

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

ПРОЦЕНКО ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК. 537.86

**МІКРОХВИЛЬОВИЙ ВІДГУК КВАЗІОПТИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ
РЕЗОНАТОРІВ ІЗ СИЛЬНОПОГЛИНАЮЧОЮ РІДИНОЮ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертація на правах рукопису

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

Науковий керівник:

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

Офіційні опоненти:

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

кандидат фізико-математичних наук
Ніколов Олег Тимофійович
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, м. Харків,
старший науковий співробітник кафедри
теоретичної радіофізики

Захист відбудеться "28" грудня 2017 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085.

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

Автореферат розісланий "27" листопада 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 та медицини. Комплексна діелектрична проникність – це важлива характеристика рідких діелектриків, що визначає характер взаємодії між електромагнітними хвилями та 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 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 коливальних (див., наприклад, [3]). 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 показано, що доцільно використовувати як основу вимірювальної комірки діелектричні резонатори з коливаннями шепочучої галереї (ШГ), тому що такі резонатори дозволяють отримувати високі значення добротності [4]. Ці резонатори є, по суті,

квасіоптичними пристроями. Введення в резонатор малої неоднорідності у вигляді порожнини [5] або отвору [6], заповнених досліджуваною рідиною, дозволяє визначати діелектричну проникність рідини, що займає малий об'єм. 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 [7] показали, що перспективним є резонатор з мікрофлюїдною системою як основа вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності рідин, що займають малі об'єми (тобто 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 [3-4]. 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 та 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 та 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 діелектричні властивості 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;

– обґрунтування можливості використання резонаторних структур як основи вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності рідин у 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 у 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 вимірної 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 реальних квазіоптичних діелектричних резонаторів (КДР) двох типів, а саме, радіально двошарових та з мікрофлюїдним каналом (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 виміральної 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 виміральної 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 виміральному 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 виміральної 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*].

Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень за темою дисертації доповідалися і обговорювалися на 7 конференціях і симпозіумах: International Kharkov Symposium Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW) у 2007 р. і в 2013 р. (Харків, Україна), European Microwave Conference (EuMC) у 2013 р. (Нюрнберг, Німеччина) і в 2015 р. (Париж, Франція), NATO Advanced Research Workshop on THz Diagnostics of CBRN Effects and Detection of Explosives & CBRN (Tera-MIR) в 2015 р. (Ізмір, Туреччина), German Microwave Conference (GeMiC) в 2016 р. (Бохум, Німеччина), Young Sci. Conf. Radiophysics and Electronics (YSC-14) в 2014 р. (Харків, Україна).

Публікації

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

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.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** викладено актуальність дисертації і обґрунтування необхідності проведення роботи, формулюється мета і задачі дослідження. Показана наукова новизна і практичне значення отриманих результатів.

У **розділі 1** описується принцип визначення комплексної діелектричної проникності речовин. Розглянуто різні резонаторні методи визначення комплексної діелектричної проникності рідин, в тому числі ті, які дозволяють

досліджувати малі об'єми рідин. Проведено порівняльний аналіз різних методів визначення діелектричної проникності, оцінені їх переваги та недоліки.

У розділі 2 представлено результати розрахунку радіаційних втрат в КДР (резонаторах з коливаннями ШГ), виготовлених з лейкосапфіру, з торцевими провідними стінками (ТПС) і без них. Розрахунок радіаційних втрат проводився шляхом чисельного моделювання в програмі COMSOL Multiphysics. Оцінка радіаційних втрат важлива при виборі резонатора – основи вимірювальної комірки для визначення діелектричної проникності речовин.

У загальному випадку добротність резонатора обумовлена втратами в діелектрику, з якого виготовлено резонатор, в провідних елементах резонатора і радіаційними втратами. Щоб отримати значення радіаційної добротності, в моделі для чисельного розрахунку необхідно втрати в діелектриках вважати рівними нулю, а провідники задавати як ідеальні.

Проведено аналіз впливу металевого прямокутного зразка, який розташований біля бокової поверхні циліндричного лейкосапфірового резонатора (радіус резонатора $R = 7,25$ мм, висота резонатора і висота зразка $h = 2,5$ мм) з двома ідеально провідними стінками. Також розглянуто резонатори зі зрізом, на якому розташовано прямокутний металевий зразок. Якщо зразок знаходиться на відстані > 1 мм від бокової поверхні резонатора, він не чинить значного впливу на розподіл поля, частоту і добротність КДР. Однак при наближенні зразка до бокової поверхні поле коливань ШГ резонатора деформується, радіаційні втрати різко зростають. При внесенні зразка в резонатор (резонатор зі зрізом) моди ШГ в резонаторі зникають. Однак прийнятними, величинами радіаційної добротності характеризується напівциліндричний резонатор зі зрізом, закритим металевим зразком достатньої довжини.

