

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ПОЛЄТАЄВ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 537.867:543.275.1

**ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІВ НВЧ
АПЕРТУРНИХ РЕЗОНАТОРНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З
ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Таврійському національному університеті ім. В.І. Вернадського Міністерства освіти і науки України, м. Сімферополь.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор

Старостенко Володимир Вікторович,

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського,
м. Сімферополь, завідувач кафедри радіофізики та електроніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник

Фісун Анатолій Іванович,

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН
України, м. Харків, провідний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, професор

Воробйов Геннадій Савельєвич,

Сумський державний університет, м. Суми,
професор кафедри наноелектроніки.

Захист відбудеться «___» _____ 2010 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 Харківського національного університету радіоелектроніки (61166, м. Харків, пр. Леніна, 14, ауд. 13).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «___» _____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Б.Г. Бородін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна наука і виробництво немислимі без точних експрес-методів виміру електрофізичних параметрів матеріалів і серед. Прецизійні виміри і дослідження їх характеристик актуальні, перш за все, для визначення властивостей зразків, вживаних в мікроелектронній промисловості, а також при вивченні малорозмірних біооб'єктів. У промисловості, насамперед сільськогосподарській, потрібна інформація про вологість сировини або продукції. Для виміру відповідних характеристик матеріалів і серед необхідна лінійка приладів, до яких пред'являються наступні вимоги: простота в експлуатації, неруйнівність зразка, портативність і можливість проведення експрес-вимірів.

Одним з найпривабливіших і перспективних методів дослідження параметрів матеріалів, застосовний у всіх вказаних галузях, є метод НВЧ діагностики – сучасний напрям радіофізики, фізики приладів, елементів і систем, вимірювальної техніки. Основним функціональним вузлом НВЧ апаратури для діагностики матеріалів з'являється датчик, який включає джерело електромагнітних хвиль, вимірювальний перетворювач і пристрої виділення інформаційних сигналів. Найбільшого поширення набули датчики на основі резонаторів. При цьому, для забезпечення безконтактності проведення експрес-вимірів, електромагнітне поле резонатора зондує зразок через отвір в одній із стінок. Такий резонаторний вимірювальний перетворювач (РВП) відноситься до апертурного типу.

Дослідженню вимірювальних перетворювачів резонаторів для мікрохвильової скануючої мікроскопії (МСМС), виміру вологовмісту в сипких матеріалах і біооб'єктах присвячена значна кількість наукових робіт. Проте, основна увага в них приділялася експериментальному дослідженню РВП з використанням оцінювальних розрахунків для відповідних конструкцій резонаторів. Існуючі теоретичні дослідження РВП носять, в основному, якісний характер. Наявні чисельні моделі РВП містять ряд спрощень і не забезпечують необхідної точності.

З врахуванням широкого використання НВЧ методів діагностики, актуальним з'являється чисельно-аналітичне моделювання РВП, яке, зокрема, дозволяє розраховувати його характеристики перетворення – первинний матеріал для подальшої комп'ютерної обробки і візуалізації результатів вимірювань. Проведення багатопараметричної оптимізації, кількісне дослідження метрологічних параметрів, обґрунтування застосування нових типів РВП і їх можливостей також потребують створення адекватної чисельної моделі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи увійшли до звітів по наступним держбюджетним темам, які проводилися по пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України, в яких здобувач брав участь у якості виконавця:

1. «Дослідження дії імпульсних електромагнітних полів на мікроструктури і моделювання електронних приладів» (№ 0101U005650), яка виконувалася в 2008 –

2010 рр. на кафедрі радіофізики та електроніки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського.

2. «Апаратно-програмний комплекс для визначення молекулярних механізмів розвитку патології організму людини і оптимізації процесу лікування кардіологічних захворювань різної етіології» (№ 0108U007614), яка виконувалася в 2008 – 2009 рр. на кафедрі мікроелектроніки, електронних приладів і пристроїв Харківського національного університету радіоелектроніки.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є встановлення і кількісний опис фізичних процесів, що визначають метрологічні характеристики ближньопольових резонаторних вимірювальних перетворювачів для НВЧ діагностики діелектричних матеріалів і серед. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Розробити чисельну модель резонаторного вимірювального перетворювача із коаксіальною вимірювальною апертурою (РВП КВА), що враховує, втрати в стінках резонатора, випромінювальні і коливальні втрати в об'єкті і повітряних зазорах.

2. Дослідити залежності добротності і чутливості РВП КВА від параметрів його геометрії і електрофізичних характеристик об'єкту діагностики.

3. Встановити особливості характеристик перетворення при вимірі вологовмісту в сипких матеріалах, біооб'єктах і мікрохвильової скануючої мікроскопії.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси взаємодії електромагнітного поля РВП КВА з діелектричними матеріалами і середами при їх НВЧ діагностиці.

Предмет дослідження – НВЧ резонаторні вимірювальні перетворювачі апертурного типу з ближньопольовою взаємодією.

Методи дослідження базуються на загальній теорії електромагнітного поля і апараті математичної фізики, зокрема, методі скінчених елементів, а також на динамічних методах виміру характеристик резонаторів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше, з використанням чисельного моделювання, отримані кількісні результати оцінки залежності добротності РВП КВА від вкладу НВЧ втрат на випромінювання в об'єкт і повітряні зазори.

2. Встановлені кількісні особливості впливу геометрії апертури РВП КВА на добротність в широкому діапазоні зміни значень ε і $tg\delta$ діелектричних об'єктів.

3. За допомогою чисельної моделі отримані характеристики перетворення удосконалених конструкцій РВП для НВЧ вологометрії сипких матеріалів і контролю вологовмісту в малорозмірних біооб'єктах.

4. Теоретично і експериментально обґрунтована оптимізована по чутливості конструкція короткохвильового РВП КВА на базі об'ємного резонатора для НВЧ діагностики діелектричних і напівпровідникових об'єктів.

Практичне значення отриманих результатів. Серед найбільш значущих результатів необхідно виділити наступні:

1. На підставі результатів чисельного моделювання, запропонована методологія оптимального вибору геометрії апертур РВП для дослідження діелектричних об'єктів, включаючи МСМС, що дозволяє цілеспрямовано підходити до їх вибору для різних застосувань.

2. Запропонована оптимальна по чутливості конструкція короткохвильового РВП КВА на базі об'ємного резонатора для НВЧ діагностики діелектричних об'єктів, ефективність якої підтверджена результатами експериментальних досліджень.

3. Розроблені теоретичні основи для подальшого удосконалення математичних моделей і розробки практичних рекомендацій щодо створення багатопараметричних вимірювальних пристроїв з використанням РВП.

4. Запропоновані і обґрунтовані методи формування інформаційних сигналів РВП, інваріантних до побічних факторів, таких як густина досліджуваного матеріалу, повітряний зазор між торцем вимірювальної апертури РВП і матеріалом.

5. Розроблена чисельна модель і методика виміру характеристик об'єктів і серед використовуються в науково-дослідній роботі кафедри радіофізики та електроніки ТНУ ім. В.І. Вернадського, в курсах лекцій і лабораторних роботах по дисциплінах: «Техніка і прилади НВЧ», «Комп'ютерна радіофізика», «Взаємодія електромагнітних хвиль з речовинами» для студентів спеціальностей 6.070201 – прикладна фізика і (7) 8.070201 – радіофізика.

