

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

**Носатюк Сергій Олегович**

621.378; 537.862

**ЗБУДЖЕННЯ МОД ШЕПОЧУЧОЇ ГАЛЕРЕЇ  
В ЕКРАНОВАНИХ КВАЗІОПТИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ  
РЕЗОНАТОРАХ ПЛАНАРНИМ ХВИЛЕВОДОМ**

01.04.03 – радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2016

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, старший науковий співробітник  
**Когут Олександр Євгенович,**  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
НАН України (м. Харків),  
провідний науковий співробітник відділу радіофізики  
твердого тіла

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Грибовський Олександр Володимирович**  
Радіоастрономічний інститут НАН України (м. Харків),  
провідний науковий співробітник відділу теоретичної  
радіофізики

кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Дегтярьов Андрій Вікторович**  
Харківський національний університет імені В. Н.  
Каразіна

Захист відбудеться «\_\_» «\_\_\_\_\_» 2016 р. о \_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (61077, м. Харків, площа Свободи, 4)..

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою:  
61077, м. Харків, площа Свободи, 4.

Автореферат розісланий «\_\_»\_\_\_\_\_ 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ю. В. Аркуша

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Резонатори з розподіленими параметрами є одним з найважливіших елементів електромагнітних кіл, тому що забезпечують частотну селекцію в широкому діапазоні довжин хвиль: від сантиметрових до субміліметрових. Найбільшого поширення вони отримали в техніці короткохвильової частини сантиметрового (см) і в міліметровому (мм) діапазонах довжин хвиль. Умови сучасних завдань електродинаміки НВЧ диктують вибір різних конструктивних виконань резонаторів, їх геометричних і електрофізичних параметрів.

Найбільш привабливими з точки зору використання в конкретних пристроях мм діапазону довжин хвиль (генераторах, суматорах потужностей, фільтрах та інш.) завдяки високій завадозахищеності є екрановані квазіоптичні діелектричні резонатори (КДР), що збуджуються на модах шепочучої галереї (ШГ). Вибір мод ШГ в якості робочих коливань резонаторів на основі діелектричних резонансних структур (куля, диск, циліндр) продиктований їх високою добротністю. Їх поля локалізовані у вузькій смузі вздовж криволінійної поверхні діелектричної структури резонатора. Самі моди ШГ утворюються хвилями, що поширюються усередині резонатора та падають на його внутрішню поверхню під дуже пологими кутами таким чином, що коефіцієнт їх відбиття наближений до одиниці. Однак, існує низка недоліків, які перешкоджають широкому застосуванню таких резонаторів. До них слід віднести наступні:

- використання металевих поверхонь в конструкції резонатора призводить до появи значних омичних втрат енергії, що негативно позначається на енергетичних характеристиках резонатора;

- екранування діелектричних резонансних структур призводить до суттєвого загушення їх спектра. Густота спектра екранованих КДР може бути настільки значна, що на окремих ділянках резонансні відгуки окремих коливань «перекриваються», тобто має місце виродження. З практичної точки зору це означає складність досягнення одночастотного відгуку від резонансної системи;

- відомі способи збудження робочих мод коливань в екранованих КДР не задовольняють досягненню високих показників їх електродинамічних характеристик. Вони передбачають розташування локального елемента зв'язку в їх полі усередині резонатора. Це веде до збурення полів робочих коливань в екранованих КДР, що негативно позначається на їх резонансних характеристиках. Окрім того, краї елементів зв'язку, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі, є джерелом додаткових дифракційних втрат енергії резонансного поля коливань. Наслідком цього є погіршення добротності таких резонаторів.

У зв'язку з вищесказаним найбільш важливими задачами досліджень є:

1. Пошук нових ефективних способів збудження коливань ШГ в екранованих КДР, використання яких суттєво не впливає на формування їх електродинамічних характеристик.
2. Пошук нових форм екранованих КДР з високим значенням власної добротності.

3. Покращення спектральних характеристик екранованих КДР шляхом застосування нових способів збудження в них робочих мод ШГ.

Розв'язання перерахованих вище задач є актуальним для сучасної радіофізичної науки.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота була виконана у відділі радіофізики твердого тіла Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України у відповідності до планів виконуваних (виконаних) НДР:

1. «Дослідження лінійних та нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених часток» (шифр теми «Кентавр-4») виконувалась з 2007 по 2011 р.р. (№ держреєстрації 0106U011978).

2. «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердо тільними структурами» (шифр теми «Кентавр-5») виконувалась з 2012 по 2016 р.р. (№ держреєстрації 0112U000211). Автор є одним з виконавців цих робіт, і його науковий внесок відображено у дисертації.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є пошук нових високоефективних способів збудження мод ШГ в високочастотних екранованих КДР різних форм, а також дослідження їх електродинамічних характеристик. Для досягнення цієї мети необхідним є розв'язання наступних задач:

1. Експериментальне дослідження розподілу інтенсивності резонансних полів коливань в екранованих КДР різних форм, а також спектральних та енергетичних характеристик при різних положеннях локального елемента зв'язку усередині резонатора.
2. Вивчення можливості збудження мод ШГ в екранованих КДР локальним джерелом, розташованим за межами їх резонансного об'єму, а саме, в планарному хвилеводі.
3. Експериментальне дослідження електродинамічних характеристик планарного хвилеводу за умови його електромагнітного зв'язку з екранованим КДР. Комп'ютерне моделювання хвильових процесів в планарному хвилеводі та резонаторі. Порівняльний аналіз результатів експериментів і розрахунків.
4. Вивчення можливості використання планарного хвилевода для ефективного збудження мод ШГ в екранованих КДР і виведення енергії їх резонансного поля.
5. Пошук шляхів розрядження спектру екранованих КДР з пріоритетним виділенням робочих мод ШГ.
6. Дослідження спектральних, частотних, енергетичних характеристик і розподілу полів мод ШГ в радіально двошарових екранованих КДР (с повітряним зазором між діелектриком і металом) за допомогою використання планарного хвилевода.
7. Дослідження можливості створення резонансної комірки діелектрометра на основі екранованих КДР з метою визначення електрофізичних характеристик рідин з високими втратами енергії електромагнітного поля в мм діапазоні довжин хвиль.

Розв'язанню зазначених вище задач присвячена надана дисертаційна робота.

**Методи дослідження.** В роботі було використано відомі радіофізичні методи вимірювань спектральних, енергетичних і поляризаційних характеристик мод ШГ, а також розподілу їх полів в екранованих КДР різних форм. Дослідження було проведено за панорамного вимірювача КСВН Р2-65. Було застосовано схеми включення досліджуваного резонатора в зовнішню хвилевідну лінію «на прохід» та «на відбиття». Теоретичне дослідження розподілу інтенсивності резонансних полів в різних за формою екранованих КДР і планарному хвилеводі здійснювалось шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою стандартного пакету програмного забезпечення CST Microwave Studio 2011, наданого Східно-Китайським НДІ «Фотоелектроніка» (м. Уху, Аньхой, КНР) в ході спільних наукових досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше експериментально та методом комп'ютерного моделювання досліджено електродинамічні характеристики екранованих КДР сферичної та циліндричної форми у режимі збудження мод ШГ планарним хвилеводом. При цьому отримано такі нові результати:

1. Вперше встановлено, що використання планарного хвилеводу дозволяє максимально розрідити спектр коливань екранованих КДР з пріоритетним виділенням мод ШГ.
2. Визначено, що на відміну від локальних джерел збудження (елементів зв'язку), планарний хвилевід є малозбурюючим елементом збудження мод ШГ в екранованих КДР по відношенню до їх резонансних полів.
3. Вперше експериментально шляхом використання планарного хвилеводу досягнуто високі значення добротності (більш ніж 6000) радіально двошарових екранованих КДР сферичної форми, які є близькими до їх розрахункових значень.
4. Показано, що планарний хвилевід є високоефективним елементом виводу енергії полів мод ШГ з екранованих КДР. Використана схема «на прохід» включення екранованого КДР в коло зв'язку з планарними хвилеводами є основою для створення фільтрів резонансного типу. Їх головною перевагою є розріджений спектр на виході резонатора, в якому присутні лише резонанси високодобротних мод ШГ.
5. Вперше запропоновано використання екранованих КДР в режимі збудження мод ШГ планарним хвилеводом для створення вимірювальної комірки діелектрометрії з метою вивчення електрофізичних властивостей рідин з високими втратами енергії у мм діапазоні довжин хвиль. Експериментально встановлено, що запропонована вимірювальна комірка на основі порожнистого півсферичного екранованого резонатора характеризується високою чутливістю до змінення електрофізичних параметрів досліджуваних рідин. Визначено відмінні ознаки рідин з близькими електрофізичними властивостями.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані результати дослідження електродинамічних характеристик різних екранованих КДР у режимі збудження мод ШГ планарним хвилеводом є передумовою для їх використання в

ряді активних і пасивних пристроїв мм діапазону довжин хвиль з поліпшеними вихідними характеристиками.

1. Розріджений при використанні планарного хвилеводу спектр екранованих КДР стане основою стабільних за частотою генераторів. Виключено можливість випадкових змін частоти вихідного сигналу при захопленні частоти генерації полями інших по відношенню до мод ШГ типів коливань.
2. Розріджений спектр коливань на виході екранованих КДР за умови використання планарного хвилеводу для підведення та виведення енергії резонансного поля дозволяє використовувати таку схему при створенні фільтрів резонансного типу.
3. Слабий зв'язок (параметр зв'язку  $p \approx 0,3$ ) планарного хвилеводу з екранованими КДР обумовлюють його несуттєвий вплив на власні електродинамічні характеристики останніх. Тому планарний хвилевод слід розглядати як малозбуррючий елемент збудження робочих мод ШГ в екранованих КДР. Саме цей фактор визначає досягнуту високу чутливість вимірювання рідин з малою відмінністю їх електрофізичних характеристик.
4. Висока ефективність зв'язку (коефіцієнт передачі близький до 0,8) екранованого КДР з планарним хвилеводом є основою для одночасної стабілізації частоти декількох генераторів мм хвиль та сумування їх потужностей.

**Апробація результатів дисертації.** Отримані у дисертаційній роботі результати доповідалися на наступних конференціях та симпозіумах.

– 20-ої, 22-ої, 24-ої Кримських міжнародних конференціях “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь, Крим, Україна. 2010, 2012, 2014р.

– 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. Kharkiv, Ukraine, 2010.

– 2013 International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. Kharkiv, Ukraine, 2013.

– International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015). Dnipropetrovsk, Ukraine, September 29 – October 2, 2015.

Результати роботи також доповідалися й обговорювалися на науково-кваліфікаційних семінарах «Радіофізика твердого тіла» та «Радіофізика і електроніка міліметрових і субміліметрових хвиль» в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України.

**Публікації.** Основні матеріали дисертації опубліковані в 13 наукових працях. Серед них 6 статей, що опубліковані у наукових фахових вітчизняних та іноземних журналах і 7 тез доповідей на українських і міжнародних наукових конференціях.

**Особистий внесок здобувача** полягає в проектуванні лабораторних макетів, виборі методик експериментальних досліджень, проведенні вимірювань, і участі в обговоренні отриманих результатів. Так, у роботах [1–13] автором проведені експериментальні дослідження електродинамічних характеристик різних екранованих КДР з модами ШГ.

У роботах [2–6, 11–13] автором запропоновано використання планарного хвилеводу («щілинної лінії») для розв'язання задачі розрідження спектра екранованих КДР з пріоритетним виділенням мод ШГ. Проведено експериментальні дослідження спектральних характеристик даних резонаторів.

У роботах [2–5, 11,12] з метою мінімізації втрат енергії резонансного поля на локальному елементі зв'язку запропонований перехід до нового типу зв'язку – з планарним хвилеводом («щілинною лінією»), що дозволяє розташовувати локальний елемент збудження коливач за межами екранованих КДР. Досліджено енергетичні характеристики екранованих КДР різних форм в режимі збудження мод ШГ щілиною зв'язку і планарним хвилеводом. Проведено порівняльний аналіз електродинамічних характеристик екранованих КДР при використанні даних двох способів збудження в них мод ШГ.

В роботі [4] проведено порівняльний аналіз енергетичних характеристик і розподілу інтенсивності поля в радіально двошарових екранованих КДР сферичної форми для різних варіантів (симетричного й асиметричного) розташування діелектричного елемента резонатора всередині металевого екрану.

В роботі [5] проведено порівняння експериментальних і розрахункових результатів дослідження розподілу резонансних полів мод ШГ в екранованому КДР при його електромагнітному зв'язку з планарним хвилеводом.

В роботі [13] автором запропоновано створення високочутливої вимірювальної комірки діелектрометрії резонансного типу на основі порожнистого металевого екрану сферичної форми в режимі збудження мод ШГ в ньому планарним хвилеводом. Проведено дослідження електрофізичних властивостей спиртовмісних рідин з близькими значеннями комплексної діелектричної проникності.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та завдання дослідження, наведено загальну характеристику дисертації.

**Розділ 1** присвячено огляду літератури за темою дисертації. Вивчається область дослідження з теми роботи в колі задач по збудженню мод ШГ в різних за формою екранованих КДР.

**Розділ 2** присвячено дослідженню електродинамічних характеристик екранованих півдискового та півкульового КДР в режимі збудження мод ШГ планарним хвилеводом. Проведено порівняльний аналіз спектральних, частотних і енергетичних характеристик цих резонаторів за умови різних способів збудження в них мод ШГ, а саме, планарним хвилеводом і щілиною зв'язку, розташованою в полі резонатора. Експериментальні результати отримані за умови використання схеми «на прохід» включення екранованого КДР в хвилевідне коло зв'язку.

У *підрозділі 2.1* досліджено спектральні характеристики півдискового екранованого КДР, розташованого на двох плоских металевих дзеркалах, у режимі збудження мод ШГ як відомим способом – щілиною зв'язку резонаторі, так і запропонованим в роботі способом – планарним хвилеводом (рис.1). Останній являє собою природній тонкий повітряний зазор між площиною металевого екрану та площиною металевого дзеркала. Його висота дорівнює декілька десятків мікрон.

В експерименті була можливість змінювати висоту  $h$  планарного хвилеводу в інтервалі значень  $50 \div 1000$  мкм.