Радіаційна добротність резонаторів, обмежених ТПС з одного боку, менша, ніж радіаційна добротність аналогічного резонатора, обмеженого з двох сторін. Зроблено спробу зменшити радіаційні втрати в циліндричних резонаторах, обмежених однією ТПС. Для цього була змінена форма поверхні резонатора. Показано, що зменшити радіаційні втрати дозволяє використання напівкульового резонатора і асферичних резонаторів з невеликим радіусом кривизни. Результати розрахунку радіаційної добротності порівнюються з результатами експериментальних досліджень. Дані, які отримано чисельно і експериментально, узгоджуються якісно, але значення радіаційних добротностей, отримані експериментально, значно нижче. Це може бути пояснено присутністю додаткових радіаційних втрат в елементах зв'язку, тому що резонатор є відкритою структурою. Також це може бути пов'язано з відхиленням від форми резонатору при його виготовленні резонатора і з шорсткостями на його поверхні [8].

Зроблено спробу підвищення добротності в лейкосапфірових резонаторах без ТПС шляхом введення в резонатор азимутальної щілини. Проаналізовано вплив місця розташування і ширини щілини на частоту, власну добротність

резонатора і на складову добротності, обумовлену виключно радіаційними втратами. При переміщенні щілини в напрямку від центру резонатора до циліндричної поверхні електромагнітне поле поступово концентрується в першому, якщо відстежувати від центру, шарі лейкосапфіра. При цьому з'являється область (збігається з азимутальною щілиною), де поле є менш інтенсивним. Це пояснюється тим, що електромагнітне поле прагне зайняти область, де дійсна частина діелектричної проникності вища, тобто, в даній структурі, область лейкосапфіра. Процес зміни розподілу поля супроводжується зміною частоти і добротності резонатора. Показано, що введення азимутальної щілини дозволяє зменшити втрати в резонаторі, обумовлені втратами в діелектрику, однак, за рахунок зростання радіаційних втрат, добротність резонатора з азимутальною щілиною менше добротності відповідного резонатора без щілини.

Також проведено розрахунок радіаційної добротності лейкосапфірового резонатора, накритого шаром пластика, в якому знаходиться мікрофлюїдний канал (МФК) [7]. Такий резонатор може бути використаний як вимірювальна комірка для визначення діелектричної проникності рідин. Для цього досліджувані рідини розміщуються в МФК. Розрахунок показав, що радіаційні втрати більш ніж на порядок нижчі від втрат в рідині, на підставі чого зроблено висновок, що при проведенні вимірювань радіаційними втратами можна знехтувати.

У **розділі 3** представлено результати дослідження мікрохвильового відгуку радіально двошарових КДР (резонаторів з порожниною), виготовлених із фторопласта і лейкосапфіра, з двома ТПС. У порожнину резонаторів поміщається рідина, характеристики якої впливають на частоту і добротність резонатора. Таким чином, існує можливість визначати діелектричну проникність рідини за вимірними частотою і добротністю резонатора.

Перші експериментальні та чисельні дослідження було проведено для фторопластового резонатора з модами ШГ в 8-мм діапазоні довжин хвиль. На підставі експериментальних досліджень методом підбору була визначена комплексна діелектрична проникність спиртових розчинів різної концентрації. Однак у 8-мм діапазоні фторопластовий резонатор характеризується великими розмірами (радіус резонатора $R = 39$ мм, висота $H_{\text{КДР}} = 14$ мм), а об'єм рідини, необхідний для дослідження, становить 10 мл. Для дослідження біологічних рідин необхідно використовувати резонаторні структури, для яких достатнім є менший об'єм досліджуваної рідини. Використання для виготовлення резонатора матеріалу, що характеризується великим значенням діелектричної проникності, дозволяє зменшити розмір резонатора, а, значить, і порожнини, заповненої досліджуваною рідиною, в мікрохвильовому діапазоні.

Наступним етапом досліджень стало визначення відгуку КДР, зовнішній шар якого виготовлено із лейкосапфіру. Діаметр резонатора $D_2 = 14,51$ мм, висота $H_{\text{КДР}} = 2,51$ мм, діаметр внутрішнього шару (порожнини) $D_1 = 8,54$ мм. Резонатор обмежено двома ТПС, виготовленими з міді ($D_{\text{ТПС}} = 20$ мм,

$H_{\text{ТПС}} = 5 \text{ мм}$). Досліджувана речовина розміщується в порожнині резонатора через отвори в ТПС. Об'єм рідини, що є достатнім для досліджень, становить 0,15 мл.

Усунення проникнення води і водних розчинів в мікрощілини між діелектричним диском і ТПС становить певну технічну складність. Тому ТПС фіксуються на кільці з лейкосапфіра за допомогою бутіральфенольного клею БФ-2 (рис. 1 а). Шар клею досить тонкий, проте істотно впливає на частоту і добротність резонатора. Програма COMSOL Multiphysics, яка використовується для розрахунків, дозволяє враховувати вплив шару клею на частоту і добротність резонатора. Через те, що шар клею занадто тонкий для безпосереднього вимірювання його товщини, остання визначалася шляхом зіставлення даних, отриманих в результаті чисельних і експериментальних досліджень КДР, заповненого повітрям. Таким же чином було визначено діелектричну проникність клею.

