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

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

> Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Проценко Ірина Олександрівна

УДК. 537.86

ДИСЕРТАЦІЯ

МІКРОХВИЛЬОВИЙ ВІДГУК КВАЗІОПТИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРІВ ІЗ СИЛЬНОПОГЛИНАЮЧОЮ РІДИНОЮ 01.04.03 — радіофізика

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,

результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ I. О. Проценко

Науковий керівник: Черпак Микола Тимофійович, доктор фізикоматематичних наук, профессор

АНОТАЦІЯ

Проценко I. О. Мікрохвильовий відгук квазіоптичних діелектричних резонаторів із сильнопоглинаючою рідиною. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 «радіофізика». – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню мікрохвильового відгуку квазіоптичних діелектричних резонаторів (КДР) із неоднорідностями, які рідкими діелектриками. Дослідження заповнено характеристик КДР мікрохвильової діелектрометрії створюють основу ЛЛЯ розвитку сильнопоглинаючих рідин малих об'ємів. В роботі розвинено методику визначення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності сильнопоглинаючої рідини за результатами вимірювання власних добротності та частоти резонатора. Уявлення про діелектричні властивості рідин, особливо розчинів біологічних рідин, можуть мати практичне значення як в промисловості (контроль якості різних рідких речовин), так і в медицині або біофізиці чи біоелектроніці (для визначення процентного вмісту різних компонентів біологічних рідин).

В роботі представлено результати чисельних та експериментальних досліджень радіально двошарових КДР з порожниною, яка заповнюється рідиною, та КДР з мікрофлюїдним каналом (МФК), у який також внесено рідину. Рідина чинить вплив на характеристики КДР, що дозволяє за добротністю виміряними частотою та КДР визначати комплексну цієї спеціальної діелектричну проникність рідини за ЛОПОМОГОЮ калібрувальної процедури.

Проведено низку заходів для підвищення точності визначення характеристик КДР. Показано, що результати експериментальних та чисельних досліджень добре узгоджуються. Це свідчить про те, що створені моделі для чисельних досліджень коректно описують реальні структури, і КДР можуть бути використані як основа вимірювальної комірки.

Реалізовано вимірювальні комірки для визначення комплексної діелектричної проникності на базі радіально двошарового КДР (в 8-мм діапазоні довжин хвиль) і двох видів КДР з МФК (в 8-мм діапазоні і короткохвильовій частині мм діапазону довжин хвиль). Показано переваги КДР з МФК для використання як основи вимірювальної комірки. Визначено комплексну діелектричну проникність розчинів біологічних рідин (глюкози, білків, альбумінів) у зазначених діапазонах з високою точністю (відносна похибка визначення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності становить 1-2 % в залежності від виду комірки, що використовується для вимірювання).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

1. Створено моделі реальних КДР двох типів, а саме, радіально двошарових та з МФК, що містять діелектричну рідину, які дозволяють чисельним методом визначати частоту і добротність резонаторів в межах похибки вимірювання цих величин.

2. Вперше експериментально і шляхом чисельного моделювання показано, що радіально двошаровий діелектричний резонатор і резонатор з МФК, виготовлені з лейкосапфіру, можуть бути використані у 8-мм діапазоні довжин хвиль як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідин з великими втратами за умови, що рідина займає малий об'єм (менше 1 мкл).

3. Показано, що радіаційні втрати в досліджених КДР нехтовно малі в порівнянні із втратами в рідині. Визначено переваги резонатора з МФК як основи вимірювальної комірки.

4. Вперше застосовано кварцовий резонатор з МФК для визначення властивостей рідин у субтерагерцовому (субТГц) діапазоні.

5. Розроблено методику визначення комплексної діелектричної проникності рідин з великими втратами по виміряному мікрохвильовому відгуку резонатора з рідиною, що досліджується.

Ключові слова: мікрохвильовий відгук, діелектричний резонатор, моди шепочучої галереї, комплексна діелектрична проникність, сильнопоглинаючі рідини.

ABSTRACT

Protsenko I. A. Microwave response of quasioptical dielectric resonators with highloss liquids. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The thesis is devoted to studying the microwave response of the WGM dielectric resonators with the inhomogeneous filled with liquid dielectrics. Investigation of the WGM resonators characteristics is the basis for the microwave dielectrometry of lossy liquids in small. The method of determining the real and imaginary rts of the complex permittivity of lossy liquid based on the results of measuring the eigen *Q*-factor and the frequency of the resonator has been developed. The information about the dielectric properties of liquids, especially of bioliquids solutions, can be of practical importance both in industry (quality control of various liquid substances) and in medicine or biophysics or bioelectronics (to determine the percentage content of various components of bioliquids).

The paper presents the results of numerical and experimental studies of radially two-layered WGM resonators with a liquid-filled cavity, and a WGM resonator with the microfluidic channel (MFC), filled with a liquid too. The liquid has an effect on the resonator characteristics, therefore it is possible to determine the complex permittivity of the liquid by means of a special calibration procedure.

A series of measures has been carried out to improve the measurement accuracy of the resonator characteristics. It is shown that the calculated data are in a good agreement with experimental ones. This suggests that the models for numerical studies describe the actual structures correctly, and the WGM resonators can be used as the basis of the measuring cell.

Measurement cells for complex permittivity obtaining based on a radiallytwo-layered WGM resonator (in the Ka-band) and two resonators with MFC (in the Ka-band and sub-THz) were realized. The advantages of the WGM resonators with MFC as a base of a measurement cell are shown. The complex permittivity of bioliquids solutions (glucose, proteins, and albumins) in these bands is determined with high accuracy (the relative error of the determination of the real and imaginary parts of the complex permittivity is 1-2%, depending on the type of cell used for measurement).

The scientific novelty of the results is as follows:

1. Models of two WGM resonators (radially two-layered resonator and resonator with a MFC) with a liquid dielectric are created. They allow obtaining the resonator frequency and *Q*-factor within the measurement error of the corresponding values. 2. For the first time, it is shown that a radially two-layered and a MFC sapphire resonators can be used in a Ka-band as the basis of a measurement cell for obtaining the complex permittivity of lossy liquids in small (liquid volume is less than 1 μ l). 3. It is shown that the radiation losses in the investigated WGM resonators are negligible compared with the losses in the liquid. The advantages of the resonator with MFC as the basis of the measurement cell are shown.

4. For the first time, a quartz resonator with an MFC was used to determine the properties of liquids in a subTHz range.

5. The method of obtaining the complex permittivity of lossy liquids by the measured microwave response of the resonator with the liquid under test is developed.

Keywords: microwave response, dielectric resonator, whispering gallery mode, complex permittivity, highly absorbing liquids.

Список публікацій здобувача

- Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electrodynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids / A.A. Barannik, N.T. Cherpak, Yu.V. Prokopenko, Yu.F. Filipov, E.N. Shaforost and I.A. Shipilova* // Meas. Sci. Technol. – 2007. – N. 18. – P. 2231-2238.
- 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. Том 6(20), № 3 С. 55-61.
- Whispering-Gallery-Mode Resonator Technique with Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids / A. I. Gubin. A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhäusser, and S.A. Vitusevich // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 2015. – Vol. 63, N. 6. – P. 2003-2009.
- 4. Измерительная ячейка на основе кварцевого квазиоптического резонатора исследования диэлектрических жидкостей для В субтерагерцевом диапазоне А. А. Баранник, С. А. Витусевич, / А. И. Губин, И. А. Проценко, Н. Т. Черпак // Радиофизика И электроника. –2016. – Том 7(21), № 2 – С. 74-78.
- Двухслойный квазиоптический лейкосапфировый резонатор для диэлектрометрии биологических жидкостей/ А. А. Баранник, С. А. Витусевич, И. А. Проценко // Радиофизика и электроника. – 2017. – Том 8(22), № 1 – С. 45-50.

^{*} Шипілова є прізвищем автора до реєстрації шлюбу

- Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich // THz for CBRN and Explosives Detection and Diagnosis 2017 / under editors M. Pereira, O. Shulika, NATO Science Series, Springer Academic Publishers, 2017. – P. 57-62.
- Whispering gallery mode sapphire resonator for microwave characterization of lossy liquids / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. F. Filippiov, Yu. V. Prokopenko, I. A. Shipilova // Proc. Int. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2007). – Kharkiv, Ukraine, 2007. – P. 922-924.
- Accurate permittivity characterization of liquids by means of WGM resonator with microfluidic / A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich // Proc. Int. Kharkiv Symp. Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2013). – Kharkiv, Ukraine, 2013. –P. 538-540.
- Biochemical liquids permittivity characterization technique based on whispering-gallery mode resonator with microfluidic channel / A.I. Gubin, A.A. Barannik, I.A. Protsenko, N.T. Cherpak, A. Offenhaeusser, S.A. Vitusevich // Proc. of 43rd Eur. Microwave Conference. – Nuremberg, Germany, 2013. – P. 314-317.
- 10.Dielectric resonators of different configurations as sensors for surface impedance of superconductors / M. Kharchenko, A. Barannik, I. Protsenko, 14th Kharkiv Young Scientists Conferenceon Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014). – Kharkiv, Ukraine, October 14-17, 2014.
- 11.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. Hlukhova, S. A. Vitusevich // Proc. of the 45 European Microwave Conference (EuMC 2015), Paris, 2015, P. 960-963.

- 12.Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich // NATO Advanced Research Workshop on THz Diagnostics of CBRN effects and Detection of Explosives & CBRN (Tera-MIR 2015), Izmir, Turkey, 2015, p. 56.
- 13.WGM resonators with microfluidic channel for sub-mm wave characterization of biological liquids / A. I. Gubin, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich, Proc. of the German Microwave Conf. (GeMiC-2016), Bochum, Germany, 2016, P. 15-18.

3MICT

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ВИЗНАЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ	
ПРОНИКНОСТІ РЕЧОВИН РЕЗОНАТОРНИМИ МЕТОДАМИ	20
1.1. Власна частота і добротність мікрохвильових резонаторів	20
1.2. Використання квазіоптичних резонаторів для визначення	
комплексної діелектричної проникності речовин	23
Висновки до розділу 1	34
РОЗДІЛ 2. РАДІАЦІЙНІ ВТРАТИ В КВАЗІОПТИЧНИХ	
ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ	35
2.1. Розрахунок радіаційних втрат діелектричних резонаторів	35
2.2. Циліндричний діелектричний резонатор зі зрізом	37
2.3. Резонатори, обмежені однією торцевою провідною стінкою	42
2.4. Циліндричний резонатор без торцевих провідних стінок	45
2.4.1. Вплив азимутальної щілини на характеристики резонатора	
без торцевих провідних стінок	45
2.4.2. Резонатори з мікрофлюїдним каналом	52
Висновки до розділу 2	55
РОЗДІЛ 3. РАДІАЛЬНО ДВОШАРОВИЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ	
РЕЗОНАТОР	57
3.1. Радіально двошаровий фторопластовий резонатор	57
3.2. Радіально двошаровий резонатор, виготовлений із лейкосапфіра	68
3.3. Радіально двошаровий резонатор як сенсор діелектричних	
властивостей рідини	78
Висновки до розділу 3	82
РОЗДІЛ 4. РЕЗОНАТОР З МІКРОФЛЮЇДНИМ КАНАЛОМ,	
ЗАПОВНЕНИМ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ РІДИНОЮ	84
4.1. Експериментальні дослідження резонатора з мікрофлюїдним	
каналом	85

4.2. Модель резонатора з мікрофлюїдним каналом для розрахунку	
його характеристик	88
4.3. Лейкосапфіровий резонатор з мікрофлюїдним каналом при	
заповненні його різними рідинами	91
4.4. Визначення діелектричної проникності розчинів біологічних	
рідин	93
4.5. Кварцовий резонатор з мікрофлюїдним каналом в субТГц	
діапазоні	98
4.5.1. Вибір діелектричного резонатора як основи вимірювальної	
комірки	98
4.5.2. Циліндричний кварцовий резонатор. Вибір робочої моди	99
4.5.3. Кварцовий резонатор, вкритий шаром пластику з	
мікрофлюїдним каналом	101
4.5.4. Кварцовый резонатор з мікрофлюїдним каналом,	
заповненим різними рідинами	104
4.6. Порівняння вимірювальних комірок	110
Висновки до розділу 4	112
ВИСНОВКИ	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	116
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	127

ВСТУП

Актуальність теми

Фундаментальні знання про властивості біологічних і хімічних рідин мають вирішальне значення для розуміння складних процесів в цих рідких середовищах. Взаємодія електромагнітних мікрохвиль з біологічними рідинами дозволяє вивчати властивості цих речовин, а також розробляти методику моніторингу властивостей рідин, що може бути актуальним для деяких областей біології і медицини. Комплексна діелектрична проникність – це важлива характеристика рідких діелектриків, що визначає характер взаємодії між електромагнітними хвилями і рідиною.

Для визначення діелектричної проникності рідини у мікрохвильовому діапазоні можуть використовуватися як резонаторні, так і нерезонаторні методи. І в тому, і в іншому випадках вимірювання діелектричної проникності пов'язано з прямим вимірюванням мікрохвильового відгуку структури, що викликає необхідність дослідження останнього. При виборі методу дослідження рідин важливо керуватися критерієм високої точності і чутливості. Також при дослідженні біологічних рідин важливо, щоб структура, яка використовується для вимірювань, давала можливість дослідження рідин малого об'єму, тому що біологічні рідини, як правило, є важкодоступними і мають значну вартість. Крім того, вимірювання діелектричної проникності зазначених рідин в мікрохвильовому діапазоні ускладнюється значними втратами мікрохвильової енергії в цих рідинах.

Найбільш поширеними на сьогодні є нерезонансні методи, засновані на лініях передачі, особливо на коаксіальних лініях [1]. Однак вони мають відносно низьку чутливість і вимагають попередньої процедури калібрування, яка значно знижує точність вимірювання. Ці методи використовуються в смузі частот до 40-50 ГГц [2]. Тут точність вимірювань діелектричної проникності нижче 5%, а об'єм рідини, необхідний для досліджень, становить величину не

менше 5-10 мл. Застосування хвилевідних методів визначення діелектричної проникності речовин [3] дозволяє підвищити точність вимірювань, однак для проведення вимірювань потрібно також мати відносно великий об'єм речовини.

Резонаторні методи визначення діелектричної проникності різних речовин характеризуються вищими значеннями точності і чутливості. Для дослідження рідин в мікрохвильовому діапазоні запропоновано і створено різні типи об'ємних резонаторів, що працюють на основному типі коливань (див., наприклад, [4]). Перехід у міліметровий діапазон хвиль супроводжується зменшенням геометричних розмірів резонаторів, що призводить до значного ускладнювання у процесі виготовлення таких резонаторів і, найголовніше, до зниження їх добротності.

Раніше в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України (ІРЕ НАН України) було показано, що доцільно використовувати як основу вимірювальної комірки діелектричні резонатори з коливаннями шепочучої галереї (ШГ), тому що такі резонатори дозволяють отримувати високі значення добротності [5-6]. Ці резонатори є, по суті, квазіоптичними пристроями. Введення в резонатор малої неоднорідності у вигляді порожнини або отвору, заповнених досліджуваною рідиною, дозволяє визначати діелектричну проникність рідини, що займає малий об'єм [7]. Уникнути технічних складнощів, пов'язаних з розміщенням рідини в середині резонатора, дозволяє винесення зразка за межі діелектрика, з якого виготовлено резонатор. Так, наприклад, попередні дослідження в [8-9] показали, що перспективним є резонатор з мікрофлюїдной системой як основа вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності рідин, що займають малі об'єми (менше 1 мкл),.

Характеристики резонатора з коливаннями ШГ можна знайти шляхом розв'язання характеристичного рівняння, проте цей підхід в даний час здійснено тільки для простих симетричних структур [4-5]. Отже, виникає необхідність у розвитку підходів, що дозволяють враховувати вплив

неоднорідностей на характеристики резонаторів і аналізувати складні структури різної форми.

Для того, щоб модель якомога точніше описувала реальну структуру, необхідно в розрахунок закладати параметри резонатора або його складових частин, проте на практиці виявляється, що вони не завжди можуть бути точно виміряні. Крім того, геометрія реальної структури певним чином завжди відрізняється від моделі, що аналізується. З метою вирішення цієї проблеми необхідно вжити додаткові заходи на етапі налагодження моделі для чисельного рахунку.

У більшості робіт, присвячених дослідженню резонаторних структур з рідиною, вивчається вплив властивостей рідини на характеристики резонатора. При цьому метод визначення дійсної і уявної частини діелектричної проникності рідини за вимірюваним мікрохвильовим відгуком резонатора, тобто за знайденими значеннями резонансної частоти і добротності, детально не розроблено для випадку дослідження рідин з великими втратами. Тому необхідним є пошук нових способів вирішення даної, по суті зворотної електродинамічної, задачі, які не потребують тривалої процедури підбору значень діелектричної проникності досліджуваної рідини так, щоб значення резонансної частоти і добротності резонатора, отримані шляхом розрахунку і експерименту, збігалися в межах похибки вимірювання.

Техніка на основі діелектричних резонаторів з хвилями ШГ поширена переважно в 8-мм діапазоні. На більш високих частотах дослідженню властивостей діелектричних резонаторів як сенсорів комплексної проникності рідин не приділялося достатньо уваги. Визначення відгуку діелектричного резонатора з рідинами на більш високих частотах не тільки дозволяє зменшити величину необхідного об'єму досліджуваної речовини, але і розширити фундаментальні уявлення про діелектричних властивостях рідин.

Також при проведенні всіх досліджень з використанням резонаторних структур актуальним є пошук способів зменшення втрат мікрохвильової енергії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана у відділі радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України відповідно до планів наступних НДР:

– «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 (виконавець);

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

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

і за часткової підтримки Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) project (German Research Foundation Project VI 456/3-1).

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягає в дослідженні мікрохвильового відгуку квазіоптичних діелектричних резонаторів (КДР) з діелектричними рідинами і впливу властивостей рідин, що характеризуються високими втратами і займають малі об'єми, на характеристики зазначених резонаторів, в створенні вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідин, в тому числі біологічних рідин, та розробки відповідного методу визначення комплексної діелектричної проникності рідин.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було розв'язати наступні задачі:

– дослідження впливу властивостей рідин на розподіл поля, спектральні

та енергетичні характеристики радіально двошарових резонаторів і резонаторів з мікрофлюїдним каналом (МФК);

обґрунтування можливості використання резонаторних структур як
 основи вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності
 рідин в міліметровому (мм) діапазоні довжин хвиль;

 оптимізація параметрів КДР для поліпшення характеристик вимірювальних комірок;

 – розробка методики визначення дійсної і уявної частин діелектричної проникності рідин по виміряним частоті і добротності резонатора з певною модою.

Об'єкт дослідження – взаємодія електромагнітного поля з рідкими діелектричними середовищами в мікрохвильовому резонаторі.

Предмет дослідження – мікрохвильовий відгук КДР з діелектричною рідиною, яка характеризується великими втратами мікрохвильової енергії і малим об'ємом.

Методи досліджень

У роботі використовуються радіофізичні методи визначення відгуку резонаторів з модами ШГ з діелектричними рідинами. Спектральні та енергетичні характеристики структур визначалися на підставі виміряної амплітудно-частотної характеристики КДР і за допомогою моделі структури, створеної в модулі Radiofrequency Module програми Comsol MULTIPHYSICS. В даному модулі реалізовано розв'язання рівнянь Максвелла методом кінцевих елементів. Результати експериментальних досліджень знаходяться у відповідності з результатами чисельних досліджень, що свідчить про достовірність отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Створено моделі для реальних КДР двох типів, а саме, радіально двошарових та з МФК, що містять діелектричну рідину, якії дозволяють чисельним методом визначати частоту і добротність резонаторів в межах похибки вимірювання цих величин.

2. Вперше експериментально і шляхом чисельного моделювання показано, що радіально двошаровий діелектричний резонатор і резонатор з МФК, виготовлені з лейкосапфіру, можуть бути використані у 8-мм діапазоні довжин хвиль як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідин з великими втратами за умови, що рідина займає малий об'єм (менше 1 мкл).

 Показано, що радіаційні втрати в досліджених КДР нехтовно малі в порівнянні із втратами в рідині. Визначено переваги резонатора з МФК як основи вимірювальної комірки.

4. Вперше застосовано кварцовий резонатор з МФК для визначення властивостей рідин у субтерагерцовому (субТГц) діапазоні.

5. Розроблено методику визначення комплексної діелектричної проникності рідин з великими втратами по виміряному мікрохвильовому відгуку резонатора з рідиною, що досліджується.

Практичне значення одержаних результатів

1. Дослідження відгуку КДР з неоднорідностями, заповненими рідиною, створюють основу для розвитку мікрохвильової діелектрометрії сильнопоглинаючих рідин малих об'ємів.

2. Показано, що на етапі проектування вимірювальної комірки на основі КДР, зокрема, при виборі оптимального місця розташування неоднорідності з рідиною, необхідно враховувати розподіл електромагнітного поля КДР і вміти ідентифікувати робочу моду.

3. В роботі розвинено методику визначення дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності сильно поглинаючої рідини за результатами вимірювання власних добротності та частоти резонатора, яка не обмежується типом резонатора та його частотою

4. Уявлення про діелектричні властивості рідин, особливо розчинів біологічних рідин, можуть мати практичне значення як в промисловості (контроль якості різних рідких речовин), так і в медицині або біофізиці чи біоелектроніці (для визначення процентного вмісту різних компонентів біологічних рідин).

Особистий внесок здобувача

Публікації, які складають основу дисертаційної роботи, виконані у співавторстві. Автор створила моделі для чисельного розрахунку резонаторних структур [2*-6*, 8*-13*], провела чисельні дослідження [1*-13*], брала участь в проведенні експериментальних досліджень [3*, 5*], в аналізі та обговоренні отриманих результатів, і написанні статей [1*-13*].

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, переліку використаних джерел наукової літератури та додатка. Обсяг дисертації становить 129 сторінок. Дисертація містить 50 рисунків. Список використаних джерел наукової літератури містить 87 найменування.

Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень за темою дисертації доповідалися і обговорювалися на 7 конференціях і симпозіумах:

– International Kharkov Symposium Physics and Engrg. of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW) у 2007 г. і в 2013 г. (Харків, Україна);

– European Microwave Conference (EuMC) у 2013 г. (Нюрнберг, Німеччина) і в 2015 г. (Париж, Франція);

– NATO Advanced Research Workshop on THz Diagnostics of CBRN effects and Detection of Explosives & CBRN (Tera-MIR) в 2015 г. (Ізмір, Туреччина);

– German Microwave Conference (GeMiC) в 2016 г. (Бохум, Німеччина), Young Sci. Conf. Radiophysics and Electronics (YSC-14) в 2014 г. (Харків, Україна).

Публікації

Основний зміст дисертації викладено в 13 наукових публікаціях: в 7 матеріалах наукових конференцій та 6 статтях наукових зарубіжних і вітчизняних видань, які входять до переліку МОН України.

- 1*.Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electrodynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids / A.A. Barannik, N.T. Cherpak, Yu.V. Prokopenko, Yu.F. Filipov, E.N. Shaforost and I.A. Shipilova // Meas. Sci. Technol. 2007. N. 18. P. 2231-2238.
- 2*.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.– Том 6(20), № 3 С. 55-61.
- 3*.Whispering-Gallery-Mode Resonator Technique with Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids / A. I. Gubin. A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhäusser, and S.A. Vitusevich

// IEEE Trans. on MW Theory and Tech. – 2015. – Vol. 63, N. 6. – P. 2003-2009.

- 4*.Измерительная ячейка на основе кварцевого квазиоптического резонатора диэлектрических жидкостей для исследования В субтерагерцевом С. А. Витусевич, диапазоне / А. А. Баранник, Н. Т. Черпак А. И. Губин, И. А. Проценко, // Радиофизика И электроника. – 2016. – Том 7(21), № 2 – С. 74-78.
- 5*. Двухслойный квазиоптический лейкосапфировый резонатор для диэлектрометрии биологических жидкостей / А. А. Баранник, С. А. Витусевич, И. А. Проценко Радиофизика и электроника. – 2017. – Том 8(22), № 2 – С. 45-50.
- 6*.Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak // THz for CBRN and Explosives' Detection and Diagnosis 2017 / under editors M. Pereira, O. Shulika, NATO Science Series, Springer Academic Publishers, 2017. – P. 57-62.
- 7*. Whispering gallery mode sapphire resonator for microwave characterization of lossy liquids / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. F. Filippiov, Yu. V. Prokopenko, I. A. Shipilova // Proc. of The Sixth Int. Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2007). Kharkiv, Ukraine, 2007. P. 922-924.
- 8*. Accurate permittivity characterization of liquids by means of WGM resonator with microfluidic / A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich // Proc. Int. Kharkiv Symp. Microwaves, MM and Sub-MM Waves (MSMW'2013). Kharkiv, Ukraine, 2013. P. 538-540.
- 9*.Biochemical liquids permittivity characterization technique based on whispering-gallery mode resonator with microfluidic channel / A.I. Gubin,
 A.A. Barannik, I.A. Protsenko, N.T. Cherpak, A. Offenhaeusser,

S.A. Vitusevich // Proc. of 43rd Eur. Microwave Conference. – Nuremberg, Germany, 2013. – P. 314-317.

- 10*. Dielectric resonators of different configurations as sensors for surface impedance of superconductors / M. Kharchenko, A. Barannik, I. Protsenko, 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Eelectronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014). – Kharkiv, Ukraine, October 14-17, 2014.
- 11*. 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. Hlukhova, S. A. Vitusevich // Proc. of the 45 European Microwave Conference (EuMC 2015), Paris, 2015, P. 960-963.
- 12*. Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich // NATO Advanced Research Workshop on THz Diagnostics of CBRN effects and Detection of Explosives & CBRN (Tera-MIR 2015), Izmir, Turkey, 2015, p.56.
- 13*. WGM resonators with microfluidic channel for sub-mm wave characterization of biological liquids / A. I. Gubin, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich, Proc. of the German Microwave Conf. (GeMiC-2016), Bochum, Germany, 2016, P. 15-18.

РОЗДІЛ 1

ВИЗНАЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ РЕЧОВИН РЕЗОНАТОРНИМИ МЕТОДАМИ

1.1. Власна частота і добротність мікрохвильових резонаторів

Резонатор є одним з найпоширеніших пристроїв у радіофізиці та мікрохвильовій техніці. Згідно з конфігурацією резонатори можуть бути одно-, двух- та тривимірними (див., наприклад, [10]). В радіофізиці мм діапазона, як правило, використовуються тривимірні об'ємні резонатори, які резонують на низці мод (типів коливань), що характеризуються трьома модовими індексами, які описують розподіл поля уздовж трьох координат.

Теорія об'ємних резонаторів найпростіших форм тісно пов'язана з теорією хвилеводів. Об'ємні резонатори циліндричної та прямокутної форм можуть бути розглянуті як відрізки відповідних ліній передавання, тобто металевих чи діелектричних хвилеводів [11].

В резонаторі з ідеально провідними стінками резонансні криві мають вигляд δ -функцій, і збуджувати їх можна було б тільки на резонансних частотах. Однак провідники і діелектрики характеризуються скінченними, хоча в потрібних для практики випадках і малими чи дуже малими, втратами. В результаті коливальний процес в резонаторі є згасаючим, тобто він представляє суперпозицію частот в околі частоти ω_0 . При цьому резонаторна крива набуває кінцеву ширину $\Delta \omega$, яка визначається відношенням середньої енергії *W*, збереженої в резонаторі, до енергії втрат за період коливань, тобто добротністю резонатора

$$Q = \frac{2\pi}{T_0} \frac{W}{P_{\rm dis}} = \omega_0 \frac{W}{P_{\rm dis}},\tag{1.1}$$

де $P_{\rm dis}$ – середня потужність теплових втрат, T_0 – період коливань у відсутності втрат.

Добротність резонатора залежить від типу коливань. Якщо для простоти обмежитися об'ємними металевими резонаторами, то запас енергії в них пропорціональний об'єму резонатора V, а енергія, яка втрачається в системах, пропорціональна об'єму, в якому поглинається енергія, $S\delta_S$, де S – площа стінок, δ_S – товщина скін-шару. Оскільки $V \sim \lambda^3$, $S \sim \lambda^2$ і $\delta S \sim \lambda^{1/2}$, то $Q \sim \lambda^{1/2}$, тобто добротність (для одного і того ж типу коливань) зменшується зі зменшенням довжини хвилі, тому в мм діапазоні добротність стає низькою. Оскільки розміри резонатора також зменшуються (пропорційно λ), то очевидною стає непрактичність таких пристроїв в мм діапазоні довжин хвиль.

При не надто великих втратах в резонаторі величина P_{dis} в (1.1) може бути представлена у вигляді суми парціальних втрат у діелектрику, провідних поверхнях чи зразках та радіаційних втрат. Відповідним чином в розділі 2 вираз (1.1) буде записано через парціальні добротності. Якщо в (1.1) не ураховуються втрати, які обумовлено елементами зв'язку з лініями передачі, то відповідна величина Q відповідає власній добротності і може бути виражена через частоту власних коливань резонатора (див. п. 1.2).

Взагалі, будь-який резонатор є осцилятором з угамівністю, характеристики якого не важко отримати шляхом розв'язання диференційного рівняння [12]:

$$\ddot{u}(t) + \eta \dot{u}(t) + \omega_0^2 u(t) = 0.$$
(1.2)

Змінна u(t) (де t – час) може бути компонентами електричного чи магнітного поля чи кутовою амплітудою маятника. Загасання коливань представлено коефіцієнтом η . Резонансна частота осцилятора без втрат позначається як ω_0 . Розв'язком рівняння (1.2) є вираз

$$u(t) = \exp(-\frac{\eta t}{2})\exp[i(\omega_1 t + \varphi)]$$

з резонансною частотою

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 - \frac{1}{4}\eta^2$$

звідки видно, що в загальному випадку втрати в усіх осциляторах приводять до зниження власної частоти, бо $\omega_1 < \omega_0$.

Цей висновок має безпосереднє відношення до даної роботи, оскільки показує, що втрати в резонаторах не тільки визначають власну добротність, але й чинять істотний вплив на значення власних частот. Останнє стає принципово важливим, якщо резонатор містить сильнопоглинаючий елемент (наприклад, водний розчин якоїсь речовини для дослідження). З іншого боку, при великих значеннях дійсної частини ε' комплексної діелектричної проникності $\varepsilon = \varepsilon' - i \varepsilon'' \varepsilon'$ чинить вплив не тільки на частоту ω_0 , але і на добротність резонатора.

В практиці мікрохвильової радіофізики використовують резонатори різноманітних, часто складних форм, для яких визначення власних частот і розподілу полей неможливо знайти аналітичним шляхом. Проте особливості власних частот і коливань є спільними для резонаторів будь-якої форми. Будьякий об'ємний резонатор має дискретний спектр резонансних частот. Кожній частоті відповідає певний розподіл поля в резонаторі. Найнижчій резонансній частоті відповідає основний тип коливань (мода). При переході до коротких довжин хвиль можна було б залишати розміри резонатора незмінними і використовувати коливання вищих типів. Однак з ростом частоти щільність мод зростає і, оскільки кожна резонансна крива має кінцеву ширину, то при достатньо високих частотах резонансні криві можуть перекриватися, що вказує на зникнення резонансних властивостей.

1.2. Використання квазіоптичних резонаторів для визначення комплексної діелектричної проникності речовин

Особливо перспективними для застосування у мм і субмм діапазонах довжин хвиль є квазіоптичні діелектричні резонатори (КДР), або резонатори з модами ШГ [4-5, 13-14]. Резонатори з модами ШГ характеризуються малими радіаційними втратами електромагнітної енергії, а, отже, високими значеннями добротності. Величина добротності таких резонаторів обумовлена переважно втратами в матеріалах, які застосовуються для виготовлення резонаторів.

Електромагнітне поле діелектричних резонаторів описується рівняннями Максвелла, які при відсутності джерел збудження мають такий вигляд [15]

rot
$$\vec{H} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$$
; rot $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$,

де \vec{H} , $\vec{E} \sim e^{-i\omega t}$ – вектори напруженості магнітного та електричного полів, ω – циклічна частота, \vec{D} і \vec{B} – вектори індукції електричного і магнітного полів.

Рівняння Максвела доповнюються матеріальними рівняннями, які пов'язують параметри електромагнітного поля і середовища

$$\vec{D} = \hat{\varepsilon}\vec{E}, \qquad \vec{B} = \hat{\mu}\vec{H},$$

де $\hat{\varepsilon}$, $\hat{\mu}$ – тензори діелектричної і магнітної проникності середовища відповідно.

Частота власних коливань резонатора є комплексною величиною: $\omega = \omega' - i\omega''$, де $\omega = 2\pi f$. Власна добротність резонатора Q визначається співвідношенням

$$Q = \frac{\omega'}{2\omega''}$$

Таким чином, розподіл електромагнітного поля, частота власних коливань ω і власна добротність Q резонатора залежать від діелектричної проникності середовищ, з якими взаємодіє електромагнітне поле.

На цьому явищі засновані резонаторні методи визначення діелектричної проникності речовин. Так, в роботі [16] експериментальним шляхом було отримано наближену формулу, яка показує зв'язок між частотою коливань резонатора, розмірами резонатора і дійсною частиною комплексної діелектричної проникності матеріалу, з якого виготовлено резонатор. Ця формула отримана для циліндричного діелектричного резонатора з нижчими типами коливань. Таким чином, з'явилася можливість, знаючи розміри резонатора і вимірявши частоту власних коливань резонатора, визначати дійсну частину діелектричної проникності матеріалу, з якого виготовлено діелектричного діелектричного резонатора, визначати 25 ГГц, на вищих частотах їх розміри неприпустимо малі для ефективного використання.

У роботах [17-19] розглянуто циліндричний діелектричний резонатор з коливаннями ШГ, обмежений торцевими провідними стінками (ТПС) (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Діелектричний резонатор, обмежений двома ТПС (рисунок взято із [5])

Присутність ідеально провідних торцевих стінок дозволяє застосувати аналітичний підхід до дослідження характеристик резонаторної структури. З урахуванням граничних умов для компонент електромагнітного поля було отримано характеристичне рівняння резонатора, яке пов'язує комплексну частоту резонатора з відповідною модою коливань і діелектричну проникність матеріалу резонатора [19-21].

Таким чином, було показано принципову можливість визначати комплексну діелектричну проникність матеріалів за допомогою КДР з відомими геометричними розмірами за виміряним відгуком резонатора, і проведено такі дослідження [22]. Визначення відгуку резонатора з різними речовинами викликає інтерес не тільки для наукових досліджень, але і при тестуванні або ж моніторингу характеристик зазначених речовин в різних галузях, таких як медицина, біотехнології, харчова промисловість, охорона довкілля та ін.

Таким чином можна досліджувати тверді діелектрики з малими величинами тангенса кута діелектричних втрат, тому що в даному випадку моди ШГ збуджуються безпосередньо в досліджуваній речовині. Однак, хоча поле коливань ШГ переважно зосереджено в діелектрику, з якого виготовлено резонатор, частина поля виходить за межі резонатора в навколишнє середовище. Отже, параметри зовнішнього середовища також впливають на розподіл поля, частоту і добротність резонатора. Це дозволяє, досліджуючи відгук резонатора, визначати діелектричну проникність середовища, в якій знаходиться резонатор. Так, наприклад, в [23-25] досліджується відгук резонаторів зі сферичними поверхнями, занурених в рідину.

У роботах [26-27] було проведено розрахунки відгуку півсферичного резонатора, виготовленого з фторопласту, з ідеально провідною плоскою поверхнею (рис. 1.2), в залежності від діелектричної проникності середовища, в яку даний резонатор був поміщений. В [28-30] показано, що резонатори з циліндричними поверхнями дозволяють визначати діелектричну проникність середовища, в яку вони поміщаються. В [28] запропоновано використовувати такий резонатор як датчик температури навколишнього середовища. Також КДР, занурений в рідину, було запропоновано використовувати для контролю якості виноматеріалів шляхом визначення діелектричної проникності досліджуваних розчинів [29, 31].



Рисунок 1.2 – Півсферичний резонатор з плоскою провідною поверхнею (рисунок взято із [5])

Якщо зразок речовини віднесено від поверхні резонатора на невелику відстань, залишаючись при цьому в ділянці електромагнітного поля резонатора, то такий зразок також вносить збурення в поле резонатора, і характеристики матеріалу зразка впливають на резонансну частоту і добротність. Таке розташування зразка дозволяє зменшити втрати енергії в структурі у порівнянні з втратами резонатора, повністю зануреного в рідке середовище. У роботах [32-33] показано, що КДР можуть бути використані для визначення діелектричної проникності рідин або сипучих речовин, зразки яких знаходяться на деякій відстані від поверхні резонатора. При цьому необхідно ретельно підбирати оптимальну відстань, на яку віднесено досліджуваний зразок, щоб забезпечити високу чутливість вимірювань.

Для визначення діелектричної проникності рідких діелектриків також використовуються КДР з порожниною, куди поміщається досліджувана рідина. Рідина при цьому є частиною резонатора, і її властивості впливають на характеристики резонатора. Це дозволяє визначати діелектричну проникність рідини по виміряним частоті і добротності резонатора з певною модою, якщо відомі властивості інших матеріалів, які застосовувалися для виготовлення резонатора, і геометричні розміри всіх елементів резонаторної структури [4-5, 34]. Так, в [35] проведено дослідження півсферичного фторопластового резонатора з порожниною, яка заповнювалася різними рідинами, як з малими, так і з великими втратами. В [6, 36-37] було запропоновано використовувати визначення діелектричної проникності речовин циліндричний для діелектричний резонатор з двома ТПС з порожниною, тобто радіально резонатор, внутрішній двошаровий шар якого являє створюється досліджуваною рідиною досліджувану рідину. Було проведено експериментальні дослідження такого резонатора і зроблено розрахунок резонансної частоти і добротності резонатора на основі характеристичного рівняння. Показано, що резонансна частота і добротність резонатора залежать від властивостей рідини у внутрішньому шарі. Звідси випливає принципова можливість визначати властивості досліджуваної рідини по виміряним характеристикам резонатора.

Як на етапі вибору геометричних розмірів діелектричного резонатора, так і при проведенні досліджень необхідно брати до уваги особливості розподілу електромагнітного поля резонатора. В [38-39] детально розглянуто процеси зміни розподілу електромагнітного поля резонаторів, обумовлені зміною радіуса внутрішньої порожнини, і вплив дійсної частини комплексної діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат рідини, що заповнює порожнину, на розподіл поля резонатора. Показано, що дані процеси супроводжуються зміною частоти і добротності резонатора.

Особливий інтерес представляють дослідження відгуку діелектричних резонаторів з малими об'ємами діелектричної рідини. Можливість застосування КДР для визначення діелектричної проникності рідин малих об'ємів особливо актуальна при дослідженні розчинів біологічних рідин [40].

Для мінімізації об'єму досліджуваних рідин можливо реалізувати два шляхи: зменшення розміру резонатора або введення в резонатор додаткових малих отворів або елементів, заповнених рідиною.

Якщо для зменшення об'єму рідини необхідно зменшити розміри резонатора, то, щоб не виходити за межі необхідного діапазону, необхідно використовувати виготовлення резонатора діелектрик, ДЛЯ шо характеризується великими значеннями дійсної частини діелектричної проникності [13]. Так, в порівнянні з фторопластом, значними величинами дійсної частини діелектричної проникності характеризуються лейкосапфір, різні види кераміки та ін. Так, наприклад, в 8-мм діапазоні довжин хвиль радіус фторопластового резонатора з коливаннями ШГ ТМ 3610 становить 39 мм [36-37], в той час як застосування, наприклад, лейкосапфіра, дозволяє зменшити радіус резонатора до менш ніж 10 мм. Перед виготовленням такої структури необхідно проводити чисельні дослідження структури з метою оптимізації геометричних параметрів і вибору робочої моди. В [39] проведено чисельні дослідження радіально двошарового лейкосапфірового резонатора із зовнішнім радіусом 7,25 мм і робочої модою ТМ 1110 на основі характеристичного рівняння.

Прикладом введення в діелектричний резонатор неоднорідності, заповненої рідиною, є додатковий радіальний шар в циліндричному або сферичному резонаторі. Введення додаткового шару дозволяє проводити дослідження рідин, що займають малі об'єми. По суті така структура являє собою радіально тришаровий діелектричний резонатор, один з шарів якого є досліджуваної рідиною (рис. 1.3). Прототипом радіально тришарового діелектричного резонатора став резонатор у вигляді металевої порожнини, усередині якої, на деякій відстані від провідних стінок, знаходиться зразок досліджуваної речовини [41-43]. Проведено дослідження такої структури на нижчих модах, в [44] отримано характеристичне рівняння радіально тришарового резонатора з провідною бічною поверхнею. У роботах [45-46] розглянуто радіально тришаровий діелектричний циліндричний резонатор з ідеально провідними торцевими стінками, а в [47] також тришаровий діелектричний резонатор зі сферичною поверхнею з коливаннями ШГ. Внутрішній і зовнішній шар резонаторів, розглянутих в даних роботах, виконані із фторопласта. Середній тонкий шар являє собою рідину. Отримано характеристичні рівняння даних структур і проведено їх чисельні дослідження, показано, як залежать частота і добротність резонаторів від місця розташування і товщини середнього шару і від властивостей речовини, яке представляє собою середній шар резонатора.



Рисунок 1.3 – Радіально тришаровий діелектричний резонатор з двома ТПС (рисунок взято із [5])

Висловлено припущення, що тришарові структури можуть бути використані як основи вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності рідин, що займають малі об'єми. Однак вимірювальну комірку на основі тришарового діелектричного резонатора на практиці реалізовано не було, і експериментальні дослідження не проводилися через те, що такі резонаторні структури дуже складно виготовити.

Більш перспективними для застосування на практиці представляються діелектричні резонатори з циліндричною поверхнею з капіляром. Капіляр

необхідно розташовувати в області електромагнітного поля резонатора [7, 48]. У роботах [49-50] отримано характеристичне рівняння і представлено результати чисельних досліджень півциліндричного резонатора, виготовленого із фторопласта, з капіляром, заповненим діелектричними рідинами. На зрізі резонатор обмежений металевим екраном. Капіляр розташовувався в максимумі поля резонатора.

Одним з критеріїв вибору структури є величина добротності резонатора. У загальному випадку добротність резонатора з модами ШГ визначається втратами в провідних елементах структури, в діелектрику, з якого виготовлений резонатор, в досліджуваній рідині, і радіаційними втратами. Внесення зразка малого розміру в поле резонатора призводить до додаткових радіаційних втрат, а отже, до зменшення радіаційної добротності резонатора. Таким чином, для успішного застосування вимірювальних комірок на основі КДР необхідно оцінювати радіаційні втрати в резонаторній структурі. Як вимірювальна комірка для визначення електрофізичних параметрів речовин може бути використано резонаторну структуру, яка забезпечує високу чутливість вимірювань і водночас характеризується прийнятними величинами радіаційного добротності. Фактори, які можуть впливати на радіаційні втрати в резонансній структурі, детально розібрано в [51]. В [52] зроблено спробу диференційованої експериментальної оцінки втрат електромагнітної енергії того, щоб приблизно оцінити добротність, обумовлену тільки для радіаційними втратами, і проаналізовано вплив форми діелектричного резонатора на величину радіаційних втрат.

При розміщенні зразка досліджуваної рідини безпосередньо в діелектрику, з якого виготовлений резонатор, на практиці виникають технічні складності. В [7, 53] запропоновано вносити в циліндричний фторопластовий резонатор фторопластовий капіляр, заповнений рідиною. У даних роботах проведено експериментальні дослідження такого резонатора з капіляром, заповненим різними речовинами, в тому числі рідинами з великими втратами. Наведено графіки залежності різниці частот і величин, зворотних добротності, для різних значень діаметра капіляра. Також в [7, 53-55] роботах описано діелектричний резонатор, що складається з двох фторопластових півдисків, між якими міститься кювета, ЩО містить досліджувану речовину. Досліджується залежність частоти і добротності складеного резонатора від товщини зазору, в який поміщається зразок. У даних роботах запропоновано використовувати діелектричний резонатор з капіляром і складений діелектричний резонатор з кюветою як основу вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності рідин, наприклад, для дослідження водно-спиртових розчинів. Однак авторами відзначено, що для успішного резонаторів необхідно застосування провести розрахунок частоти і добротності структур і зіставити результати чисельних і експериментальних досліджень. Крім того, у складеного діелектричного резонатора існує проблема відхилення від співвісності і паралельності частин резонатора, а також виникнення повітряних зазорів. Детально ця проблема і можливі шляхи ії вирішення висвітлені в [56].