Особистий внесок здобувача. У роботах, опублікованих із співавторами, здобувачеві належить: [2, 3, 16, 17] – побудова чисельної моделі, обчислювальної програми; [4, 5, 7, 9, 14, 19] – участь в аналізі результатів, проведення чисельного моделювання; [6 – 15, 18, 20] – розробка строгої чисельної моделі, що враховує випромінювальні втрати, аналіз результатів; [18] – проведення експерименту, аналіз отриманих результатів. Результати робіт [1, 16, 21] отримані здобувачем самостійно, при постановці завдань проф. Ю.Е. Гордієнко.

Апробація результатів дисертації. Результати, приведені в дисертаційній роботі, представлені і опубліковані в матеріалах наступних конференцій:

Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції студентів, аспірантів і учених «Молодь і сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій» – Севастополь, 2006 р.;

16, 17, 18, 19, 20-й Міжнародних Кримських конференціях «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» – Севастополь, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 рр.;

11, 12-м Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» – Харків, 2007, 2008 рр.;

3, 4-й Міжнародних молодіжних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій» – Севастополь, 2007, 2008 рр.;

Конференції молодих учених «Лашкарьовські читання –2008» – Київ, 2008 р.;

3-м Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» – Харків – Судак, 2008 р.;

II, III Міжнародних наукових конференціях «Електронна компонентна база. Стані перспективи розвитку» – Харків – Кацівелі, 2009, 2010 рр.

Результати роботи також доповідалися на семінарах кафедри радіофізики та електроніки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг роботи – 161 сторінка, у тому числі основного тексту – 128 с. Список використаної літератури налічує 148 назв.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в 21-й науковій публікації. Із них 5 статей в наукових журналах [3, 12, 13, 16, 17], 16 тез доповідей в матеріалах конференцій [1, 2, 4 – 11, 16, 17, 18 – 21].

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У *вступі* сформульовані основні задачі дослідження, розкрито актуальність проблеми, мета, значущість та сутність дослідження, проведено огляд результатів, що виносяться на захист, визначено особистий внесок здобувача.

У *розділі 1* визначено сучасні тенденції розвитку НВЧ діагностики матеріалів та обґрунтовано нові підходи у вирішенні найбільш суттєвих проблем.

НВЧ діагностика передбачає як дослідження фізико-технічних та фізико-хімічних властивостей, так і вимірювання параметрів матеріалів і об'єктів, що визначають шляхи створення нових приладів і технологій. Оптимальне проектування спеціалізованих РВП вимагає розробки ефективних методів розв'язання прямих і обернених електродинамічних задач і синтезу оптимальних конструкцій. Аналіз результатів попередніх розробок показує складність аналітичних досліджень та суттєву спрощеність чисельних електродинамічних методів.

Проведений аналіз як теоретичних, так і експериментальних робіт дозволяє зробити висновок, що сучасні НВЧ резонаторні вимірювальні перетворювачі для діагностики напівпровідникових структур є переважно апертурного типу, що істотно ускладнює їхні електродинамічні моделі. У НВЧ діагностиці напівпровідників із застосуванням резонаторних вимірювальних перетворювачів апертурного типу далеко не всі результати досліджень наведених у літературі можуть бути безпосередньо застосовані. Модифікація їх з урахуванням відповідної специфіки часто не виправдана в порівнянні з постановкою нових рішень конкретних задач. Тому для дослідження НВЧ резонаторних вимірювальних перетворювачів, треба створювати нові більш ефективні чисельні електродинамічні моделі.

У розділі 2 розглядаються особливості побудови і моделювання коаксіальних резонаторних вимірювальних перетворювачів (КРВП) для вологометрії сипких матеріалів. У даному розділі приводиться основна частка математичного апарату чисельного моделювання РВП, описується методика проведення чисельного моделювання, проводиться перевірка адекватності чисельної моделі на тестових завданнях, аналізується збіжність рішень чисельного методу і відповідність чисельних результатів фізичним уявленням.

Чисельна модель з використанням методу скінчених елементів передбачає вирішення хвильових рівнянь з відповідними граничними умовами:

$$\begin{aligned} \text{C}^2 E^g + k^g E^g &= 0, \\ \text{C}^2 H^g + k^g H^g &= 0, \\ \vec{\nabla} H^g, n_0 \Big|_S &= J_s^g, \\ J_s^g &= \vec{\nabla} E^g, n_0 \Big|_S \frac{\Delta \sigma_M}{1+j}, \\ (\epsilon_1^g E_1^g - \epsilon_2^g E_2^g) n_0 &= 0, \quad \vec{\nabla} (E_1^g - E_2^g), n_0 \Big|_S = 0, \\ (\mu_1 H_1^g - \mu_2 H_2^g) n_0 &= 0, \quad \vec{\nabla} n_0, (H_1^g - H_2^g) \Big|_S = 0, \\ E^g &= Z_i^g \vec{\nabla} H^g, n_0 \Big|_S, \end{aligned}$$

де E^g, H^g – комплексні вектори напруженості електричного і магнітного поля, відповідно; k^g – комплексне хвильове число, n_0 – одиничний вектор нормалі до межі розділу; J_s^g – комплексний вектор густини струму; Δ – глибина скін-шару; σ_M – провідність; Z_i^g – повний опір.

Оптимізація РВП передбачає збільшення чутливості, підвищення добротності, усунення погрішностей практичних вимірів. Звичайно моделювання характеристик РВП ґрунтується з наявності тільки коливальних втрат в стінках резонатора, діелектрику, що заповнює внутрішній об'єм резонатора і зразку. Об'єкт поза резонатором змінює випромінювальні властивості вимірювальної апертури. Внесення матеріалу до області апертури КРВП змінює умови на відкритому торці резонатора і з'являється не лише «вихід» поля резонансного коливання в об'єкт, але і його «витрата», тобто хвилеве випромінювання із резонатора. Випромінювальні втрати, що є сумою втрат на випромінювання із РВП у вільний простір і зразок, однозначно пов'язані з інформаційними сигналами РВП. Внесок випромінювальної компоненти в зміну добротності РВП при взаємодії з об'єктом залежить від електродинамічних властивостей матеріалу і геометрії апертури. Порівняння значень добротності РВП при малому $tg\delta_2$, з врахуванням втрат в стінках

резонатора показує, що навіть у разі малих значень R_1/R_2 апертури, величина втрат на випромінювання дуже істотна (рис. 2). Із графіків (рис. 2) видно, що тільки при $R_2/\lambda < 0,01$ та $tg\delta_2 > 10^{-2}$ можна нехтувати випромінювальними втратами в порівнянні з коливальними. Дані графіки ілюструють втрату енергії електромагнітних коливань на випромінювання з резонатора: добротність РВП при урахуванні випромінювальних втрат менше добротності без врахування останніх.