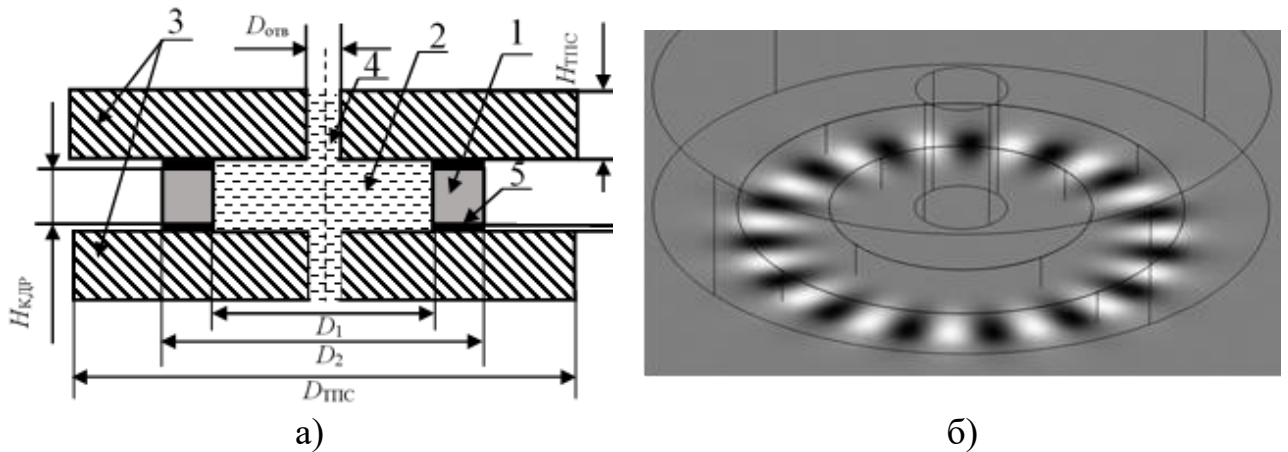


Рисунок 1 – Вимірювальна комірка на основі радіально двошарового резонатора (а) і розподіл поля моди $HE_{15,1} \delta$ ШГ в резонаторі (б). 1 – кільце із лейкосапфіра; 2 – внутрішня порожнина з досліджуваною рідиною; 3 – мідні ТПС; 4 – отвори в ТПС для заповнення резонатора рідиною; 5 – шар клею

Експериментальні дослідження лейкосапфірового резонатора проводилися в діапазоні 30-40 ГГц. Для зв'язку резонатора з генератором використовувалися два діелектричних хвилеводи. Таким чином, була реалізована схема включення резонатора на прохід з реалізацією режиму рухомої хвилі. Всі експериментальні дослідження резонатора з порожниною, заповненою рідинами, проводилися при температурі $20 \pm 0,3^\circ \text{C}$.

Щоб переконатися, що модель для чисельного розрахунку коректно описує реальну структуру, необхідно порівняти результати розрахунку і експерименту. Зіставлялися значення різниці частоти і величин, обернених добротності, резонатора з порожниною, заповненою дистильованою водою, щодо відповідних характеристик резонатора, порожнину якого заповнено повітрям, для мод шепочучої галереї $HE_{n,1} \delta$. Результати розрахунку і експерименту показали хороший збіг (в межах похибки вимірювань), з чого зроблено висновок, що

резонатор може бути використаним як вимірювальна комірка для визначення діелектричної проникності речовин.

Проведено експериментальні дослідження резонатора з модою $HE_{151\delta}$ (рис. 1 б) при заповненні внутрішньої порожнини різними біологічними рідинами. Обидві характеристики резонатора, і частота і добротність, залежать від дійсної (ϵ') і уявної (ϵ'') частин комплексної діелектричної проникності рідини. Це ускладнює визначення проникності досліджуваної рідини.

Щоб спростити визначення дійсної і уявної частин діелектричної проникності, запропоновано спеціальну калібрувальну процедуру. За допомогою моделі для чисельних досліджень розраховано номограму (рис. 2), яка дозволяє визначати обидві частини проникності безпосередньо по вимірним значенням різниці частот і величин, обернених добротності резонатора, не проводячи процедуру підбору значень проникності. Номограма показує зміну частоти і добротності лейкосапфірового резонатора з модою $HE_{151\delta}$ при його заповненні речовинами з різними значеннями ϵ' і ϵ'' діелектричної проникності щодо відповідних характеристик резонатора з порожниною, заповненою дистильованою водою. Щоб побудувати номограму, за допомогою моделі розраховувалися значення резонансної частоти і добротності резонатора для різних значень ϵ'' (в діапазоні 17,71-29,71) при фіксованому значенні ϵ' і навпаки, для різних значень ϵ' (в інтервалі 15,34-21,34). Верхні межі діапазонів зміни ($\epsilon' = 21,34$, $\epsilon'' = 29,71$) відповідають значенням діелектричної проникності води.

