. 49, N. 8, – P. 1987-1989.

- 5\*. On the low-temperature microwave response of a  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  epitaxial film determined by a new measurement technique / A. A. Barannik, S. A. Bunyaev, N. T. Cherpak // *Low Temperature Physics*. 2008.– V. 34, N. 12, – P. 977-981.
- 6\*. Квазиоптический кольцевой сапфировый резонатор с внутренним цилиндрическим проводником / А. А. Баранник, К. И. Торохтий, Н. Т. Черпак // *Радиофизика и электроника*. – 2009. – Т.14, № 1, С. 19-23.
- 7\*. Quasi-Optical Sapphire Resonators in the Form of a Truncated Cone / A. A. Barannik, S. A. Bunyaev, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich // *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*. – 2008. – V. 26, N. 17, – P. 3118-3123.
- 8\*. Whispering gallery mode hemisphere dielectric resonators with impedance plane / A. A. Barannik, S.A. Bunyaev, N. T Cherpak, Yu. V. Prokopenko, A. A. Kharchenko, S. A. Vitusevich // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2010. – V. 58, N.10, – P. 682-2691.
- 9\*. Millimeter-Wave Surface Impedance Characterization of HTS Films and Single Crystals Using Quasi-Optical Sapphire Resonator / N. T. Cherpak, A. A. Barannik, S. A. Bunyaev, Y. V. Prokopenko, K. I. Torokhtii, S. A. Vitusevich // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* – 2011. – V. 21, N. 3, – P. 591-594.
- 10\*. Millimeter-wave study of London penetration depth temperature dependence in  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$  single crystal / A.A. Barannik, N.T. Cherpak, N. Ni, M. A. Tanatar, S. A. Vitusevich, V.N. Skresanov, P.C. Canfield, R. Prozorov, V. V. Glamazdin, and K. I. Torokhtii // *Low Temperature Physics*. – 2011. – V. 37, – N.8, – P. 725-728.
- 11\*. Surface impedance of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  films grown on MgO substrate as a function of film thickness / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, M. S. Kharchenko, R. Semerad, S. Vitusevich // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2013. – V. 26, – № 1. – P. 43-48.
- 12\*. Millimeter-wave surface impedance of optimally-doped  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  single crystals / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, M. A. Tanatar, S. Vitusevich, V. Skresanov, P. C. Canfield, R. Prozorov // *Phys. Rev. B*, – 2013. – V. 87, – P. 014506-1-014506-7.
- 13\*. A Unique Ka-Band Measurement System Based on Quasi-Optical Dielectric Resonator Technology for Studying Small Superconducting Samples / Y. Wu, B. Cui, S. Luo, X. Jiang, F. Zhou, Y. Bian, Y. He, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, V. N. Skresanov // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* – 2013. – V. 23, N. 3, – Art. – N. 9000204,
- 14\*. Microwave Properties of  $\text{BaFe}_{1.9}\text{Ni}_{0.1}\text{As}_2$  Superconducting Single Crystal / Y. Wu, S. Luo, X. B. Jiang, F. Zhou, L. X. Cao, Y.S. He, N. T. Cherpak, V. N. Skresanov, A. Barannik // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. – 2013. – V. 26, N. 4, – P. 1221-1225.
- 15\*. Hemispherical and aspheric WGM dielectric resonators with conducting plane: Radiation and conductivity losses / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, M. S. Kharchenko, S. Vitusevich // *Радиофизика и электроника*. – 2013. – Т. 4(18), №4, – С. 49 - 54.