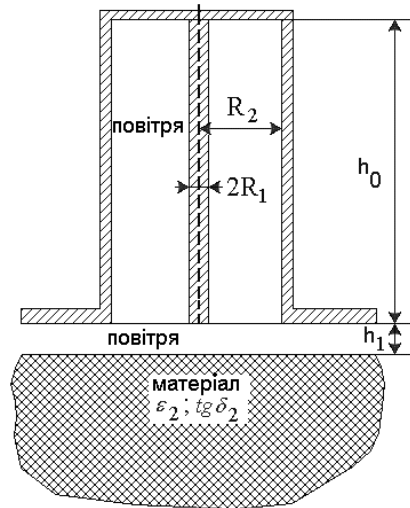


Рис. 1. Конструкція КРВП

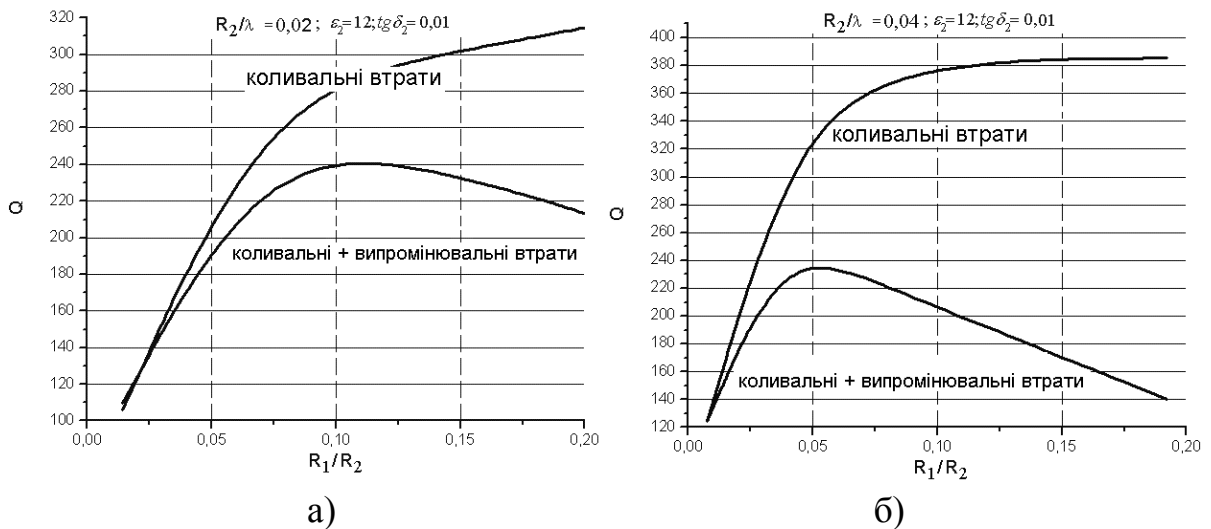


Рис. 2. Залежність добротності від величини R_1/R_2 (для параметрів моделі на рис. 1: $h_0/\lambda = 2,75$; $h_1 = 0$; $\lambda = 22$ см)

Розраховувати і аналізувати повне сімейство характеристик перетворення навіть для одного типу перетворювачів, наприклад КРВП, недоцільно. Необхідно враховувати сферу застосування і специфіку використання резонаторних вимірювальних перетворювачів. На підставі розробленої чисельної моделі з врахуванням випромінювальних і коливальних втрат, побудовані характеристики перетворення КРВП для виміру вологовмісту сипких матеріалів (рис. 3), що зв'язують інформаційні сигнали РВП (зміна частоти і добротності РВП, відносно

частоти і добротності РВП, навантаженого на вільний простір) з електрофізичними параметрами досліджуваного матеріалу (відносно діелектричною проникністю ε_2 і тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta_2$).

Зазор між торцем резонатора і матеріалом суттєво змінює інформаційні сигнали РВП. Чисельні дослідження дозволили встановити залежність інформаційних сигналів КРВП від величини зазору і електрофізичних параметрів матеріалу.

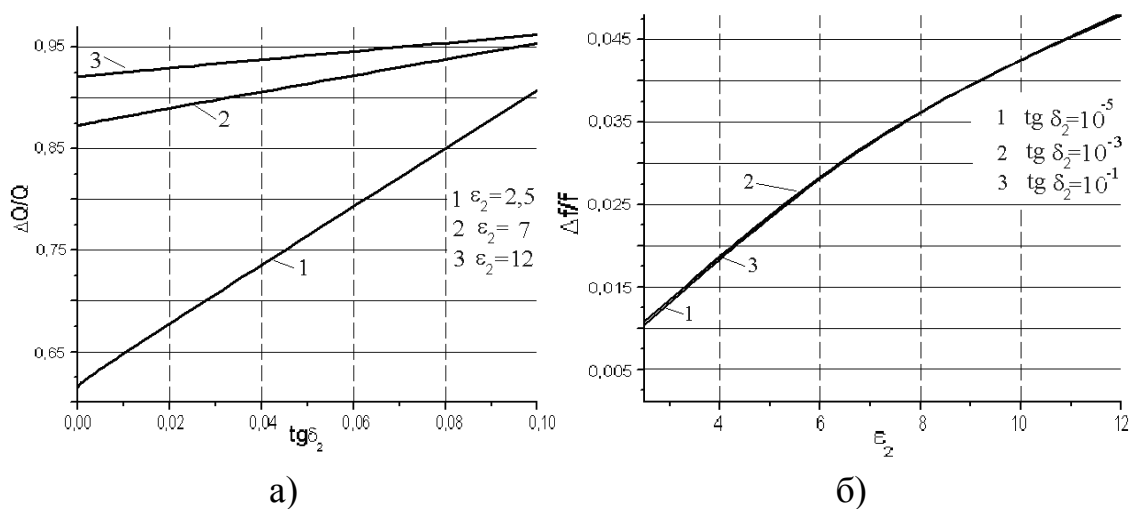


Рис. 3. Залежність зміни добротності КРВП (а), частоти (б) від електрофізичних параметрів матеріалу (для параметрів моделі на рис. 1: $h_0/\lambda = 2,75$; $h_1 = 0$; $R_2/\lambda = 0,1$; $R_1/R_2 = 0,1$; $\lambda = 22$ см)

Для збільшення добротності КРВП, запропонована конструкція датчика на основі КРВП з позамежною частиною, яка дозволяє зменшити випромінювальні втрати електромагнітної енергії і збільшити навантажену добротність.

У розділі 3 розглядаються електродинамічні особливості вдосконаленого РВП КВА для виміру вологовмісту в малорозмірних біооб'єктах.

З метою вивчення життєдіяльності організму виявляється важливим дослідження вмісту в його тканинах і рідинній середі вільної води, яка вносить основний внесок до уявної частини комплексної діелектричної проникності досліджуваного біозразка. Біооб'єкти і проби біосереді є, як правило, малорозмірними – багато менше довжини хвилі зондуючого коливання. Тому для їх НВЧ діагностики непридатні методи, традиційні в НВЧ вологометрії сипких матеріалів. Представляється доцільним розвиток відомих в НВЧ контролі параметрів матеріалів ближньопольових методів МСМС.

Біооб'єкт може містити воду в двох різних формах. Перша – це зв'язана вода, яка розглядається як частина складної сполуки, друга – вільна, здатна утворювати нові зв'язки. Відомо, що комплексне значення діелектричної проникності води, у свою чергу, залежить від її зв'язку з речовиною і частоти НВЧ поля. Наприклад, на

частоті 10 ГГц вільна вода має $\varepsilon = 82$, $\operatorname{tg}\delta = 0,55$, а зв'язана в зерні пшениці – $\varepsilon = 2..6$, $\operatorname{tg}\delta = 0,15..0,8$, відповідно. Належне із приведених вище даних високе значення тангенса кута діелектричних втрат істотно обмежуватиме чутливість НВЧ методів. Якщо орієнтуватися на перспективність варіантів резонаторів ближньопольових методів, то проблему одночасного локального і високочутливого виміру електрофізичних параметрів біооб'єктів слід вирішувати через пошук оптимальних конструкцій резонаторних вимірювальних перетворювачів, подібно як в мікрохвильовій скануючій мікроскопії. Конструкція РВП на основі коаксialного резонатора з коаксialною вимірювальною апертурою для виміру вологовмісту в біооб'єктах приведена на рис. 4.