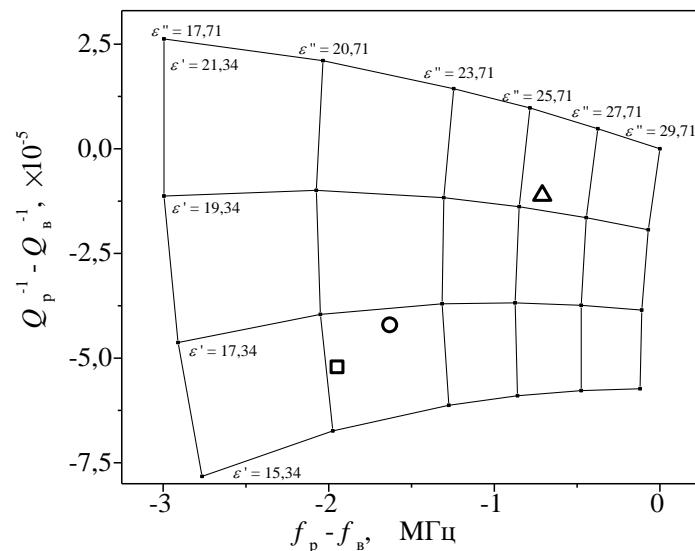


Рисунок 2 – Номограма для визначення дійсної і уявної частин комплексної проникності рідин за допомогою лейкосапфірового радіально двохшарового резонатора з модою $HE_{151\delta}$ у 8-мм діапазоні довжин хвиль

У номограму вносилися значення різниці частот і величин, обернених добротності, для розчинів різних біологічних речовин. На рис. 2 кружечком позначено відповідні значення для розчину глюкози (20%), квадратом – для

розчину лактальбуміна (5 ммоль/л), трикутником – для розчину бичачого сироваткового альбуміна (5 ммоль/л), отримані експериментально.

За допомогою номограми отримано значення дійсної ε' і уявної ε'' частин комплексної діелектричної проникності досліджуваних розчинів (таблиця 1).

Таблиця 1 – Діелектрична проникність розчинів біологічних рідин

Розчин	Комплексна діелектрична проникність	
	дійсна частина ε'	уявна частина ε''
глюкози(20%)	17,04	22,19
бичачого сироваткового альбуміну(5 ммоль/л)	16,42	20,96
лактальбуміну (5 ммоль/л)	19,53	26,31

Відносна похибка визначення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності за допомогою радіально двошарового лейкосапфірового резонатора становить відповідно $\delta\varepsilon'/\varepsilon' = 1,8\%$, $\delta\varepsilon''/\varepsilon'' = 0,6\%$.

У розділі 4 проведено експериментальні та чисельні дослідження відгуку циліндричних діелектричних резонаторів, накритих шаром пластика, в якому знаходиться МФК. У МФК розміщується досліджувана рідина.

У 8-мм діапазоні довжин хвиль досліджувався резонатор, виготовлений з лейкосапфіра (радіус резонатора $R = 7,25$ мм, висота $H_{\text{КДР}} = 2,5$ мм). Товщина шару пластика становить 0,69 мм. Діаметр МФК $D_{\text{МФК}} \approx 0,2$ мм, МФК розташовано посередині шару пластика на відстані 4,1 мм від центру резонатора (рис. 3).

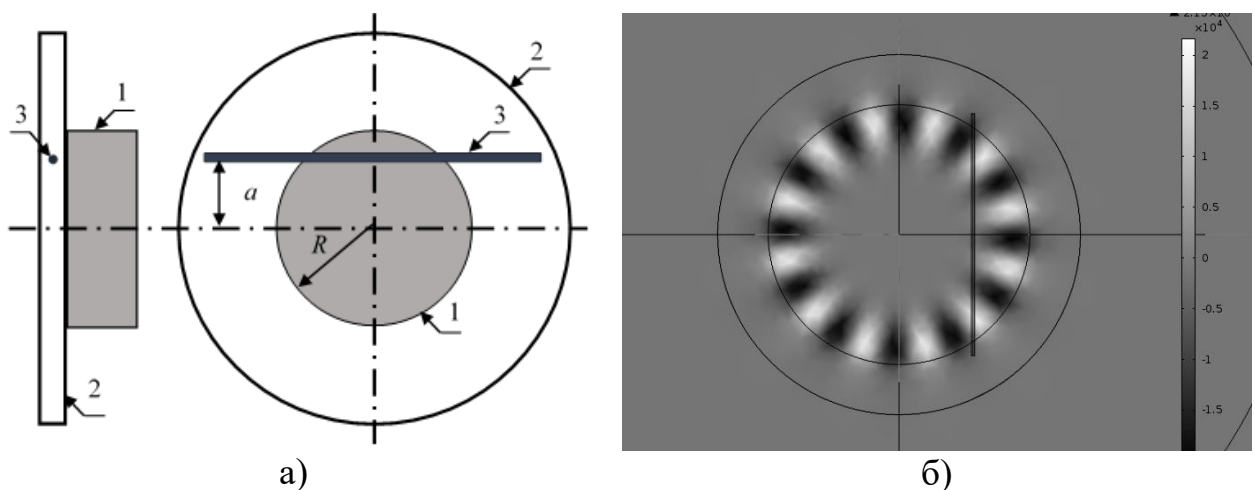


Рисунок 3 – Циліндричний діелектричний резонатор (1) з шаром пластика (2), в якому розташовано МФК (3) (а) та розподіл поля моди HE_{1511} шепочучої галереї в резонаторі (б)