- 16\*. On the determination of the quasiparticle scattering rate in unconventional superconductors by microwave surface impedance / N. T. Cherpak, A. A. Barannik, R. Prozorov, M. A. Tanatar, A. V. Velichko // *Low Temperature Physics*. – 2013. – V. 39, N. 12, – P. 1110–1112.
- 17\*. Unusual microwave response and bulk conductivity of very thin FeSe<sub>0.3</sub>Te<sub>0.7</sub> films as a function of temperature / A.A. Barannik, N. T. Cherpak, Y. Wu, S. Luo, Y. He, M.S. Kharchenko, A. Poch // *Low temperature physics*. – 2014. – V. 40, N. 6, – P. 492-499.
- 18\*. Microstrip Whispering-Gallery-Mode Resonator S. A. Bunyaev // A. A. Barannik, N. T. Cherpak // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. – 2015. – V.63, N. 9, – P. 2776-2781.
- 19\*. Радиационная добротность диэлектрических резонаторов различной формы с исследуемыми проводниками и жидкими диэлектриками // А. А. Баранник, С. А. Витусевич, И. А. Проценко, М. С. Харченко, Н. Т. Черпак // *Радиофизика и электроника*. – 2015. – Т.6(20), №3, – С. 55-61.
- 20\*. Whispering gallery mode resonators in microwave physics and technologies // A. Barannik, N. Cherpak, A. Kirichenko, Y. Prokopenko, S. Vitusevich, V. Yakovenko // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. – 2017. – V. 9, N. 4, – P. 781-796.
- 21\*. New Type of Microwave High-Tc Superconductor Microstrip Resonator and Its Application Prospects / L. Sun, N. Cherpak, A. Barannik, Y. He, V. Glamazdin, X. Zhang, J. Wang, V. Zolotaryov // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* – 2017. – V. 27, N. 4, Art. – N. 1501304.
- 22\*. Microwave response of cavity resonator with thin superconductor film depending on film temperature and orientation / A.A. Barannik, N.T. Cherpak, Y. He, L. Sun, X. Zhang, M.V. Vovnyuk, and Y. Wu, // *Low Temperature Physics*. – 2018. – V. 44, N. 3, – P. 247-251.
- 23\*. On The Nature of Unusual Microwave Response of Thin FeSe<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> Film Near Critical Temperature / N. Cherpak, A. Barannik, Y. He, L. Sun, X. Zhang, Y. Ma, Y. Bian, G. Li // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* – 2018. – V. 28, N. 4. – Art. – N. 1501104.
- 24\*. Микроволновая радиофизика необычных сверхпроводников / А. А. Баранник, А. И. Губин, А. А. Лавринович, Н. Т. Черпак // *Радиофизика и электроника*. – 2018. – Т. 23, №4, – С. 15-36.
- 25\*. Millimeter-Wave WGM Resonator-Based Characterization of Continuous and Noncontinuous Ultrathin Cu Films / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. A. Vitusevich // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, – 2019. – Vol. 29, N. 1, – P.363-365.
- 26\*. Резонатор / О. А. Баранник, С. О.Буняев, М. Т. Черпак // Декларацийний патент на корисну модель №29336, Бюл. №1 (10.01.2008).
- 27\*. Rectangular band-pass filter having recesses of less than one-quarter wavelength depth dielectric insert with superconductive film within the recesses / L. Sun, X. Wang, J. Wang, Y. Wu, Y. He, H. Li, J. Huang, S. Luo, V. Skresanov,