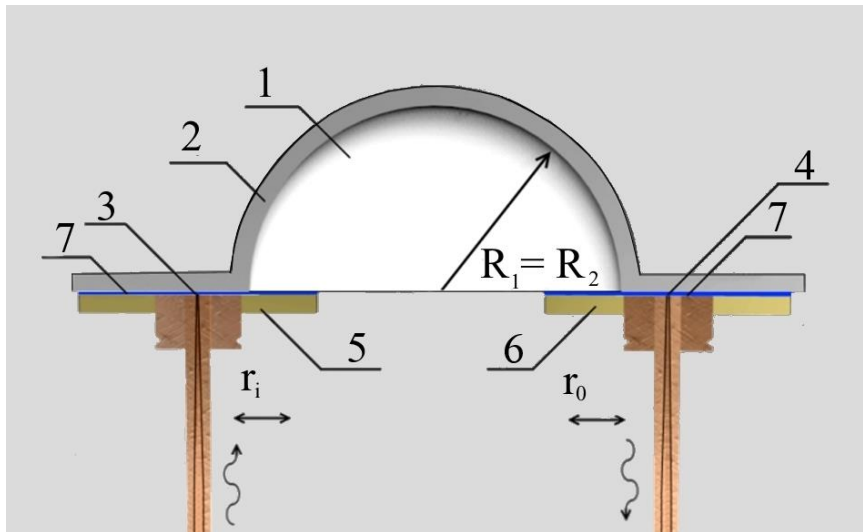


Рисунок 1 – Півдисковий екранований КДР як об'єкт експериментальних досліджень

Радіус  $R_1$  діелектричного півдиска 1, виготовленого з фторопласту-4 був відповідним до радіусу  $R_2$  металевого екрану 2 циліндричної форми і дорівнював 39 мм. Резонатор був відкритий з боку одного плоского зрізу півдиска. Джерелами підведення та виведення енергії електромагнітного поля з резонатора були щілини зв'язку 3, 4 з розмірами  $7,2 \times 0,5$  мм<sup>2</sup>, які являли собою відкриті кінці звужених металевих хвилеводів. Щілини зв'язку розташовувались в рухомих вздовж радіального напрямку локальних металевих дзеркалах 5 і 6. Їх переміщенням утворювалась можливість розташовувати елементи підведення та виведення енергії як в самому резонаторі, так і за його межами – в планарному хвилеводі 7. Розміри локальних дзеркал дорівнювали  $50 \times 50$  мм<sup>2</sup>. Їх положення відносно діелектричного півдиску обиралось таким чином, що вони покривали області локалізації полів мод ШГ на відстані 12 мм від краю півдиска. Щілина зв'язку збудження (елемент підведення енергії) розташовувалась в схемі включення резонатора таким чином, що в ньому пріоритетно збуджувались моди  $EH$ -поляризації. Дослідження було проведено в смузі частот  $28 \div 37$  ГГц.

Раніше було встановлено, що спектр досліджуваного екранованого КДР, збуджуваного щілиною зв'язку зсередини резонатора та розташованого на суцільному металевому дзеркалі надто густий. В ньому, окрім мод ШГ, присутні так звані променеві коливання та коливання типу «більярд». Їх поля на відміну від полів мод ШГ глибше локалізовані в діелектричному матеріалі резонатора. Крім того, як було встановлено в цій роботі, одночасно з модами переважної  $EH$ -поляризації в резонаторі збуджуються моди  $HE$ -поляризації.

Частково розрідити спектр коливань півдискового екранованого КДР дозволяє використання двох локальних дзеркал, застосованих в цій роботі (рис. 2а). Більшість коливань, розподіл полів яких відмінний від розподілу полів мод ШГ, при цьому не збуджується по причині високих радіаційних втрат або ефективність їх збудження мала.



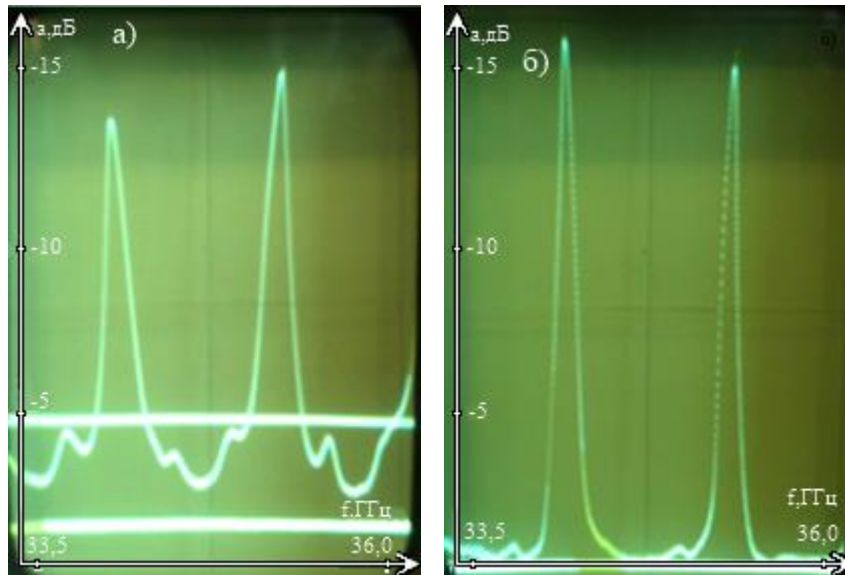


Рисунок 2 – Спектри коливань півдискового екранованого КДР з локальними дзеркалами в режимі збудження щілиною зв'язку (а) та планарним хвилеводом (б)

Досягти найбільшого розрідження спектру екранованого КДР та ефективно (з високою амплітудою резонансу) збуджувати в ньому моди ШГ дозволяє використання планарного хвилеводу (рис.2б). Щілини зв'язку при цьому розташовані за межами самого резонатора – в тонкому повітряному зазорі між площинами металевого екрану та локальних дзеркал. Розрідження спектру в цьому випадку здійснюється за рахунок того, що енергія поля від зовнішнього джерела за допомогою планарного хвилеводу підводиться до краю резонатора, саме в ту область, де локалізовані поля мод ШГ. Поля інших коливань, як зазначалось вище, розташовані глибше в резонаторі. Тому вони не збуджуються.

Таким чином, у *підрозділі 2.1* розв'язано задачу розрідження спектру екранованих КДР шляхом використання планарного хвилеводу.

*Підрозділ 2.2* присвячено дослідженню впливу різних способів збудження мод ШГ (щілиною зв'язку зсередини резонатора та планарним хвилеводом) у півдисковому та півкульовому екранованих КДР на їх частотні й енергетичні характеристики. Було встановлено, що на відміну від застосування щілини зв'язку планарний хвилевід як елемент збудження робочих мод ШГ в екранованих КДР мало впливає на їх частотні характеристики. Суттєве збурення резонансних характеристик локальним елементом збудження – щілиною зв'язку обумовлено розсіянням енергії резонансного поля мод ШГ його краями. При цьому щілина зв'язку впливає на частотні характеристики екранованих КДР як збурююча неоднорідність. При переміщенні щілини зв'язку збудження в радіальному напрямі в області локалізації поля робочої моди ШГ резонансна частота може змінюватись на декілька десятків МГц. Розташування щілини зв'язку збудження за межами резонатора, а саме в планарному хвилеводі, майже не впливає на резонансну частоту. Було встановлено, що в широкому інтервалі змінення радіальної координати щілини зв'язку збудження в планарному хвилеводі (близько довжини хвилі) частота збуджуваного резонансу практично не змінюється. При переміщенні щілини зв'язку з планарного хвилеводу до резонатора резонансна частота

змінюється плавно на межі їх розділу. Це свідчить про збудження планарним хвилеводом саме мод ШГ в екранованих КДР.

Для дослідження енергетичних характеристик екранованих КДР обирались коефіцієнт передачі та навантажена добротність. Поведінку цих характеристик при різних умовах збудження мод ШГ в резонаторах дозволяють оцінити їх залежності від відносної радіальної координати  $r_i/R_2$  щілини зв'язку збудження (рис. 3 а, б). Коефіцієнт передачі представлений як відношення амплітуди сигналу на виході резонатора до його найбільшого значення  $A_0/A_{max}$ .