Залежності добротності і зміни добротності РВП КВА при зміні R_0/R_2 апертури, при навантаженні на зразок з постійним ε_2 , при $\operatorname{tg}\delta_2 = 0,01$ і $\operatorname{tg}\delta_2 = 0,02$, представлені на рис. 5.

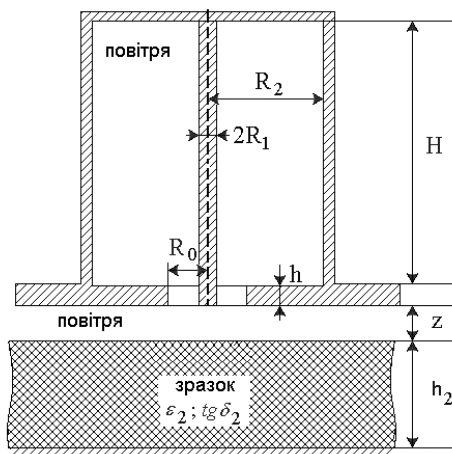


Рис. 4. Конструкція РВП КВА для виміру вологовмісту в біооб'єктах

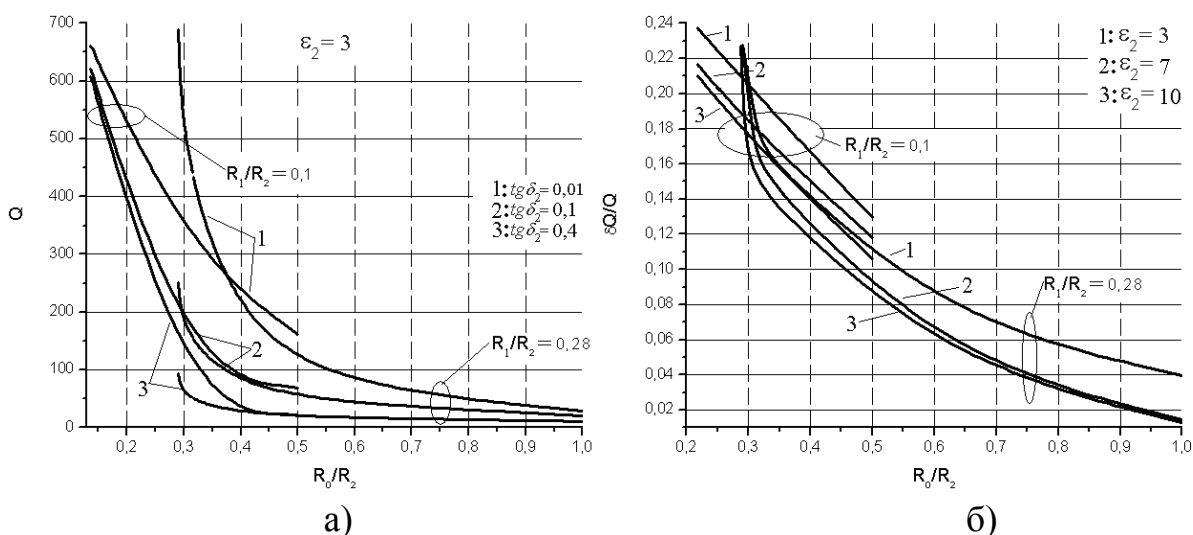


Рис. 5. Залежність добротності (а) зміни добротності (б) РВП КВА від величини апертури і параметрів зразка (для параметрів моделі на мал. 4: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $h/\lambda = 0,01$; $z = 0$; $h_2/\lambda = 0,14$; $\lambda = 3$ см)

Як видно з рис. 5, розмір апертури істотно впливає на інформаційний сигнал РВП. Вибір оптимальної геометрії вимірювальної апертури здійснюється згідно з наступними принципами: висока чутливість до зміни $tg\delta$, при збереженні високої добротності.

На підставі чисельної моделі РВП КВА в дисертаційній роботі побудовані залежності зміни добротності і частоти від електрофізичних параметрів зразка. Характеристики перетворення РВП КВА показують, що збільшення відносної діелектричної проникності зразка значно зменшує добротність РВП КВА внаслідок великого провисання електромагнітного поля з апертури перетворювача. Разом з тим, основний вплив на резонансну частоту РВП КВА надає відносна діелектрична проникність зразка.

Повітряний зазор зменшує значення відносної діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат біозразка, внаслідок чого змінюються інформаційні сигнали РВП КВА. У дисертаційній роботі досліджений вплив зазору між зразком і КВА на характеристики перетворення РВП КВА при зміні електрофізичних параметрів зразка. Встановлено, що добротність визначається переважно тангенсом кута діелектричних втрат і мало залежить від величини зазору. Це свідчить про велике провисання електромагнітного поля з апертури.

Розділ 4 присвячений аналізу процесів взаємодії поля РВП КВА з діелектричними об'єктами в мікрохвильовій скануючій мікроскопії.

Для забезпечення високої чутливості РВП повинен мати значну власну добротність. Це нездійсненно при використанні чисто коаксіальних РВП. У роботі розглянутий резонаторний вимірювальний перетворювач на основі циліндричного резонатора з коаксіальною вимірювальною апертурою (ЦРВП КВА), загальний вид якого приведений на рис. 6. Коаксіальна апертура дозволяє формувати зондувальне зовнішнє поле при збереженні достоїнств циліндричного резонатора.

Найбільш застосовними режимами функціонування ЦРВП КВА представляються режими, при яких: 1) коаксіальний мікрозонд II (рис. 6) резонансно налаштован на робочу частоту і утворює спільно з об'ємним резонатором I систему зв'язаних резонаторів, або 2) коаксіальний мікрозонд II узгоджен з об'ємним резонатором I в області їх з'єднання, але функціонує в режимі передавальної лінії, навантаженої зразком.

Узгодження коаксіального мікрозонду II (рис. 6) з об'ємним резонатором I здійснюється шляхом зміни його довжини L . При цьому режим функціонування РВП в ближньопольовій області зразка робитиме вторинний вплив на характеристики ЦРВП КВА. За допомогою чисельної моделі розрахована залежність зміни добротності конструкції ЦРВП КВА (рис. 7), при навантаженні на зразок з електрофізичними параметрами: $\varepsilon_2 = 12; tg\delta_2 = 0,05$ і $\varepsilon_2 = 12; tg\delta_2 = 0,07$.