- O. Barannyk, V. Glamazdin, V. Zolotarev, M. Natarov, M. Cherpak, O. Shubnyj // United States Patent. Pat. US 9,537,195 B2 (Jan. 3, 2017).
- 28\*. Conical Whispering Gallery Mode Resonator / A. A. Barannik, S. A. Bunyaev, N. T. Cherpak // 35th European Microwave Conference Proceeding (EuMC 2005). – Paris, France, 2005. – P. 1195-1197.
- 29\*. Whispering Gallery Modes in Dielectric Substrate under a Metal Disc / S. A. Bunyaev, A. A. Barannik, N. T. Cherpak // 37th European Microwave Conference Proceedings, (EuMC 2007). – Munich, Germany, 2007. – P. 961-963.
- 30\*. Quasi-Optical Dielectric Resonator-Based Technique of HTS Film Millimeter-Wave Surface Resistance Measurements: Three Types of Resonators / N. T. Cherpak, A. A. Barannik, S. A. Bunyaev // 38th European Microwave Conference Proceedings (EuMC 2008). – Amsterdam, Netherlands, 2008. – P. 789-792.
- 31\*. Slotted-Disk Sapphire Quasi-Optical Resonator with Conducting Endplates / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, K. I. Torohtiy and S. Vitusevich // 41st European Microwave Conference Proceedings (EuMC 2011). – Manchester, UK, 2011. – P. 830-833.
- 32\*. Hemispherical and aspheric WGM dielectric resonators with conducting plane: Radiation and conductivity losses in millimeter wavelength range / N. T. Cherpak, A. A. Barannik, M. S. Kharchenko and S. Vitusevich // Microwave Symposium Digest (MTT). – Montreal, Canada, 2012. – P. 1-3.
- 33\*. Experience in developing Ka-band waveguide filter with HTS E-plane insert / V. N. Skresanov, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Y. He, V. V. Glamazdin, V. A. Zolotaryov, A. I. Shubny, L. Sun, J. Wang, Y. Wu // Proc. International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter waves (MSMW-2013). – Kharkov, Ukraine, 2013. – V.1. – P. 661-663.
- 34\*. WGM Resonator-Based Measurement Technique for Weakly and Highly Absorbing Substances / N. Cherpak, A. Barannik, A. Gubin // Proc. International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON 2014). – Gdansk, Poland, 2014. – P. 1-4.
- 35\*. Radiation Losses of Sapphire WGM Resonators: Effects of Dielectric Disk Shape / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, M. S. Kharchenko, H. O. Hluchova, S. A. Vitusevich // 45th European Microwave Conference Proceedings (EuMC 2015). – Paris, France, 2015. – P. 960-963.
- 36\*. Electrodynamics Features and Design of Filter Based on HTS E-plane Insert in a Cross Waveguide / V. A. Skresanov, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, V. V. Glamazdin, A. I. Shubny, Y.-S. He, L. Sun // Proc. International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter waves (MSMW-2016). – Kharkov, Ukraine, 2016. – P. 1-4.
- 37\*. On Possibility of Creating HTS Microstrip Quasi-Optical Resonator / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, V. V. Glamazdin, Y.-S. He, L. Sun, Y. Bian, J. Wang // Proc. International Kharkov Symposium on Physics and Engineering

of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter waves (MSMW-2016). – Kharkov, Ukraine, 2016. – P. 1-3.

- 38\*. Microwave Surface Impedance and Complex Conductivity of  $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.926}\text{Co}_{0.074})_2\text{As}_2$  Single Crystals / N. Cherpak, A. Barannik, Y. He, L. Sun, X. Zhang, R. Prozorov, M. Tanatar // The 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductivity (M<sup>2</sup>S-2018): Abstract Book. – Beijing, China, 2018. – P. 312.

## АНОТАЦІЯ

Баранник О. А. **Квазіоптичні діелектричні резонатори з елементами незвичайних надпровідників.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2019.

Вперше проведено дослідження спектральних та енергетичних характеристик низки квазіоптичних діелектричних резонаторів (КДР) з елементами незвичайних надпровідників, а саме напівсферичного, конічного і асферичного резонаторів, що дозволяють локалізувати електромагнітне поле поблизу торцевої поверхні, яка є досліджуваним зразком. На цій основі обґрунтовано можливість дослідження індивідуальних мікрохвильових імпедансних характеристик плівок незвичайних надпровідників (на прикладі плівок  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ ) за мікрохвильовим відгуком КДР, що вимірюється.

Обґрунтовано можливість проведення досліджень фізичних властивостей незвичайних надпровідників малих розмірів з використанням мікрохвильового відгуку КДР. З цією метою проведено дослідження спектральних та енергетичних характеристик КДР у формі диска з радіальною щілиною і досліджуваним зразком у ній.

З використанням нової техніки, а саме із застосуванням сапфірового напівсферичного КДР, що дозволяє підвищити чутливість вимірів поверхневого опору надпровідників  $R_s$  у мм діапазоні довжин хвиль, експериментально отримано температурну залежність  $R_s$  епітаксialної плівки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ , нанесеної на монокристалічну підкладку  $\text{MgO}$ , у широкому температурному інтервалі, від 2 до до  $\sim 90$  К. Отримано лінійну залежність  $R_s(T)$  при  $T < 15$  К, яка узгоджується з результатами інших авторів, що вказує на  $d$ -хвильову симетрію параметра порядку в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ . При цьому виявлено, що залишковий опір  $R_{res}$  змінюється за законом  $\omega^{3/2}$ . Також проведено дослідження поверхневого опору  $R_s$  епітаксialної плівки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  залежно від її товщини ( $df = 75\text{-}600$  нм). Експериментально показано, що ефективне значення поверхневого опору  $R_s^{eff}$  зменшується зі збільшенням товщини плівки і при  $df > 300$  нм прагне до значення опору для об'ємного зразка.