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. Для уточнення геометричних параметрів резонатора було розроблено і застосовано спеціальну процедуру. У моделі для чисельного рахунку варіювалися відстань від поверхні резонатора до центру МФК і діаметр МФК (в межах похибки вимірювання), і отримані значення різниці частот і добротності зіставлялися з відповідними значеннями, отриманими експериментально.

Вимірювальна комірка також включає в себе два лейкосапфірових діелектричних хвилевода як вхідну та вихідну лінії передачі і системи позиціонування резонатора з температурним датчиком і елементом Пельтьє як керуючим елементом для системи температурної стабілізації. Така вимірювальна комірка розміщується в спеціальній камері з метою зменшення температурного обміну з навколишнім середовищем. Резонансна частота і добротність вимірювалися за допомогою векторного аналізатора мереж HP 8722C.

Зіставлено результати експерименту і розрахунку для випадку, коли МФК заповнений рідинами з добре вивченими властивостями (пропанол, етанол, метанол, ацетон, дистильована вода). У модель для розрахунку закладалися значення комплексної діелектричної проникності рідин, наведені в [9]. Моделю, на якій проводились дослідження – HE_{1211} (рис. 3 б), має частоту $\approx 35,5$ ГГц. Показано, що результати чисельних і експериментальних досліджень збігаються в межах похибки вимірювань, а, значить, резонаторна структура може бути використана як основа вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідин.

Також проведено експериментальні дослідження резонатора при заповненні МФК розчинами глюкози різної концентрації. Як і в розділі 3, для визначення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності використовувалася номограма, отримана за допомогою моделі для чисельного розрахунку. На номограму наносилися значення різниці частот і величин, обернених добротності, резонатора з МФК, заповненим розчином глюкози, щодо відповідних характеристик резонатора з МФК, заповненим водою. Концентраційні залежності діелектричної проникності глюкози, отримані описаним способом, представлено на рис. 4 а. Представлені результати добре узгоджуються з даними, отриманими в [10]. Різниця між значеннями діелектричної проникності розчинів глюкози, отриманими з використанням описаної методики, і значеннями в [10], 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.

Проведено експериментальні дослідження резонатора з МФК, заповненим розчинами різних білків. Отримані значення різниці частот і величин, обернених добротності, також підставляються в номограму, і таким чином визначаються

величини діелектричної проникності досліджуваних розчинів. На рис. 4 б показано концентраційні залежності дійсної (зафарбовані символи) і уявної (незафарбовані символи) частин діелектричної проникності таких розчинів: бичачого сироваткового альбуміна (—●—, —○—), лактальбуміна (—■—, —□—), цитохрома С (—▲—, —Δ—).

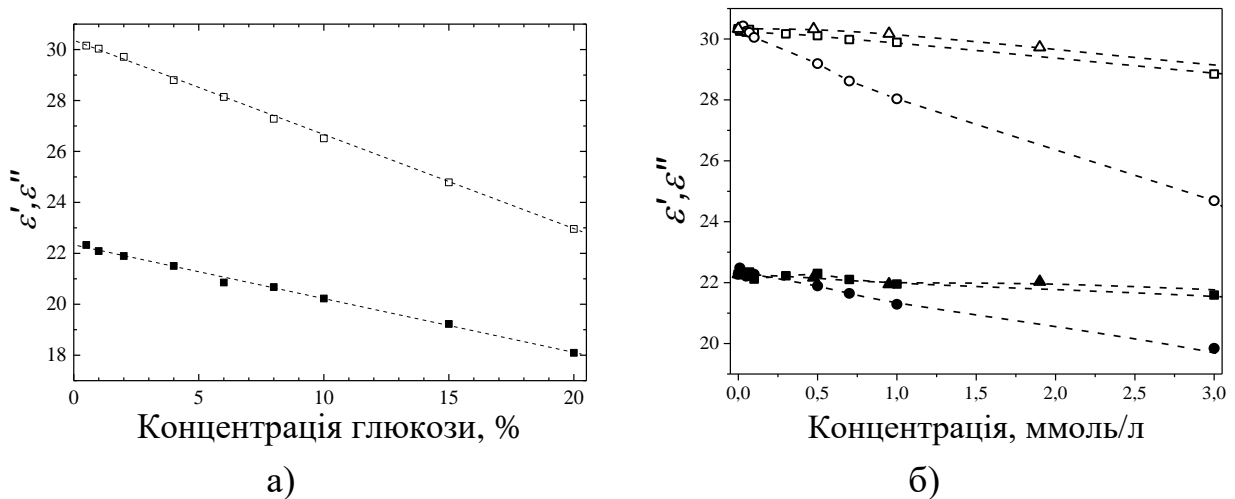


Рисунок 4 – Концентраційні залежності дійсної (зафарбовані символи) і уявної (незафарбовані символи) частин діелектричної проникності розчинів різних біологічних речовин