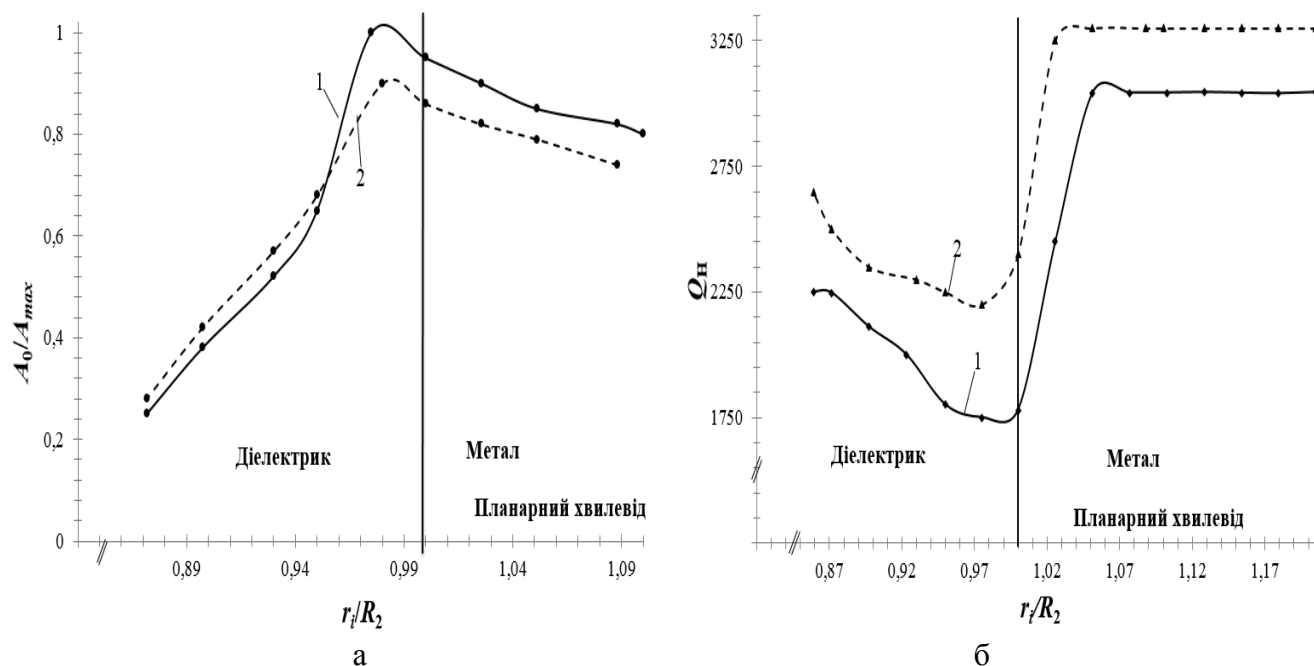


Рисунок 3 – Залежності коефіцієнту передачі (а) на навантаженій добротності (б) півдискового та півкульового екранованих КДР від радіальної координати щілини зв'язку збудження

Положення щілини зв'язку виведення енергії фіксувалось на межі резонатор – планарний хвилевід в точці з відносною радіальною координатою  $r_0/R_2 = 1$ . Суцільною кривою з'єднані результати дослідження енергетичних характеристик півдискового екранованого КДР, пунктиром – півкульового резонатору. Висота планарного хвилеводу дорівнювала 100 мкм.

Про високу ефективність збудження мод ШГ в екранованих КДР планарним хвилеводом свідчать результати дослідження коефіцієнту передачі. Видно, що, не зважаючи на те, що максимальних значень коефіцієнту передачі досягає при розташуванні щілини зв'язку збудження в резонаторі, а саме в області найбільшої інтенсивності резонансного поля мод ШГ, застосування планарного хвилеводу забезпечує достатньо високу ефективність збудження мод ШГ в досліджуваних резонаторах. Необхідно зазначити при цьому, що зв'язок планарного хвилеводу з екранованими резонаторами слабкий.

Розглядаючи залежність навантаженої добротності екранованих КДР від радіальної координати щілини зв'язку необхідно зробити важливий висновок. Видно, що застосування планарного хвилеводу дозволяє досягти найбільших значень навантаженої добротності. На відміну від збудження мод ШГ в екранованих КДР щілиною зв'язку зсередини їх резонансного об'єму, розташування елемента підведення енергії за його межами - в планарному хвилеводі, мінімізує втрати енергії резонансного поля на його краях, що приводить до підвищення добротності резонатора. Також видно, що змінення радіальної координати щілини зв'язку збудження в планарному хвилеводі в широкому інтервалі її значень практично не впливає на значення навантаженої добротності. Це обумовлює малі втрати на краях локального елемента зв'язку, наближені до постійних. Враховуючи слабкий зв'язок планарного хвилеводу з екранованими резонаторами, необхідно зробити висновок, що при застосуванні планарного хвилеводу навантажена добротність екранованих КДР наближується до їх власної добротності. Більш висока добротність півкульового екранованого КДР у порівнянні з екранованим резонатором на основі діелектричного півдиску обумовлена відсутністю втрат з боку плоских зрізів півдискової структури.

Таким чином, у *підрозділі 2.2* встановлено високу ефективність збудження мод ШГ в екранованих КДР за допомогою планарного хвилеводу та можливість досягнення високої добротності резонаторів у порівнянні з відомими способами збуджень мод ШГ.

**У Розділі 3** вивчено можливість використання планарного хвилеводу для ефективного виведення енергії полів мод ШГ з екранованих КДР при застосуванні схеми «на прохід».

*Підрозділ 3.1* присвячено дослідженню розподілу інтенсивності полів коливальних, збуджуваних в півдисковому та півкульовому екранованих КДР щілиною зв'язку зсередини резонаторів і планарним хвилеводом. Для цього інформативною є залежність відносної амплітуди  $A_0/A_{max}$  сигналу на виході резонатора від радіальної координати щілини зв'язку виведення енергії при фіксованому положенні щілини зв'язку збудження. Проведеними дослідженнями було встановлено, що при застосуванні щілини зв'язку, розташованої всередині екранованих КДР в області локалізації полів мод ШГ ( $r_i/R_2 = 0,99$ ), окрім самих мод ШГ, збуджуються променеві коливання. Їх поля глибше локалізовані в діелектрику. Причиною цього є широке випромінювання з щілини зв'язку збудження, розташованої всередині досліджуваних резонаторів. При використанні планарного хвилеводу характер поведінки залежності відносної амплітуди сигналу від радіальної координати щілини зв'язку виведення енергії вказує на те, що в екранованих КДР збуджуються лише моди ШГ.

Показано, що при зв'язку планарного хвилеводу з екранованими КДР поля мод ШГ глибоко (на відстані більш довжини хвилі) проникають в планарний хвилевід. Це обумовлює високу ефективності такого зв'язку на ділянці виведення енергії полів мод ШГ з екранованих КДР. Таким чином, використана схема включення екранованих КДР в коло зв'язку, утворений двома планарними хвилеводами підведення та виведення енергії резонансного поля, дозволяє розглядати її як фільтр резонансного типу.

У *підрозділі 3.2* представлено результати дослідження розподілу електромагнітних полів в планарному хвилеводі при його електромагнітному зв'язку з екранованими КДР. Встановлено, що всередині планарного хвилеводу воно має інтерференційний характер. Періодичні максимуми та мінімуми інтенсивності поля в планарному хвилеводі вказують на утворення режиму «стоячої хвилі» завдяки збудженню зворотної хвилі, відбитої від країв планарного хвилеводу. Про наявність режиму «стоячої хвилі» в планарному хвилеводі вказують і результати комп'ютерного моделювання, проведені за допомогою програмного пакету CST Microwave Studio 2011 (рис.4).