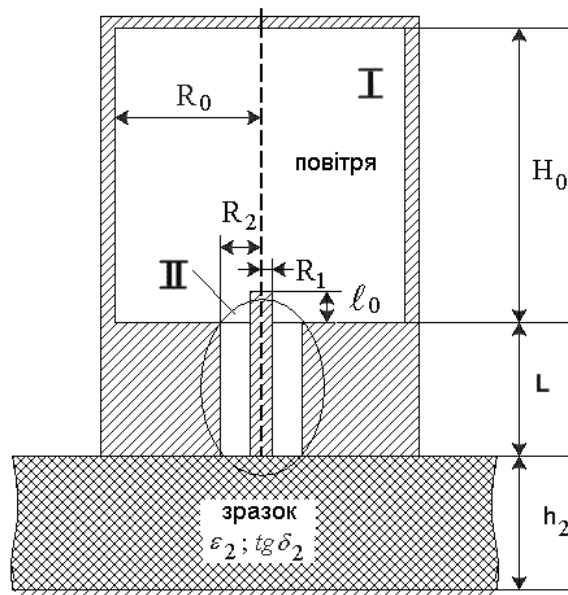
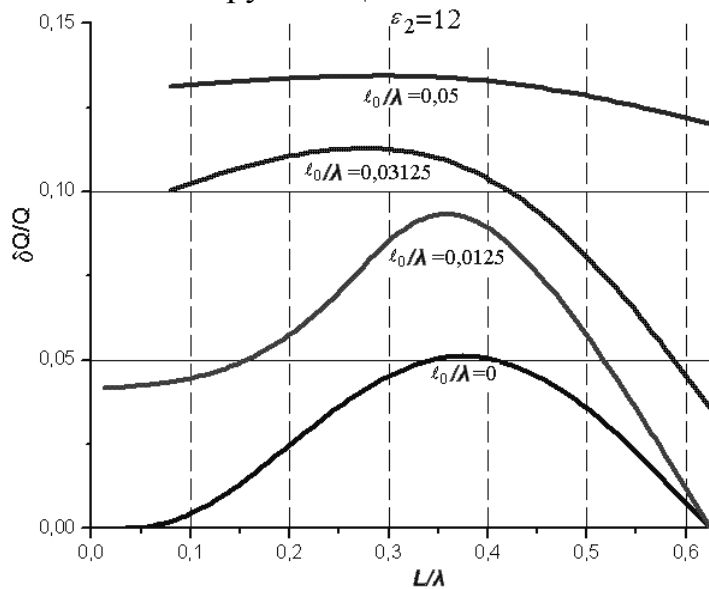


Рис. 6. Конструкція ЦРВП КВА для МСМС

Рис. 7. Залежність $\delta Q/Q$ від величини L/λ (для параметрів моделі на рис. 6: $H_0/\lambda = 0,74$; $R_0/\lambda = 0,55$; $R_2/\lambda = 0,05$; $R_1/R_2 = 0,01$; $h_2/\lambda = 0,2$; $\lambda = 8$ мм)

На залежності (рис. 7) просліджується резонансний характер узгодження мікрозонду з об'ємним резонатором при зміні довжини L для $\ell_0/\lambda = 0$ і покращення узгодження вибірковості по L при збільшенні ℓ_0/λ . Зростання чутливості РВП з підвищенням ℓ_0/λ явно свідчить про підвищення ефективності збудження коаксимальної вставки.

На підставі розробленої чисельної моделі з врахуванням випромінювальних і коливальних втрат, побудовані характеристики перетворення ЦРВП КВА для МСМС (рис. 8). Графіки (рис. 8) дозволяють зіставити інформаційні сигнали ЦРВП КВА параметрам досліджуваного зразка. При необхідності, характеристики перетворення можуть бути побудовані для певного напівпровідникового матеріалу з

конкретним ступенем легування, рухливістю носіїв заряду та ін. Разом з тим, залежності на рис. 8 не відображають вплив неоднорідностей в об'ємі зразка на інформаційні сигнали РВП. Подібного роду дослідження проведені і містяться в дисертаційній роботі.

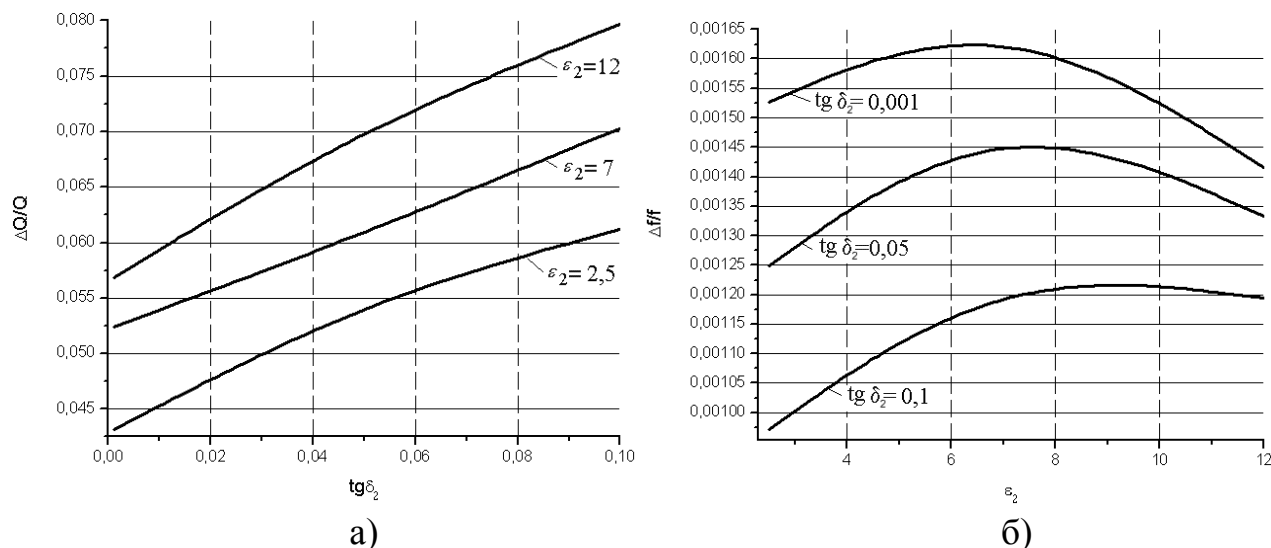


Рис. 8. Залежність зміни добротності (а), частоти (б) від електрофізичних параметрів зразка (для параметрів моделі на рис. 6: $H_0/\lambda = 0,74$; $R_0/\lambda = 0,55$; $L/\lambda = 0,37$; $R_2/\lambda = 0,05$; $R_1/R_2 = 0,01$; $h_2/\lambda = 0,2$; $\lambda = 8$ мм)

У *розділі 5* проводиться порівняння експериментальних і теоретичних інформаційних сигналів РВП, спроектованих на базі оптимізованих конструкцій, чисельні моделі яких розвинені в розділах 3 і 4 дисертаційної роботи.

Для перевірки деяких результатів чисельних моделей були сконструйовані і виготовлені РВП КВА і ЦРВП КВА з робочою довжиною хвилі $\lambda = 3$ см. Експериментальні вимірювання навантаженої добротності РВП здійснювалися з використанням методу коефіцієнта стоячої хвилі, як найбільш точного. Для експерименту були підготовлені два зразки пшеничного борошна з масовими концентраціями води: 6% і 12% і два зразки кварцового піску з масовими концентраціями води: 1% і 5%. Вологовміст визначався гравіметричним методом. Експериментальні значення електрофізичних параметрів пшеничного борошна і кварцового піску залежно від масової концентрації вологи, отримані при $\lambda = 3$ см і температурі навколишнього середовища $+20^\circ\text{C}$, узяті із довідкової літератури.

Для практичного використання в найбільшій мірі затребуваними з'являються вологоміри, показання яких не залежать від густини вимірюваної речовини (густинонезалежні виміри). В ході експерименту використана методика компенсації впливу густини матеріалу на значення вологовмісту. У даній методиці проводиться будова залежності $\Delta f/f$ від $\Delta Q/Q$ резонаторного перетворювача при різній густині досліджуваного матеріалу. При цьому кут між прямою, проведеною через

точки залежності $\Delta f/f$ ($\Delta Q/Q$) і віссю абсцис, визначає вологовміст при різній густині.