Описані вище методи визначення діелектричної проникності рідин, що займають малі об'єми, припускають, що зразок рідини поміщається безпосередньо в діелектричний резонатор. Уникнути цього дозволяє метод, запропонований в [57-58]. Крапля рідини поміщається на поверхню лейкосапфірового резонатора, в область максимуму електромагнітного поля, що викликає зміни резонансної частоти і добротності резонатора. Перевагою цієї структури є те, що відгук резонатора чутливий до характеристик дуже малого об'єму рідини (близько 1 нл). У роботах приведено отримані на основі експериментальних даних графіки залежності різниці частоти і величин, обернених добротності, резонатора з краплею водних розчинів солі і спирту щодо відповідних характеристик резонатора з краплею дистильованої води в 8-мм діапазоні довжин хвиль. Застосування методу малих збуджень дозволило розділити вплив дійсної і уявної частин діелектричної проникності на резонансну частоту і добротність резонатора і зіставити отримані залежності з концентраційними залежностями дійсної і уявної частин діелектричної проникності з робіт [59]. Хоча дані знаходяться у відповідності, автори відзначають, що, для визначення абсолютного значення діелектричної проникності рідини необхідно якомога точніше визначати об'єм краплі рідини, тому що характеристики резонатора чутливі навіть до невеликої зміни об'єму краплі. Нестабільність об'єму і форми краплі ускладнює побудову точної моделі для чисельного розрахунку. Крім того, для нанесення краплі на поверхню резонатора необхідно використовувати спеціальний пристрій. Також має місце швидке випаровування краплі рідини з поверхні резонатора.

В роботі [60] досліджується резонаторна структура, яка представляє з себе лейкосапфіровий диск, накритий кварцовою пластиною з циліндричним отвором, розташованим співвісно з дисковим резонатором (рис. 1.4). Заповнення поглиблення рідиною призводить до зміни відгуку лейкосапфірового резонатора. Таким чином, дана резонаторна структура також може бути використана для визначення характеристик рідини, що займає малий об'єм, за виміряним відгуком резонатора.



Рисунок 1.4 – Лейкосапфіровий диск, накритий кварцовою пластиною з циліндричним отвором, розташованим співвісно з дисковим резонатором (рисунок взято із [60]).

Внесення рідини в отвір в кварцову пластину забезпечує більш стабільну форму краплі, ніж при нанесенні краплі безпосередньо на поверхню

резонатора, і сприяє більш повільному випаровуванню. Однак, крапля не приймає форму ідеального циліндра. Крім того, відгук резонатора сильно залежить від місця розташування отвору.

В ІРЕ НАНУ було запропоновано використовувати для визначення комплексної діелектричної проникності рідин, що займають малі об'єми (<1 мкл), КДР з МФК, куди поміщується досліджувана рідина [8, 61]. Прототипом даної системи резонатора структури є резонатор з капіляром [48]. Перевагою КДР з МФК є те, що МФК, заповнений досліджуваної рідиною, виноситься за межі монокристалу, з якого виготовлений КДР. МФК розташовано в шарі діелектрика на поверхні КДР. Також достоїнствами такої структури є те, що структура дозволяє домогтися постійної форми і об'єму досліджуваної рідини, не вимагає додаткових складних пристроїв для введення рідини в канал.

Для виготовлення шару діелектрика обраний пластик Zeonex, тому що порівняльний аналіз резонаторів, накритих пластинами, виконаними з різних діелектриків, показав, що застосування даного матеріалу дозволяє добутися високих значень добротності резонатора. Показано, що параметри рідини, що заповнює МФК, впливають на резонансну частоту і добротність резонатора. Виміряно значення резонансної частоти і добротності резонатора при заповненні МФК різними водними розчинами.

Однак для того, щоб викорустовувати КДР з МФК як вимірювальну комірку для визначення комплексної діелектричної проникності рідин, необхідно було створити чисельні моделі, за допомогою яких можливо визначати частоту і добротність структурі чисельним шляхом. Додатковою складністю при створенні моделі було те, що деякі параметри резонатора (діаметр МФК та його розташування в шарі пластику), які істотно впливають на його характеристики, складно визначати з великою точністю. Крім того, не було розроблено процедури, яка б дозволила визначати комплексну діелектричну проникність резонатора беспосередньо за виміряними величинами частоти і добротності резонатора.

Висновки до розділу 1

Використання КДР з неоднорідностями як основи вимірювальних комірок є дуже перспективним для визначення комплексної діелектричної проникності сильнопоглинаючих рідин. Рідина, яка заповнює неоднорідність, чинить вплив на розподіл поля, резонансну частоту та добротність резонатора. Таким чином, виникає принципова можливість визначати комплексну діелектричну проникність рідини за виміряним відгуком КДР.

Так, радіально двошаровий фторопластовій КДР [6] може бути використано як основу вимірювальної комірки в 8-мм діапазоні довжин хвиль. Використання для виготовлення резонатору діелектрика з більшим значенням дійсної частини комплексної діелектричної проникності дозволяє зменшити розмір КДР, і, таким чином, дозволяє знизити об'єм рідини, потрібний для дослідження. Однак використання такого резонатора пов'язано з деякими технічними труднощами. Так, для усунення мікрозазорів між кільцем з лейкосапфіру і ТПС необхідно використовувати додатковий шар герметиків, що ускладнює структуру і виключає можливість визначення її характеристик аналітичними методами.

Використання КДР з МФК [8] дозволяє зменшити об'єм досліджуваної рідини до сотен нанолітрів (нл). Однак існуючі аналітичні методи також не дозволяють визначати характеристики такої структури, отже потрібний пошук інших методів аналізу цієї структури і створення моделі, яка б дозволила з високою точністю визначати частоту і добротність резонатора.

Крім того, в розглянутих методах визначення комплексної діелектричної проникності відсутній алгоритм визначення дійсної та уявної частини комплексної діелектричної проникності сильнопоглинаючих рідин безпосередньо за виміряними частотою і добротністю структури.

РОЗДІЛ 2

РАДІАЦІЙНІ ВТРАТИ В КВАЗІОПТИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ

Внесення неоднорідності (наприклад, досліджуваного зразка діелектричної рідини) в резонатор призводить до зміни розподілу поля резонатора, його спектральних і енергетичних характеристик. У той же час внесення зразка малого розміру в поле резонатора призводить до додаткових радіаційним втрат, а значить, до зменшення радіаційної добротності резонатора. Для успішного застосування вимірювальних комірок на основі КДР необхідно оцінити радіаційні втрати в резонаторній структурі. Як вимірювальна комірка для визначення електрофізичних параметрів речовин може бути використана резонаторна структура, яка забезпечує високу точність і чутливість вимірювань, які в значній мірі залежать від величини радіаційної добротності, тому остання повинна складати прийнятну величину.

2.1. Розрахунок радіаційних втрат діелектричних резонаторів

Розрахунок радіаційних втрат КДР проводився шляхом чисельного моделювання в програмі COMSOL Multiphysics [62-64]. У даній програмі моделювання відкритої межі здійснюється завданням спеціальних граничних умов (відсутність відображення від границі) в сукупності з узгоджувальним поглинальним шаром, розташованим на деякій відстані від резонатора. Однак порівняння з результатами розрахунку радіаційної добротності, отриманими аналітично [5], показує, що при використанні поглинача, який складається з шарів діелектрика з різними значеннями комплексної діелектричної проникності, точність розрахунку зростає. Саме такий підхід, з використанням шаруватого поглинача, використовується в даній роботі.
При розрахунку власної добротності КДР з ТПС програма COMSOL Multiphysics враховує втрати в діелектрику, в провіднику і радіаційні втрати:

$$Q^{-1} = k_{\rm c} \operatorname{tg} \delta_{\rm c} + A_{\rm s}^{\rm THC} R_{\rm s}^{\rm THC} + Q_{\rm pag}^{-1}$$
(2.1)

де Q – власна добротність резонатора, $k_c \operatorname{tg} \delta_c$ – добуток коефіцієнта заповнення резонатора на тангенс кута втрат лейкосапфіра (втрати в лейкосапфірі), $A_s^{\text{TIIC}} R_s^{\text{TIIC}}$ – добуток коефіцієнта включення провідника на поверхневий опір провідника (втрати в ТПС), $Q_{\text{рад}}$ – радіаційна добротність [5, 58]. Коефіцієнт включення провідника – це величина, обернена загальноприйнятому геометричному фактору, використовується для зручності при роботі з величинами, оберненими добротності [5].

При внесенні в поле резонатора з ТПС додаткового металевого зразка враховуються також втрати в цьому зразку:

$$Q^{-1} = k_{\rm c} \operatorname{tg} \delta_{\rm c} + A_{\rm s}^{\rm THC} R_{\rm s}^{\rm THC} + A_{\rm s}^{\rm o} R_{\rm s}^{\rm o} + Q_{\rm pag}^{-1}.$$

Власна добротність резонатора без ТПС с МФК визначається як

$$Q^{-1} = k_{\rm c} {\rm tg} \delta_{\rm c} + k_{\rm a} {\rm tg} \delta_{\rm a} + k_{\rm n} {\rm tg} \delta_{\rm n} + Q^{-1}_{\rm pag}, \qquad (2.2)$$

де $k_{\rm n}$ tg $\delta_{\rm n}$ – втрати в шарі діелектрика, в якому знаходиться МФК, $k_{\rm d}$ tg $\delta_{\rm d}$ – втрати в рідкому діелектрику, що заповнює МФК. Тому, щоб отримати за допомогою програмного продукту розрахункове значення добротності, обумовлене тільки радіаційними втратами, втрати у всіх елементах резонатора покладаються рівними 0 (tg δ = 0, R_S = 0).

При виборі структури для досліджень слід керуватися критерієм, відповідно до якого радіаційні втрати повинні бути приблизно на порядок нижче втрат в діелектриках і провідниках, при цьому радіаційними втратами можна нехтувати. Таким чином, прийнятною для структури, що складається з резонатора, виготовленого з лейкосапфира, і провідників, є величина радіаційної добротності не менше 10⁵ [65].

Власна добротність резонатора з МФК, заповненим водними розчинами біологічних рідин, становить величину порядку декількох тисяч [66], отже, для такого резонатора величина радіаційної добротності > 10^5 також є прийнятною. Однак, для порівняння, при дослідженні надпровідників при низьких температурах потрібно досягати вищих значень радіаційної добротності [67], тому що тангенс кута діелектричних втрат монокристала лейкосапфіра tg δ_c при низьких кріогенних температурах набагато менше 10^{-5} [68].

2.2. Циліндричний діелектричний резонатор зі зрізом

Внесення будь-якої неоднорідності в резонатор або в ділянку, де зосереджено електромагнітне поле резонатора, призводить до зростання радіаційних втрат. Зміна форми циліндричного резонатора також може призводити до зміни величини радіаційної добротності. На рис. 2.1 представлено циліндричний КДР, обмежений двома ідеально провідними торцевими стінками, і плоский прямокутний металевий зразок, розташований паралельно циліндричній поверхні діелектричного диска на деякій відстані від нього. Резонатора і висота зразка h = 2,5 мм. Довжина зразка l. Відстань від зразок розташовано на деякій відстані від резонатора, величина Δx вважається позитивною, $\Delta x > 0$. Випадку, коли зразок торкається резонатора, відповідає величина $\Delta x = 0$, а випадку, коли зразок «входить» в лейкосапфіровий циліндр (резонатор зі зрізом) – величина $\Delta x < 0$. Таким чином, резонатор зі зрізом – це циліндричний КДР, у якого виконано зріз паралельно осі циліндра, і до зрізу

приставлено металевий зразок. Півциліндричний резонатор — це окремий випадок резонатора зі зрізом, цьому випадку відповідає величина $\Delta x = -7,25$ мм.



Рисунок 2.1 – Циліндричний КДР (1), обмежений двома ТПС (2), і металевий зразок (3)

На рис. 2.2 показано розподіл E_z -компоненти поля $TM_{10\ 1\ 0}$ при різному розташуванні зразка стосовно циліндричного КДР. На рис. 2.2 а зображено поле коливань ШГ для випадку, коли зразок розташовано на деякій відстані від резонатора. Видно, що при пересуванні зразка на невелику відстань в резонатор (рис. 2.2 б) розподіл поля моди ШГ деформується, а при подальшому просуванні зразка мода ШГ зникає (рис. 2.2 в). Однак при

 $\Delta x = -7,25$ мм (відповідає півдисковому резонатору) в резонаторі знову можуть існувати коливання ШГ (рис. 2.2 г).



Рисунок 2.2 – Розподіл E_z -компоненти электромагнітного поля ШГ ТМ_{10 1 0} в КДР з двома ТПС при різному розташуванні металевого зразка: а) $\Delta x > 0$, б) $\Delta x = 0$, в) $\Delta x < 0$, г) $\Delta x = -7,25$ мм

Зміна електромагнітного поля резонатора супроводжується зміною його спектральних і енергетичних характеристик. На рис. 2.3 показано зміна частоти і радіаційної добротності КДР з $TM_{n\,1\,0}$ модою при зміні положення зразка Δx для різних значень азимутального індексу коливань *n* і довжини зразка *l* (суцільні криві відповідають випадку *l* = 40 мм, пунктирні – випадку *l* = 4 мм). Горизонтальні прямі, до яких прагне радіаційна добротність резонатора при видаленні зразка від поверхні, відповідають випадку циліндричного КДР без зразка. Ці прямі добре узгоджуються з результатами, розрахованими для останнього випадку аналітично [5]. Зразок чинить помітний вплив на частоту резонатора *f* при наближенні до бічної поверхні КДР на відстань $\Delta x < 1$ мм. Вплив зразка на радіаційну добротність $Q_{\text{рад}}$ стає помітним на відстані $\Delta x < 5$ мм для l = 40 мм і на відстані $\Delta x < 9$ мм для l = 4 мм.



Рисунок 2.3 – Частота і радіаційна добротність КДР при різному розташуванні провідного зразка. Номер кривої відповідає азимутальному індексу *n*

Сильна деформація хвилі ШГ при наближенні зразка до діелектричних диску супроводжується різким збільшенням радіаційних втрат, що робить недоцільним застосування структури як вимірювальної комірки для визначення електрофізичних параметрів речовин. Очевидно, що металева неоднорідність повинна бути віднесена від поверхні резонатора на відстань не менше 1 мм.

Високими значеннями радіаційної добротності характеризується півциліндричний резонатор з ТПС, обмежений на зрізі металевим зразком (рис. 2.2 г). Однак при використанні такого резонатора необхідно ураховувати вплив довжини зразка l на величину радіаційної добротності Q_{pag} . На рис. 2.4 представлено графік залежності радіаційної добротності резонатора від довжини зразка l.



Рисунок 2.4 – Радіаційна добротність півциліндричного резонатора (рис. 2, г). Номер кривої відповідає азимутальному індексу *n*

Якщо довжина зразка досить велика (l > 35 мм), радіаційна добротність $Q_{\rm pad}$ досягає величин, характерних для циліндричного КДР з двома ТПС з відповідною модою.

2.3. Резонатори, обмежені однією торцевою провідною стінкою

Як сенсори для досліджень властивостей речовин можуть бути використані циліндричні резонатори не тільки з двома, а й з однією ТПС [52]. Радіаційна добротність резонаторів, обмежених ТПС з одного боку, менше, ніж радіаційна добротність резонатора, обмеженого з двох сторін. Було зроблено спробу зменшити радіаційні втрати в циліндричних КДР, обмежених однією ТПС. Для цього було змінено форму резонатора. Визначено радіаційну добротність КДР різної конфігурації з коливаннями ШГ НЕ-типу, виготовлених з лейкосапфіру, обмежених однією ТПС: циліндричного (рис. 2.5 а), асферіко-циліндричного (рис. 2.5 б), асферичного (рис. 2.5 в), півсферичного (рис. 2.5 г). Радіуси дисків і півсфери дорівнюють 7,25 мм. Висота циліндричного і асферичних резонаторів дорівнює 2,5 мм.



в) r = 2,5 мм
 г) r = 7,25 мм
 Рисунок 2.5 – Резонатори різних конфігурацій з різними значеннями радіусу
 кривизни r, обмежені однією ТПС

На рис. 2.6 представлено залежності частоти та радіаційної добротності КДР, виготовлених із лейкосапфіра і обмежених однією ТПС, від радіуса

кривизни *r* їх поверхні для різних значень азимутального індексу коливань *n*. Слід зазначити, що пунктирна лінія, що з'єднує точки, які відповідають різним значенням радіусу кривизни, наведена для кращого візуального сприйняття і не відображає дійсної функціональної залежності.



Рисунок 2.6 – Частота і радіаційна добротність КДР різної конфігурації з коливаннями НЕ-типу з однією ТПС

Незафарбованими символами позначено результати чисельного експерименту. При проведенні численних досліджень в програмі Comsol виникли складнощі при розрахунку точок, де радіаційна добротність приймає значення > 10⁹. Виникнення складнощів пов'язано з тим, що досліджувана модель розбивається на кінцеве число елементів. Точка, зазначена зірочкою, отримана шляхом апроксимації з використанням результатів для нижчих мод.

Величини радіаційної добротності резонаторів зі зміненою формою (асферичні і півсферичний) більше, ніж відповідні значення для циліндричного КДР. Серед розглянутих КДР з одною ТПС найбільшою величиною радіаційної добротності характеризується півсферичний резонатор (r = 7,25 мм). Є досвід застосування такого резонатора для дослідження властивостей ВТНП-плівок [67]. Також представляє інтерес використання асферіко-циліндричного резонатора з радіусом кривизни r = 1,25 мм. Однак при подальшому збільшенні радіуса кривизни (r = 2,5 мм) спостерігається зменшення радіаційної добротності КДР.

Значення частоти і радіаційної добротності для КДР з одною ТПС при значенні азимутального індексу n = 14, отримані з результатів експерименту, позначено зафарбованими символами на рис. 2.6. Значення радіаційної добротності резонаторів отримано зі значень їх власної добротності шляхом урахування складових, обумовлених втратами в провіднику і діелектрику (див. (2.1)). Дані, отримані чисельно і експериментально, узгоджуються якісно, але значення радіаційних добротностей, що отримані експериментально, значно нижчі. Це може бути пояснено додатковими радіаційними втратами в елементах зв'язку, тому що резонатор є відкритою структурою. Також це може бути пов'язано з відхиленням від форми при виготовленні резонатора і з шорсткостями на його поверхні [51].

2.4. Циліндричний резонатор без торцевих провідних стінок

2.4.1. Вплив азимутальної щілини на характеристики резонатора без торцевих провідних стінок

Наявність ТПС значно впливає на характеристики циліндричного діелектричного резонатора. Змінюється розподіл поля резонатора. У резонаторі без ТПС не можуть існувати аксіально однорідні моди TM $_{n10}$, які розглядалися в п. 2.2. Електромагнітне поле резонатора без ТПС виходить з області діелектрика не тільки через бічну поверхню, але і через торцеві. Очевидно, що це призводить до зменшення значень радіаційної добротності резонатора. У таблиці 2.1 наведено значення частоти і радіаційної добротності лейкосапфірових резонаторів з двома ТПС і аксіально однорідної модою TM $_{12\,10}$ з однією ТПС (див. п. 2.3) і без ТПС з модами НЕ $_{12\,11}$.

Таблиця 2.1

	<i>f</i> , ГГц	$Q_{ m pag}$
КДР із лейкосапфіра з модою НЕ 1211	35,728	3,18×10 ⁷
КДР із лейкосапфіра з однією ТПС з модою НЕ 1211	31,595	4,32×10 ⁷
КДР із лейкосапфіра с двумя ТПС с модою ТМ 1210	30,011	1,89×10 ⁸

Частота і радіаційна добротність резонаторів з лейкосапфіра

Власна добротність лейкосапфірового резонатора без ТПС з модою НЕ _{12 1 1} становить 41360. Ця величина обумовлена як радіаційними втратами, так і втратами в лейкосапфірі. Було зроблено спробу збільшити власну добротність такого резонатора. Для цього в резонатор вводилася азимутальна щілина (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Циліндричний КДР (1) с азимутальною щілиною (2)

Проведено чисельні дослідження КДР з лейкосапфіру з азимутальною щілиною. Радіус резонатора R = 7,25 мм фіксувався, а величина R_1 – відстань від центру резонатора до азимутальної щілини – варіювалася. У таблиці 2.2 показано динаміку розподілу нормованої величини E_z компоненти НЕ $_{10\,1\,1}$ моди для ширини азимутальної щілини $R_2 - R_1 = 0,3$ мм і $R_2 - R_1 = 1$ мм в залежності від R_1 . Видно, що при переміщенні щілини в напрямку від центру резонатора до його циліндричної поверхні електромагнітне поле поступово концентрується в першому, якщо рахувати від центру, шарі лейкосапфира. При цьому з'являється область (збігається з азимутальною щілиною), де поле менш інтенсивне, що особливо помітно в резонаторі з ширшою щілиною ($R_2 - R_1 = 1$ мм). Це пояснюється тим, що електромагнітне поле прагне зайняти область, яка характеризується більш високим значенням дійсної частини діелектричної проникності, тобто, в даній структурі, область лейкосапфіра. Процес перезосереджування поля супроводжується зміною частоти і добротності резонатора.



Динаміка розподілу нормованої величини E_z - компоненти НЕ 1011 моди

На рис. 2.8 представлено резонансну частоту і добротність резонатора $Q_{\rm Д}$, яка обумовлена тільки втратами в діелектрику, з якого виготовлено резонатор (($Q_{\rm Д}$)⁻¹ = $k_{\rm c}$ tg $\delta_{\rm c}$).