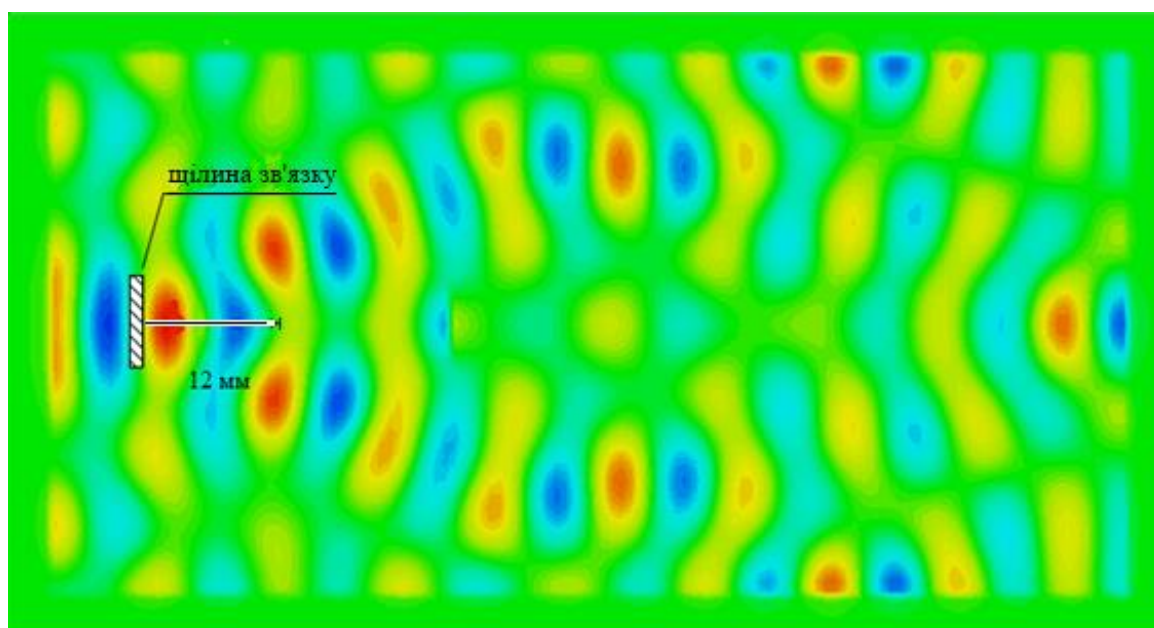


Рисунок 4 – Розподіл електромагнітних полів, збуджуваних в планарному хвилеводі щілиною зв'язку

Пучностям поля відповідають темні області, представлені на рис.4. Цікавим з позицій хвильових процесів в планарному хвилеводі є ділянка поля, віддалений від елемента збудження хвиль на відстань близько 12 мм. Його головною особливістю є перетворення моди основного хвилевідного типу  $TE_{10}$  в моду  $TE_{20}$ . Таке перетворення обумовлено двома причинами. По-перше, пучок хвиль, що виходять з щілини зв'язку є розбіжним. По-друге, розміри металевих стінок планарного хвилеводу в напрямку перпендикулярному поширенню хвиль на багато більше

довжини хвилі, що дозволяє сформувати поле мод з вищими поперечними індексами, як  $TE_{20}$ . При подальшому поширенні хвилі в планарном хвилеводі можливе подальше модове перетворення в моди з більш високими поперечними індексами, як  $TE_{30}$  і т.д. в разі, коли поперечні розміри стінок планарного хвилеводу досить великі. Таким чином, слід говорити про багатомодовість використовуваного в роботі планарного хвилеводу.

Також було вивчено вплив висоти планарного хвилеводу на його хвилевідні властивості, а саме, коефіцієнт передачі при зв'язку з півдисковим екранованим КДР. Було встановлено, що існує оптимум висоти планарного хвилеводу у межах  $h \approx 300 \div 500$  мкм, який характеризується максимумом коефіцієнту передачі. Існування такого оптимуму пояснюється залежністю втрат енергії в планарном хвилеводі від його висоти. Можна очікувати, що при малих висотах  $h < 300$  мкм омічні втрати в стінках планарного хвилеводу достатньо великі та призводять до зменшення коефіцієнту передачі. При великих висотах планарного хвилеводу  $h > 500$  мкм суттєву роль у погіршенні хвилевідних властивостей відіграють радіаційні втрати. Таким чином, у підрозділі 3.2 вивчено розподіл полів в планарному хвилеводі та надано рекомендації щодо його висоти відносно значень коефіцієнту передачі.

**Розділ 4** присвячено розв'язанню задачі досягнення високих значень добротності екранованих КДР. Для розв'язання цієї задачі в роботі запропоновано перехід до двошарових екранованих резонансних структур. Раніше в теоретичних роботах по вивченню електродинамічних процесів в екранованих резонаторах було показано, що в двошарових КДР сферичної форми при певному співвідношенні радіусів діелектричної півкулі та сферичного металевого екрану можливо досягнення надвисокої добротності, яка перевищує «порогове» значення, обумовлене втратами в матеріалі діелектрика [1\*, 2\*]. Доказати експериментально таку можливість, як буде показано нижче, стало можливо лише при використанні планарного хвилеводу як елемента збудження мод ШГ в екранованих КДР.

В роботі було розглянуто двошаровий екранований КДР сферичної форми. Діелектрична півкуля з фторопласту-4 радіусом  $R_1 = 39$  мм розміщувалась усередині металевого екрану радіусом  $R_2 = 42$  мм таким чином, що їх осі симетрії співпадали. Тонкий зазор між діелектриком і металом був заповнений повітрям. Для часткового розрядження спектру такого резонатора використовувались локальні металеві дзеркала. Збудження робочих мод ШГ здійснювалось як планарним хвилеводом, так і щілиною зв'язку зсередини двошарового екранованого резонатора. При цьому щілина зв'язку мала можливість змінювати своє положення вздовж радіальної координати завдяки рухомості локального дзеркала, в якому вона розміщувалась. Згідно з результатами досліджень, наведеними в Розділі 3, для досягнення найбільш високих значень коефіцієнту

передачі висота планарного хвилеводу обиралась  $h = 300$  мкм. Дослідження електродинамічних характеристик двошарового екранованого КДР сферичної форми було проведено в смузі частот  $28 \div 37$  ГГц. Для визначення енергетичних характеристик досліджуваного резонатора було використано схему «на відбиття», для спектральних характеристик – схему «на прохід» з застосуванням двох однакових за розмірами щілин зв'язку. Застосування схеми «на відбиття» дозволяло визначити параметр зв'язку елемента збудження з резонатором та власну добротність останнього.

У підрозділі 4.1 вивчено спектральні, частотні й енергетичні характеристики такого двошарового екранованого КДР. Показано, що подібно результатам досліджень, наведеним в Розділі 2, застосування планарного хвилеводу дозволяє максимально розрізати спектр та виділити в ньому робочі моди ШГ ТМ пріоритетної поляризації. В спектрі коливань двошарового екранованого КДР виділяються періодичні за частотою резонанси, що відповідають модам ШГ та так званим «об'ємним» коливанням, поля яких локалізовані у повітряному зазорі резонатора. У відношенні до мод ШГ вони є значно менш добротними, тому в подальшому вони не розглядалися.

Подальші дослідження електродинамічних характеристик двошарового екранованого КДР показали, що на відміну від щілини зв'язку, розташованої всередині резонатора, застосування планарного хвилеводу не впливає на резонансну частоту мод ШГ. Зв'язок резонатора з планарним хвилеводом слабкий. Значення параметру зв'язку  $p$  не перевищує 0,35. В той час, як при використанні щілини зв'язку всередині резонатора параметр зв'язку суттєво залежав від її радіальної координати. Розташування щілини зв'язку в точках з великою інтенсивністю резонансного поля приводив до підвищення параметру зв'язку до 0,58. При цьому власна добротність двошарового екранованого КДР, збуджуваного щілиною зв'язку, розташованою в цих точках, була найменшою. Про це свідчать результати дослідження власної добротності розглянутого резонатора (рис. 5). Значну роль в погіршенні добротності при цьому відіграють втрати енергії на краях щілини як локального елемента зв'язку. На рис.5 видно область найменших значень власної добротності двошарового екранованого КДР при значеннях радіальної координати щілини зв'язку  $r_i/R_2 < 1$ , що відповідає розміщенню елемента зв'язку в поля мод ШГ. При переході елемента зв'язку до планарного хвилеводу вдається зменшити такі втрати енергії резонансного поля і тим самим підвищити власну добротність резонатора. Цікаво, що одержані результати визначення власної добротності експериментально шляхом застосування планарного хвилеводу знаходяться у добрій відповідності до результатів теоретичних досліджень, проведених раніше та наведених у роботі [1\*].