Густина матеріалів (пшеничне борошно і кварцовий пісок) в експерименті регулювалася шляхом послідовного утрамбовування проби. Теоретичні характеристики перетворення РВП, побудовані з врахуванням варіації електрофізичних параметрів пшеничного борошна і кварцового піску, що описуються рівняннями трикомпонентного діелектрика, при зміні густини матеріалу.

Результати чисельного моделювання і експериментальні дані (показані дискретними крапками) визначення вологовмісту в пшеничному борошні і піску для РВП КВА і ЦРВП КВА приведені на рис. 9. Як видно з графіків (рис. 9), залежності інформаційних сигналів РВП при зміні вологовмісту і густини при високій густині матеріалу (яким відповідають великі величини $\Delta f/f$ і $\Delta Q/Q$) близькі до лінійних.

Незважаючи на меншу чутливість ЦРВП КВА (рис. 9) даний тип РВП має більшу власну добротність, що дозволяє підвищити достовірність вимірів і розширити діапазон зміни електрофізичних параметрів досліджуваного зразка.

Слід зазначити, що приведений метод компенсації впливу густини матеріалу має значну погрішністю для РВП КВА і ЦРВП КВА (залежності інформаційних сигналів не можна повністю описати лінійними функціями), внаслідок орієнтації метода компенсації впливу густини матеріалу на резонаторні вимірювальні перетворювачі з частковим або повним заповненням резонатору досліджуваним матеріалом. Однак пошук інваріантних співвідношень, щодо густини, для даних типів РВП не з'являвся цілком даної роботи.

Максимальна різниця теоретичних і експериментальних результатів не перевищує 20%. Вона обумовлена впливом збуджуючої системи експериментальних РВП, а також низькою чистотою обробки внутрішньої поверхні резонаторів. Взагалі експериментальні дослідження підтвердили адекватність чисельної моделі і можливість її використання для розрахунку і оптимізації характеристик різних модифікацій РВП.

У додатках до дисертації наводяться деякі допоміжні факти та твердження. Зокрема, наводяться формули, на яких базується вивід основних співвідношень, проводиться оцінка випромінювальних втрат у порівнянні з коливальними, оцінюється вплив зондуючого поля на досліджувані параметри матеріалів і зразків.

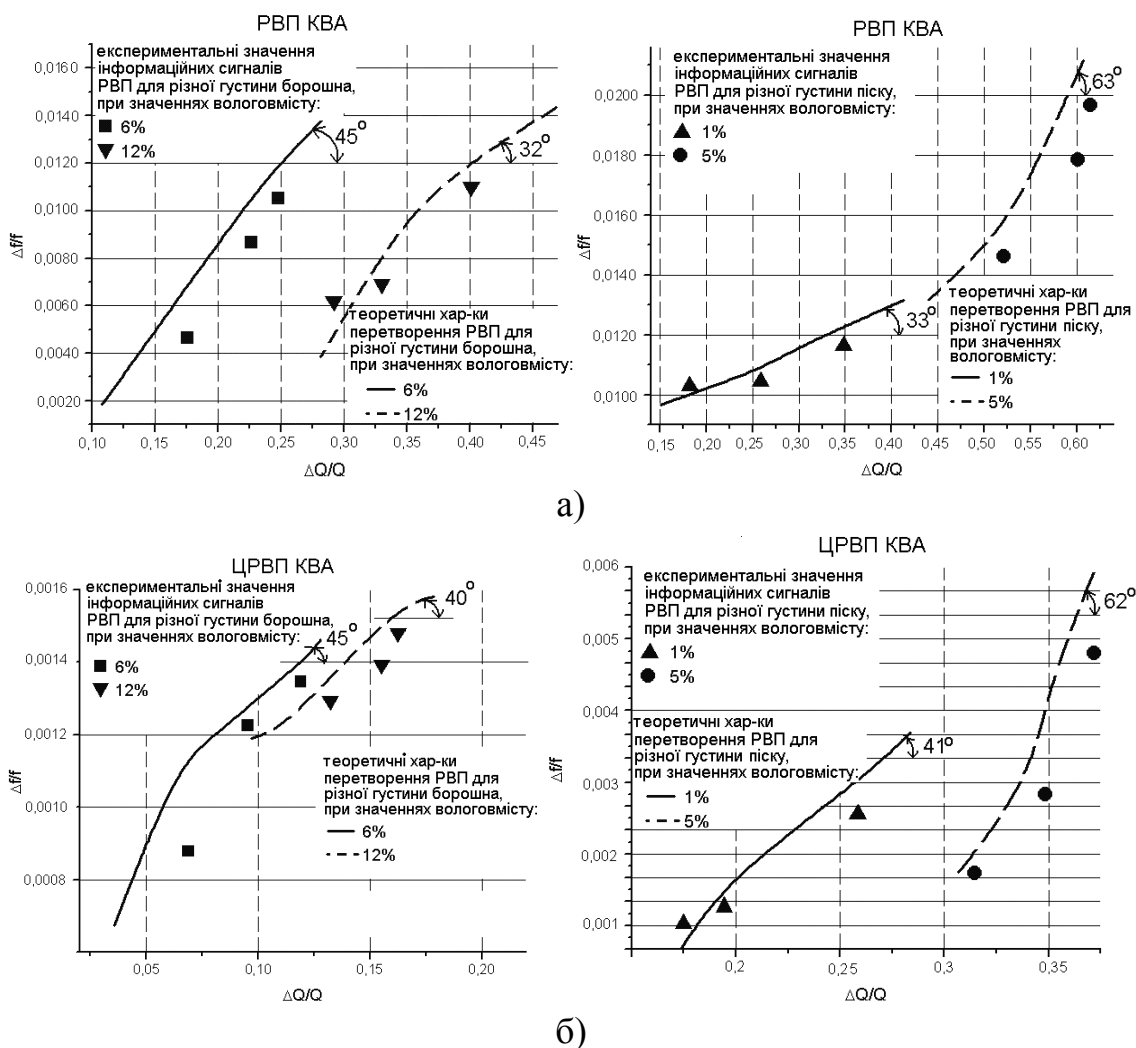


Рис. 9. Залежність інформаційних сигналів РВП КВА (а) (для параметрів моделі і експериментального РВП на рис. 4: $H/\lambda = 1,25$; $R_2/\lambda = 0,17$; $R_1/R_2 = 0,28$; $h/\lambda = 0,01$; $z = 0$; $h_2/\lambda = 0,14$; $\lambda = 3$ см), ЦРВП КВА (б) (для параметрів моделі і експериментального РВП на рис. 6: $H_0/\lambda = 0,83$; $R_0/\lambda = 0,5$; $l_0/\lambda = 0,1$; $L/\lambda = 0,22$; $R_2/\lambda = 0,07$; $R_1/R_2 = 0,14$; $\lambda = 3$ см)

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Основні результати і положення дисертаційної роботи, що складають наукову новизну і практичну цінність, можна сформулювати таким чином:

1. Існуючі резонаторні вимірювальні перетворювачі розраховувалися і конструювалися за допомогою наближених співвідношень і на підставі приблизних розрахунків. У дисертаційній роботі розроблена чисельна модель, що дозволяє досліджувати структуру поля в резонаторі, апертурі і зразку, знаходити зв'язок між електрофізичними характеристиками об'єкту і інформаційними сигналами РВП (характеристики перетворення) для подальшої комп'ютерної обробки.