Відносна похибка визначення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності за допомогою лейкосапфірового резонатора з МФК в 8-мм діапазоні довжин хвиль становить відповідно $\delta\varepsilon'/\varepsilon' = 0,7\%$, $\delta\varepsilon''/\varepsilon'' = 1,4\%$. Об'єм рідини, який потрібно забезпечити для досліджень, складає 400 нл.

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 короткохвильовій частині мм діапазону запропоновано використовувати кварцовий резонатор з МФК як основу вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності. Кварц для виготовлення резонатора було обрано тому, що в цьому діапазоні він характеризується меншими значеннями тангенса кута втрат в порівнянні з лейкосапфіром.

Проведено експериментальні дослідження кварцового резонатора (радіус $R = 4,44$ мм, $h = 1,25$ мм), а також побудовано його модель в COMSOL Multiphysics. Резонатор покрито шаром пластику товщиною 0,61 мм з МФК (діаметр $D_{\text{МФК}} = 0,2$ мм). МФК знаходиться посередині шару пластику на відстані ≈ 3 мм від центру резонатора. Для збудження резонатора застосовуються два хвилеводи, виготовлені з поліетилену. Використовувався генератор, створений на базі лампи зворотної хвилі з фазовим автопідстроюванням частоти, що дозволило проводити вимірювання в діапазоні частот 118-178 ГГц.

Як і при дослідженні лейкосапфірового резонатора у 8-мм діапазоні довжин хвиль, діаметр МФК і його місце розташування в шарі пластику

уточнювалися і проводилися експериментальні та чисельні дослідження структури при заповненні МФК рідинами з добре відомими властивостями. Зіставлення результатів показало хороший збіг.

Було проведено експериментальні дослідження резонатора при заповненні МФК водно-спиртовими розчинами різної концентрації. Дослідження проводилися при збудженні моди HE_{1211} на частоті $\approx 167,5$ ГГц.

За допомогою побудованої номограми визначалася діелектрична проникність водно-спиртового розчину в субТГц діапазоні за методикою, описаною у розділі 3 для 8-мм діапазону довжин хвиль. На рис. 5 представлено залежності дійсної (а) та уявної (б) частин комплексної діелектричної проникності від концентрації водно-спиртового розчину.

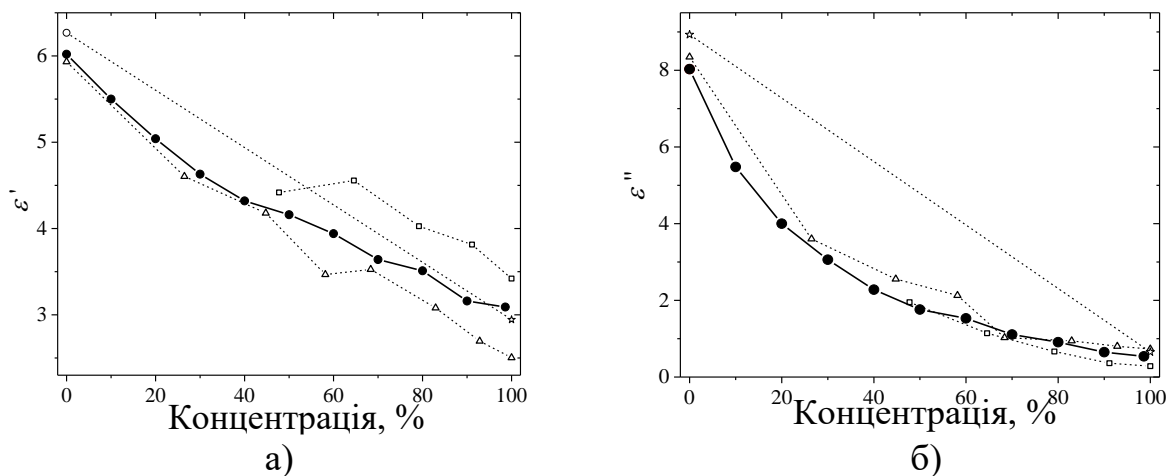


Рисунок 5 – Концентраційні залежності дійсної (а) та уявної (б) частин діелектричної проникності водно-спиртового розчину в субТГц діапазоні

Зафарбованими кружечками позначені результати, що отримані на підставі експериментальних даних. Для порівняння на графік також нанесено значення діелектричної проникності, які представлено в інших джерелах: [9] – позначені зірочками, [11] – квадратами, [12] – 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 і отриманих значень діелектричної проникності водно-спиртового розчину з результатами, наведеними в [9, 11-12], 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 водними розчинами глюкози 10% і 20%. На підставі вимірюваних значень різниці частот і добротності за допомогою номограми знайдено значення дійсної і уявної частини діелектричної проникності розчинів (таблиця 2).