Таблиця 2.3



Рисунок 2.8 – Частота и добротність (без урахування радіаційних втрат) резонатора з азимутальною щілиною різної ширини з модами НЕ 1011 (зафарбовані символи) і НЕ 1111 (незафарбовані символи);

-▲-, -Δ--
$$R_2 - R_1 = 0,3$$
 MM,
-■-, -□-- $R_2 - R_1 = 0,5$ MM,
- ●-, -○-- $R_2 - R_1 = 1,5$ MM

Для розрахунку використовувалася модель, де резонатор розміщено в циліндричній ємності, виконаної з ідеального провідника. Таким чином, дана

модель не враховує радіаційні втрати в структурі. Якщо азимутальна щілина розміщена близько до області внутрішньої каустики ($R_1 < 5$ мм), вона не має значного впливу на розподіл поля, і характеристики резонатора з таким розташуванням азимутальної щілини збігаються з характеристиками відповідного резонатора з відповідною модою без азимутальної щілини. Максимальне збурювання поля і, отже, сильна зміна характеристик відповідають випадку, коли азимутальна щілина знаходиться в області максимуму мікрохвильового електричного поля ($R_1 \approx 6-6,5$ мм в залежності від ширини щілини). Таким чином, щоб отримати максимальне зростання добротності, обумовлене втратами в діелектрику, необхідно розташовувати щілину в області максимуму мікрохвильового електричного поля.

Однак, хоча внесення азимутальної щілини в резонатор дозволяє зменшити втрати в діелектрику, її присутність призводить до додаткових радіаційних втрат. На рис. 2.9 представлено графік залежності добротності Q резонатора з азимутальною щілиною, обумовленої втратами в діелектрику, з якого виготовлено резонатор, і радіаційними втратами ($Q^{-1} = k_{\rm c} tg \delta_{\rm c} + (Q_{\rm pan})^{-1}$), від місця розташування азимутальної щілини в резонаторі. Для розрахунку характеристики використовувалася модель, що включає в себе шар поглинача (див. п. 2.1), ЩО дозволяє враховувати втрати на випромінювання. Пунктирними лініями позначена добротність резонатора з відповідними характеристиками без азимутальної щілини з модою НЕ 1011 (менші значення добротності) і НЕ 1111 (більші значення добротності). Видно, що при внесенні азимутальної щілини в область максимуму електромагнітного поля резонатора добротність різко зменшується, що обумовлено появою додаткових втрат на випромінювання, причому, чим ширшу щілину вводять в резонатор, тим більші радіаційні втрати вона привносить. Таким чином, введення азимутальної щілини не дозволяє отримати збільшення власної добротності резонатора в порівнянні з власною добротністю резонатора без азимутальної щілини.



Рисунок 2.9 – Добротність резонатора з азимутальною щілиною різної ширини з модами НЕ 1011 (зафарбовані символи) и НЕ 1111 (незафарбовані символи)

-▲-, -Δ--
$$R_2 - R_1 = 0,3$$
 MM,
-■-, -□-- $R_2 - R_1 = 0,5$ MM,
- ●-, -○-- $R_2 - R_1 = 1,5$ MM

Зроблено спробу зменшити радіаційні втрати резонатора 3 азимутальною щілиною. Для цього було зменшено висоту азимутальної щілини. Проведено чисельні дослідження резонатора, у якого азимутальну щілину розташовано не по всій висоті резонатора (рис. 2.10 а). На рис. 2.10 б представлені частота (пунктирна лінія) і добротність (неперервна лінія) щілиною шириною 3 азимутальною висотою $h_{\rm III} = 1$ MM, резонатора $R_2 - R_1 = 0,3$ мм, з модою НЕ $_{1011}$.



Рисунок 2.10 – Резонатор з азимутальною щілиною, висота якої менше висоти резонатора (а), і характеристики такого резонатора з модою НЕ _{10 1 1} (б).

Очевидно, що втрати в діелектрику в такому резонаторі більше, ніж у відповідному йому резонаторі з азимутальною щілиною, розташованою по всій висоті резонатора, а добротність вище. Це обумовлено зменшенням радіаційних втрат. Однак величина добротності не досягає значення, характерного для резонатора без азимутальної щілини. Отже, введення азимутальної щілини в резонатор, хоча і призводить до збільшення тієї складової добротності, яка обумовлена втратами в діелектрику, не дозволяє збільшити власну добротність резонатора через зростання радіаційних втрат.

2.4.2. Резонатори з мікрофлюїдним каналом

Для визначення комплексної проникності малого об'єму рідини можуть бути використані різні КДР з коливаннями ШГ: радіально шаруваті резонатори [5, 6, 69], а також резонатори з капіляром [5, 70] і з МФК [66, 71].

На рис. 2.11 зображено циліндричний КДР (1), на торцевій поверхні діелектричного диска якого розташовано шар пластику (2). В шарі пластика знаходиться МФК (3).



Рисунок 2.11 – Циліндричний КДР (1) з шаром пластика (2), в якому розташований МФК (3)

Циліндричний резонатор виготовлено з лейкосапфіра; радіус циліндра R = 7,25 мм, висота циліндра $H_{KДP} = 2,5$ мм. Товщина шару пластика $H_{пл} = 0,69$ мм. Чисельні розрахунки проведені для випадку МФК, заповненого водою, тому що саме водні розчини біологічних рідин представляють інтерес

для дослідження. МФК розташовано на певній відстані а від центру резонатора. Діаметр МФК $D_{M\Phi K} = 0,2$ мм.

Шар пластику і МФК вносять додаткові радіаційні втрати в резонаторну структуру. У таблиці 2.4 представлено частоту і радіаційну добротність дискового КДР без ТПС з модою ШГ $HE_{12 \ 1 \ 1}$ і такого ж резонатора, накритого шаром пластика з МФК і без нього. МФК розташовано на відстані a = 4,1 мм від центра резонатора.

Таблиця 2.4

Частота і радіаційна добротність резонаторів без ТПС з модою ШГ НЕ1211

	<i>f</i> , ГГц	$Q_{ m pag}$
КДР з лейкосапфіра	35,728	3,18×10 ⁷
КДР з лейкосапфіра з шаром пластика	35,394	$2,50 \times 10^7$
КДР з МФК в шарі пластика	35,392	3,94×10 ⁵

Місце розташування МФК в шарі пластика впливає на частоту і радіаційну добротність резонатора. На рис. 2.12 представлено графік залежності частоти та радіаційної добротності резонатора з МФК від відстані *а* від МФК до центру резонатора.



Рисунок 2.12 – Залежність частоти (пунктирна лінія) і радіаційної добротності (суцільна лінія) резонатора від розташування МФК

Видно, що залежність частоти носить лінійний характер, а залежність радіаційної добротності має мінімум в точці a = 4,1 мм.

Розподіл *E*_z-компоненти електромагнітного поля моди HE_{12 1 1} при такому розташуванні МФК представлено на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – Розподіл E_z -компоненти електромагнітного поля моди HE_{12 1 1} в КДР с МФК

На рис. 2.14 представлено втрати в резонаторі з МФК при різних розташуваннях МФК в шарі пластика.



Рисунок 2.14 – Втрати в резонаторі з МФК, заповненим водою: втрати в воді (пунктирна лінія) і радіаційні втрати (суцільна лінія)

Суцільною лінією позначені радіаційні втрати, пунктирною лінією позначені втрати в воді, яка заповнює МФК. Щоб визначити втрати в воді, в використаній моделі для чисельних досліджень втрати в лейкосапфірі (tg δ_c) і в пластику (tg δ_n) покладалися рівними 0, тобто враховувалися тільки втрати в воді (tg $\delta_{\alpha} \neq 0$) і радіаційні втрати. Потім втрати в воді k_{α} tg δ_{α} розраховувалися за формулою (2.2).

Оскільки радіаційні втрати більш ніж на порядок нижчі, ніж втрати в рідині (рис. 2.14), то при проведенні вимірювань радіаційними втратами можна знехтувати.

Висновки до розділу 2

1. Проведено оцінку радіаційних втрат в різних діелектричних резонаторах з коливаннями ШГ:

 - оцінено вплив форми резонатора і наявність малих неоднорідностей на величину радіаційних втрат;

 показано, що в резонаторах з малими неоднорідностями, заповненими рідинами, радіаційні втрати нехтовно малі в порівнянні з втратами, які вносить рідина;

показано, що асферичний резонатор з невеликим радіусом кривизни,
 півсферичний і півдисковий резонатори характеризуються величинами
 радіаційних втрат, прийнятними для того, щоб ці резонатори могли бути
 використані як вимірювальні комірки для визначення електрофізичних
 параметрів речовин з відносно невеликими втратами;

- отримано якісний збіг між значеннями радіаційних добротностей різних резонаторних структур, отриманих в результаті чисельних і експериментальних досліджень, і розглянуто можливі причини кількісної різниці результатів.

2. Зроблено спробу збільшити добротність резонатора без провідних ТПС шляхом введення в резонатор азимутальної щілини. Показано, що при

внесенні в резонатор азимутальної щілини збільшується значення складової добротності, обумовленої втратами в діелектрику, але при цьому зростають радіаційні втрати, що особливо помітно, коли азимутальна щілина розташована в області, близької до максимуму мікрохвильового електричного поля резонатора, через що власна добротність резонатора з азимутальною щілиною виявляється менше добротності відповідного резонатора без азимутальної щілини.

РОЗДІЛ З

РАДІАЛЬНО ДВОШАРОВИЙ ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЗОНАТОР

Застосування резонаторів з модами ШГ для визначення діелектричних властивостей речовин дозволяє, як правило, домогтися високої точності вимірювань завдяки високій добротності резонаторних структур. У роботах [5, 36] розглянуто електродинамічні властивості радіально двошарового резонатора з ідеально провідними торцевими стінками. Рідина, що заповнює внутрішню порожнину такого резонатора, чинить істотний вплив на розподіл поля, резонансну частоту і добротність резонатора. Таким чином, існує можливість визначення діелектричної проникності рідини за виміряним відгуком такого резонатора. Дослідження відгуку фторопластового радіально двошарового КДР продовжено нами в [69]. В [72-73] проведено дослідження лейкосапфірового радіально двошарового КДР.

3.1. Радіально двошаровий фторопластовий резонатор

На рис. 3.1 представлено радіально двошаровий циліндричний резонатор з двома ідеально провідними торцевими стінками. Шари резонатора і навколишнє середовище характеризуються комплексними значеннями компонент тензору діелектричної [ε_v] [21] та магнітної проникності μ_v , де v=1; 2; 3, рахуючи від центру резонатора. Компоненти тензорів [ε_v] в напрямках, перпендикулярному і паралельному осі анізотропії, рівні $\varepsilon_{\perp v} = \varepsilon'_{\perp v} (1 - i \text{tg} \delta_{\perp v})$ і $\varepsilon_{\parallel v} = \varepsilon'_{\parallel v} (1 - i \text{tg} \delta_{\parallel v})$ відповідно. Тут $\varepsilon_{\perp v}$, $\varepsilon_{\parallel v}$, $\text{tg} \delta_{\perp v}$, $\text{tg} \delta_{\parallel v} -$ дійсні частини діелектричної проникності і тангенс кута втрат середовищ у відповідних напрямках. Осі анізотропії всіх середовищ спрямовані уздовж поздовжньої осі резонатора. Аксіальний розмір резонатора – $H_{\text{KДP}}$, R_1 и R_2 – радіуси його внутрішнього і зовнішнього шарів відповідно.



Рисунок 3.1 – Радіально двошаровий циліндричний резонатор з шаром діелектрика (1) та внутрішнім шаром (порожниною) (2), обмежений ідеально провідними площинами (3)

В циліндричній системі координат система рівнянь Максвелла (1.1) приводиться до хвильових рівнянь щодо осьових компонент поля власних коливань резонатора. З урахуванням граничних умов на ідеально провідних торцях і безперервності аксіальних компонент поля на циліндричних поверхнях між середовищами резонатора рішення даних рівнянь приймають вид [5, 36]:

$$E_{z\nu} = \Psi_c G_{E\nu}(\rho); \qquad \qquad H_{z\nu} = \Psi_s G_{H\nu}(\rho), \qquad (3.1)$$

де $\Psi_c = \cos(k_z z) \exp i (n\varphi - \omega_p t)$ і $\Psi_s = \sin(k_z z) \exp i (n\varphi - \omega_p t)$, $\omega_p = \omega'_p - \omega''_p - B$ ласна комплексна частота *p*-й моди резонатора (*p* - сукупність трьох модових індексів *n*, *s* і *l* - азимутального, радіального і аксіального відповідно), $k_z = l\pi/L$, де l = 0, 1, 2, ... Функція

$$G_{j\nu}(\rho) = \begin{bmatrix} \frac{J_n(q_{j1}\rho)}{J_n(q_{j1}R_1)} \Big[B_{jn}J_n(q_{j2}R_1) + C_{jn}N_n(q_{j2}R_1) \Big], & \nu = 1, \quad \rho \le R_1 \\\\ B_{jn}J_n(q_{j2}\rho) + C_{jn}N_n(q_{j2}\rho), & \nu = 2, \quad R_1 \le \rho \le R_2 \\\\ \frac{H_n^{(1)}(q_{j3}\rho)}{H_n^{(1)}(q_{j3}R_2)} \Big[B_{jn}J_n(q_{j2}R_2) + C_{jn}N_n(q_{j2}R_2) \Big], & \nu = 3, \quad \rho \ge R_2 \end{bmatrix}$$

характеризує розподіл поля аксіальних компонент по радіусу в *v*-м шарі резонатора. Тут B_{jn} і C_{jn} – сталі, що пов'язані між собою граничними умовами і можуть бути виражені через будь-яку одну з них, яка визначається умовою збудження електромагнітних коливань в резонаторі (або з умови нормування); $N_n(u)$ – циліндрична функція Неймана *n*-го порядку. Індекс *j* позначає *E* або *H*. Радіальні компоненти хвильового вектора q_{jv} полів в *v*-му шарі резонатора дорівнюють:

$$q_{H\nu} = \sqrt{\varepsilon_{\perp\nu}\mu_{\nu}k_{p}^{2} - k_{z}^{2}} , \ q_{E\nu} = \sqrt{\varepsilon_{\parallel\nu}/\varepsilon_{\perp\nu}} q_{H\nu} \,.$$

Поперечні компоненти електромагнітного поля власних коливань досліджуваного резонатора визначаються співвідношеннями

$$q_{H\nu}^{2}E_{\rho\nu} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial^{2}}{\partial\varphi\partial z}E_{z\nu} - i\omega_{p}\mu_{\nu}\frac{\partial}{\partial\rho}H_{z\nu} \qquad q_{H\nu}^{2}E_{\rho\nu} = \frac{\partial^{2}}{\partial\rho\partial z}E_{z\nu} + i\omega_{p}\mu_{\nu}\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\varphi}H_{z\nu}$$

$$q_{H\nu}^{2}H_{\rho\nu} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial^{2}}{\partial\phi\partial z}H_{z\nu} + i\omega_{p}\varepsilon_{\perp\nu}\frac{\partial}{\partial\rho}E_{z\nu} \qquad q_{H\nu}^{2}H_{\rho\nu} = \frac{\partial^{2}}{\partial\rho\partial z}H_{z\nu} - i\omega_{p}\varepsilon_{\perp\nu}\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}E_{z\nu}$$

при підстановці в них аксіальних компонент (3.1).

Характеристичне рівняння [5, 36] отримано після задовільнення граничним умовам на межі розділу середовищ:

$$\Omega_{1}[\chi_{2}\chi_{1}(\xi_{\beta}^{E}-\xi_{\alpha}^{E})Z_{J}^{E}Z_{N}^{E}+\delta_{\beta}^{E}(\chi_{1}^{2}-\xi_{\beta}^{H}\xi_{\alpha}^{E})Z_{J}^{E}Z_{N}^{H}+\delta_{\alpha}^{E}(\xi_{\beta}^{H}\xi_{\beta}^{E}-\chi_{1}^{2})Z_{N}^{H}Z_{N}^{E}] = \\ = \Omega_{2}[\chi_{1}\delta_{\beta}^{E}(\xi_{\alpha}^{H}-\xi_{\beta}^{H})Z_{J}^{H}Z_{N}^{H}+\chi_{2}(\xi_{\alpha}^{H}\xi_{\beta}^{E}-\chi_{1}^{2})Z_{J}^{H}Z_{N}^{E}+\chi_{2}(\chi_{1}^{2}-\xi_{\beta}^{H}\xi_{\beta}^{E})Z_{N}^{H}Z_{N}^{E}],$$
(3.2)

$$\begin{split} & \exists \mathbf{C} \ \Omega_{1} = \chi_{2} \chi_{1} \Big(\xi_{\alpha}^{H} - \xi_{\beta}^{H} \Big) Z_{J}^{H} Z_{N}^{H} + \delta_{\beta}^{H} \Big(\xi_{\alpha}^{H} \xi_{\beta}^{E} - \chi_{1}^{2} \Big) Z_{J}^{H} Z_{N}^{E} + \delta_{\alpha}^{H} \Big(\chi_{1}^{2} - \xi_{\beta}^{H} \xi_{\beta}^{E} \Big) Z_{N}^{H} Z_{N}^{E}; \\ & \Omega_{2} = \chi_{2} \Big(\xi_{\beta}^{H} \xi_{\beta}^{E} - \chi_{1}^{2} \Big) Z_{N}^{H} Z_{N}^{E} + \chi_{2} \Big(\chi_{1}^{2} - \xi_{\beta}^{H} \xi_{\alpha}^{E} \Big) Z_{J}^{E} Z_{N}^{H} + \chi_{1} \delta_{\beta}^{H} \Big(\xi_{\beta}^{E} - \xi_{\alpha}^{E} \Big) Z_{J}^{E} Z_{N}^{E}, \\ & \chi_{\nu} = \frac{nk_{z}}{k_{p}R_{\nu}^{2}} \left(\frac{1}{q_{H\nu}^{2}} - \frac{1}{q_{H\nu+1}^{2}} \right) \xi_{\beta}^{H} = \mu_{2} \beta_{21}^{H} - \mu_{1} \alpha_{11}^{H}; \qquad \xi_{\beta}^{E} = \varepsilon_{\parallel 2} \beta_{21}^{E} - \varepsilon_{\parallel 1} \alpha_{11}^{E}; \qquad \xi_{\alpha}^{E} = \varepsilon_{\parallel 2} \alpha_{21}^{E} - \varepsilon_{\parallel 1} \alpha_{11}^{E}; \\ & \delta_{\alpha}^{E} = \varepsilon_{\parallel 2} \alpha_{03}^{E}; \qquad \delta_{\beta}^{E} = \varepsilon_{\parallel 2} \beta_{22}^{E} - \varepsilon_{\parallel 3} \alpha_{03}^{E}, \qquad \xi_{\alpha}^{H} = \mu_{2} \alpha_{21}^{H} - \mu_{1} \alpha_{11}^{H}; \qquad \delta_{\alpha}^{H} = \mu_{2} \alpha_{22}^{H} - \mu_{3} \alpha_{03}^{H}; \\ & \delta_{\beta}^{H} = \mu_{2} \beta_{22}^{H} - \mu_{3} \alpha_{03}^{H}; \qquad \alpha_{j}^{j} = \frac{1}{q_{j\nu}R_{\eta}} \frac{J_{n}^{'}(q_{j\nu}R_{\eta})}{J_{n}(q_{j\nu}R_{\eta})}; \qquad \beta_{\nu\eta}^{j} = \frac{1}{q_{j\nu}R_{\eta}} \frac{N_{n}^{'}(q_{j\nu}R_{\eta})}{N_{n}(q_{j\nu}R_{\eta})}; \end{aligned}$$

 $\alpha_{0\nu}^{j} = \frac{1}{q_{j\nu}R_{\nu-1}} \frac{H_{n}^{(1)'}(q_{j\nu}R_{\nu-1})}{H_{n}^{(1)}(q_{j\nu}R_{\nu-1})}; \ Z_{R}^{j} = \frac{Y_{n}(q_{j2}R_{1})}{Y_{n}(q_{j2}R_{2})}. \ \text{Тут } Y_{n}(u) \text{ позначає одну з циліндричних}$

функцій $J_n(u), H_n^{(1)}(u),$ чи $N_n(u)$.

Частота $\omega_p = 2\pi f$ для власної *p*-ї моди радіально двошарового циліндричного діелектричного резонатора визначається рішенням даного характеристичного рівняння. Добротність резонатора визначається за формулою (1.2).

Відповідність рішень рівнянь (3.2) визначеному типу коливань (НЕ або ЕН) можна ідентифікувати тільки після визначення домінуючих аксіальних компонент поля, тобто порівняння максимальних значень модулів $|H_{zv}|$ і $|E_{zv}|$.

Права частина в (3.2), пропорційна $\chi_{\nu} \sim nk_z$, перетворюється в нуль для аксіально-однорідних ($k_z = 0$, $n \neq 0$) коливань. Виникають незалежні ТЕ ($E_{z\nu} = 0$) і ТМ ($H_{z\nu} = 0$) коливання, власні частоти яких визначаються характеристичними рівняннями

для ТЕ коливань

$$\delta^{H}_{\beta}\xi^{H}_{\alpha}Z^{H}_{J} + \delta^{H}_{\alpha}\xi^{H}_{\beta}Z^{H}_{N} = 0;$$

$$\delta^E_\beta \xi^E_\alpha Z^E_J + \delta^E_\alpha \xi^E_\beta Z^E_N = 0.$$

Зіставлення результатів експериментальних і чисельних досліджень структури в принципі дозволяє знаходити діелектричну проникність ε_1 , а, значить, використовувати дану структуру як вимірювальну комірку для визначення діелектричної проникності рідин.

Як матеріал для виготовлення резонатора на першому етапі досліджень було обрано фторопласт, тому що даний діелектрик зручний в процесі механічної обробки і характеризується прийнятними властивостями в мікрохвильовому діапазоні.

Експериментальні дослідження [69] резонатора проводилися в 8-мм діапазоні довжин хвиль при кімнатній температурі. Діелектрична проникність фторопласта на частоті f = 37,5 ГГц складає $\varepsilon_2 = 2,07 - i 3,5 \times 10^{-4}$.

