

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію Лукаша Олексія Сергійовича “Напівсферичні відкриті резонатори міліметрового діапазону для визначення параметрів твердих діелектриків”, яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – “Фізика та астрономія”

Актуальність дослідження. Дисертацію Олексія Лукаша присвячено задачі радіофізики, яка стосується пошуку нових вимірювальних пристроїв для визначення електрофізичних параметрів речовин зі застосуванням відкритих резонансних систем вкрай високочастотного діапазону. У зв'язку з цим в дисертаційній роботі додатково досліджуються особливості збудження вищих аксіально-симетричних та аксіально-несиметричних коливань у напівсферичних відкритих резонансних системах, включених до хвилевідної лінії передачі чотирьох міліметрового діапазону довжин хвиль. Обидві відмічені задачі є актуальними в радіофізиці та техніці міліметрового діапазону, розв'язки яких є необхідними для створення нових та вдосконалення існуючих пристроїв та приладів різного призначення. Дослідження, які пов'язані з освоєнням міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль та коливань та визначенням електрофізичних параметрів речовин в частотних діапазонах, що їм відповідають, є пріоритетними для України.

Метою наукових досліджень дисертаційної роботи є виявлення фізичних особливостей та закономірностей збудження вищих власних коливань напівсферичних неоднорідних відкритих резонаторів за допомогою зосереджених елементів зв'язку та застосування цих резонаторів як вимірювальні комірки в пристроях для визначення діелектричних проникностей твердих речовин за виміряними спектральними та енергетичними характеристиками резонаторів.

Ступінь наукової обґрунтованості та наукова новизна результатів роботи. Достовірність результатів, що наведені в роботі, підтверджується узгодженням результатів, що отримані при аналітичному аналізі та чисельно-обчислювальними методами, зокрема, моделюванням у CST-студії, з тими, що отримані експериментально за допомогою класичних методів вимірювання частоти, спектру, розподілу поля робочого коливання та коефіцієнтів розсіювання енергії електромагнітної хвилі на неоднорідності, яка є складовою частиною електродинамічної структури, що досліджується. При цьому аналітичний аналіз базувався на розв'язанні системи рівнянь Максвелла та матеріальних рівнянь, які однозначно описували неоднорідну електродинамічну структуру, математичне моделювання якої здійснювалося зі застосуванням добре апробованих методів математичної фізики.

Наукова новизна результатів, що отримані Лукашем О. С. та наведені в дисертаційній роботі, є в наступному:

1. Вперше продемонстровано, що коли нормована відстань між дзеркалами $L/R = 0,72 \div 0,76$ (де L і R — відстань між дзеркалами і радіус сферичного дзеркала відповідно), у напівсферичному відкритому резонаторі разом з TEM_{00q} -коливанням збуджується поверхневе коливання на сферичному дзеркалі. При цьому елемент зв'язку резонатора з зовнішнім трактом може знаходитися як на сферичному, так і на плоскому дзеркалі.
2. Вперше показано, що аксіально-симетричні TEM_{01q}^* -коливання, які збуджуються у напівсферичному відкритому резонаторі за допомогою елементів зв'язку, що зміщені до периферії сферичного відбивача, мають на осі симетрії резонатора область з нульовою напруженістю електричного поля, а їхня структура поля являє собою симбіоз двох вищих аксіально-несиметричних TEM_{10q} - і TEM_{20q} -коливань.
3. Вперше експериментально підтверджено, що напівсферичний відкритий резонатор, який узгоджено навантажений відрізком круглого надрозмірного хвилеводу, що співвісно зчленований з плоским дзеркалом, може застосовуватися для визначення електрофізичних параметрів твердих діелектриків у формі дисків. Така резонансна система може застосовуватися як у вкрай високочастотному, так і терагерцовому (ТГц) діапазонах.

Список публікацій здобувача за матеріалами дисертації містить 4 наукові статті, з

яких 3 опубліковано в науковому фаховому виданні України, а 1 — в зарубіжному виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку. Усі видання включено до наукометричних баз Scopus і Web of Science. Крім того, результати дисертації апробовані на 4 міжнародних наукових конференціях та опубліковані в збірниках їх праць, з яких 3 індексуються в наукометричній базі Scopus.

Структура та зміст дисертації. Загальний обсяг дисертації складається зі 156 сторінок, з яких 120 сторінок є основний текст, та містить анотацію, перелік умовних позначень, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і один додаток зі списком публікацій здобувача за темою дисертації. Робота містить 51 рисунок, а список використаних джерел складається зі 145 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано вибір теми досліджень, освітлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами та грантами, наведено мету, завдання та методи дослідження, сформульовано наукову новизну отриманих результатів та відмічено їх практичне значення, описано особистий внесок здобувача в опублікованих працях, список яких наведено окремо за анотацією та в додатку, а також представлено апробацію матеріалів дисертації.

