

ЗАСТОСУВАННЯ ВІДКРИТИХ РЕЗОНАТОРІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАМАТЕРІАЛІВ У КВЧ-ДІАПАЗОНІ

Когут О.Є., Кузьмичов І.К.

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

Національної академії наук України, Харків, Україна

E-mail: hazar70@gmail.com

APPLICATION OF OPEN RESONATORS TO RESEARCH THE METAMATERIALS PROPERTIES IN THE ENF RANGE

A variant of technical implementation of an open resonator for measuring the electromagnetic characteristics of metamaterials by the resonance method in the ENF range is proposed. Preliminary studies have shown that the quality factor of such a resonant system does not deteriorate due to abnormally small power losses. The proposed resonator has unimodal resonance characteristics, which allows to increase the accuracy and unambiguity of measurements of material parameters.

В усіх провідних країнах світу вже кілька десятиліть проводяться дослідження нового класу штучно створених речовин – метаматеріалів, які мають абсолютно унікальні електромагнітні властивості, такі як: інверсія доплерівського зсуву частоти; зміна напрямку випромінювання Вавілова – Черенкова; негативна рефракція на межі розділу та ін. Завдяки цим властивостям такі композитні матеріали (метаматеріали) можуть знайти та знаходять застосування в антенній техніці, вимірювальних системах, наноелектроніці та нанотехнологіях. На сьогоднішній день кількість наукових публікацій з дослідження метаматеріалів, що виконуються провідними науковими центрами США, Євросоюзу та Японії, є досить великою. Проте отримані в цих роботах результати носять часом суперечливий характер. Тому одним з ключових завдань є отримання достовірної інформації про електромагнітні властивості метаматеріалів у КВЧ- та терагерцовому діапазонах. Для цього доцільно застосовувати резонансні методи дослідження, які забезпечують вищу точність результатів у порівнянні з іншими. Основна ідея таких методів полягає в спостереженні відгуку резонатора, що містить зразок досліджуваного матеріалу. Вивчення резонансних кривих до і після внесення зразка дозволяє за зміною добротності резонатора і зсувом резонансної частоти визначити як дійсну частину діелектричної проникності, так і тангенс кута втрат.

У НВЧ-діапазоні для вимірювання діелектричної проникності метаматеріалів найбільш перспективний циліндричний резонатор, що перебудовується, в якому збуджується коливання H_{01n} [1]. Використання резонатора, що перебудовується, дозволяє застосовувати генератор, що працює на фіксованій частоті. Це дозволяє здійснювати частотну стабілізацію генератора і, отже, підвищувати точність вимірювань. При цьому розташування зразка по осі резонатора, де напруженість електричного поля мінімальна, якраз і дозволяє вимірювати електрофізичні параметри метаматеріалів, які можуть

характеризуватись великими втратами. Однак, при переході до КВЧ-діапазону зменшуються геометричні розміри циліндричного резонатора, які пропорційні робочій довжині хвилі.

У той самий час при укороченні довжини хвилі λ зростає поверхневий опір R_s металу, з якого зроблено резонатор, оскільки $R_s = \pi\sqrt{120/\sigma\lambda}$ [2], де σ – питома провідність металу. Якщо збільшувати геометричні розміри, тобто переходити до надрозмірних резонансних систем, то в цьому випадку в резонансному об'ємі поряд з коливанням H_{01n} будуть збуджуватися інші коливання, наприклад, E_{11n} , у якого така ж фазова швидкість, як і у робочого коливання. Тому необхідно вживати додаткових заходів для селекції спектру в таких резонаторах, що є досить складним технічним завданням. У зв'язку з цим у КВЧ-діапазоні необхідно переходити до резонансних систем, що використовують поширення хвиль у вільному просторі – відкритих резонаторів (ВР). Особливістю таких резонансних систем є те, що, крім високої добротності, їх геометричні розміри становлять кілька десятків довжин хвиль, а зв'язок із вільним простором забезпечує додаткову селекцію спектра коливань та вільний доступ до резонансного об'єму.

Відкритий резонатор є високочутливим інструментом вимірювання електромагнітних характеристик речовин [3,4]. Під час проведення досліджень використовуються, зазвичай, плоскі зразки, а в резонаторі збуджується нижній тип коливання TEM_{00q} (q – поздовжній індекс коливання). Завдяки застосуванню напівсферичної геометрії резонатора усуваються помилки, пов'язані з визначенням кутового положення зразка, оскільки останній у цьому випадку розміщується на плоскому дзеркалі ВР [5,6].

При проведенні вимірювань зразок повинен розташовуватись у максимумі електричної компоненти поля стоячої хвилі в ВР, що забезпечує найбільшу точність вимірювань. При цьому однією з основних умов застосування методу ВР для вимірювання електромагнітних характеристик речовин є малі втрати потужності у зразку матеріалу, що вимірюється, оскільки тільки в цьому випадку ВР разом із зразком залишається високодобротною резонансною системою і зберігаються всі переваги такого методу вимірювань. Для діагностики за допомогою ВР сильнопоглинаючих речовин (метаматеріали), товщина зразка повинна бути меншою за величину скін-шару.