Вперше досліджено мікрохвильові імпедансні властивості монокристалів оптимально допованого пніктида  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  у 8-мм діапазоні довжин хвиль

за допомогою нової техніки на базі КДР з радіальною щілиною і зразком в ній; при цьому отримано температурні залежності комплексної провідності, глибини проникнення поля і також часу квазічасткового розсіювання. Проведено комплексне дослідження надпровідників, які містять Fe із застосуванням двочастотного підходу до вивчення різних складів незвичайних надпровідників у широкому температурному інтервалі, включаючи критичну температуру  $T_c$ . На основі отриманих температурних залежностей імпедансних властивостей і комплексної провідності досліджених надпровідників ( $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ,  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ ) встановлено, що квазічастинкова провідність зростає з пониженням температури, що обумовлено різким зниженням швидкості розсіювання квазічастинок.

Реалізовано оригінальні мікрохвильові пристрої на основі плівок ВТНП ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ ), а саме, мікросмуговий резонатор з хвилями шепочучої галереї, локалізованими під диском надпровідника, який розташовано на діелектричній підкладці, і смуго-проникний фільтр з E-площинною вставкою в хрестоподібному хвилеводі.

**Ключові слова:** мікрохвильовий відгук, діелектричний резонатор, моди шепочучої галереї, комплексна провідність, незвичайні надпровідники, поверхневий імпеданс.

## АННОТАЦІЯ

Баранник А. А. **Квазиоптические диэлектрические резонаторы с элементами необычных сверхпроводников.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, 2019.

Впервые проведены исследования спектральных и энергетических характеристик ряда квазиоптических диэлектрических резонаторов (КДР) с элементами необычных сверхпроводников, а именно: полусферического, конусообразного и асферического резонаторов, позволяющих локализовать электромагнитное поле вблизи торцевой поверхности, которые являются исследуемыми образцами. На этой основе обоснована возможность исследования индивидуальных микроволновых импедансных характеристик пленок необычных сверхпроводников (YBCO) по измеренному микроволновому отклику КДР.

Обоснована возможность проведения исследований физических свойств необычных сверхпроводников малых размеров с использованием микроволнового отклика КДР. С этой целью проведены исследования спектральных и энергетических характеристик КДР в форме диска с радиальной щелью и исследуемым образцом.

С использованием новой техники, а именно с применением сапфирового

полусферического КДР, позволяющей повысить чувствительность измерений поверхностного сопротивления сверхпроводников  $R_s$  в мм диапазоне длин волн, экспериментально получена температурная зависимость  $R_s$  эпитаксиальной пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-\sigma}$ , нанесенной на монокристаллическую пленку  $MgO$ , в широком температурном интервале, от 2 К до  $\sim 90$  К. Получена линейная зависимость  $R_s(T)$  при  $T < 15$  К, которая согласуется с результатами других авторов, что указывает на  $d$ -волновую симметрию параметра порядка в  $YBa_2Cu_3O_{7-\sigma}$ . При этом обнаружено, что остаточное сопротивление  $R_{res}$  изменяется по закону  $\omega^{3/2}$ . Также проведены исследования поверхностного сопротивления  $R_s$  эпитаксиальной пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-\sigma}$  в зависимости от ее толщины ( $d_f = 75\text{--}600$  нм). Экспериментально показано, что эффективное значение поверхностного сопротивления  $R_s^{eff}$  уменьшается с увеличением толщины и при  $d_f > 300$  нм стремится к значению сопротивления для объемного образца.