У *першому розділі* дисертаційної роботи розглянуто особливості мікрохвильових методів і пристроїв для визначення електрофізичних параметрів речовин. Наведено методи та засоби визначення діелектричної проникності та тангенсу кута втрат речовин. Розглянуто власні моди відкритого резонатора, який утворено увігнутими металевими дзеркалами, та визначено його навантажену добротність. Представлено розробку методики визначення діелектричної проникності матеріалу зі застосуванням резонаторного методу. Зокрема, показано, що резонаторні методи визначення електрофізичних параметрів речовини, зразок з якої є складовою частиною резонатора, спроможні забезпечити високу чутливість вимірюваних спектральних та енергетичних характеристик до зміни як діелектричної проникності зразку внаслідок впливу зовнішніх факторів, так і геометричних розмірів резонатора та його навантаження.

Другий розділ дисертації присвячено дослідженню поверхневих коливань у відкритих резонаторах із криволінійними відбивачами. Представлено блок-схему вимірювального стенду характеристик напівсферичного відкритого резонатора, що утворений плоским та сферичним металевими дзеркалами, відстань між якими не перевищує радіуса сферичного дзеркала. Резонатор включено в чотирьох-міліметрову лінію передачі із прямокутних хвильоводів. Наведено результати вимірювань резонансного коефіцієнта передачі резонаторного тракту залежно від відстані між дзеркалами для основних TEM_{00q} -мод резонатора. На підставі поведінки розподілу полів TEM_{00q} -мод у напівсферичних резонаторах, що мають однакові апертури дзеркал, але різні радіуси кривизни криволінійних відбивачів, виявлено поверхневе коливання під час зміни відстані між ними. Показано, що воно локалізується на увігнутій поверхні сферичного дзеркала резонатора в площині магнітної складової H власної TE_{10} -хвилі підвідного прямокутного хвильоводу. За нормованих відстаней між дзеркалами $L/R = 0,72 \div 0,76$, у разі яких відкритий резонатор має максимальну величину навантаженої добротності, поверхневе коливання взаємодіє з основною TEM_{00q} -модом резонатора, оскільки має з нею один клас симетрії. Це необхідно враховувати при вимірюванні електрофізичних параметрів твердих діелектриків методом відкритого резонатора.

Додатково розглянуто відкритий резонатор, в якому сферичне дзеркало замінюється системою / плоске дзеркало–плоско-опукла діелектрична лінза з поверхнею у вигляді гіперболоїда обертання. Виконані дослідження показали, що у такому резонаторі також збуджується поверхневе коливання, яке взаємопов'язане з TEM_{00q} -модом резонатора, що в підсумку призводить до погіршення його спектральних характеристик. Виявлено, що поверхневе коливання локалізоване в області у вигляді смуги на опуклій поверхні діелектричної лінзи. На відміну від попереднього випадку це коливання існує на опуклій поверхні діелектричної лінзи в площині електричної складової E власної TE_{10} -хвилі підвідного прямокутного хвильоводу.

У *третьому розділі* наведено результати збудження TE_{10} -хвилі у прямокутному

хвильоводі полем вищого типу коливання TEM_{20q} напівсферичного відкритого резонатора. Як правило, для визначення електрофізичних параметрів твердих листових діелектриків резонаторним методом зі застосуванням напівсферичного відкритого резонатора плоскопаралельний зразок розташовується на поверхні плоского дзеркала, поблизу якого фронт власної TEM_{00q} -моди резонатора також плоский. При цьому поперечні розміри зразків відносно осі симетрії резонатора повинні бути більші за діаметр «плями» поля основної TEM_{00q} -моди на плоскому дзеркалі. Для зменшення розмірів зразків запропоновано їх розміщувати в площині перетину відрізка надрозмірного прямокутного чи круглого хвильоводу, що приєднується до плоского дзеркала зі збереженням симетрії системи. В свою чергу для зменшення геометричних розмірів хвильоводів в резонаторі необхідно збуджувати вищі його власні *аксіально-несиметричні* коливання, каустики полів яких притискаються до осі симетрії системи. Чим вище поперечний індекс коливання, яке збуджується, тим сильніше воно стягується до осі резонатора. Завдяки цьому можливе використання зразків невеликих розмірів. Якраз у зв'язку з відміченою особливістю досліджено ефективність збудження TE_{10} -хвилі у прямокутному хвильоводі полем вищої TEM_{20q} -моди напівсферичного відкритого резонатора. Чисельні розрахунки показали, що для ефективного збудження власної TE_{10} -хвилі прямокутного хвильоводу за допомогою центральної «плями» поля TEM_{20q} -моди його розкрив у площині дзеркала резонатора повинен представляти собою *E*-секторіальний рупор.

Наведено опис експериментального стенду дослідження напівсферичного відкритого резонатора, який узгоджено навантажений в центрі плоского дзеркала відрізком прямокутного хвильоводу з плоскопаралельним зразком діелектрика. Результати експериментальних досліджень показали, що в такій резонансній системі втрати зростають у середньому на 9,6 дБ порівняно з порожнім резонатором. Таким чином, з'ясовано, що застосування дослідженої резонансної системи є недоцільним для визначення електрофізичних параметрів твердих діелектриків у ВВЧ-діапазоні.

