

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Лукаша Олексія Сергійовича “Напівсферичні відкриті резонатори міліметрового діапазону для визначення параметрів твердих діелектриків”, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – фізика та астрономія.

Актуальність дослідження.

Останнім часом з'являється багато видів штучно створених діелектриків, призначених для використання в радіофізиці, електроніці та інших областях науки і практики. Для побудови радіофізичних комплексів різного призначення, елементи яких виготовлені з таких матеріалів, важливо знати їх електромагнітні параметри, зокрема ε' та $\operatorname{tg} \delta$. Існують різні методи вимірювання параметрів діелектриків, у тому числі і резонаторний метод.

Для визначення електромагнітних параметрів діелектриків у міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль часто використовується відкритий резонатор (ВР), який утворений металевими дзеркалами. Коли резонатор утворений увігнутими дзеркалами, дифракційні явища на краях дзеркал є неістотними. Це є перевагою такого резонатору.

Але доцільніше вимірювати електромагнітні параметри з використанням ВР, утвореного плоским і увігнутим дзеркалами. У цьому випадку зразок досить просто фіксується на поверхні плоского дзеркала, де коливання резонатора теж має плоский фазовий фронт.

Використання дводзеркального ВР дозволяє отримати значення ε' та $\operatorname{tg} \delta$ діелектриків за виміряними резонансними частотами і добротностями в міліметровому і субміліметровому діапазонах довжин хвиль. Крім того, метод дводзеркального ВР дозволяє визначати геометричні розміри (товщину) листових матеріалів з періодом неоднозначності, що дорівнює довжині хвилі в діелектрику.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Лукаша О.С. актуальна для практики і буде актуальною в майбутньому.

Ступінь наукової обґрунтованості та наукова новизна результатів роботи.

Достовірність результатів дисертаційної роботи базується на використанні відомих чисельних методів розв'язання задач електродинаміки та порівняння теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень.

При проведенні експериментів використано відомий метод пробного тіла, який дозволяє вимірювати структуру електричних полів різних типів коливань, що збуджуються в резонаторах (у тому числі за допомогою щілинних та апертурних елементів зв'язку).

Наукова новизна дисертаційної роботи Лукаша О.С. визначається наступним:

1. Вперше продемонстровано, що при нормованих відстанях між дзеркалами $L/R=0,72\div 0,76$ у напівсферичному резонаторі разом з коливанням TEM_{00q} збуджується поверхневе коливання, яке обумовлено співвідношенням апертури криволінійного відбивача та розміром плями поля основного коливання на ньому. Збудження цього поверхневого коливання у ВР не залежить від того, де знаходиться елемент зв'язку: на сферичному чи плоскому дзеркалі.

2. Вперше показано, що аксіально-симетричні коливання TEM_{01q}^* , які збуджуються в резонаторі за допомогою елементів зв'язку, зміщених до периферії криволінійного відбивача, мають у центрі область з нульовою напруженістю електричного поля, а структура поля являє собою симбіоз двох вищих аксіально-несиметричних коливань TEM_{10q} і TEM_{20q} .

3. Вперше експериментально показано, що наявність вставки плоскої форми в центрі сферичного дзеркала призводить до збудження в резонаторі як першого вищого коливання не TEM_{20q} , структура поля якого описується

функціями Ерміта-Гауса, а TEM_{10q} , яке є аксіально-симетричним і структура поля якого описується функціями Лагера-Гауса.

Визначено, що ефективність збудження хвилі TE_{11} у відрізку круглого хвилеводу, розташованого в центрі одного з дзеркал ВР, становить 90% за умови $\tilde{a} = a/w_0 = 0,6042$. Завдяки цьому має місце додаткова кутова селекція спектру коливань резонатора.

4. Вперше експериментально встановлено, що складовий ВР з відрізком круглого надрозмірного хвилеводу з хвилею TE_{11} може використовуватися для визначення електромагнітних параметрів твердих діелектриків у формі дисків.

Структура і зміст дисертації. Результати дисертаційної роботи повністю відображено у 8 публікаціях: в 4 наукових статтях, які індексуються в міжнародній наукометричній базі даних Scopus, а також у 4 збірниках матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях, три з яких теж індексуються в цій базі даних.

Дисертація містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, перелік використаних джерел та перелік публікацій автора.

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі роботи, наведено стислу характеристику результатів, ступінь їх апробації та перелік публікацій.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу існуючих методів вимірювання параметрів діелектриків, наведена їх класифікація. Обґрунтовано причину вибору резонансного методу вимірювань параметрів діелектриків.

У другому розділі дисертаційної проведено аналіз характеристик напівсферичного (при розтушуванні зразка діелектрика на поверхні плоского дзеркала) та діелектрично-лінзового ВР. Зроблено обґрунтований висновок, що доцільніше використовувати напівсферичний ВР. Причина такого висновку полягає в тому, що в цьому випадку не потрібно юстувати зразок

діелектрика перпендикулярно осі резонатора, що необхідно робити при використанні сферичних дзеркал.

Наведена структурна схема експериментальної установки, представлені результати вимірювань.

У *третьому розділі* роботи наведені результати досліджень ефективності збудження хвилі TE_{10} у прямокутному хвилеводі за допомогою коливань ВР TEM_{20q} напівсферичного резонатора та окремих «плям» поля. Наведена схема експериментальної установки і проведені вимірювання.