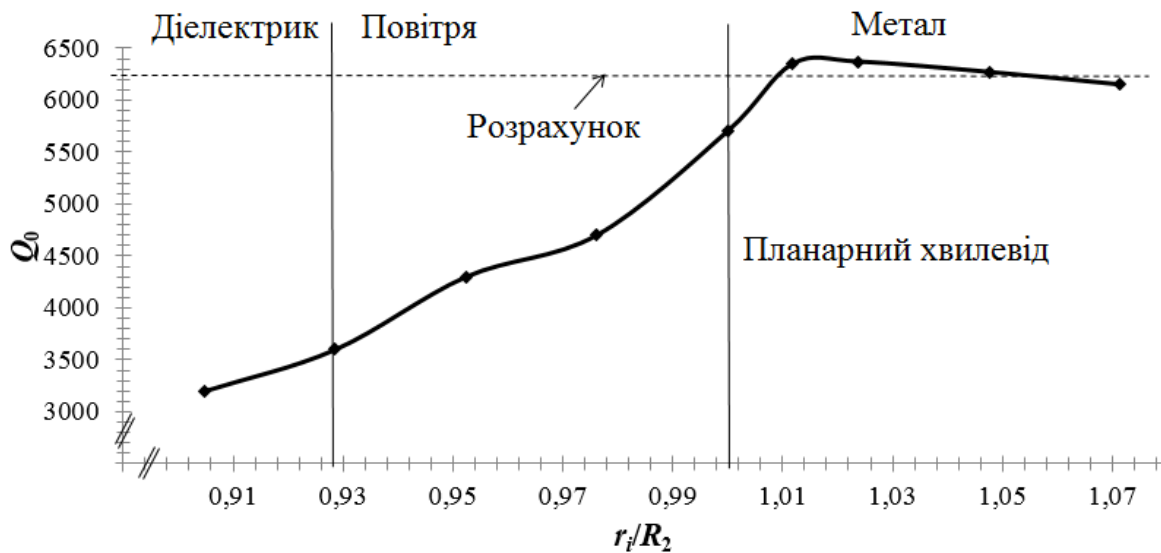


Рисунок 5 – Залежність власної добротності двохшарового екранованого КДР від радіальної координати щілини зв'язку збудження

Найбільш інтересним результатом, проведених досліджень є те, що значення власної добротності досліджуваного двохшарового екранованого КДР перевищують «порогові», які визначаються втратами в діелектричному елементі резонатора та для використаного матеріалу (тефлон-4) складають 5600. Пояснити такий ефект дозволяють результати дослідження розподілу інтенсивності полів мод ШГ в двохшаровому екранованому КДР сферичної форми. Результати проведених досліджень показали, що в досліджуваному двохшаровому екранованому КДР, поля мод ШГ частково зміщуються з області діелектрика в повітряний зазор. При цьому інтенсивність резонансного поля на металі екрану незначна  $A_0/A_{max} \approx 0,15$ . Таким чином, не дивлячись на те, що максимум інтенсивності поля мод ШГ локалізовано в діелектрику, у двохшарових екранованих резонансних структурах вдається зменшити власні втрати, тим самим збільшити добротність резонаторів на їх основі.

У *підрозділі 4.2* наведено результати дослідження розподілу полів в планарному хвилеводі при його електромагнітному зв'язку з двохшаровим екранованим КДР. Показано, що також, як і в одношарових екранованих КДР, поле в планарному хвилеводі має інтерференційний характер, що свідчить про наявність режиму «стоячої хвилі». При розташуванні щілин зв'язку в областях максимумів полів вдається підвищити ефективність зв'язку з резонатором як при підведенні до нього енергії від зовнішнього джерела, так і при виведенні її. Одержані експериментальні результати підтверджено шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою програмного пакету CST Microwave Studio 2011.

У *підрозділі 4.3* показано, що власна добротність двохшарового екранованого КДР суттєво залежить від симетрії його складових елементів. При навіть незначному порушенні симетрії взаємного розташування діелектричної півкулі та

металевого екрану сферичної форми добротність такої резонансної структури значно погіршується. Так, при зміщенні осі симетрії діелектричної півкулі відносно осі симетрії металевого екрану добротність такого резонатора погіршується навіть удвічі у відношенні до їх симетричного взаємного розташування. Причиною цього є підвищення власних втрат за рахунок підвищення втрат в діелектрику та омичних втрати на поверхні металевого екрану. Про це свідчать результати дослідження розподілу інтенсивності полів мод ШГ в двошарових екранованих резонаторах з порушеною внутрішньою симетрією (асиметрією повітряного зазору). Тому для досягнення високої добротності дуже важливим є контроль внутрішньої симетрії двошарового екранованого КДР.

Таким чином, у **Розділі 4** вирішено задачу досягнення високої добротності екранованих КДР шляхом переходу до двошарових екранованих діелектричних структур, збуджуваних на модах ШГ планарним хвилеводом.

В **Розділі 5** вивчено можливість застосування екранованих КДР в пристроях мм діапазону довжин хвиль щодо дослідження електрофізичних властивостей рідин з великими втратами. Для цього у *підрозділі 5.1* досліджено електродинамічні характеристики екранованого КДР на основі порожнистого півсферичного металевого екрану, розташованого на двох локальних металевих дзеркалах. Проведеними експериментальними дослідженнями та шляхом комп'ютерного моделювання (CST Microwave Studio 2011) встановлено, що в порожнистому металевому екрані сферичної форми існують моди ШГ (рис. 6). Для їх збудження використано планарний хвилевід і щілину зв'язку, розташовану в порожнистому резонаторі.

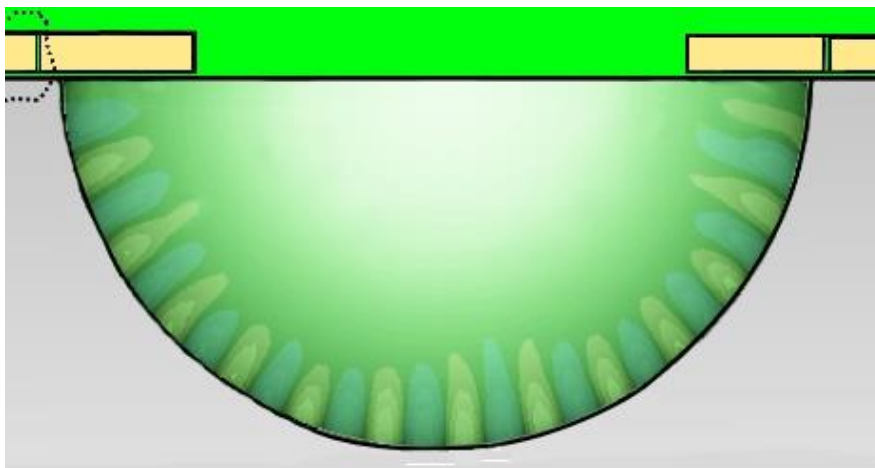


Рисунок 6 – Розподіл поля  $TM_{28,1,1}$ -моди ШГ в порожнистому півсферичному резонаторі в режимі зв'язку з планарним хвилеводом (результати комп'ютерного моделювання)

Показано, що, як і в випадку екранованих резонаторів з твердим діелектриком, спектральні, частотні та енергетичні характеристики порожнистого резонатора



залежать від умов збудження, а саме, від радіальної координати щілини зв'язку. Результати дослідження розподілу полів мод ШГ в такому резонаторі показали, що вони «прижаті» до металевих стінок екрану, таким чином, що повітряна область поблизу криволінійної поверхні резонатору характеризується великим значенням інтенсивності резонансного поля мод ШГ. Це створює передумови для ефективної взаємодії полів мод ШГ в резонаторі з досліджуваною рідиною. Добротність порожнистого резонатора значно менша, ніж добротність екранованих КДР на основі твердого діелектрика, досліджуваних в Розділах 2 - 4.