Розміри резонатора (рис. 3.2) обрано на підставі результатів ряду проведених досліджень спектральних і енергетичних характеристик резонаторних структур. Радіус резонатора $R_2 = 39$ мм. Радіус внутрішнього шару (порожнини (5)) резонатора R₁ варіювався шляхом механічного зняття внутрішнього шару зовнішнього фторопластового кільця (1). Висота резонатора *H*_{КДР} = 14 мм. ТПС (3) виконано у вигляді пластин з дюралюмінію, товщина їх становить $H_{\text{TПC}} = 5$ мм, діаметр $D_{\text{TПC}} = 100$ мм. Вибір пластин такого розміру дозволяє мінімізувати вплив краю пластини на розподіл електромагнітного поля резонатора, бо край пластини віднесено на достатню відстань від його бічної поверхні. Цe дозволило зробити коректним порівняння результатів експерименту і чисельного розрахунку, тому що в розрахунку ТПС задаються як нескінченні. Весь резонатор, що складається з фторопластового кільця (1) і двох дюралюмінієвих пластин, затискався за допомогою металевого гвинта (6). Положення гвинта в центральній частині резонатора не збурює електромагнітне

поле резонатора, тому що воно має поверхневий характер і зосереджено поблизу бокової поверхні резонатора в зовнішньому фторопластовий кільці. Порожнина резонатора (5) може заповнюватися рідиною (через отвір (7)), що призводить до зміни мікрохвильового відгуку резонатора.



Рисунок 3.2 – Вимірювальна комірка на основі резонатора з порожниною: 1 – зовнішній шар у вигляді кільця з фторопласту, 2 – внутрішній шар фторопласту, 3 – ТПС з дюралюмінію, 4 - діелектричні хвилеводи, 5 – внутрішня порожнина, заповнена рідиною, 6 – металевий гвинт, 7 – отвір для заливки рідини в порожнину.

Оскільки резонатор обмежений двома ТПС, в ньому можуть існувати аксіально-однорідні моди. Для досліджень обрано моду HE_{39 1 0}, тому що резонансна частота даної моди знаходиться в 8-мм діапазоні довжин хвиль і резонатор з такою модою характеризується високими значеннями добротності.

Для того, щоб обрати відповідну величину радіуса внутрішньої порожнини R_1 , проводилися дослідження характеристик резонатора з різними значеннями радіусу внутрішньої порожнини. Радіус внутрішньої порожнини R_1 потрібно вибирати достатнім для того, щоб досліджувана рідина впливала на електромагнітне поле резонатора. Однак, з іншого боку, порожнина не повинна бути занадто велика, бо в цьому випадку буде спостерігатися різке падіння добротності резонатора при заповненні порожнини рідиною, що негативно вплине на точність вимірювань.

На рис. 3.3 показано вплив величини радіуса порожнини на частоту і добротність резонатора з модою HE₃₉₁₀. Критеріям, описаним вище, відповідає $R_2 - R_1 = 8$ мм. Такий резонатор характеризується достатньою чутливістю до зміни властивостей рідини, яка заповнює порожнину, при величинах добротності Q = 200-500 в залежності від властивостей цієї рідини. Лініями позначено результати, отримані на підставі характеристичного рівняння (3.2), при заповненні порожнини різними рідинами (1 – водою, 2 – етиловим спиртом (96%), 3 – бензином), точками - результати експерименту (-▲--водою, -●--етиловим спиртом (96%), -■--бензином). Для усунення впливу систематичної помилки на результат розглядалися не абсолютні значення частоти, а різниця $f_p - f_0$, де f_p – частота резонатора при заповненні його внутрішнього шару досліджуваною рідиною, *f*₀ - частота резонатора при повітряному заповненні його внутрішнього шару. Суцільна лінія описує характеристики резонатора, порожнину якого заповнено водою, без урахування втрат ТПС (при проведенні розрахунку на підставі В характеристичного рівняння торцеві площини вважаються ідеально провідними). Значення частоти, виміряні та отримані шляхом розрахунку,

добре збігаються, проте значення добротності, отримані експериментально, нижче відповідних розрахованих величин. Це пояснюється тим, що урахування впливу кінцевої провідності ТПС впливає на величину добротності, але не впливає в межах похибки вимірювання на резонансну частоту.



Рисунок 3.3 – Різниця частот (а) і добротність (б) радіально двошарового резонатора при різних значеннях радіуса порожнини *R*₁ при заповненні порожнини різними речовинами.

Проведено вимірювання частоти і добротності резонатора. Похибка вимірювання частоти становила ±5 кГц. Добротність вимірювалася шляхом визначення ширини резонансної лінії з похибкою < 0,2 %. Зв'язок резонатора з генератором здійснювалася за допомогою двох діелектричних хвилеводів. Таким чином було реалізовано схему вмикання резонатора на прохід з режимом біжучої хвилі.

Всі експериментальні дослідження резонатора з порожниною, заповненою рідинами, проводилися при температурі 20±0,3°С. Варіації діелектричної проникності фторопласта і рідин, які заповнювали порожнину, в такому температурному інтервалі були менші, ніж точність вимірювань діелектричної проникності з використанням фторопластового резонатора. Дисперсія діелектричної проникності води враховувалася згідно [74].

Хоча аналіз властивостей резонатора на основі характеристичного рівняння не дозволяє врахувати втрати в ТПС, шляхом зіставлення величин добротності резонатора, порожнину якого заповнено дистильованою водою, отриманих чисельно і експериментально (рис.3.3 б), можна визначити значення геометричного коефіцієнта включення провідника A_s . На рис. 3.4 представлена залежність коефіцієнта A_s від товщини фторопластового шару $R_2 - R_1$. Коефіцієнт включення провідника A_s разом з поверхневим опором R_s визначає внесок втрат в провіднику в величину добротності резонатора (2.1). Розраховані таким чином для випадку заповнення порожнини резонатора дистильованою водою значення коефіцієнта A_s дозволяють коригувати значення добротності резонатора, отримані чисельно, коли порожнина заповнюється іншими рідинами. Відкориговані таким чином значення добротності резонатора з порожниною, заповненою етиловим спиртом (96%) і бензином, представлено на рис. 3.3 б (пунктирні лінії). Величина поверхневого опору дюралюмінієвих пластин припускалася $R_s = 0,14$ Ом.



Рисунок 3.4 – Залежність геометричного коефіцієнта провідника *A_s* від товщини зовнішнього (фторопластового) шару резонатора.

Потім порожнину резонатора з обраною товщиною фторопластового шару заповнювали розчином етилового спирту різної концентрації. Зміна концентрації розчину також впливає на частоту і добротність резонатора.

Характеристики резонатора, отримані експериментально і шляхом розрахунку, узгоджуються (рис. 3.3), тому можна зробити висновок, що резонатор може бути використаний для визначення діелектричної проникності рідин, в тому числі діелектричної проникності спиртового розчину різної концентрації.

На рис. 3.5 представлено концентраційні залежності різниці частот резонатора при заповненні порожнини водно-спиртовим розчином (f_p) і повітрям (f_0), а також добротності. Характеристики резонатора в точці з нульовою концентрацією розчину відповідають характеристикам резонатора при заповненні порожнини водою. Дані отримано для резонатора з модою HE_{39 10}. При цьому значення добротності резонатора (рис. 3.5 б), отримані чисельно, відкориговано з урахуванням величини коефіцієнта включення провідника A_s , як описано раніше.



Рисунок 3.5 – Концентраційні залежності різниці частот (а) і добротності (б) фторопластового резонатора з модою HE₃₉₁₀ з порожниною, заповненою розчином етилового спирту

При використанні радіально двошарового фторопластового резонатора для дослідження рідин необхідний об'єм рідини становить близько 10 мл. Для дослідження біологічних рідин необхідно вибирати резонаторні структури, при використанні яких потрібний об'єм досліджуваної рідини може зменшуватися. Використання матеріалу, що характеризується більшим значенням діелектричної проникності, для виготовлення резонатора, дозволяє зменшити розмір мікрохвильового резонатора, а, значить, і порожнини, заповненої досліджуваної рідиною.

3.2. Радіально двошаровий резонатор, виготовлений із лейкосапфіра

В роботі [72] проведено дослідження резонатора, зовнішній шар якого виготовлено із лейкосапфіра. Структура його ідентична структурі резонатора, розглянутого в п.3.1. Чисельні дослідження резонатора проведені на основі характеристичного рівняння (3.2). Радіус резонатора $R_2 = 7,25$ мм, висота Діелектрична проникність лейкосапфіра є тензорною $H_{\rm KJP} = 2.5$ MM. величиною. Компоненти тензора в напрямках, перпендикулярному і дорівнюють $\varepsilon_{\perp 2} = 9,4 \ (1 - 2,5 \times 10^{-5} \ i)$ i паралельному oci анізотропії, $\varepsilon_{\parallel 2} = 11,59 \ (1 - 2,5 \times 10^{-5} \ i)$ відповідно. Внутрішній шар резонатора заповнювався спиртом ($\varepsilon_{\perp 1} = \varepsilon_{\parallel 1} = 3,58 (1 - 0,305 i)$ і дистильованою водою. використанні дистильованої води враховувалася При дисперсія <u>ii</u> діелектричної проникності при температурі 20°С [73]. Дослідження проводилися в 8-мм діапазоні довжин хвиль для моди НЕ 1120. Хоча резонатор з модами з однією варіацією в радіальному напрямку характеризується вищими значеннями добротності, вибір моди з двома варіаціями в радіальному напрямку обумовлено розмірами порожнини резонатора (величина R₁ варіювалася в межах 3-3,75 мм). Поле моди з однією варіацією по радіусу зосереджено поблизу бокової поверхні резонатора, і при таких розмірах порожнини буде слабко взаємодіяти з рідиною всередині порожнини.

На рис. 3.6 представлено залежності різниці частот $f_p - f_0$ і добротності *Q* резонатора від товщини лейкосапфірового шару. Суцільними і пунктирними лініями позначено результати чисельного дослідження резонатора, внутрішній шар якого заповнено водою і спиртом відповідно. Символами (\bigcirc) і (\triangle) позначено точки, отримані в результаті експериментального дослідження резонатора, внутрішній шар якого заповнено відповідними рідинами.



Рисунок 3.6 – Залежність різниці частот (а) і добротності (б) лейкосапфірового резонатора від товщини його зовнішнього шару

Експериментально досліджувався резонатор, ТПС якого виготовлено з міді, поверхневий опір якої $R_{\rm S} = 0,065$ Ом. При проведенні чисельних досліджень ТПС вважалися ідеально провідними. Як було зазначено в п. 3.1, таке припущення не впливає на значення частотної різниці, але впливає на значення добротності резонатора.

На рис. 3.7 представлено значення коефіцієнта A_s, отримані, як і в п.3.1, шляхом зіставлення значень добротності резонатора, знайдених експериментально і в результаті обчислення без урахування втрат в ТПС (см. формулу 2.1).



Рисунок 3.7 – Залежність геометричного коефіцієнта провідника A_s від товщини зовнішнього (лейкосапфірового) шару резонатора.

Значення добротності, отримані шляхом розрахунку, було відкориговано з урахуванням втрат в ТПС. На рис. 3.8 представлено значення добротності, отримані експериментально, при заповненні порожнини резонатора водою (°) і спиртом (Δ), та розраховані значення добротності, що були відповідно відкориговані, при заповненні порожнини водою (лінія), в залежності від товщини зовнішнього (лейкосапфірового) шару.



Рисунок 3.8 – Залежність добротності КДР від товщини зовнішнього (лейкосапфірового) шару резонатора.

Експериментальні дослідження показують, що в реальних умовах завжди мають місце мікропроміжки між лейкосапфіровим диском і металом, заповнені повітрям або рідиною. Тому на наступному етапі досліджень були проведені дослідження радіально двошарового лейкосапфірового резонатора з мідними ТПС, які закріплювалися за допомогою бутіральфенольного клею БФ-2 (для кращої фіксації і щоб уникнути появи повітряних проміжків і проникнення води в них) [73]. Шар клею впливає на частоту і добротність резонатора, і цей вплив не враховувався при використанні строгих аналітичних методів [5, 36, 69, 72]. У процесі використання програми COMSOL Multiphysics нами створена модель резонатора, що дозволяє враховувати особливості реальної резонаторної структури. Для з'ясування можливості використання реальної резонатора структури як вимірювальної
комірки для визначення діелектричної проникності рідин, зіставлено результати чисельних і експериментальних досліджень лейкосапфірових КДР.

На рис. 3.9 представлено варіант реального радіально двошарового циліндричного резонатора з двома ТПС.



Рисунок 3.9 – Вимірювальна комірка на основі радіально-двошарового КДР. 1 – кільце з лейкосапфіра; 2 – внутрішня порожнина КДР з досліджуваною рідиною; 3 – мідні ТПС; 4 – отвори в ТПС для заповнення КДР рідиною; 5 – шар клею

Зовнішній шар резонатора виготовлено з лейкосапфіра. Радіус резонатора $R_2 = 7,255$ мм, висота $H_{KДP} = 2,51$ мм, радіус внутрішнього шару (порожнини) $R_1 = 4,27$ MM. Таким чином, товщина зовнішнього лейкосапфірового шару резонатора становить $R_2 - R_1 = 2,98$ мм. Порожнина даного резонатора має більший розмір у порівнянні з розміром порожнини лейкосапфірового резонатора, розглянутого вище. Тому характеристики такої резонаторної структури з модою з однією варіацією поля в радіальному напрямку залишаються чутливими до властивостей рідини, що заповнює порожнину. Таким чином, використовуючи значення зміни резонансної частоти і добротності, що отримуються експериментально при заповненні порожнини резонатора рідиною, можна визначити діелектричну проникність

досліджуваної речовини. Резонатор обмежено двома ТПС, виготовленими з міді ($D_{\text{TПС}} = 20 \text{ мм}, H_{\text{TПС}} = 5 \text{ мм}$). Досліджувана речовина заливається в порожнину резонатора через отвори в ТПС ($D_{\text{отв}} = 3 \text{ мм}$).

Як зазначалося вище, повне виключення проникнення води і водних розчинів в мікрощілини між кільцем з лейкосапфіру і ТПС становить певну технічну складність. Тому ТПС фіксуються на лейкосапфіровому кільці за допомогою клею. Шар клею досить тонкий, проте істотно впливає на частоту і добротність резонатора. Програма COMSOL Multiphysics, яка використовувалася для розрахунків, дозволяє враховувати вплив шару клею на частоту і добротність резонатора.

Шар клею занадто тонкий для того, щоб безпосередньо вимірювати його товщину з високою точністю, тому остання визначалася шляхом зіставлення даних, отриманих в результаті чисельних і експериментальних досліджень КДР, порожнина якого заповнена повітрям. Таким же чином було визначено діелектричну проникність клею. Отримані значення складають відповідно $H_{\kappa} = 12$ мкм, $\varepsilon_{\kappa} = 3,3 (1 - 0,0025i)$. У таблиці 3.1 представлено частоту і добротність резонатора, порожнину якого заповнено повітрям, з модою ШГ НЕ $_{15\,1\,\delta}$ (0 < δ < 1). Видно, що частота КДР, у якого ТПС зафіксовано за допомогою клею, приблизно на 450 МГц вища, а добротність нижча, ніж у резонатора без клею.

Таблица 3.1.

Частота і добротність радіально двошарового лейкосапфірового резонатора з модою ШГ НЕ 15 1 *б*

КДР	Частота, ГГц	Добротність
Без шару клею	36,400	5570
3 шаром клею	36,853	4300

Розподіл E_z - компоненти електромагнітного поля моди ШГ НЕ $_{15 1 \delta}$ в радіально двошаровому лейкосапфіровому резонаторі з двома ТПС представлено на рис. 3.10.



Рисунок 3.10 – Модель радіально двошарового лейкосапфірового КДР з модою ШГ НЕ 15 1 *б* для розрахунку його характеристик

Експериментальні дослідження радіально двошарового КДР проводилися в діапазоні 30-40 ГГц. Спектри цього КДР при заповненні повітрям (пунктирні лінії) і дистильованою водою (суцільні лінії) представлено на малюнку 3.11.



Рисунок 3.11 – Спектр радіально двошарового лейкосапфірового КДР при заповненні внутрішньої порожнини повітрям (пунктирні лінії) і дистильованою водою (суцільні лінії)

В спектрі резонатора з порожниною, заповненою повітрям, чітко простежуються два набори мод – $HE_{n\,1\,\delta}$ (з однією варіацією електромагнітного поля вздовж радіуса КДР) і $HE_{n\,2\,\delta}$ (з двома варіаціями електромагнітного поля вздовж радіуса КДР). Однак при заповненні резонатора дистильованою водою моди з двома варіаціями ($HE_{n\,2\,\delta}$) загасають практично повністю. Це пояснюється тим, що електромагнітне поле моди $HE_{n\,2\,\delta}$ має вищу інтенсивність в порівнянні з полем моди $HE_{n\,1\,\delta}$ в порожнині КДР, тобто в ділянці резонатора, де знаходиться вода – сильнопоглинаюча рідина (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 — Розподіл E_z -компоненти мод ШГ HE_{15 1} δ (з однією варіацією вздовж радіуса КДР) (а) і HE_{15 2} δ (з двома варіаціями вздовж радіуса КДР) (б)

На рис. 3.13 представлено графіки залежності частоти (а) і добротності (б) радіально двошарового КДР при заповненні порожнини повітрям і дистильованою водою для мод ШГ НЕ $_{n1\delta}$ від азимутального індексу *n*. На вставці рис. 3.13 а показано залежність різниці між частотами КДР з порожниною, заповненою водою ($f_{\rm B}$) і повітрям (f_0). Лініями позначено результати чисельних досліджень, точками – експериментальних (трикутники відповідають заповненню порожнини КДР повітрям, кружечки – заповненню

порожнини дистильованою водою, ромбики – різниці між частотами КДР з порожниною, заповненою водою і повітрям).



Рисунок 3.13 – Частота (а) и добротність (б) радіально двошарового лейкосапфірового резонатора з модами ШГ НЕ _{*n* 1 δ}

У моделі резонатора з порожниною, заповненою дистильованою водою, використовувалися параметри шару клею, наведені вище. Значення

діелектричної проникності дистильованої води при температурі 25°С для розрахунку взяті із [74]. З даних, наведених на рис. 3.13, видно, що модель коректно описує реальну вимірювальну комірку, бо дані розрахунку і добре збігаються. експерименту Отже, дану структуру можна використовувати діелектричної проникності рідин, для визначення включаючи водні розчини.

Наступним етапом досліджень стало вивчення властивостей радіально двошарового резонатора, порожнину якого заповнено різними біологічними рідинами. Проведено експериментальні дослідження КДР при заповненні порожнини глюкозою (20 %), лактальбуміном (5 ммоль/л), бичачим сироватковим альбуміном (5 ммоль/л). У таблиці 3.2 наведено спектральні та енергетичні характеристики резонатора з модою ШГ НЕ 15 1 *б*.

Таблиця 3.2.

Характеристики радіально двошарового лейкосапфірового КДР з розчинами біологічних рідин

	Разність		
Розчин	частот, $f_{ m p}-f_{ m B},$ Гц	величин, обернених добротності, $Q_{ m p}^{-1} - Q_{ m B}^{-1}$	
Розчин глюкози (20%)	$-1,63 \times 10^{6}$	$-4,21 \times 10^{-5}$	
Розчин бичачого сироваткого альбуміну (5 ммоль/л)	-1,95×10 ⁶	-5,21×10 ⁻⁵	
Розчин лактальбуміну (5 ммоль/л)	$-7,10 \times 10^{5}$	$-1,11 \times 10^{-5}$	

Для частоти, характерної для даної моди ($\approx 36,85$ ГГц), діелектрична проникність дистильованої води при температурі 25°C становить $\varepsilon_{води} = 21,34(1-1,39i)$. Для подальшого зменшення впливу неповної

відповідності моделі і реальної вимірювальної комірки на результат вимірювань розглянуто не абсолютні величини частоти і добротності КДР, а різниця частот $f_p - f_B$ і величин, обернених добротності $Q_p^{-1} - Q_B^{-1}$, при заповненні порожнини розчином, щодо відповідних характеристик резонатора з порожниною, заповненою дистильованою водою.

3.3. Радіально двошаровий резонатор як сенсор діелектричних властивостей рідини

Як вже було показано вище, вплив властивостей рідини, що заповнює порожнину радіально двошарового КДР, на резонансну частоту і добротність резонатора, можливість розв'язання оберненої залачі вказує на електродинаміки, тобто на можливість визначення властивостей рідини за виміряними резонансною частотою і добротністю резонатора з відповідною модою. Шлях до вирішення такої задачі дотепер не був відпрацьованим, тому проведенні перших досліджень при за допомогою фторопластового резонатора [69] використовувався метод підбору значень дійсної та уявної частини діелектричної проникності рідини так, щоб значення резонансної частоти і добротності резонатора, що отримуються шляхом розв'язання характеристичного рівняння (3.2) і експерименту, збігалися в межах похибки вимірювання.

На рис. 3.14 представлено концентраційні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин діелектричної проникності водно-спиртового розчину, отримані описаним способом за допомогою фторопластового резонатора, описаного в п. 3.1. Отримані значення діелектричної проникності позначено точками. Кривими позначено концентраційні залежності діелектричної проникності, отримані за допомогою моделі Дебая для двокомпонентних розчинів, коефіцієнти для якої взяті з джерел [60, 75-78]. Дані криві наведено для підтвердження того, що вимірювальна комірка на основі радіально

двошарового фторопластового резонатора дозволяє коректно визначати комплексну діелектричну проникність рідин з великими втратами.



Рисунок 3.14 – Концентраційні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин діелектричної проникності водно-спиртового розчину

Обидві характеристики резонатора, як частота, так і добротність, залежать від дійсної (є) і уявної (є) частин комплексної діелектричної

проникності рідини в порожнині резонатора. Це ускладнює визначення проникності досліджуваної рідини.

Щоб спростити визначення дійсної і уявної частин діелектричної проникності, запропоновано калібрувальну процедуру [66]. За допомогою моделі для чисельних досліджень розраховано номограму (рис. 3.15), що дозволяє визначати обидві частини проникності безпосередньо по виміряним значенням різниці частот і величин, обернених добротності резонатора, не проводячи процедуру підбору значень проникності, як це було зроблено при визначенні проникності водно-спиртових розчинів за допомогою фторопластового резонатора.