Таблиця 2 – Діелектрична проникність розчинів глюкози в субТГц діапазоні

Концентрація глюкози, %	Комплексна діелектрична проникність	
	дійсна частина ε'	уявна частина ε''
0	6,02	8,03
10	6,12	5,38
20	6,17	4,91

Відносна похибка визначення дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності за допомогою кварцового резонатора з МФК в короткохвильовій частині мм діапазону довжин хвиль становить відповідно $\delta\varepsilon'/\varepsilon' = 2,23\%$, $\delta\varepsilon''/\varepsilon'' = 1,8\%$. Об'єм рідини, який потрібен для досліджень, складає 300 нл.

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 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 мікрозазори між ними і перешкоджає 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) в 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 ($\delta\varepsilon'/\varepsilon' = 0,7\%$, $\delta\varepsilon''/\varepsilon'' = 1,4\%$) 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, у короткохвильовій частині мм діапазону запропоновано використовувати кварцовий КДР з МФК. Показано, що отримані значення діелектричної проникності водно-спиртових розчинів добре узгоджуються з 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 двошарового КДР, запропоновано і розроблено спеціальну калібрувальну процедуру, що дозволяє знаходити величини проникності за виміряними значеннями резонансної частоти і добротності резонатора.

СПИСОК РОБІТ, ЦИТОВАНИХ В АВТОРЕФЕРАТІ

1. 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.
3. Microwave Electronics. Measurement and Materials Characterization / L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan V. K. Varadan. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2004. – 549 p.
4. Квазиоптические твердотельные резонаторы / А.Я. Кириченко, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Н.Т. Черпак. – К.: Наукова думка, 2008. – 296 с.
5. Quasi-optical dielectric resonators with small cuvette and capillary filled with Ethanol-water mixtures / N. T. Cherpak, A. A. Lavrinovich, E. N. Shaforost // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2006. – Vol. 27, N. 1. – P. 115-133.

6. Влияние глубины проникновения поля в жидкость с большими потерями на спектральные характеристики дискового квазиоптического диэлектрического резонатора / А. А. Лавринович // Радиофизика и электроника. – 2005. – Том 10, № 1 – С. 164-168.
7. 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.
8. Системы с малой диссипацией / В.Б. Брагинский, В.П. Митрофанов, В.И. Панов. – М.: Наука, 1981. – 144 с.
9. 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.
10. Dielectric properties of glucose solutions in the 0.5–67 GHz range / P. F. M. Smulders, M. G. Buysse, and M. D. Huang // Microw. Opt. Technol. Lett. – 2013. – Vol. 55, N. 8. – P. 1916-1917.
11. Water-Ethanol Mixtures at Different compositions and Temperatures. A Dielectric Relaxation Study / P. Petong P, Potter R and Kaatze // Phys. Chem. A. – 2000. – Vol. 104, P. 7420-7428.
12. Dielectric Characteristics of Water Solutions of Ethanol in the Terahertz Region / H. Kitahara, T. Yagi, K. Mano, M. Wada Takeda, S. Kojima and S. Nishizawa // Journal of the Korean Phys.Soc. – 2005. – Vol. 46, N. 1. – P. 82-85.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 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 Microwave Theory and Tech. – 2015. – Vol. 63, N. 6. – P. 2003-2009.

* Шипілова є прізвищем автора до реєстрації шлюбу

- 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.
- 5*. Двухслойный квазиоптический лейкосапфировый резонатор для диэлектрметрии 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. 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 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, 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.

АНОТАЦІЯ

Проценко І. О. Мікрохвильовий відгук квазіоптичних діелектричних резонаторів із сильнопоглинаючою рідиною. – 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, м. Харків, 2017.

Роботу присвячено електродинамічному обґрунтуванню можливості дослідження діелектричних властивостей сильнопоглинаючих рідин за виміряним мікрохвильовим відгуком квазіоптичних діелектричних резонаторів і створенню вимірювальної комірки для визначення комплексної діелектричної проникності рідин, в тому числі біологічних рідин. З цією метою було проведено дослідження впливу рідин з великими втратами на розподіл поля, спектральні та енергетичні характеристики радіально двошарових резонаторів і резонаторів з мікрофлюїдним каналом (МФК); оптимізація параметрів квазіоптичних діелектричних резонаторів для поліпшення характеристик вимірювальних комірок; розробка методу визначення дійсної і уявної частин діелектричної проникності рідин по виміряним частоті і добротності резонатора з ідентифікованої модою.