В *підрозділі 5.2* проведено дослідження можливості використання порожнистого екранованого резонатора сферичної форми щодо дослідження близькими за електрофізичними властивостями рідин – спиртовміщуючих розчинів: етанол, метанол, бутанол, бензол. Зразки рідин дозовано (0,5 мл) розміщувались в області полюса півсферичного екрану (точка на сферичній поверхні, через яку проходить вісь симетрії). Інформативними щодо визначення розрізнявальних ознак досліджуваних рідин є резонансні частоти та значення добротності резонатора. Показано, що завдяки використанню планарного хвилеводу з метою збудження в резонаторі робочих мод ШГ, вдається визначити розрізнявальні ознаки досліджуваних рідин тільки в малих об'ємах (до 3 мл), які є у добрій відповідності до існуючих уявлень про їх електрофізичні властивості [3\*]. Більш високі об'єми рідин вели до значного збурення резонансного поля робочих мод ШГ. При цьому ідентифікувати рідини за зміненням електродинамічних характеристик використаного резонатора не представлялось можливим. При використанні щілини зв'язку, розташованої в полі резонатора, такі ознаки не є очевидними. Причиною цього є значне збурення резонансного поля мод ШГ самим локальним елементом збудження, на фоні якого збурення поля зразками рідин в малих об'ємах не є достатнім для виявлення їх розрізнявальних ознак.

Таким чином, у **Розділі 5** показано перспективність екранованих КДР, збуджуваних на модах ШГ планарним хвилеводом, для створення в подальшому на їх основі вимірювальних комірок діелектрометрів резонаторного типу.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної задачі сучасної радіофізики – вдосконаленню відомих способів збудження мод шепочучої галереї (ШГ) в екранованих квазіоптичних діелектричних резонаторах (КДР) локальними джерелами з метою мінімізації збурюючого впливу на резонансні поля. Експериментально досліджено залежність основних електродинамічних характеристик різних за формою екранованих КДР від умов збудження в них мод ШГ. Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нового способу збудження мод ШГ в високодобротних екранованих КДР – планарним хвилеводом, а також вдосконаленні існуючих пасивних пристроїв мм діапазону довжин хвиль.

Основні фундаментальні та прикладні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Запропоновано новий спосіб ефективного збудження мод ШГ в екранованих КДР – планарним хвилеводом, утвореним площиною металевого дзеркала резонатора та плоскою основою його металевого екрану.

2. Встановлено, що значення коефіцієнту передачі при збудженні мод ШГ в екранованих КДР планарним хвилеводом є високими й мало залежать від місця розташування в ньому елементу підведення енергії на відстанях, порівняних з довжиною хвилі. Це визначає високу ефективність збудження мод ШГ в екранованих КДР планарним хвилеводом.

3. Експериментально показано, що частотні та енергетичні характеристики екранованих КДР при їх зв'язку з планарним хвилеводом мало залежать від вибору радіальної координати елементу підведення енергії до планарного хвилеводу. Тим самим запропонований спосіб збудження мод ШГ в екранованих КДР планарним хвилеводом є малозбурюючим у порівнянні до відомих способів збудження мод ШГ в закритих резонаторах.

4. Експериментально та шляхом комп'ютерного моделювання встановлено, що у планарному хвилеводі при електромагнітному зв'язку з екранованим КДР разом з режимом бігучої хвилі можливо режим стоячої хвилі за причиною збудження відбитої від його країв зворотної хвилі. Розташування елементу зв'язку в пучностях поля дозволяє підвищити ефективність зв'язку з резонатором.

5. Експериментально розв'язано задачу розрідження густого спектру екранованих КДР з пріоритетним виділенням мод ШГ шляхом використання планарного хвилеводу. Показано, що при збудженні мод ШГ в екранованих КДР, підведення енергії електромагнітного поля зовнішнього джерела здійснюється безпосередньо до області локалізації полів мод ШГ в резонаторі. Інші типи коливань, поля яких глибше розташовані всередині об'єму резонатора, планарним хвилеводом не збуджуються на відміну від локальних елементів збудження.

6. Показано, що при включенні екранованих КДР до кола зв'язку з планарним хвилеводом за схемою «на прохід» досягаються умови не тільки ефективного збудження, але й виведення енергії резонансних полів мод ШГ з резонатору. Розряджений спектр вихідного сигналу дозволяє розглядати таку схему включення резонатору як фільтр резонансного типу з добрими селективними властивостями.

7. Шляхом використання планарного хвилеводу експериментально доказано можливість збудження «наддобротних» мод ШГ в двошарових (діелектрик-повітря-метал) півкульових екранованих КДР. Встановлено, що за умови певних співвідношень розмірів металевого екрану таких резонаторів і півкульової діелектричної структури при їх симетричному взаємному розташуванні досягається власна добротність, яка перевищує порогове значення, обумовлене втратами енергії в діелектричному матеріалі резонатора. Показано, що причиною такого ефекту є часткове зміщення резонансного поля мод ШГ з діелектрику до повітряного зазору. При цьому інтенсивність резонансного поля на стінках металевого екрану мала.

8. Вивчено електродинамічні характеристики порожнистого півсферичного екранованого резонатора. Встановлено, що в ньому збуджуються моди ШГ. Їх поля локалізовано в безпосередній близькості від внутрішньої криволінійної поверхні. Це створює можливість щодо ефективної взаємодії резонансних полів мод ШГ з різними матеріалами з метою вивчення їх електрофізичних властивостей.

9. Запропоновано конструкцію вимірювальної комірки на основі порожнистого півсферичного екранованого КДР для дослідження рідин. Встановлено, що завдяки використанню планарного хвилеводу вдається мінімізувати сторонні фактори збурення резонансних полів робочих мод ШГ, і, тим самим, досягти високої чутливості вимірювань.

### СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1\* Kharkovsky S.N. Whispering-gallery modes in shielded hemispherical dielectric resonators / S.N. Kharkovsky, Yu.F. Filippov, A.E. Kogut et al. // IEEE Trans on MTT. – 2002. – V. 50, – P. 2647 – 2649.
- 2\* Харьковский С.Н. Высокодобротные колебания шепчущей галереи в экранированном сферическом диэлектрическом резонаторе / С.Н. Харьковский, Ю.Ф. Филиппов, А.Е. Когут и др. // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, №14. – С.20-25.
- 3\*. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов / Я.Ю. Ахадов. – М.: Наука, 1977. – 400с.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кириченко А.Я. Полюй полушаровой диэлектрический резонатор для диэлектromетрии жидкостей / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г. Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т.16, №2.– С. 90-93.
2. Кириченко А.Я., Возбуждение колебаний шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах щелевой линией / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника – 2013. – Т. 56, № 8. – С. 24-32.
3. Когут А.Е. Возбуждение высокодобротных колебаний шепчущей галереи в полушаровом экранированном диэлектрическом резонаторе «щелевой линией» / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля // Изв. ВУЗов. Радиофизика. –2014. – Т. 54, №7. – С.588-595.
4. Когут А.Е. Реализация режима вынужденных колебаний высших порядков в экранированных диэлектрических резонаторах путем использования щелевой линии / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 25-33.
5. Когут А.Е., He Jaoschan Возбуждение мод шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах щелевой линией связи / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, Р.С. Доля, He Jaoschan // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), №3.– С. 49-54.