У *четвертому розділі* дисертації досліджено збудження *аксіально-симетричних* коливань у напівсферичному відкритому резонаторі. Показано, що амплітудний розподіл електричної компоненти аксіально-симетричного поля TEM_{01q}^* -моди, яку збуджено у резонаторі елементом зв'язку, що розташований на периферії одного з дзеркал, є гібридною структурою електричних полів власних TEM_{20q} - і TEM_{10q} -мод резонатора. Головна різниця між TEM_{01q}^* -модом та TEM_{20q} - і TEM_{10q} -модами є в наявності області з нульовою напруженістю електричного поля в центрі дзеркала, що свідчить про можливість використання резонансної системи для визначення електрофізичних параметрів речовин, зокрема, рідин в кюветі, зразок яких має шайбоподібну форму. У цьому випадку зразок розміщується співвісно вздовж осі симетрії резонатора. Показано, що змінюючи радіус кривизни сферичного дзеркала та місце розташування елемента зв'язку на дзеркалі, можна регулювати розмір області з нульовою напруженістю електричного поля по відношенню до діаметру трубки з рідиною, яка досліджується. Це особливо важливо при дослідженні рідин з великими втратами.

У *п'ятому розділі* наведено результати досліджень неоднорідної електродинамічної системи, що складається з напівсферичного відкритого резонатора, до плоского дзеркала якого приєднано співвісно круглий хвильовід з діелектричним плоскопаралельним диском всередині нього. Диск розміщено перпендикулярно осі симетрії системи в цілому. Визначено ефективність збудження власної TE_{11} -моди круглого хвильоводу центральною «прямою» поля власної TEM_{10q} -моди відкритого резонатора. Наведено функціональну схему та детальний опис елементів експериментального стенду для вимірювання характеристик резонансної електродинамічної системи. За результатами експериментальних досліджень структур полів робочих мод в резонансній системі, відносних амплітуд електричних полів вимушених коливань як відкритих резонаторів, так і резонаторів навантажених відрізком круглого хвильоводу з неоднорідністю, які відрізняються відстанями між дзеркалами, та розрахункових залежностей нормованих напруженостей електричних полів коливань напівсферичного відкритого резонатора на плоскому дзеркалі від поперечної координати і чисельного

модельовання резонансної системи в мікрохвильовому пакеті CST-студії показано, що запропонована електродинамічна система може бути застосована для визначення електрофізичних параметрів речовин у вкрай високочастотному та ТГц-му діапазонах. Розроблена методика була апробована для визначення діелектричних проникностей фторопластового та полістиролового дисків на частотах 73,988 ГГц та 72,968 ГГц відповідно. При цьому відносні похибки значень проникностей відповідно становили 1,12% та 3,58%.

Практичне значення наукових результатів, що отримані та наведені у дисертаційній роботі Лукаша О. С., полягає у розробці науково-технічної основи для створення діелектрометрів у вкрай високочастотному діапазоні на базі відкритих резонаторних систем з зосередженими елементами зв'язку. Розроблений резонаторний метод дозволяє визначати електрофізичні параметри плоских діелектриків. Розробка таких методів важлива для визначення параметрів діелектриків з низькими втратами, які використовуються у друкованих платах і смугових антенах міліметрового діапазону довжин хвиль.

Відомості про дотримання академічної доброчесності. Поршень правил академічної доброчесності у наведених результатах роботи не виявлено. Запозичені результати інших авторів мають посилання на першоджерела.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. У дисертації наведені результати досліджень дійсної частини діелектричної проникності твердих діелектриків. Вважаю, що дисертантові варто було б звернути увагу на визначення другої важливої для практичних застосувань характеристики діелектриків — діелектричних втрат, тобто відносної уявної частини діелектричної проникності $\text{tg} \delta$.
2. У тексті роботи зустрічаються різні найменування одного і того ж пристрою, а саме: «поглинаючий зонд», «пробне тіло» і «тестове тіло».
3. На стор. 29 одне з речень виглядає незавершеним, оскільки в ньому відсутній присудок, ймовірно з технічних причин.

Всі наведені недоліки не стосуються основних результатів роботи, а їх здолання буде корисними у подальших дослідженнях автора.

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим нормам

Зміст дисертації Лукаша О. С. “Напівсферичні відкриті резонатори міліметрового діапазону для визначення параметрів твердих діелектриків” дає підставу вважати її завершеною науковою працею, яка відповідає вимогам МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення Дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р., а автор роботи, Лукаш Олексій Сергійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – “Фізика та астрономія”.

Рецензент

Кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України

Геннадій ЄРМАК

Підпис Г. П. Єрмака засвідчую.
В. о. вченого секретаря
ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України



Олена КРИВЕНКО