2. Виконані розрахунки переконливо свідчать про те, що при використанні коаксіальної вимірювальної апертури для дослідження діелектриків з $tg\delta_2 < 10^{-2}$,

нехтування впливом втрат на випромінювання при чисельному моделюванні неприпустимо. Крім того, при проведенні теоретичного опису характеристик перетворення РВП з коаксіальною апертурою $R_2/\lambda > 0,01$, необхідно враховувати втрати на випромінювання внаслідок їхнього значного внеску і істотного падіння добротності РВП.

3. Проведена оцінка впливу повітряного зазору між торцем апертури і матеріалом та побудовані характеристики перетворення КРВП для вологомірії сипких матеріалів. На підставі розробленої чисельної моделі РВП, був проведений аналіз основних характеристик вологоміра сипких матеріалів на основі коаксіального резонатора з позамежною частиною.

4. Запропонована чисельна модель РВП КВА для виміру вологовмісту в малорозмірних біооб'єктах, на підставі якої проведена оптимізація геометрії зонда для досягнення найбільшої добротності і чутливості до відносної діелектричної проникності і тангенса діелектричних втрат одночасно.

5. На підставі моделі РВП КВА з оптимізованою геометрією, розраховані характеристики перетворення вимірювального перетворювача для виміру вологовмісту в малорозмірних біооб'єктах.

6. Позначені основні напрями оптимізації чутливості ЦРВП КВА і проведений комплекс чисельних досліджень за визначенням оптимальних співвідношень коаксіальної апертури, які слід брати за основу при проектуванні ЦРВП КВА.

7. На підставі розробленої моделі ЦРВП КВА для МСМС проведений аналіз характеристик перетворення і оцінений вплив неоднорідності в досліджуваному зразку на інформаційні сигнали резонаторного перетворювача.

8. Здійснена оптимізація геометрії мікрозонда ЦРВП КВА з робочою довжиною хвилі $\lambda = 3$ см для виміру вологовмісту в малорозмірних біооб'єктах.

9. Виготовлені ЦРВП і РВП КВА з встановленими оптимальними геометричними розмірами, проведений комплекс експериментальних досліджень. Експериментально підтверджена адекватність чисельних моделей ЦРВП і РВП КВА при порівнянні характеристик перетворення.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Полетаев Д.А.** Применение микроволновой микроскопии для исследования параметров неоднородности в полупроводниковых образцах / **Д.А. Полетаев** // Материалы международной молодёжной научно-технической конференции студентов, аспирантов и учёных «Молодёжь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ – 2006). – Севастополь, 17 – 21 апреля 2006 г. – С. 141.

2. **Полетаев Д.А.** Распределение электрического поля в зазоре коаксиального резонатора микроволнового микроскопа / **Д.А. Полетаев**, Е.П. Таран, А.А. Шадрин // Материалы 16-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и

телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006). – Севастополь, 11 – 15 сентября 2006 г. – С. 833 – 834.

3. Старостенко В.В. Динамика электротепловых процессов в диэлектрических структурах микросхем при воздействии электромагнитных полей / В.В. Старостенко, Л.Н. Ахрамович., **Д.А. Полетаев**, Е.П. Таран, Г.И. Чурюмов // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 2. – С. 45 – 49.

4. **Полетаев Д.А.** Численный расчет добротности резонатора микроволнового микроскопа в зависимости от величины связи / **Д.А. Полетаев**, Е.П. Таран, А.А. Шадрин // Материалы 11-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, 10 – 12 апреля 2007 г. – С. 185.

5. Таран Е.П. Численная модель микроволнового микроскопа с резонатором на петлевых возбуждителях / Е.П. Таран, А.А. Шадрин, **Д.А. Полетаев** // Материалы 3-й международной молодёжной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ – 2007). – Севастополь, 16 – 21 апреля 2007 г. – С. 293.

6. Старостенко В.В. Распределение токов и полей в плёночных металлодиэлектрических структурах / В.В. Старостенко, Е.П. Таран, **Д.А. Полетаев** // Материалы 17-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007). – Севастополь, 10 – 14 сентября 2007 г. – С. 667 – 668.

7. Таран Е.П. Численная оценка мощности потерь на излучение в микроволновом микроскопе / Е.П. Таран, А.А. Шадрин, **Д.А. Полетаев** // Материалы 12-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ, 1 – 3 апреля 2008 г. – С. 286.

8. **Полетаев Д.А.** Модель микроволнового микроскопа с балансной схемой / **Д.А. Полетаев**, В.В. Старостенко, Е.П. Таран, А.А. Шадрин // Материалы 4-й международной молодёжной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (РТ – 2008). – Севастополь, 21 – 25 апреля 2008 г. – С. 192.

9. Таран Е.П. Численная оценка чувствительности микроволнового микроскопа с балансной схемой / Е.П. Таран, А.А. Шадрин, **Д.А. Полетаев** // Сборник тезисов конференции молодых учёных «Лашкаръовские чтения – 2008». – Киев, 21 – 23 апреля 2008 г. – С. 20 – 21.

10. Гордиенко Ю.Е. Оценка влияния зазора на величину выходных сигналов коаксиальных резонаторных измерительных преобразователей / Ю.Е. Гордиенко, **Д.А. Полетаев**, В.В. Старостенко // Материалы 18-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008). – Севастополь, 10 – 14 сентября 2008 г. – С. 667 – 668.

11. Гордиенко Ю.Е. Компенсация влияния зазора между материалом и коаксиальным преобразователем на параметры измерителя влажности / Ю.Е.

Гордиенко, Д.А. **Полетаев**, А.А. Шадрин, Е.П. Таран // Материалы 3-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. состояние и перспективы развития» (МРФ – 2008). – Харьков – Судак, 30 сентября – 3 октября 2008 г. – С. 80 – 83.

12. Гордиенко Ю.Е. Свойства четвертьволнового коаксиального СВЧ измерительного преобразователя для диагностики материалов / Ю.Е. Гордиенко, В.В. Петров, Д.А. **Полетаев** // Радиотехника. – 2008. – № 154. – С. 61 – 66.

13. Гордиенко Ю.Е. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой / Ю.Е. Гордиенко, Ю.И. Гуд, Д.А. **Полетаев** // Радиотехника. – 2009. – № 157. – С. 108 – 114.

14. Гордиенко Ю.Е. Влияние излучательных потерь на характеристики СВЧ резонаторных преобразователей с коаксиальной апертурой / Ю.Е. Гордиенко, Ю.И. Гуд, Д.А. **Полетаев** // Материалы 19-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). – Севастополь, 14 – 18 сентября 2009 г. – С. 561 – 563.

15. Гордиенко Ю.Е. Применение резонаторного микронзонда для определения влагосодержания в биообъектах / Ю.Е. Гордиенко, В.В. Старостенко, Д.А. **Полетаев** // Материалы II международной научной конференции «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития». – Харьков – Кацивели, 30 сентября – 3 октября 2009 г. – С. 45 – 49.

16. **Полетаев** Д.А. Учет влияния зазора между образцом и коаксиальным резонаторным измерительным преобразователем / Д.А. **Полетаев** // Вестник Сумского государственного университета. – 2009. – Т. 1, № 3. – С. 74 – 78.

17. Гордиенко Ю.Е. Электродинамические характеристики усовершенствованного резонаторного микронзонда для микроволновой микроскопии и микродиагностики / Ю.Е. Гордиенко, Ю.И. Гуд, С.Ю. Ларкин, Д.А. **Полетаев** // Радиотехника. – 2009. – № 159. – С. 302 – 309.