Рисунок 3.15 – Номограма для визначення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності рідин за допомогою лейкосапфірового радіально двошарового КДР

Дана номограма показує зміну різниці частот і величин, обернених добротності лейкосапфірового резонатора з модою НЕ 151 *в* при його

заповненні речовинами з різними значеннями ε' і ε'' діелектричної проникності щодо відповідних характеристик резонатора з порожниною, заповненою дистильованою водою. Щоб побудувати номограмму, в моделі для чисельного розрахунку знаходилися резонансна частота і добротність резонатора для різних значень ε'' (в діапазоні 17,71-29,71) при фіксованому значенні ε' і навпаки, для різних значень ε'' (в діапазоні 15,34-21,34) при фіксованому значенні ε'' . Верхні межі діапазонів зміни ($\varepsilon' = 21,34$, $\varepsilon'' = 29,71$) відповідають значенням дійсної та уявної частин діелектричної проникності води.

Видно, що величина уявної частини діелектричної проникності є речовини, що представляє внутрішній шар КДР, сильніше впливає на резонансну частоту, а величина дійсної частини є' – на добротність резонатора. Це явище пов'язане з процесом зміни розподілу електромагнітного поля резонатора в умовах великих втрат в шарі рідини [5]. Ця особливість відрізняє діелектрометрію рідин з великими і малими втратами мікрохвильової енергії.

У номограму вносилися отримані експериментально значення різниці частот і величин, обернених добротності, між відповідними характеристиками резонаторів з порожниною, заповненою розчином, і порожниною, заповненою дистильованою водою, для розчинів різних біологічних рідин. На номограмі, приведеній на рис. 3.15, кружком позначено відповідні значення для розчину глюкози (20%), квадратом – для розчину лактальбуміна (5 ммоль/л), трикутником – для розчину бичачого сироваткового альбуміну (5 ммоль/л). Ці дані приведено у таблиці 3.2.

За допомогою номограми визначено значення дійсної є і уявної є частин комплексної діелектричної проникності досліджуваних розчинів (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3

	Комплексна діелектрична проникність			
Розчин	Дійсна частина, є '	Обернена частина, є "		
глюкози (20%)	17,04	22,19		
бичачого сироваткого альбуміну (5 ммоль/л)	16,42	20,96		
лактальбуміну (5 ммоль/л)	19,53	26,31		

Діелектрична проникність розчинів біологічних рідин

Висновки до розділу 3

1. Показано, що радіально двошаровий резонатор може бути використаним як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності конденсованих середовищ у міліметровому діапазоні довжин хвиль.

2. Визначено діелектричні властивості водно-спиртових розчинів різної концентрації за допомогою фторопластового КДР в 8-мм діапазоні довжин хвиль.

3. Введення в резонаторну структуру двох шарів клею, які дозволяють ліквідувати мікрозазори між шаром лейкосапфіра і ТПС і перешкоджають протіканню рідини, виключають в даний час аналітичний розв'язок відповідної електродинамічної задачі для резонатора, тому для розрахунку характеристик сапфірового резонатора використовувалася модель, створена нами в програмі COMSOL Multiphysics.

4. Проведено процедуру оптимізації вимірювальної комірки на основі лейкосапфірового КДР і обгрунтовано вибір геометричних розмірів і робочої моди.

5. Визначено діелектричні властивості розчинів біологічних рідин (глюкози, бичачого сироваткового альбуміну та лактальбуміну) у 8-мм

діапазоні довжин хвиль. Для цього за допомогою чисельного моделювання була побудована номограма, що дозволяє за спектральними та енергетичними характеристиками резонатора з відповідною модою визначити дійсну і уявну частини діелектричної проникності досліджуваної рідини.

РОЗДІЛ 4

РЕЗОНАТОР З МІКРОФЛЮЇДНИМ КАНАЛОМ, ЗАПОВНЕНИМ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ РІДИНОЮ

Всі резонаторні методи визначення діелектричної проникності рідин базуються на дослідженні відгуку резонатора, електромагнітне поле якого взаємодіє з досліджуваною рідиною. Так, в розділі 3 описано метод визначення діелектричної проникності рідин за допомогою вимірювальної комірки на основі радіально двошарового діелектричного резонатора з ТПС. Для того, щоб отримати можливість досліджувати малі обсяги речовини, для резонатора використовувався лейкосапфір. Резонатор, виготовлення виготовлений із лейкосапфіра, має відносно невеликі розміри в 8-мм діапазоні довжин хвиль. Об'єм досліджуваної рідини, яка міститься в порожнину резонатора, становить величину близько 0,15 мл. Крім того, як зазначалося в розділі 3, реалізація вимірювальної комірки на основі двошарового КДР пов'язана 3 серйозними технологічними труднощами, обумовленими необхідністю усунення мікрощілин між металевими ТПС і лейкосапфіровим кільцем.

Перспективною для подальшої мініатюризації є вимірювальна комірка з мікрофлюїдним каналом (МФК), розміщеним певним чином в шарі пластика, притиснутого до однієї з основ резонатора [66, 71, 79]. Можливість визначати діелектричну проникність сильнопоглинаючих конденсованих середовищ, що займають малі об'єми, особливо актуальна при дослідженні біологічних рідин. Для визначення діелектричної проникності рідин за допомогою лейкосапфірового резонатора з МФК потрібен зразок досліджуваної рідини об'ємом не більше 1 мкл, і з'являється перспектива подальшого зменшення її об'єму. Крім того, така вимірювальна комірка не потребує внесення зразка досліджуваної рідини безпосередньо в монокристал, з якого виготовлено резонатор, що спрощує процес виготовлення вимірювальної структури. Також

застосування резонатора з МФК дозволяє виключити технічні складності, характерні для радіально двошарового резонатора і пов'язані з заливкою та видаленням рідини із порожнини цього резонатора.

Резонатор з МФК не є простою симетричною структурою, і визначення його характеристик методом електродинамічного аналізу на даний момент відсутнє. Тому для ідентифікації моди, визначення резонансної частоти і добротності резонатора використовується, як і в розділі 3 (для визначення властивостей лейкосапфірового резонатора з двома шарами клею), модель, створена в програмі COMSOL Multiphysics.

4.1. Експериментальні дослідження резонатора з мікрофлюїдним каналом

Щоб використовувати резонаторну структуру як основу вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності, необхідно експериментально досліджувати відгук даної структури, тобто вимірювати резонансну частоту і добротність резонатора з відомою, ідентифікованою модою. В даному розділі розглядається вимірювальна комірка на основі циліндричного резонатора (радіус резонатора R = 7,25 MM, висота $H_{\rm KJP} = 2.5$ мм), виготовленого з лейкосапфіра, накритого шаром пластика (висота $H_{\text{пл}} = 0,69$ мм), в якому розташовано МФК з досліджуваною рідиною (рис. 2.10) [66, 71, 79]. Діаметр МФК $D_{M\Phi K} \approx 0.2$ мм, МФК розташований посередині шару пластика на відстані 4,1 мм від центру резонатора. Точне значення діаметра МФК і його місце розташування в шарі пластика не піддається прямому вимірюванню, що викликає складності на етапі зіставлення характеристик резонатора, отриманих шляхом експерименту і розрахунку. Тому тут необхідним є проведення процедури уточнення даних параметрів, яка буде детально описана далі.

Вимірювальна комірка також включає в себе два лейкосапфірових діелектричних хвилевода як вхідну і вихідну лінії передачі і системи

позиціонування резонатора з температурним датчиком і елементом Пельтьє як керуючим елементом для системи температурної стабілізації (рис.4.1).





Рисунок 4.1 – Схема (а) і фото (б) вимірювальної комірки на основі КДР з МФК, що включає в себе також пару діелектричних хвилеводів, в спеціальній камері

Така вимірювальна комірка розташовується в спеціальній камері з метою зменшення температурного обміну з навколишнім середовищем. Резонансна частота і добротність були виміряні за допомогою векторного аналізатора НР 8722С. Система стабілізації температури дозволяє стабілізувати температуру резонатора і рідини, що заповнює МФК, з точністю краще 0,01 С. Зміна добротності резонатора, обумовлена температурною нестабільністю, дуже мала, а зміна різниці частот становить 2 МГц на 1 градус Цельсія. Таким чином, система, що використовується для температурної стабілізації, дозволяє забезпечити стабільність резонансної частоти не гірше 20 кГц.

Описана вимірювальна комірка дозволяє проводити дослідження характеристик резонатора з досліджуваною рідиною на ряді резонансних частот (на різних модах) з інтервалом близько 1,8 ГГц для частотного діапазону 27-40 ГГц.

На рис. 4.2 представлено значення добротності лейкосапфірового резонатора з МФК, заповненим водою, для різних мод в розглянутому діапазоні.



Рисунок 4.2 – Частота і добротність лейкосапфірового резонатора з МФК, заповненим дистильованою водою, з модами ШГ НЕ *п* 1.

При переході від однієї моди до іншої потрібна зміна зв'язку резонатора з діелектричними хвилеводами. Всі результати вимірювань, представлені далі, проводилися на одній моді (на одній резонансній частоті, $f \approx 35,4 \ \Gamma \Gamma \mu$), щоб умови, при яких виконуються вимірювання, були максимально ідентичними. Ідентифікація моди проводиться за допомогою моделі резонатора з МФК, описаної нижче.

МФК розташовується в шарі пластика Zeonor 1420R, яким накрито резонатор. Вибір матеріалу обумовлений тим, що пластик Zeonor 1420R має відносно низькі діелектричні втрати (tg $\delta = 8,66 \times 10^{-4}$) і може застосовуватися для виготовлення МФК з використанням методу термокомпрессії (цей метод реалізовано співробітником запропоновано i успішно IPE НАНУ А. І. Губіним). МФК має циліндричну форму, края МФК, що збігаються з краями шару пластика, герметично з'єднані з металевими трубочками, що вирішує проблему заливання різних рідин в МФК. Місцезнаходження МФК в площині пластикового шару вибрано з таким розрахунком, щоб забезпечити високу чутливість вимірювань. Для цього було проведено попередні чисельні дослідження структури за допомогою моделі для чисельного рахунку.

4.2. Модель резонатора з мікрофлюїдним каналом для розрахунку його характеристик

Модель резонатора з МФК (рис. 4.3) виконано в програмі COMSOL Multiphysics. Циліндричний резонатор, виконаний iз лейкосапфіра $(\varepsilon_{\perp} = 9,4 \ (1-2,5 \times 10^{-5} \ i), \ \varepsilon_{\parallel} = 11,59 \ (1-2,5 \times 10^{-5} \ i)),$ накрито шаром пластика $(\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\parallel} = 2,38 (1 - 8,66 \times 10^{-4} i).$ Значення тангенса кута діелектричних втрат визначено експериментально зіставлення пластика шляхом величин добротності лейкосапфірового резонатора з пластиковим шаром і без нього. Резонатор розміщено в циліндр із провідного матеріалу, стінки якого розташовано на деякій відстані від резонатора, достатній для того, щоб присутність цього циліндра не чинила вплив на характеристики резонатора.



Рисунок 4.3 – Модель для розрахунку характеристик резонатора з МФК, виконана в програмі COMSOL Multiphysics

В симетричних резонаторних структурах моди ШГ є двічі виродженими за азимутальним індексом. У резонаторі з МФК виродження знімається через присутність неоднорідності, і при проведенні чисельних розрахунків можна спостерігати розщеплення моди, особливо помітне при заповненні МФК водою. В результаті в резонаторі присутні дві моди з аналогічним розподілом поля і кількома різними значеннями частоти. Так, при заповненні МФК водою чисельно спостерігаються дві моди НЕ $_{1211}$: на частоті f = 35,39268 ГГц і f = 35,39294 ГГц. Різниця між резонансними частотами цих двох мод досить мала (0,26 МГц), і вона в даному випадку практично не проявляється при проведенні експериментальних досліджень. Тому, для того, щоб можливо було зіставити результати чисельних і експериментальних досліджень, використовувалося усереднене значення характеристик резонатора для цих двох мод.

З метою забезпечення високої точності вимірювання діелектричної проникності необхідно, щоб модель якомога точніше описувала властивості реальної резонаторної структури, для чого необхідно знати з високою точністю всі розміри резонатора, в тому числі такі важко вимірювані параметри, як діаметр МФК і його місце розташування в шарі пластика. Тому виникає необхідність проводити процедуру уточнення величини діаметра

МФК і його місця розташування в шарі пластика щодо сапфірового диска. Для цього в моделі для чисельного розрахунку варіювалися відстань від поверхні резонатора до центру МФК і діаметр МФК (в межах похибки вимірювання), і отримані значення різниці частот $f_{\rm B} - f_0$ і добротності зіставлялися з відповідними значеннями, отриманими експериментально. На рис. 4.4 представлено залежності різниці частот (а) і добротності (б) від відстані від поверхні резонатора до центру МФК для різних значень діаметра МФК.



Рисунок 4.4 – Залежність різниці частот (а) і добротності (б) лейкосапфірового резонатора від місця розташування МФК в шарі пластика

Значення різниці частот і добротності резонатора, отримані експериментально, позначені на графіках кружечком. Уточнення геометричних розмірів проводилося на основі результатів дослідження резонатора з МФК, заповненим водою, тому що за допомогою резонатора планувалося досліджувати розчини біологічних рідин, основою яких є вода.

Рис. 4.4 тільки частково ілюструє весь процес зіставлення результатів експериментальних і чисельних досліджень. Весь комплекс експериментальних і чисельних досліджень показав, що МФК зсунуто від середини пластика в напрямку поверхні резонатора на 0,0325 мм, а його діаметр становить 0,188 мм.

4.3. Лейкосапфіровий резонатор з мікрофлюїдним каналом при заповненні його різними рідинами

Щоб переконатися в тому, що модель для розрахунку характеристик резонатора коректно описує властивості реальної резонаторної структури, необхідно провести дослідження такого резонатора з МФК, заповненим рідинами з добре вивченими діелектричними властивостями. На рис. 4.5 представлено залежності різниці частот $f_p - f_0$ (позначено квадратиками) і величин, зворотних добротності, $1/Q_p - 1/Q_0$ (позначені кружечками), де f_p , Q_p – характеристики резонатора, МФК якого заповнено рідиною, f₀, Q₀ – характеристики резонатора, МФК якого заповнено повітрям, від дійсної (а) та уявної (б) частини діелектричної проникності рідини, що заповнює МФК. Дослідження проводилися для випадків заповнення МФК пропанолом, етанолом, метанолом, ацетоном і дистильованою водою. У модель для розрахунку закладалися значення комплексної діелектричної проникності рідин, наведені в [80]. Зафарбованими символами позначено результати розрахунку, незафарбованими – результати експерименту. Мода, на якій проводились дослідження – НЕ₁₂₁₁, має частоту приблизно 35,5 ГГц. При проведенні розрахунку характеристик резонатора в моделі задавалися

уточнені геометричні значення параметрів, отримані в п. 4.2. Експериментальні дослідження проводилися при температурі $25 \pm 0,01$ градусів Цельсія.



Рисунок 4.5 – Спектральні і енергетичні характеристики лейкосапфірового резонатора з МФК, заповненим добре вивченими речовинами

Різниця частот збільшується зі збільшенням дійсною частини діелектричної проникності рідини, і залежність стає майже лінійною при $\varepsilon' > 5$. Залежність різниці величин, зворотних добротності, від уявної частини діелектричної проникності рідини також майже лінійна для рідин з відносно високими значеннями уявної частини діелектричної проникності. Результати чисельних і експериментальних досліджень добре узгоджуються. Це означає, що модель коректно описує властивості резонатора з МФК, а, значить, резонатор може бути використано як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідин. Уточнення параметрів резонатора проводилося для випадку МФК, заповненого водою, тому найбільшою точністю будуть характеризуватися дослідження рідин, діелектричні властивості яких близькі до властивостей води.

4.4. Визначення діелектричної проникності розчинів біологічних рідин

Першим етапом в дослідженні властивостей біологічних речовин за допомогою резонатора з МФК став вимір спектральних і енергетичних характеристик резонатора з МФК, заповненим розчином глюкози різної концентрації.

На рис. 4.6 представлено отримані експериментально концентраційні залежності різниці частот (кружечки) і величин, зворотних добротності (квадратики), для резонатора з МФК, заповненим розчином глюкози. Дослідження, як і раніше, проводилися на частоті близько 35,5 ГГц (НЕ 1211 мода), при температурі 25 ± 0,01 градусів Цельсія. МФК заповнювався розчином глюкози з концентрацією 0.5%, 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15% і 20% Точки, що відповідають значенням концентрації 0%, описують властивості резонатора при заповненні МФК дистильованою водою. Видно, що представлені залежності носять лінійний характер.



Рисунок 4.6 – Залежності різниці частот (•) і величин, обернених добротності (•), від концентрації водного розчину глюкози

Як і в разі застосування радіально двошарового резонатора як основи вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності речовин (розділ 3), для визначення діелектричної проникності розчину глюкози за допомогою вимірювальної комірки на основі резонатора ΜФК 3 застосовується спеціальна калібрувальна процедура. На рис. 4.7 представлено яку нанесено отримані експериментально (позначено номограму, на кружечками) характеристики резонатора з МФК, заповненим розчином глюкози різної концентрації. Як і в розділі 3, для отримання номограми в моделі резонатора змінювалися значення уявної частини діелектричної проникності речовини в МФК при фіксованих значеннях дійсної частини, і навпаки. Відшукувалася різниця отриманих таким чином характеристик і характеристик резонатора з МФК, заповненим водою, і результат наносився на номограму. Значення $\varepsilon' = 22,277$ і $\varepsilon'' = 30,337$ відповідають значенням комплексної діелектричної проникності дистильованої води на досліджуваній частоті.



Рисунок 4.7 – Номограма, що дозволяє визначати дійсну і уявну частини комплексної діелектричної проникності рідини, що заповнює МФК лейкосапфірового резонатора, отримана за допомогою моделі для розрахунку. Кружечками позначено результати експериментальних досліджень.

На рис. 4.7 показано, як за допомогою номограми визначати дійсну і уявну частини діелектричної проникності рідини, на прикладі розчину глюкози 20% концентрації. Значення цих величин відповідно дорівнюють $\varepsilon' = 18,1, \varepsilon' = 23,0$. Таким же чином було визначено дійсну та уявну частини діелектричної проникності всіх досліджуваних розчинів глюкози. На рис. 4.8 представлено отримані концентраційні залежності цих характеристик. Видно, що залежності дійсної (позначено квадратиками) і уявної (позначено

кружечками) частин діелектричної проникності розчину глюкози від концентрації має лінійний характер.



Рисунок 4.8 – Концентраційні залежності дійсної (■) і уявної (●) частин діелектричної проникності розчину глюкози

Представлені результати добре узгоджуються з даними, отриманими в [81]. Різниця між значеннями діелектричної проникності розчинів глюкози, отриманими з використанням описаної методики, і значеннями з [81] не перевищує 3%. Якщо враховувати температурну залежність відносної діелектричної проникності розчину глюкози, то цим відхиленням можна знехтувати. Цей факт доводить, що запропонована методика є точною і надійною.

Висока точність і чутливість методу визначення діелектричної проникності на основі резонаторів з модами ШГ робить даний метод перспективним для дослідження діелектричних властивостей біологічних рідин.

Проведено експериментальні дослідження резонатора з МФК, заповненим розчинами різних біологічних речовин: бичачого сироваткового альбуміну, лактальбуміну і цитохрому С. Концентрація розчинів варіюється від 0,01 до 3,0 ммоль/л. Отримані значення різниці частот і величин, обернених добротності, підставляються в номограму, і таким чином визначаються значення діелектричної проникності досліджуваних розчинів.

На рис. 4.9 показано концентраційні залежності дійсної та уявної частин діелектричної проникності цих розчинів. Кружечками позначено дійсну і уявну частину діелектричної проникності бичачого сироваткового альбуміну, квадратами — лактальбуміну, трикутниками — цитохрому С. Зафарбовані символи відповідають значенням дійсної, а незафарбовані — уявної частини комплексної діелектричної проникності розчинів.



Рисунок 4.9 – Залежність дійсної (зафарбовані символи) і уявної (незафарбовані символи) частин діелектричної проникності розчинів різних біологічних речовин від концентрації цих розчинів

Застосування методики визначення комплексної діелектричної проникності рідин за допомогою вимірювальної комірки на основі резонатора з МФК завдяки високій чутливості є перспективним також для відстеження зміни концентрації розчинів біологічних рідин.

4.5. Кварцовий резонатор з мікрофлюїдним каналом в субТГц діапазоні

Лейкосапфіровий КДР з МФК, описаний в п. 4.1, дозволяє визначати діелектричну проникність рідин з великими втратами, які займають малі об'єми, в 8-мм діапазоні довжин хвиль. Дослідження рідин на більш високій частоті не тільки дозволяє розширити фундаментальні уявлення про діелектричні властивості рідин, але і дозволяє зменшити необхідний для досліджень об'єм рідин. У роботах [82-85] запропоновано вимірювальну комірку на основі діелектричного резонатора з МФК, яка дозволяє проводити вимірювання комплексної діелектричної проникності рідин в короткохвильовій частині мм діапазону (субТГц діапазоні).

4.5.1. Вибір діелектричного резонатора як основи вимірювальної комірки

Оскільки виготовлений з лейкосапфіру резонатор має властивості, що роблять можливим його застосування як основи вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності рідин у 8-мм діапазоні (розділ 3), було вирішено вдатися до спроб його використання в субТГц діапазоні. Було циліндричного резонатора, дослідження виготовленого проведено 3 лейкосапфіра, з наступними параметрами: радіус резонатора R = 2,96 мм, висота резонатора $H_{\text{KЛP}} = 1,48$ мм. Як і раніше, для даної системи резонатора структури була використана програма COMSOL Multiphysics. Однак і експериментальні, і чисельні дослідження показали, що в субТГц діапазоні частот резонатор, виготовлений з лейкосапфіру, має добротність менше 6 000. Альтернативою резонатору, виготовленому з лейкосапфіру, є резонатор, виготовлений з кварцу, через менші втрати в ТГц діапазоні. Кварцовий досліджено (радіус R = 4,44 MM, $H_{\rm KJIP} = 1,25 \,\,{\rm MM})$ резонатор також експериментально, і побудовано його модель в COMSOL Multiphysics.