Впервые исследованы микроволновые импедансные свойства монокристалла оптимально допированного пниктида  $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$  в 8-мм диапазоне длин волн с помощью новой техники на базе КДР с радиальной щелью и образцом в ней; при этом получены температурные зависимости комплексной проводимости, глубины проникновения и времени квазичастичного рассеяния. Проведено комплексное исследование Fe-содержащих сверхпроводников с применением двухчастотного подхода к изучению различных составов необычных сверхпроводников в широком температурном интервале, включая критическую температуру  $T_c$ . На основе полученных температурных зависимостей импедансных свойств и комплексной проводимости исследованных сверхпроводников ( $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ ,  $FeSe_{1-x}Te_x$ ) установлено, что квазичастичная проводимость растет с понижением температуры, что обусловлено резким снижением скорости рассеяния квазичастиц.

Реализованы оригинальные микроволновые устройства на основе пленок ВТСП ( $YBa_2Cu_3O_{7-\sigma}$ ), а именно: микрополосковый резонатор с волнами шепчущей галереи, локализованными под диском сверхпроводника, расположенного на диэлектрической подложке, и полосно-пропускающий фильтр с Е-плоскостной вставкой в крестообразном волноводе.

**Ключевые слова:** микроволновый отклик, диэлектрический резонатор, моды шепчущей галереи, комплексная проводимость, необычные сверхпроводники.

## ABSTRACT

Barannik A. A. **Quasi-optical dielectric resonators with elements of unusual superconductors.** – The Manuscript.

Thesis for Doctor of Science degree by specialty 01.04.03 – radiophysics. O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The spectral and energy characteristics of a number of quasioptical dielectric resonators (QDR) with elements of unusual superconductors, namely, hemispherical, cone-shaped, and aspherical resonators, which make it possible to localize the electromagnetic field near the endplate, which is the studied samples, were studied for the first time. On this basis, the possibility of studying the individual microwave impedance characteristics of films of unusual superconductors (on the example of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  films) based on the measured microwave response of the QDR is substantiated.

The possibility of investigating the physical properties of unusual small-sized superconductors using the microwave response of the QDR is substantiated. For this purpose, the spectral and energy characteristics of the QDR in the form of a disk with a radial gap and a sample under study in it were studied.

Using a new technique, namely, using a sapphire hemispherical QDR, which makes it possible to increase the sensitivity of measurements of the surface resistance of superconductors  $R_s$  in the mm wavelength range, the temperature dependence of  $R_s$  of the  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  epitaxial film deposited on a single-crystal MgO substrate was experimentally obtained in a wide temperature range from 2 K to  $\sim 90$  K. A linear dependence  $R_s(T)$  was obtained at  $T < 15$  K, which is consistent with the results of other authors, which indicates the  $d$ -wave symmetry of the order parameter in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ . It was found that the residual resistance  $R_{res}$  changes according to the law  $\omega^{3/2}$ . The surface resistance  $R_s$  of the  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$  epitaxial film was also studied depending on its thickness ( $df = 75\text{--}600$  nm). It was experimentally shown that the effective value of the surface resistance  $R_s^{eff}$  decreases with increasing film thickness and tends to the resistance value for the bulk sample at  $df > 300$  nm.

For the first time, the microwave impedance properties of a single crystal of optimally doped  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  pnictide in the 8-mm wavelength range were studied using a new technique based on QDR with a radial gap and a sample in it; the temperature dependences of the complex conductivity, penetration depth, and time of quasiparticle scattering are obtained. A comprehensive study of Fe-containing superconductors using a two-frequency approach was carried out to study various compositions of unusual superconductors in a wide temperature range, including the critical temperature  $T_c$ . Based on the obtained temperature dependences of the impedance properties and complex conductivity of the studied superconductors ( $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ ,  $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ ), it was found that the quasiparticle conductivity increases with decreasing temperature, which is due to a sharp decrease in the scattering rate of quasiparticles.

Original microwave devices based on HTS films ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ ) were realized, namely, a microstrip resonator with whispering gallery waves localized under a superconductor disk which located on a dielectric substrate, and a band-pass filter with an E-plane insert in a cross-shaped waveguide.

**Keywords:** microwave response, dielectric resonator, whispering gallery mode, complex conductivity, unusual superconductors, surface impedance.