18. Гордиенко Ю.Е. Объёмный резонаторный измерительный преобразователь с коаксиальной апертурой для определения влагосодержания в малоразмерных объектах / Ю.Е. Гордиенко, А.А. Шадрин, Д.А. **Полетаев**, В.И. Гришковец, Д.В. Турчин // Материалы 20-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). – Севастополь, 13 – 17 сентября 2010 г. – С. 1114 – 1115.

19. Гордиенко Ю.Е. Коаксиальный резонаторный измерительный преобразователь для СВЧ влагометрии / Ю.Е. Гордиенко, В.В. Старостенко, А.А. Шадрин, Д.А. **Полетаев** // Материалы 20-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). – Севастополь, 13 – 17 сентября 2010 г. – С. 1001 – 1002.

20. Старостенко В.В. Распределение токов в плёночных металлодиэлектрических структурах при воздействии мощных электромагнитных полей / В.В. Старостенко,

Е.П. Таран, М.В. Глумова, **Д.А. Полетаев** // Материалы 20-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). – Севастополь, 13 – 17 сентября 2010 г. – С. 938 – 939.

21. **Полетаев Д.А.** Некоторые особенности проведения теоретической градуировки резонаторных измерительных преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой / **Д.А. Полетаев** // Материалы III международной научной конференции «Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники». – Харьков – Кацивели, 28 сентября – 2 октября 2010 г. – С. 41 – 44.

АНОТАЦІЯ

Полетаєв Д.О. Електродинамічні особливості взаємодії полів НВЧ апертурних резонаторних вимірювальних перетворювачів з діелектричними об'єктами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2010 р.

Дисертація присвячена дослідженню і кількісному опису фізичних процесів, що визначають метрологічні характеристики ближньопольових резонаторних вимірювальних перетворювачів для НВЧ діагностики діелектричних матеріалів і серед.

У роботі запропонована вдосконалена чисельна електродинамічна модель резонаторного вимірювального перетворювача з коаксіальною апертурою, придатна для дослідження метрологічних властивостей, аналізу характеристик, оптимізації і побудови характеристик перетворення резонаторного вимірювального перетворювача, вживаних для вологометрії сипких матеріалів, мікрохвильової скануючої мікроскопії, виміру вологовмісту в малорозмірних біооб'єктах. Виконані дослідження переконливо свідчать про те, що при використанні коаксіальної вимірювальної апертури для дослідження діелектриків з $tg\delta_2 < 10^{-2}$, зневажа впливом втрат на випромінювання при чисельному моделюванні неприпустимо. Для апертур $R_2/\lambda > 0,01$ при проведенні теоретичного опису характеристик перетворення резонаторного вимірювального перетворювача, необхідно враховувати втрати на випромінювання, зважаючи на їх значний внесок і істотне падіння добротності резонатора.

Ключові слова: НВЧ резонатор, резонаторний вимірювальний перетворювач, апертура, характеристики перетворення, мікрохвильова скануюча мікроскопія.

АННОТАЦИЯ

Полетаев Д.А. Электродинамические особенности взаимодействия полей СВЧ апертурных резонаторных измерительных преобразователей с диэлектрическими объектами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2010 г.

Диссертация посвящена исследованию и количественному описанию физических процессов, определяющих метрологические характеристики ближнеполевых резонаторных измерительных преобразователей для СВЧ диагностики диэлектрических материалов и сред.

В работе предложена усовершенствованная численная электродинамическая модель резонаторного измерительного преобразователя с коаксиальной апертурой, пригодная для исследования метрологических свойств, анализа характеристик, оптимизации и построения характеристик преобразования резонаторного измерительного преобразователя, применяемых для влагометрии сыпучих материалов, микроволновой сканирующей микроскопии, определения влагосодержания в малоразмерных биообъектах. Выполненные исследования убедительно свидетельствуют о том, что при использовании коаксиальной измерительной апертуры для исследования диэлектриков с $tg\delta_2 < 10^{-2}$, пренебрежение влиянием потерь на излучение при численном моделировании недопустимо. Для апертур $R_2/\lambda > 0,01$ при проведении теоретического описания характеристик преобразования резонаторного измерительного преобразователя необходимо учитывать потери на излучение, ввиду их значительного вклада и существенного падения добротности резонатора.

Проведена оценка влияния воздушного зазора между торцом апертуры и сыпучим материалом и построены характеристики преобразования коаксиального резонаторного измерительного преобразователя для влагометрии сыпучих материалов.

На основании разработанной численной модели резонаторного измерительного преобразователя, проведен анализ основных характеристик влагомера сыпучих материала на основе коаксиального резонатора с запредельной частью.

Предложена численная модель резонаторного измерительного преобразователя с коаксиальной измерительной апертурой для определения влагосодержания в малоразмерных биообъектах, на основании которой проведена оптимизация геометрии зонда для достижения наибольшей добротности и чувствительности к относительной диэлектрической проницаемости и тангенсу диэлектрических потерь одновременно.

На основании модели резонаторного измерительного преобразователя с коаксиальной измерительной апертурой с оптимизированной геометрией, проведено теоретическое описание характеристик преобразования измерительного преобразователя для определения влагосодержания в малоразмерных биообъектах.

Обозначены основные направления оптимизации чувствительности резонаторного измерительного преобразователя на основе цилиндрического

резонатора с коаксиальной измерительной апертурой и проведен комплекс численных исследований по определению геометрии микрозонда, соотношений L/λ , R_1/R_2 , R_2/λ коаксиальной апертуры, которые следует брать за основу при проектировании.

На основании разработанной модели резонаторного измерительного преобразователя на основе цилиндрического резонатора с коаксиальной измерительной апертурой для микроволновой сканирующей микроскопии проведен анализ характеристик преобразования и оценено влияние неоднородности в исследуемом образце на информационные сигналы резонаторного преобразователя.

Осуществлена оптимизация геометрии микрозонда резонаторного измерительного преобразователя на основе цилиндрического резонатора с коаксиальной измерительной апертурой для определения влагосодержания в малоразмерных биообъектах, при $\lambda = 3$ см.

Проведен комплекс экспериментальных исследований оптимизированных конструкций резонаторных измерительных преобразователей. Экспериментально подтверждена адекватность численных моделей.

Ключевые слова: СВЧ резонатор, резонаторный измерительный преобразователь, апертура, характеристики преобразования, микроволновая сканирующая микроскопия.

ABSTRACT

Poletaev D.A. Electrodynamics features of interaction microwave aperture resonant measuring converters' fields with dielectric objects. – Manuscript.

The dissertation for obtaining scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences by speciality 01.04.01 – physics of devices, elements and systems. – Kharkiv national university of radioelectronics, Kharkiv, 2010.

Thesis is devoted to research and the quantitative description of the physical processes defining metrological characteristics of resonant near-field measuring converters for the microwave diagnostics of dielectric materials and mediums.

In work the advanced numerical electrodynamic model resonant measuring converter with the coaxial aperture is offered. On the basis of the this model research of metrological properties, the analysis of characteristics and optimization constructions of characteristics of transformation resonant measuring converter are spent.

The executed researches authenticate that at use of the coaxial measuring aperture for research dielectrics with $tg\delta_2 < 10^{-2}$, the neglect influence of losses on radiation at numerical modelling is inadmissible.

For the microwave aquametry with apertures $R_2/\lambda > 0,01$ at carrying out of the theoretical description of transformation characteristics resonant measuring converter it is necessary to consider losses on radiation.

Keywords: microwave resonator, resonant measuring converter, aperture, characteristics of transformation, scanning microwave microscopy.