Моделлю для проведення чисельних досліджень вимірювальної комірки є виготовлений з лейкосапфіру резонатор, розміщений в сферу із ідеального провідника з досить великим радіусом, достатнім для того, щоб сферична поверхня не впливала значно на електромагнітне поле резонатора. Однак для резонатора, виготовленого із кварцу, даний підхід є неприйнятним. Діелектрична проникність кварцу менше, ніж лейкосапфіру, тому більша частина електромагнітної енергії випромінюється в навколишній простір. Тому модель для чисельного дослідження кварцового резонатора складніша, ніж для резонатора, виготовленого з лейкосапфіру. Для зменшення відбиття електромагнітних хвиль в моделі з кварцовим резонатором, як і в моделях, описаних в розділі 3, використовувався багатошаровий поглинач.

4.5.2. Циліндричний кварцовий резонатор. Вибір робочої моди

Спектр циліндричного кварцового резонатора в субТгц діапазоні представлено на рис. 4.10.



Рисунок 4.10 – Спектр кварцового циліндричного резонатору

Для експериментальних досліджень використовувався генератор, створений на базі лампи зворотної хвилі з фазовим автопідстроюванням частоти, що дозволяє проводити вимірювання в діапазоні частот 118-178 ГГц. Ідентифікація мод проводилася за допомогою модуля Eigenvalue solver програми COMSOL Multiphysics. Вертикальними пунктирними лініями відзначені значення частоти, отримані чисельно.

Розподіл E_z - компоненти електромагнітного поля мод ШГ НЕ ₁₈₃₁ (a), НЕ ₂₇₁₁ (б), НЕ ₂₃₂₁ (в) в циліндричному кварцовому резонаторі показано на рис. 4.11.









Рисунок 4.11 – Розподіл *E*_z - компоненти електромагнітного поля мод ШГ в кварцовому циліндричному резонаторі

Перспективними в розглянутому діапазоні представлялися дві моди: НЕ HE $_{27\,1\,1}$ і HE $_{23\,2\,1}$. Добротність резонатора з модою HE $_{27\,1\,1}$ виявилася вищою (Q = 32200), тому цю моду було обрано як робочу і далі все дослідження проводилося для даної моди.

4.5.3. Кварцовий резонатор, вкритий шаром пластику з МФК

Наступним кроком стало дослідження кварцового резонатора, покритого шаром пластику Zeonex товщиною 0,61 мм з МФК ($D_{M\Phi K} = 0,2$ мм). МФК знаходиться посередині шару пластика на відстані ≈ 3 мм від центру резонатора. Для збудження резонатора використовуються два хвилевода, виготовлені з поліетилену. Фотозображення вимірювальної комірки на основі кварцового резонатора, покритого шаром пластика з МФК, представлено на рис. 4.12.



Рисунок 4.12 – Вимірювальна комірка на основі кварцового резонатора, покритого шаром пластика з МКФ, і діелектричні хвилеводи

МФК без рідини не вносить значного збурення в поле резонатора і мало впливає на його спектральні та енергетичні характеристики. Модель резонаторної структури для численних досліджень в програмі COMSOL Multiphysics і розподіл E_z -компоненти поля моди НЕ _{27 1 1} представлено на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Модель резонаторної структури для чисельного розрахунку в COMSOL Multiphysics

Шар пластику доволі сильно впливає на спектральні і енергетичні характеристики резонатора. Внесення пластика спричиняє виникнення додаткових втрат електромагнітної енергії в структурі, що викликає зменшення добротності резонатора. Проте значення добротності залишаються прийнятними для використання резонатора як основи вимірювальної комірки.

Частота і добротність кварцового циліндричного резонатора і резонатора, покритого шаром пластика з МФК, заповненим повітрям і водою, представлено в таблиці 4.1.

Таблица 4.1

	Частота резонатора, ГГц		Добротність	
	експеримент	чисельне	експеримент	чисельне
		моделювання		моделювання
Кварцовий резонатор	167,360	167,360	32 200	34 000
Резонатор с МФК,				
який заповнено	166,554	166,566	19 120	19 070
воздухом				
Резонатор с МФК,				
який заповнено	166,547	166,559	8 850	8 800
водою				

Частота и добротність кварцових резонаторів

МФК як неоднорідність призводить до зняття виродження. В результаті ми можемо спостерігати дві моди з ідентичним розподілом поля, але вони відрізняються за частотою та добротністю. Однак відмінність частот цих двох мод невелика і розрізнити їх при проведенні експериментальних досліджень неможливо. Тому, як і при зіставленні результатів чисельних і експериментальних досліджень лейкосапфірового резонатора в 8-мм діапазоні довжин хвиль, в даному випадку також використовується усереднене значення для частоти і добротності.

У МФК спочатку було внесено воду. Критерієм того, чи може створена резонаторна структура служити як вимірювальна комірка у субТГц діапазоні, є збіг результатів чисельного розрахунку і експерименту. Для того, щоб розрахункова модель максимально точно відображала реальну, було проведено коригування деяких геометричних розмірів, зокрема, уточнення положення МФК в пластиці по аналогії з процедурою уточнення розмірів МФК і його положення в сапфіровому резонаторі.

Це було здійснено шляхом варіювання висоти розташування МФК в пластиці і його відстані від центру резонатора в розрахунковій моделі в межах

похибки вимірювання і порівнянням результатів розрахунку і експерименту. У модель для численних досліджень закладалися значення діелектричної проникності води, отримані в [74]. Детально дана процедура описана в п. 4.2. Коригування розмірів було проведено для резонатора з МФК, заповненим водою, тому що планується дослідження біологічних рідин, діелектрична проникність яких близька до діелектричної проникності води.

4.5.4. Кварцовый резонатор з мікрофлюїдним каналом, заповненим різними рідинами

Проведено дослідження резонатора, МФК якого заповнювався речовинами з відомими властивостями: пропанолом, етанолом, ацетоном і метанолом. На рис. 4.14 показано спектральні та енергетичні характеристики такого резонатора в залежності від дійсної (а) та уявної (б) частин діелектричної проникності речовини, що знаходиться в МФК. Щоб зменшити вплив неповної відповідності моделі реальній вимірювальній комірці на результат вимірювань, розглядалися не абсолютні значення частоти і добротності, а різниця частоти і величин, обернених добротності, щодо резонатора з МФК, заповненим повітрям. Для чисельної моделі при цьому задавалося відкореговане положення МФК і використовувалися значення діелектричної проникності рідин із [80]. Кружечками позначено значення різниці частот, а квадратиками – різниці величин, обернених добротності. Зафарбовані елементи відповідають результатам чисельного дослідження, а незафарбовані – результатами експерименту. Результати чисельного розрахунку і експерименту збігаються в межах похибок вимірювання частоти і добротності.



Рисунок 4.14 – Різница частот и величин, обернених добротності, при заповненні МКФ речовинами с різними значеннями дійсної (а) і уявної (б) частини діелектричесної проникності: 1 – повітрям; 2 – пропанолом; 3 – етанолом; 4 – ацетоном; 5 – метанолом; 6 – дистильованою водою

Також проведено дослідження кварцового резонатора з МФК, заповненим водно-спиртовим розчином різної концентрації.

На рис. 4.15 представлено отримані експериментально концентраційні залежності різниці частот (а) і величин, обернених добротності (б) резонатора



Рисунок 4.15 Концентраційні залежності різниці частот (а) і величин, обернених добротності (б) резонатора з МФК, заповненим водно-спиртовим розчином

Очевидно, що характеристики резонатора з МФК, заповненим водноспиртовим розчином з концентрацією 0 %, відповідають характеристикам резонатора з МФК, заповненим дистильованою водою, тому різниця частот і величин, обернених добротності, для випадку нульової концентрації дорівнює 0.

З метою визначення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності рідини, що заповнює МФК, по виміряним спектральним і енергетичними характеристиками резонатора, за допомогою моделі для розрахунку побудовано номограму для даної системи резонаторної структури (рис. 4.16). Номограму побудовано за тим же принципом, що і номограмму для лейкосапфірового резонатора з МФК у 8-мм діапазоні довжин хвиль. На номограмму, представлену на рис. 4.16, нанесено значення різниці частот і величин, обернених добротності (позначено кружечками), які отримано в результаті експериментальних досліджень резонатора з МФК, заповненим водно-спиртовим розчином різної концентрації (рис. 4.15).



Рисунок 4.16 – Номограма, що дозволяє визначити комплексну діелектричну проникність рідини, що заповнює МФК кварцового резонатора. Кружечками позначено величини, які отримано експериментально для випадку заповнення МФК водно-спиртовим розчином різної концентрації.
За допомогою даної номограми визначено діелектричну проникність водно-спиртового розчину у субТГц діапазоні. На рис. 4.17 представлено залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної діелектричної проникності від концентрації водно-спиртового розчину.



Рисунок 4.17 – Концентраційні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин діелектричної проникності водно-спиртового розчину в субТГц діапазоні.

Зафарбованими кружечками позначено результати, отримані на підставі експериментальних даних (рис. 4.15). Для порівняння на графік також нанесено значення діелектричної проникності, отримані із інших джерел: [59] – позначені квадратами, [80] – зірочками, [86] – трикутниками. Видно, що отримані значення діелектричної проникності добре узгоджуються з результатами, представленими в наведених джерелах.

Збіг в межах похибки результатів розрахунку і експерименту спектральних і енергетичних характеристик резонатора при заповненні МФК рідинами з добре вивченими властивостями (рис. 4.14) і отриманих значень діелектричної проникності водно-спиртового розчину з результатами, наведеними в [59, 80, 86], свідчить про те, що кварцовий резонатор з МФК в шарі пластика може бути використаним як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідин в субТГц діапазоні.

Проведено також експериментальні дослідження кварцового резонатора з МФК, заповненим розчинами глюкози 10% і 20%. На підставі виміряних значень різниці частот і добротності за допомогою номограми визначено значення дійсної і уявної частини діелектричної проникності розчинів (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2

Концентрація глюкози, %	Комплексна діелектрична проникність		
	дійсна частина <i>є</i> '	уявна частина є "	
0	6,02	8,03	
10	6,12	5,38	
20	6,17	4,91	

Діелектрична проникність розчинів глюкози в субТГц діапазоні

Дослідження, як і раніше, проводилися для резонатора з модою ШГ НЕ 27 11

4.6. Порівняння вимірювальних комірок

У роботі розглянуто два типи резонаторних структур з модами ШГ, які можуть застосовуватися як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідини в 8-мм діапазоні довжин хвиль. Це радіально двошаровий резонатор (фторопластовий або лейкосапфіровий), або резонатор з порожниною, куди поміщається досліджувана рідина, і резонатор з МФК, розташованим в шарі пластика.

Фторопластовий резонатор має досить великі розміри у 8-мм діапазоні довжин хвиль. Об'єм досліджуваної рідини становить близько 10 мл, в той час як об'єм порожнини лейкосапфірового резонатора становить 0,15 мл. Крім того, лейкосапфіровий резонатор з модами ШГ характеризується в 8-мм діапазоні довжин хвиль вищими значеннями добротності. Тому кращим як основа вимірювальної комірки є радіально двошаровий резонатор, виготовлений з лейкосапфіра.

Однак, як вже було сказано раніше, визначення діелектричної проникності рідин за допомогою радіально двошарового резонатора, виготовленого з лейкосапфіра, пов'язане з низкою труднощів технічного характеру. Ці труднощі пов'язані з усуненням мікрощілин між лейкосапфіровим кільцем і ТПС і з заливанням рідини в порожнину і видаленням із неї.

Лейкосапфіровий резонатор з МФК дозволяє уникнути даних труднощів. Крім того, застосування такого резонатора дозволяє істотно знизити об'єм рідини, необхідної для проведення досліджень. Об'єм рідини в МФК становить близько 400 нл. Це є суттєвою перевагою даного резонатора.

Важливою характеристикою вимірювальної комірки є точність визначення діелектричної проникності рідин. Абсолютна похибка визначення дійсної і уявної частин діелектричної проникності визначається за формулами [87]

$$\delta \varepsilon' = \left\{ \left[\frac{\partial \varepsilon'}{\partial (\Delta f)} \delta (\Delta f) \right]^2 + \left[\frac{\partial \varepsilon'}{\partial Q} \delta Q \right]^2 \right\}^{1/2}$$
$$\delta \varepsilon'' = \left\{ \left[\frac{\partial \varepsilon''}{\partial (\Delta f)} \delta (\Delta f) \right]^2 + \left[\frac{\partial \varepsilon''}{\partial Q} \delta Q \right]^2 \right\}^{1/2}$$

В ці формули закладалися значення $\partial \varepsilon' / \partial (\Delta f)$, $\partial \varepsilon' / \partial (\Delta f)$, $\partial \varepsilon' / \partial Q$, $\partial \varepsilon'' / \partial Q$, розраховані за даними, взятими із номограми для відповідного резонатора в околиці значень діелектричної проникності, характерних для води, і величини абсолютної похибки частоти і добротності, зазначені в попередньому розділі. Величини відносної похибки визначення діелектричної проникності за допомогою резонаторів з модами ШГ в 8-мм діапазоні довжин хвиль, розраховані за цими формулами, наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Похибка визначення діелектричної проникності

4 10

	$\delta arepsilon'/arepsilon',~\%$	$\delta arepsilon '' / arepsilon '', \%$
Радіально двошаровий КДР з лейкосапфіра	1,8	0,6
Лейкосапфіровий резонатор з МФК	0,7	1,4

Видно, що вимірювальні комірки на основі КДР в 8-мм діапазоні довжин хвиль дозволяють визначати діелектричну проникність рідини з високою точністю. У разі використання радіально двошарового резонатора похибка визначення дійсної частини діелектричної проникності вища, ніж уявної, а в разі використання резонатора з МФК, навпаки, нижче. Це обумовлено різною чутливістю характеристик резонаторів до зміни дійсної і уявної частин діелектричної проникності досліджуваної рідини.

Як основу вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності в субТгц діапазоні в роботі розглянуто кварцовий резонатор з

111

МФК. Об'єм рідини, потрібний для проведення досліджень за допомогою такого резонатора, становить 300 нл. Похибка визначення дійсної і уявної частин діелектричної проникності за допомогою вимірювальної комірки на основі даного резонатора становить відповідно $\delta \varepsilon' / \varepsilon' = 2,23 \%$, $\delta \varepsilon'' / \varepsilon'' = 1,8 \%$.

Висновки до розділу 4

- Запропоновано використовувати лейкосапфіровий (в 8-мм діапазоні) і кварцовий (в короткохвильовій частині мм діапазону) резонатори з МФК в шарі пластика як основи вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності сильнопоглинаючих рідин малих об'ємів (до 300 нл). Для цього результати експериментальних досліджень резонатора співставляються з результатами, отриманими за допомогою моделі для чисельного розрахунку характеристик резонаторної структури.
- Проведено аналіз характеристик резонаторів при різному місцезнаходженні МФК в шарі пластика, і на основі отриманих результатів обрано оптимальні параметри структури.
- 3. Запропоновано спеціальну процедуру уточнення параметрів, які не піддаються точному виміру. Отримані значення було застосовано в моделі для чисельного розрахунку для того, щоб модель якомога точніше описувала властивості реальної системи резонаторної структури. На прикладі рідин з добре вивченими властивостями показано, що модель описує реальну структуру коректно і резонатор з МФК може бути використано як основа вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності рідин.
- 4. Запропоновано спеціальну калібрувальну процедуру, що дозволяє визначати комплексну діелектричну проникність рідин, що заповнюють МФК, за виміряними значеннями резонансної частоти і добротності резонатора з ідентифікованої модою. Таким чином було визначено

дійсну та уявну частини діелектричної проникності розчинів різних біологічних рідин (цитохром С, лактальбумин, бичачий сироватковий альбумін).

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню мікрохвильового відгуку різних КДР з рідинами, що характеризуються великими втратами і малим об'ємом. Визначення розподілу електромагнітного поля, резонансної частоти і добротності резонатора дозволяють знаходити дійсну і уявну частину комплексної діелектричної проникності рідини, внесеної в КДР. Основні наукові і прикладні результати роботи полягають в такому:

1. Проведено оцінку радіаційних втрат в різних діелектричних резонаторах з коливаннями ШГ та проаналізовано вплив форми резонатора і малих неоднорідностей на величину радіаційних втрат; отримано якісний збіг між значеннями радіаційних добротностей, визначених в результаті чисельних та експериментальних досліджень, і пояснено кількісні відмінності результатів, отриманих для різних резонаторних структур;

показано, що в резонаторах з малими неоднорідностями, заповненими
 рідинами, радіаційні втрати нехтовно малі у порівнянні з втратами, які
 вносить рідина;

показано, що асферичний резонатор з невеликим радіусом кривизни,
 напівкульовий і напівдисковий резонатори характеризуються
 величинами радіаційних втрат, прийнятними для того, щоб бути
 використаними як вимірювальні комірки для визначення
 електрофізичних параметрів речовин з відносно невеликими втратами.

2. Вперше експериментально показано, що радіально двошаровий резонатор може бути використаний як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності конденсованих середовищ у 8-мм діапазоні довжин хвиль. Проведено процедуру оптимізації вимірювальної комірки на основі лейкосапфірового КДР. Введення шару клею між лейкосапфіровим кільцем і провідними торцевими стінками дозволяє ліквідувати мікрощілини між ними і

запобігає протіканню рідини. За допомогою радіально двошарового лейкосапфірового КДР з високою точністю ($\delta \varepsilon' / \varepsilon' = 1,8 \%$, $\delta \varepsilon' / \varepsilon'' = 0,6 \%$) визначено діелектричні властивості розчинів бичачого сироваткового альбуміну та лактальбуміна, що займають малі об'єми (0,15 мл) у 8-мм діапазоні довжин хвиль.

- 3. Вперше показано можливість використовувати лейкосапфіровий резонатор з МФК в шарі пластика як основу вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності сильнопоглинаючих рідин малих об'ємів (400 нл). Визначено з високою точністю (*δε* '/ε ' = 0,7 %, *δε* "/ε " = 1,4 %) діелектричні властивості розчинів різних біологічних рідин (цитохром С, лактальбумін, бичачий сироватковий альбумін). Показано переваги КДР з МФК в порівнянні з радіально двошаровим КДР як основи комірки для визначення діелектричної проникності рідин в 8-мм діапазоні довжин хвиль.
- 4. Для визначення комплексної діелектричної проникності рідин, що займають малі об'єми (до 300 нл), у короткохвильовій частині мм діапазону запропоновано використовувати кварцовий КДР з МФК. Показано, що отримані значення діелектричної проникності водноспиртових розчинів добре узгоджуються 3 результатами, представленими в інших джерелах. Також визначено діелектричну проникність розчинів глюкози різної концентрації. Похибка вимірювання складає $\delta \varepsilon / \varepsilon = 2,23 \%$, $\delta \varepsilon / \varepsilon = 1,8 \%$.
- 5. Для визначення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності рідини, що заповнює МФК або порожнину радіально запропоновано i двошарового КДР, розроблено спеціальну калібрувальну процедуру, ЩО дозволяє знаходити величини проникності за виміряними значеннями резонансної частоти і добротності резонатора.

Насамкінець здобувач висловлює подяку своєму науковому керівнику, проф. Черпаку Миколі Тимофійовичу, за постановку наукової задачі, за допомогу у вирішенні проблем, що виникали при проведенні роботи, за стимулювання у написанні дисертації; с.н.с. Бараннику О.А. і с.н.с. Губіну А.І. постійну співпрацю i допомогу проведенні досліджень, У за с.н.с. Лавриновичу О.А. за цінні поради у роботі, Новікову В. А. за технічну допомогу при проведенні експериментальних досліджень та всім співавторам робіт та відвідувачам семінару радіофізики твердого тіла за підтримку роботи, зацікавленість та цінні зауваження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Radiation-corrected open-ended coax line technique for dielectric measurements of liquids up to 20 GHz / Y.-Z. Wei, S.Sridhar // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1991. – Vol. 39, N 3. – P. 526-531.
- 2. Agilent 85070E Dielectric Probe Kit, 200 MHz to 50 GHz / Agilent Technologies, Inc. 2003, Printed in USA, November 6, 2003.
- Применение метода дифференциальной КВЧ диэлектрометрии в молекулярной биофизике / В. А. Кашпур, В. Я. Малеев, О. В. Хорунжая// Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2008. – Том 13, спецвыпуск. - С. 446-454.
- High-temperature Superconducting Microwave Circuits / Zhi-Yuan Shen. Artech House, 1994. – 273 p.
- Квазиоптические твердотельные резонаторы / А.Я. Кириченко,
 Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Н.Т. Черпак. К.: Наукова думка,
 2008. 296 с.
- 6. Пат. № 59568 А Україна, 7G01R27/26. Квазіоптичний діелектрометр: пат. №59568 А Україна, 7G01R27/26 / О. А. Баранник, Ю. В. Прокопенко, Т. О. Смирнова, Ю. Ф. Філіпов, М. Т. Черпак. №2002086550; Заявл. 06.08.2002; Опубл. 15.09.2003, бюл. №9. 5с.
- Quasi-optical dielectric resonators with small cuvette and capillary filled with Ethanol-water mixtures / N. T. Cherpak, A. A.Lavrinovich, E. N. Shaforost // Int. Journ. of Infrared and mm Waves. – 2006. – Vol. 27, N. 1. – P. 115-133.
- 8. Whispering-gallery Mode Resonator Technique for Characterization of Small Volumes of Biochemical Liquids in Microfluidic Channel / A. Gubin, A. Barannik, N. Cherpak, A. Offenhaeusser, N. Klein, S. Vitusevich // Proc. of 41st Eur. Microwave Conference. – Manchester, UK, 2011. – P. 615-618.
- Biochemical liquid investigation on the nanolitre scale by millimetre wave dielectric resonators / A. Gubin, A. Barannik, N. Cherpak, A. Offenhaeusser, N. Klein, S. Vitusevich // Nanodays, 2010.