Результати досліджень показали, що ефективність збудження хвилі TE_{10} у прямокутному хвилеводі, створеному в центрі плоского дзеркала напівсферичного ВР за допомогою центральної плями поля вищого аксіально-несиметричного коливання TEM_{20q} , дорівнює 0,8901. Водночас $\tilde{a} = a/w_0 = 0,9986$, $\tilde{b} = b/w_0 = 1,9799$.

У *четвертому розділі* дисертаційної роботи показано, що при розташуванні елемента зв'язку не в центрі криволінійного відбивача в резонаторі збуджуються аксіально-симетричні коливання, які не описані в літературі, а амплітудний розподіл електричної компоненти аксіально-симетричного поля коливання TEM_{01q}^* , збудженого у ВР елементом зв'язку, розташованим на периферії одного з дзеркал, є гібридною структурою електричних полів коливань TEM_{20q} і TEM_{10q} . Головна різниця між коливаннями TEM_{01q}^* та вказаними вище полягає в наявності області з нульовою напруженістю електричного поля в центрі дзеркала.

У *п'ятому розділі* дисертаційної роботи проведено теоретичний аналіз залежності ефективності збудження $\eta(\tilde{a})$ TE_{11} моди в круглому хвилеводі за допомогою центральної плями поля коливання TEM_{10q} . Розрахунки показали, що її значення досягає 0,8993 за умови $\tilde{a} = a/w_0 = 0,6042$. Експериментальні дослідження підтвердили, що наявність у центрі криволінійного відбивача плоскої діелектричної вставки діаметром щонайменше дві довжини хвилі призводить до збудження аксіально-симетричних коливань у резонаторі.

Амплітудний розподіл електричного поля цих коливань описується функціями Лагера-Гауса. Водночас сам ВР може не мати аксіальну симетрію.

Практичне значення наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі Лукаша О.С. полягає в наступному.

1. У роботі представлена методика створення діелектрометрів у ВВЧ діапазоні на основі відкритих резонансних систем із зосередженими елементами зв'язку.

2. Розгляд складеного ВР, в якому збуджується аксіально-симетричне коливання $ТЕМ_{10q}$, а в центрі одного з дзеркал є відрізок круглого хвилеводу, дозволить створити ефективний інтерференційний ключ при порівняно невеликих напруженнях пробою. Це відкриває можливість побудови компресорів імпульсної потужності у ВВЧ діапазоні на базі ВР.

3. Розгляд аксіально-симетричних коливань ВР $ТЕМ_{01q}^*$, які збуджуються в резонаторі за допомогою елементів зв'язку, зміщених до периферії криволінійного відбивача і які мають в центрі область з нульовою напруженістю електричного поля, дозволить визначати електромагнітні параметри твердих діелектриків у формі дисків навіть з великими втратами.

Відомості про дотримання академічної доброчесності. У дисертаційній роботі та публікаціях Лукаша О.С. неправомірних запозичень та ознак порушення академічної доброчесності не виявлено.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. Не сформульовані фізичні критерії ефективності збудження. Використовуються вирази «ефективність збудження», однак не вказано, що приймається за критерій: коефіцієнт зв'язку, ККД передачі потужності, інтеграл перекриття полів або інший параметр.

2. Не обговорюються обмеження застосовності отриманих результатів. Наприклад, бажано було б провести аналіз впливу якості обробки дзеркал, точності їх виготовлення, товщини зразків і юстування системи на збудження досліджуваних коливань.

3. Вимірювання просторового розподілу поля скрізь зроблено у першій пучності поля біля плоского дзеркала резонатора. Було б цікаво зняти розподіл поля ближче до увігнутого дзеркала (або лінзи) або виконати чисельне моделювання для підтвердження збудження поверхневого коливання.

4. На рис. 1.2 не підписані елементи рисунка (а-в). Також часто не пояснені номери елементів на схемах експериментальних стендів, що ускладнює їх ідентифікацію.

5. На рис. 2.5 (і подібних рисунках) краще було б поєднувати точки резонансного коефіцієнта проходження сусідніх мод пунктиром, оскільки на проміжних положеннях дзеркала коефіцієнт проходження близький до нуля.

6. На стор. 15 «Поперечні розміри зразків повинні перевищувати діаметр плями поля...». Більш правильно «Поперечні розміри зразків мають перевищувати діаметр плями поля...».

7. На стор. 80 «...даний вираз диференціюємо по x ...». Має бути «...даний вираз диференціюємо по x ...». На стор. 91 наприкінці першого абзацу замість «рисунок 4.4» має бути «рисунок 4.3».

Зроблені зауваження не впливають на якість, наукову новизну та практичну значимість дисертації.

Висновок щодо відповідності дисертації нормам.

Вважаю, що дисертаційна робота Лукаша О.С. “Напівсферичні відкриті резонатори міліметрового діапазону для визначення параметрів твердих діелектриків” є завершеною науковою працею, яка містить ряд нових наукових та практичних результатів, що важливі для вимірювання параметрів штучно виготовлених діелектриків у міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль. Дисертація повністю відповідає вимогам наказу 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 її автор, Лукаш Олексій Сергійович заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та Астрономія».

Рецензент: доктор фіз.-мат. наук, ст. досл.,
старший науковий співробітник
відділу радіоспектроскопії

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України



Сергій ПОЛЕВОЙ

Підпис Полевого С.Ю. засвідчую.

В.о. вченого секретаря

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України

кандидат фіз.-мат. наук



Олена КРИВЕНКО