У 8-мм діапазоні довжин хвиль проведено чисельні та експериментальні дослідження радіально двошарових квазіоптичних резонаторів, виготовлених з фторопласту та лейкосапфіру, і лейкосапфірового резонатора з МФК. Показано, що дані резонатори можуть бути використані для визначення комплексної діелектричної проникності рідин у малих об'ємах. Визначено діелектричні властивості водно-спиртових розчинів, розчинів глюкози і білків, для чого було розроблено спеціальну калібрувальну процедуру, яка дозволила знаходити дійсну і уявну частини діелектричної проникності рідини за виміряними значеннями резонансної частоти і добротності резонатора з ідентифікованої модою. Проведено порівняльний аналіз характеристик резонаторів як основи вимірювальних комірок, показано переваги резонатора з МФК.

У короткохвильовій частині мм діапазону довжин хвиль проведено дослідження властивостей кварцового резонатора з МФК. Як і в 8-мм діапазоні, для визначення діелектричних властивостей рідин було використано спеціальну калібрувальну процедуру. Визначено комплексну діелектричну проникність водно-спиртових розчинів різної концентрації. Отримані дані показали хороший збіг з результатами, наведеними в інших джерелах. Визначено комплексну діелектричну проникність розчинів глюкози різної концентрації.

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

АННОТАЦИЯ

Проценко И. А. **Микроволновый отклик квазиоптических диэлектрических резонаторов с сильнопоглощающей жидкостью.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика. Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, 2017.

Работа посвящена обоснованию возможности исследования диэлектрических свойств сильнопоглощающих жидкостей по измеренному микроволновому отклику квазиоптических диэлектрических резонаторов и созданию измерительной ячейки для определения комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей, в том числе биологических жидкостей. С этой целью были проведены: исследования влияния жидкостей с большими потерями на распределение поля, спектральные и энергетические характеристики радиально двухслойных резонаторов и резонаторов с микрофлюидным каналом (МКФ); оптимизация параметров квазиоптических диэлектрических резонаторов для улучшения характеристик измерительных ячеек; разработка метода определения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости жидкостей по измеренным частоте и добротности резонатора с определенной модой.

В 8-мм диапазоне длин волн проведены численные и экспериментальные исследования радиально двухслойных квазиоптических резонаторов, изготовленных из фторопласта и лейкосапфира, и лейкосапфирового резонатора с МФК. Показано, что данные резонаторы могут быть использованы для определения комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей в малых объемах. Определены диэлектрические свойства водно-спиртовых растворов, растворов глюкозы и белков, для чего была разработана специальная калибровочная процедура, позволяющая определять действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости жидкости по измеренным значениям резонансной частоты и добротности резонатора с идентифицированной модой. Проведен сравнительный анализ характеристик резонаторов как основы измерительных ячеек, показаны преимущества резонатора с МФК.

В коротковолновой части мм диапазона длин волн проведены исследования свойств кварцевого резонатора с МФК. Как и в 8-мм диапазоне, для определения диэлектрических свойств жидкостей использовалась калибровочная процедура. Определена комплексная диэлектрическая проницаемость водно-спиртовых растворов различной концентрации. Полученные данные показали хорошее совпадение с результатами, приведенными в других источниках. Определена комплексная диэлектрическая проницаемость растворов глюкозы различной концентрации.

Ключевые слова: микроволновый отклик, диэлектрический резонатор, моды шепчущей галереи, комплексная диэлектрическая проницаемость, сильнопоглощающие жидкости.

ABSTRACT

Protsenko I. A. **Microwave response of quasioptical dielectric resonators with high-loss liquids.** – The Manuscript.

Thesis for candidate's degree 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 the electromagnetic justification of possibility to study the dielectric properties of high-loss liquids by the measured microwave response of quasioptical dielectric resonators and to the creation of a measurement cell for finding the complex permittivity of liquids, including biological liquids. For this purpose, the effect of the lossy liquids properties on the field distribution, the spectral and energy characteristics of radially two-layered resonators and resonators with microfluidic channel (MFC) are studied; optimization of resonators parameters for improving the characteristics of measuring cells was carried out and the development of a method for obtaining the real and imaginary parts of the liquids permittivity by the measured the resonance frequency and Q -factor with the identified mode was developed.

In the Ka-band, numerical and experimental studies of radially two-layered quasioptical resonators made of Teflon and leucosapphire and also a leucosapphire resonator with MFC were carried out. It is shown that the resonators can be used to determine the complex permittivity of liquids in small. The dielectric properties of different water solutions (ethanol, glucose, proteins) have been determined. For this purpose, a special calibration procedure was devised for finding the real and imaginary parts of the liquids permittivities from the measured values of the resonance frequency and Q -factor for the resonator identified mode. A comparative analysis of resonators used as the measurement cells is carried out, and the advantages of a MFC resonator are shown.

In the subTHz-band, the investigations of the properties of a quartz MFC resonator were carried out. A special calibration procedure has been made to determine the dielectric properties of liquids too. The complex permittivity of water-ethanol solutions with various concentrations was determined. The obtained data demonstrate a good agreement with the results from other sources. The complex permittivity of glucose solutions with various concentrations was determined.

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