- 10.High Temperature Superconducting Microwave Components / R. G. Dorothy, D.W. Face, W.L. Holstein, C. Wilker, Z-Y. Shen, D.B.Laubacher // Advances in Superconductivity III. – Springer-Verlag, Tokyo, 1991. – P. 1175-1178.
- 11. Теория волн / М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. М.: Наука, 1979. 383 с.
- 12.High-Temperature-Superconductor Thin Films at Microwave Frequencies /
 M. Hein. Springer Science & Business Media, 1999. P. 394.
- 13. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятышев, Л. Г. Гасанов и др. М.: Радио и связь, 1989. 328 с.
- 14. Whispering gallery mode resonators in microwave physics and technologies / A.Barannik, N.Cherpak, A.Kirichenko, Yu.Prokopenko, S.Vitusevich and V.Yakovenko // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2017. – Vol. 9, N. 4. – P. 781-796.
- 15.Открытые резонаторы и открытые волноводы / Л. А. Вайнштейн. М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
- 16.Dielectric Resonators / D. Kajfez and P. Guillon. Artech House, Dedham, MA, 1986.
- 17.Колебания в анизотропном диэлектрическом резонаторе с торцевыми отражателями / В. Н. Егоров, И. Н Мальцева // Электронная техника.
 Серия І. Электроника СВЧ. 1984. № 1. С.3-8.
- 18.Resonant modes in shielded uniaxial-anisotropic dielectric rod resonators / Y. Kobayashi, T. Senju // IEEE Transactions on MTT. – 1993. – Vol. 41, N. 12. – P. 2198 - 2205.
- 19.Квазиоптический диэлектрический резонатор с одноосной анизотропией и проводящими торцевыми стенками. Структура поля и добротность / Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак // Радиофизика и электроника. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. 1999. Том 4, № 2. С. 50-54.
- 20. Добротность сапфирового дискового резонатора с проводящими торцевыми стенками в миллиметровом диапазоне длин волн /

А. А. Баранник, Ю. В Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак,
И. В. Короташ // ЖТФ. – 2003. – Том 73, № 5. – С. 99-103.

- 21.Анизотропный дисковый диэлектрический резонатор с проводящими торцевыми стенками / Прокопенко Ю. В., Филиппов Ю. Ф. // ЖТФ. – 2002. – Том 72, № 6. – С. 79-84.
- 22.Measuring the Dielectric Permittivity of Sapphireat Temperatures 93–343 K. / V. N. Egorov, A. S. Volovikov // Radiophysics and quantum electronics. 2001, Vol. 44, N. 11. P 885–891.
- 23.Квазиоптический метод измерения предельно малых диэлектрических потерь в конденсированных средах / Е. М. Ганапольский, А. В. Голик, А. П. Королюк // Физика низких температур. 1993. Том 19, №11. С.1255-1259.
- 24.Квазиоптический слоистый шаровой резонатор для измерения диэлектрической проницаемости сильно поглощающей жидкости в миллиметровом диапазоне / З. Е. Еременко // Радиофизика и электроника. – 2004. – Том 9, № 2. – С. 442–451.
- 25.Microwave hemiball resonator for measurement of dielectric permittivity in small volume of high lossy liquid / Z. E. Eremenko, E. M. Ganapolskii // Proc. of the 5th Intern. Kharkov Symp. (MSMW'2004). – Kharkov, 2004. – P. 850–852.
- 26.Полушаровой изотропный диэлектрический резонатор с идеально проводящей плоской поверхностью / Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, И. А. Шипилова, В. М. Яковенко // Матер. 15-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо – 2005), Севастополь, Украина. – 2005. – Т. 2. – С. 513-514.
- 27.Моды "шепчущей галереи" в полушаровом изотропном диэлектрическом резонаторе с идеально проводящей плоской поверхностью / Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, И. А. Шипилова, В. М. Яковенко // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 2. С. 102-111.

- 28.Влияние температуры окружающей среды на собственные частоты квазиоптического цилиндрического диэлектрического резонатора / А. В. Дормидонтов, Ю.В. Прокопенко // Письма в ЖТФ. 2013. Том 39, № 8, с.71-79.
- 29.Измерение комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов компонентов виноградных вин на частоте 31,82 ГГц / Z. E. Eremenko, V. Skresanov, A. Shubnyi, V. Glamazdin // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. №1, С.60-72.
- 30.Resonance absorption of microwaves in He II: Evidence for roton emission /
 A. Rybalko, S. Rubets, E. Rudavskii, V. Tikhiy, S. Tarapov,
 R. Golovashchenko, V. Derkach // Physical Review B. 2007 Vol. 76, N. 14,
 paper 140503, 4 p.
- 31.Применение диэлектрометрии миллиметрового диапазона для определения аутентичности виноградных соков и столовых вин /
 3. Е. Еременко, В. Н. Скресанов, В. Г. Гержикова, Т. А. Жилякова, Н. С. Аникина // Журнал: Виноград, Галузеве професійне спеціалізоване видання виноградарів і виноробів Украины. 2010. №1-2, вып. 24-25. С.45-47.
- 32.Влияние некоторых жидкостей на спектральные характеристики диэлектрического резонатора в форме полушара / Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко, И. Г. Максимчук // Радиофизика и электроника.– 2007. Том 12, № 2. С. 362-366.
- 33.Е. В. Кривенко, А. Я. Кириченко, В. И. Луценко, Использование метода диэлектрометрии для определения компонентного состава смесей сыпучих веществ Радиофизика и электроника, том 12, №2, 2007, с. 416-420.
- 34. Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies / J. Krupka // Meas. Sci. Technol. 2006. Vol. 17, R55-70.

- 35.Полый полушаровой диэлектрический резонатор для диэлектрометрии жидкостей / А. Я. Кириченко, А. Е. Когут, В. В. Кутузов, И. Г. Максимчук, С. О. Носатюк, В. А. Солодовник // Радиофизика и электроника. – 2011. – Том 2(16), № 2. – С. 90-93.
- 36.A new technique of dielectric characterization of liquids / N.T. Cherpak, A.A. Barannik, Yu.V. Prokopenko, T.A.Smirnova and Yu.F. Filipov // Nonlinear dielectric phenomena in complex liquids / under editors S. J. Rzoska and V. P. Zhelezny, NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers. – 2004. – Vol. 157. – P. 63-67.
- 37. Електромагнитні мікрохвилі шепочучої галереї в рідинах / О. А. Баранник, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Н. Т. Черпак // Доп. НАН України. – 2003. – N 3. – С. 77-79.
- 38.Радиально двухслойный квазиоптический диэлектрический резонатор для диэлектрометрии / Ю. В. Прокопенко, Т. А. Смирнова, Ю. Ф. Филиппов, О. А. Матяш // Вопросы атомной науки и техники. 2004. № 4. С. 93-96.
- 39.Распределение поля колебаний «шепчущей галереи» в радиальнодвухслойном цилиндрическом диэлектрическом резонаторе /
 Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, И. А. Шипилова // Изв. ВУЗов, радиофизика. – 2008. – Том 51, № 7. – С.622-632.
- 40.Lab-on-Chip Microwave-to-Terahertz Single Cell Detection: Towards Liquid Biopsy / N. Klein // Workshop WM-02, Electromagnetic Sensors for Life Science Applications, European Microwave Week, 2017, Nuremberg, Germany.
- 41.Precise calculations and measurements on the complex dielectric constant of lossy materials using TM₀₁₀ cavity perturbation techniques / Sh. Li , C. Akyel
 // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1981. Vol. 29, No. 10. P. 1041-1048.
- 42.Low temperature properties of microwave dielectrics / H. Takamura, H. Matsumoto and K. Wakino // Proc. 7th Meeting on Ferroelectric Materials

and Their Applications, Japan. J. Appl. Phys. – 1989. – Vol. 28 (Suppl. 28-2). – P. 21–23.

- 43.A dielectric resonator for measurements of complex permittivity of low loss dielectric materials as a function of temperature / J. Krupka, K. Derzakowski, B. Riddle and J. Baker-Jarvis // Meas. Sci. Technol. 1998. Vol. 9. P. 1751–1756.
- 44. The determination of electron density by means of a cylindrical TM_{010} microwave cavity / D. Lukac // Brit. J. Appl. Phys. 1968. Vol. 1. –P. 1495-1499.
- 45.Влияние кольцевого слоя из различных веществ на собственную частоту и добротность цилиндрического квазиоптического диэлектрического резонатора / Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, И. А. Шипилова // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 7. С. 36-41.
- 46.Радиально трехслойный диэлектрический резонатор с идеально проводящими торцевыми стенками / Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов, И. А. Шипилова // Радиофизика и электроника. 2006. Т. 11, № 1. С. 32-37.
- 47.Собственные колебания радиально трехслойных диэлектрических резонаторов / Ю. В. Прокопенко, О. А. Суворова, Ю. Ф. Филиппов, И. А. Шипилова // Изв. ВУЗов, радиоэлектроника. 2009. Том. 52, № 1. С.14-26.
- 48. Влияние глубины проникновения поля в жидкость с большими потерями на спектральные характеристики дискового квазиоптического диэлектрического резонатора / Лавринович А.А. // Радиофизика и электроника. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 164-1687.
- 49. Yu. F. Filipov, Yu. V. Prokopenko, I. A Shipilova / Influence of a capillary non-uniformity on an eigen frequency and Q-factor of semi-cylindrical quasioptical dielectric resonator // Proc. International Conf. MMET-2006, Kharkiv, Ukraine. – 2006. – P. 538-539.

- 50.Подстройка частоты автогенератора на диоде Ганна, стабилизированного квазиоптическим диэлектрическим резонатором / А. Я. Кириченко Е. В. Кривенко, В. И. Луценко, Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов // Матер. 15-ой междунар. конф. "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо-2005), Севастополь, Украина. 2005. Т. 2. С. 529-530.
- 51. Системы с малой диссипацией / В.Б. Брагинский, В.П. Митрофанов, В.И. Панов. М.: Наука, 1981. 144 с.
- 52.Hemispherical and aspheric WGM dielecric resonators with conducting endplates: radiation and conductivity losses depending on shape of the resonators surface / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, M. S. Kharchenko, and S. A. Vitusevich // Радиофизика и электроника. – 2013. – Том 4(18), № 4. – С. 49-54.
- 53.Mm wave quasi-optical dielectric resonators with small liquid-filled cavities
 / A. A. Lavrinovich, E. N. Shaforost // Proc. of the 5th Intern. Kharkov Symp.
 MSMW-2004. 2004. Vol 2. P. 615-617.
- 54.Symmetric and assimetric two-hemidisk quasioptical dielectric resonators / N. T. Cherpak, A. A. Lavrinovich, E. N. Shaforost // Proc. 33rd European Microwave Conf., UK, London. 2003. Vol.3. P. 1183-1186.
- 55.Two-hemidisk quasioptical dielectric resonators / A. A. Lavrinovich, N. T. Cherpak, E. N. Shaforost // Telecomm. and Radioengineering. – 2003. Vol. 59, N. 3. – P. 67-74.
- 56.СВЧ методы измерения параметров диэлектрических материалов на основе составного диэлектрического резонатора / Ю. В. Диденко, В. И. Молчанов, В. М. Пашков, Д. Д. Татарчук, Д. А. Шмыгин // Electron Comm. – 2014. – Vol. 19, №6(83). – С. 14-20.
- 57.Nanoliter liquid characterization by open whispering-gallery mode dielectric resonators at millimeter wave frequencies / E. N. Shaforost, N. Klein, S. A. Vitusevich, A. Offenhäusser, and A. A. Barannik // Journal of applied physics. 2008. Vol. 104. 074111(1-7).

- 58.Open WGM Dielectric Resonator Technique for Characterization of nL-Volume Liquids / E. N. Shaforost, A. A. Barannik, S. Vitusevich, A. Offenhäusser // Proc. of the 38th European Microwave Conference. – 2008 – P. 1129-1132.
- 59.P. Petong, R. Potter and Kaatze / U 2000 Water-Ethanol Mixtures at Different compositions and Temperatures. A Dielectric Relaxation Study // Phys. Chem. A. – Vol. 104, 7420-7428.
- 60. High sensitivity microwave characterization of organic molecule solutions of nanoliters volume / E. N. Shaforost, N. Klein, S. A. Vitusevich, A. A. Barannik, and N. T. Cherpak // Applied physics letters. 2009. Vol. 94, 112901(1-3).
- 61.Biochemical liquid investigation on the nanolitre scale by millimetre wave dielectric resonators / A. Gubin, A. Barannik, N. Cherpak, A. Offenhaeusser, N. Klein, S. Vitusevich // Proc. JARA-FIT nanoelectronics days 2010, Aachen, Germany. 2010.
- 62. 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. Hlukhova, S. A. Vitusevich // Proc. of the 45 European Microwave Conference (EuMC 2015), Paris. – 2015. – P. 960-963.
- 63. 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. Том 6(20), № 3. Р. 55-61.
- 64.Dielectric resonators of different configurations as sensors for surface impedance of superconductors / M. Kharchenko, A. Barannik, I. Protsenko, 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Eelectronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014), Kharkiv, Ukraine. – 2014.
- 65. Accurate microwave technique of surface resistance measurement of largearea HTS films using sapphire quasioptical resonator / N. Cherpak,

A. Barannik, Y. Prokopenko, Y. Filipov, and S. Vitusevich // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 2003. – Vol. 13, N. 2. – P. 3570-3573.

- 66. Whispering-Gallery-Mode Resonator Technique with Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids / A.I. Gubin. A.A. Barannik, N.T. Cherpak, I.A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhäusser, and S.A. Vitusevich // IEEE Trans. on MW Theory and Tech. – 2015. – Vol. 63, N 6. – P. 2003-2009.
- 67. About low-temperature microwave response of epitaxial YBa₂Cu₃O_{7-δ} film measured by a novel measurement technique / A. A. Barannik, S.O. Bunyayev, and N.T. Cherpak / Low Temperature Physics. 2008. Vol. 34, N. 12 P. 977-981.
- 68.Experimental observation of fundamental microwave absorption in high quality dielectric crystals / V. B. Braginsky, V. S. Ilchenko, and K. S. Bagdassarov // Phys. Lett. A. – 1987. – Vol. 120, N. 6. – P. 300-305.
- 69. Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electrodynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. V. Prokopenko, Yu. F. Filipov, E. N. Shaforost and I. A. Shipilova // Meas. Sci. Technol. 2007. N. 18. P. 2231-2238.
- 70.Dielectric resonators with "Whispering-gallery" waves in investigations of small-volume binary solutions / A. I. Gubin, A. A. Lavrinovich, N. T. Cherpak // Ukr. J. Phys. 2006. Vol. 51, N. 7. P. 723-727.
- 71. Biochemical liquids permittivity characterization technique based on whispering-gallery mode resonator with microfluidic channel / A. I. Gubin, A. A. Barannik, I. A. Protsenko, N. T. Cherpak, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich // Proc. of 43rd Eur. Microwave Conference, Nuremberg, Germany. 2013. P. 314-317.
- 72. Whispering gallery mode sapphire resonator for microwave characterization of lossy liquids / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. F. Filippiov, Yu. V. Prokopenko, I.A.Shipilova // Proc. of The 6th Int. Kharkov Symposium

on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW-2007), Kharkov, Ukraine. – 2007. – P. 922-924.

- 73. Двухслойный квазиоптический лейкосапфировый резонатор для диэлектрометрии биологических жидкостей / А. А. Баранник, С. А. Витусевич, И. А. Проценко Радиофизика и электроника. – 2017. – Vol 822), N. 2. – Р. 45-50.
- 74.Permittivity of Pure Water, at Standard Atmospheric Pressure, over the Frequency Range 0–25 THz and the Temperature Range 0–100°C / W. Ellison // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2007. Vol 36, N 18. P. 1-18.
- 75. Emission, reflection, and absorption of microwave at a smooth air-water interface / H. A. Hyatt // J. Quant Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1970. – Vol. 10. – P. 217-247.
- 76. Dielectric behaviour of DMSO-water mixtures. A hydrogen-bonding model
 / A. Luzar // J. Mol. Liq. 1990. Vol. 46, P. 221-238.
- 77. Dielectric relaxation studies of aqueous sucrose in ethanol mixtures using time domain reflectometry / C. G Acode, K. S. Kause, M P. Lokhande, A. C. Kumbharhane and S. C. Menrotra / Pranama J. of Physics. 2004.– Vol. 62. P. 973-81.
- 78. The dielectric relaxation of water between 0°C and 35°C / R. Busher,
 J. Barthel and J. Stauber // Chem. Phys. Letters. 1999. Vol. 306. P. 57-63.
- Accurate permittivity characterization of liquids by means of WGM resonator with microfluidic / A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich // Proc. Int. Kharkiv Symp. Microwaves, MM and Sub-MM Waves (MSMW'2013), Kharkiv. 2013. P. 538-540.
- 80. High frequency permittivity and its use in the investigation of solution properties / J. Barthel and R. Buchner // Pure Appl. Chem. –1991. – Vol. 63, N. 10. – P. 1473–1482.

- 81. Dielectric properties of glucose solutions in the 0.5–67 GHz range / F. M. Smulders, M. G. Buysse, and M. D. Huang // Microw. Opt. Technol. Lett. 2013. Vol. 55, N. 8. P. 1916–1917.
- ячейка на основе кварцевого 82. Измерительная квазиоптического резонатора для исследования диэлектрических жидкостей В субтерагерцевом диапазоне / А. А. Баранник, С. А. Витусевич, А. И. Губин, И. А. Проценко, Н. Т. Черпак // Радиофизика И электроника. – 2016. – Т. 7(21), N. 2. – Р. 74-78.
- 83. Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich // NATO Advanced Research Workshop on THz Diagnostics of CBRN effects and Detection of Explosives & CBRN (Tera-MIR 2015), Izmir, Turkey. – 2015. – P.56.
- 84. WGM resonators with microfluidic channel for sub-mm wave characterization of biological liquids / A. I. Gubin, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich, Proc. Of the German Microwave Conf. (GeMiC-2016), Bochum, Germany. 2016. P. 15-18.
- 85. Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, S. Vitusevich // THz for CBRN and Explosives' Detection and Diagnosis 2017 / under editors M. Pereira, O. Shulika, NATO Science Series, Springer Academic Publishers, 2017. – P. 57-62.
- 86. Dielectric Characteristics of Water Solutions of Ethanol in the Terahertz Region / H. Kitahara, T. Yagi, K. Mano, M. W. Takeda, S. Kojima and S. Nishizawa // J. Korean Phys. Soc. – 2005. – Vol. 46, P. 82.
- 87. Приборы и методы измерения электрических величин / Э. Г. Атамалян.
 М. : Высшая школа, 2005. С. 73.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

 Two-layered disc quasi-optical dielectric resonators: electrodynamics and application perspectives for complex permittivity measurements of lossy liquids / A.A. Barannik, N.T. Cherpak, Yu.V. Prokopenko, Yu.F. Filipov, E.N. Shaforost, I.A. Shipilova* // Meas. Sci. Techn. –2007. – N. 18. – P. 2231-2238.

2. 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. – Том 6(20), № 3 – С. 55-61.

3. Whispering-Gallery-Mode Resonator Technique with Microfluidic Channel for Permittivity Measurement of Liquids / A. I. Gubin. A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhäusser, and S.A. Vitusevich // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 2015.– Vol. 63, N. 6.–P. 2003-2009.

4. Измерительная ячейка на основе кварцевого квазиоптического резонатора для исследования диэлектрических жидкостей в субтерагерцевом диапазоне / А. А. Баранник, С. А. Витусевич, А. И. Губин, И. А. Проценко, Н. Т. Черпак // Радиофизика и электроника. –2016. – Том 7(21), № 2 – С. 74-78.

 Двухслойный квазиоптический лейкосапфировый резонатор для диэлектрометрии биологических жидкостей/ А.А.Баранник, С.А.Витусевич,
 И.А.Проценко // Радиофизика и электроника. –2017.– Том 8(22), №1 – С.45-50.

6. Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich // THz for CBRN and Explosives Detection and Diagnosis 2017 / under editors M. Pereira , O. Shulika, NATO Science Series, Springer Academic Publishers, 2017. – P. 57-62.

7. Whispering gallery mode sapphire resonator for microwave characterization of lossy liquids / A. A. Barannik, N. T. Cherpak, Yu. F. Filippiov, Yu.V.Prokopenko,

^{*} Шипілова є прізвищем автора до реєстрації шлюбу

I. A. Shipilova // Proc. Int. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2007). – Kharkiv, Ukraine, 2007. – P. 922-924.

8. Accurate permittivity characterization of liquids by means of WGM resonator with microfluidic / A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich // Proc. Int. Kharkiv Symp. Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2013). – Kharkiv, Ukraine, 2013. –P. 538-540.

9. Biochemical liquids permittivity characterization technique based on whispering-gallery mode resonator with microfluidic channel / A.I.Gubin, A.A.Barannik, I.A.Protsenko, N.T.Cherpak, A.Offenhaeusser, S.A.Vitusevich // Proc. of 43rd Eur. Microwave Conf. – Nuremberg, Germany, 2013. – P. 314-317.

10. Dielectric resonators of different configurations as sensors for surface impedance of superconductors / M. Kharchenko, A. Barannik, I. Protsenko, 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2014). – Kharkiv, Ukraine, October 14-17, 2014.

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. Hlukhova, S. A. Vitusevich // Proc. of the 45 European Microwave Conf.
 (EuMC 2015), Paris, 2015, P. 960-963.

12. Testing of sub-THz properties of bioliquids using WGM resonator with microfluidic channel / I. A. Protsenko, A. A. Barannik, A. I. Gubin, N. T. Cherpak, S. A. Vitusevich, NATO Advanced Research Workshop on THz Diagnostics of CBRN effects and Detection of Explosives & CBRN (Tera-MIR 2015), Izmir, Turkey, 2015, p. 56.

13. WGM resonators with microfluidic channel for sub-mm wave characterization of biological liquids / A. I. Gubin, A. A. Barannik, N. T. Cherpak, I. A. Protsenko, S. Pud, A. Offenhaeusser, S. A. Vitusevich, Proc. of the German Microwave Conf. (GeMiC-2016), Bochum, Germany, 2016, P. 15-18.