6. Когут А.Е., О перспективах использования щелевой линии как элемента возбуждения квазиоптического полусферического резонатора при решении задач диэлектromетрии жидкостей линии / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, Р.С. Доля // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2016. -Т. 59, №4 – С. 19-25.
7. Kirichenko A.Ya. Dielectrometer measuring cel for investigation of liquids with high losses and high dielectric constant designed in form of the two – layer semispherical teflon resonator / A.Ya. Kirichenko, A.E. Kogut, V.V. Kutuzov, I.G. Maksimchuk, V.A. Solodovnik, S.O. Nosatiuk // Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: International. Kharkov Symposium,(MSMW'2010), June 21-26, 2010: Symp. Proc. – Kharkov, Ukraine, 2010.
8. Кириченко А.Я. Полушаровой диэлектрический резонатор с концентрической полушаровой выборкой для диэлектromетрии жидкостей / А.Я.Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г. Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // 20<sup>ая</sup> Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2010), 13-17 сентября 2010г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2010– Т.2.– С.1010-1011.
9. Кириченко А.Я., Резонансный метод для определения диэлектрических характеристик смеси мелкодисперсных сыпучих материалов в 8-мм диапазоне длин волн / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г. Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // 20<sup>ая</sup> Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2010), 13-17 сентября 2010г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2010– Т.2.– С.1012-1013.
- 10.Когут А.Е. Полушаровой диэлектрический резонатор с концентрической полушаровой выборкой для диэлектromетрии спиртоводных растворов / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г. Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // 22<sup>ая</sup> Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2012), 10-14 сентября 2012г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2012– Т.2.– С.845-846.
- 11.Kirichenko A.Ya. Excitation of whispering gallery modes in shielded dielectric resonator by “slot-line” / A.Ya. Kirichenko, A.E. Kogut, V.V. Kutuzov, V.A. Solodovnik, S.O.Nosatiuk // Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: International. Kharkov Symposium, (MSMW'2013), June 23-28, 2013: Symp. Proc. – Kharkov, Ukraine, 2013 – P. 268-270
- 12.Когут А.Е. Возбуждение высокочастотных колебаний шепчущей галереи в полушаровом экранированном диэлектрическом резонаторе «щелевой линией» линии / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля // 24<sup>ая</sup> Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2014), 7-13 сентября 2014г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2014– Т.2.– С. 613-614
- 13.Kogut A.E., The slot-line as element of excitation of quasioptic hemispherical resonators for the solving problems of dielectrometry liquids / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, Р.С. Доля // International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015) September 29 – October 2, 2015:Symp. Proc. – Dnipropetrovsk, Ukraine, 2015

## АНОТАЦІЯ

Носатюк С.О. Збудження мод шепочучої галереї в екранованих квазіоптичних діелектричних резонаторах планарним хвилеводом.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.03. - радіофізика. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2016.

В дисертації вирішено задачу ефективного збудження робочих мод шепочучої галереї (ШГ) в екранованих квазіоптичних діелектричних резонаторах (КДР) шляхом застосування планарного хвилеводу. Шляхом вивчення електродинамічних характеристик різних за формою екранованих КДР показано, що на відміну від існуючих способів збудження мод ШГ в екранованих КДР запропонований спосіб є малозбурюючим по відношенню до резонансних полів мод ШГ. Встановлено високу ефективність зв'язку планарного хвилеводу з екранованими КДР як при підведенні до них енергії електромагнітного поля від зовнішнього джерела, так і при виведенні з резонаторів енергії резонансного поля мод ШГ. Показано наявність режиму стоячої хвилі в планарному хвилеводі при його електромагнітному зв'язку з екранованими резонаторами, що створює додаткові умови щодо підвищення ефективності збудження в них мод ШГ. При збудженні екранованих КДР планарним хвилеводом вдається вирішити задачу розрядження їх спектру з пріоритетним виділенням мод ШГ. Шляхом застосування планарного хвилеводу експериментально доказано високу добротність двошарових екранованих КДР сферичної форми. Запропоновано застосування збудження мод ШГ в екранованих КДР планарним хвилеводом для вирішення задач діелектрометрії рідин в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

*Ключові слова:* екранований квазіоптичний діелектричний резонатор, моди шепочучої галереї, планарний хвилевід, електрофізичні властивості рідин.

## АННОТАЦИЯ

Носатюк С.О. Возбуждение мод шепчущей галереи в экранированных квазиоптических диэлектрических резонаторах планарным волноводом.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03. - радиофизика. Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2016.

В диссертации решена задача эффективного возбуждения рабочих мод шепчущей галереи (ШГ) в экранированных квазиоптических диэлектрических резонаторах (КДР) путем использования планарного волновода. При исследовании электродинамических характеристик экранированных КДР разных форм показано, что в отличие от существующих способов возбуждения мод ШГ в экранированных КДР предложенный в данной работе способ является маловозмущающим по

отношению к резонансным полям мод ШГ. Установлена высокая эффективность связи планарного волновода с экранированными КДР как при подводе к ним энергии электромагнитного поля от внешнего источника, так и при выводе из резонаторов энергии резонансного поля мод ШГ. Показано существование режима стоячей волны в планарном волноводе при его электромагнитной связи с экранированными резонаторами. Это создает дополнительные возможности для повышения эффективности возбуждения в резонаторах мод ШГ. При использовании планарного волновода для возбуждения колебаний в экранированных КДР удается решить задачу разряжения спектра последних с приоритетным выделением мод ШГ. Экспериментально доказано существование высокой добротности двухслойных экранированных КДР сферической формы. Предложено использование планарного волновода для возбуждения рабочих мод ШГ в экранированных КДР для решения задач диэлектromетрии жидкостей в миллиметровом диапазоне длин волн.

*Ключевые слова:* экранированный квазиоптический диэлектрический резонатор, моды шепчущей галереи, планарный волновод, электрофизические свойства жидкостей.

## ABSTRACT

Nosatiuk S.O. Excitation of whispering gallery modes in shielded quasioptic dielectric resonators by the planar waveguide.

Thesis for the Ph. D. degree in physics and mathematics by the speciality 01.04.03. – radiophysics. – V. N. Karazin Kharkov national university, Kharkov, 2016.

The thesis is devoted to the solving of the effective excitation of the whispering gallery modes (WGM) in the shielded quasioptic dielectric resonators (QDR) by the using of a planar waveguide. The study of electromagnetic characteristics of different shielded QDR shows that in contrast to the existing modes of WGM excitation in shielded QDR the planar waveguide is small disturbing mode with respect to the resonance fields of WGM. High efficiency coupling between the planar waveguide and shielded QDR as at excitation of WGM so in output of shielded resonators is demonstrated. The existence of a standing wave mode in a planar waveguide is shown. This creates additional opportunities to improve the efficiency of WGM excitation in the resonators. The using of planar waveguide allows solving the problem of improving of the shielded QDR spectrum by the excitation of WGM only. The high Q-factor of spherical double-layered shielded QDR is proved experimentally. Using of the planar waveguide for the excitation of WGM in the shielded QDR is proposed for the dielectrometry liquids in the millimeter wavelength range.

**Key words:** shielded quasioptic dielectric resonators, whispering gallery modes, planar waveguide, permittivity of liquids.