У ряді практичних випадків необхідно досліджувати метаматеріали, які мають циліндричну форму. І тут виникають технічні труднощі, пов'язані з розташуванням такого зразка в об'ємі резонатора, оскільки при кожному вимірюванні останній повинен поміщатися в область з тією самою напруженістю електричного поля. Використання зразків з великими втратами може призвести до зриву коливання в ВР, оскільки діаметр досліджуваної речовини, як правило, перевищує товщину скін-шару. Ця обставина накладає обмеження по застосуванню ВР для дослідження електрофізичних властивостей метаматеріалів циліндричної форми. Таким чином, можна сказати, що на сьогоднішній день відсутні методи та засоби для вимірювання основних характеристик матеріалів у зазначених вище частотних діапазонах.

Найбільш перспективною для дослідження таких матеріалів є запропонована авторами відкрита резонансна система [7,8]. Така резонансна система є ВР, в центрі одного з дзеркал якого виконаний відрізок круглого хвилеводу (Рис.1). У такому хвилеводі збуджується лише хвиля TE_{01} , хоча його діаметр становить кілька довжин хвиль, тобто він є надрозмірним. Проведені попередні дослідження показали, що добротність такої резонансної системи практично не погіршується через аномально малі втрати хвилі TE_{01} . Такий резонатор має унімодальну резонансну характеристику (Рис.2). Це дозволяє підвищити точність і однозначність вимірів. З іншого боку, розташування зразка метаматеріалу в області лінійної зміни електромагнітного поля (вісь резонатора) також забезпечує підвищення точності вимірювань в такій системі [9].

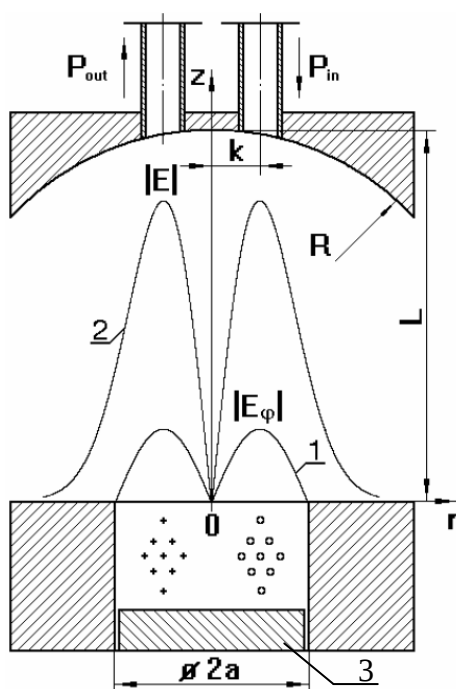


Рис.1. Геометрія поперечного перерізу півсферичного ВР:
1 – амплітудний розподіл складової електричного поля E_ϕ ;
2 – розподіл поля хвилі TE_{01} в площині $z = 0$;
3 – досліджуваний матеріал.

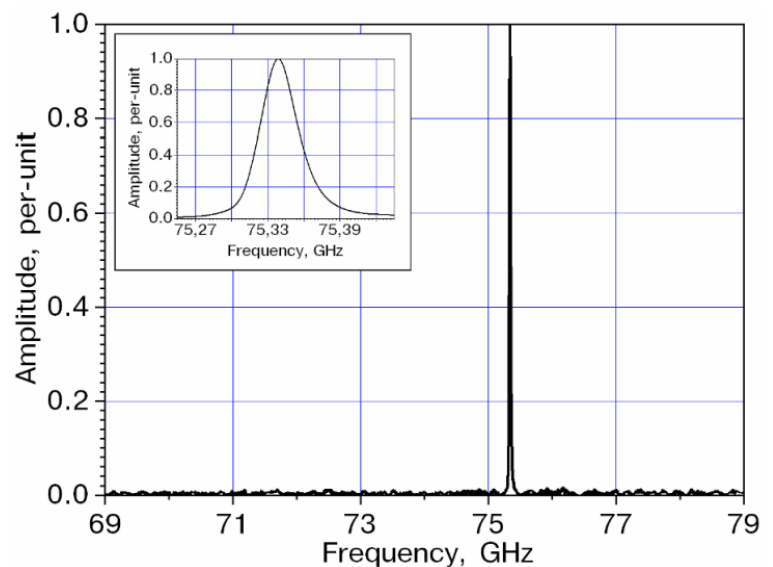


Рис.2. Спектр мод півсферичного ВР з круглим хвилеводом у середині плоского дзеркала при навантаженій добротності резонатора $QI \approx 3140$.

Налаштування системи в резонанс можна здійснювати за допомогою дзеркала відкритого резонатора, на якому розташовані елементи зв'язку. Це, у свою чергу, дозволяє працювати на фіксованій частоті, що, як було зазначено вище, дуже важливо для частотної стабілізації генератора і сприяє підвищенню точності вимірювань.

Розв'язання вищезазначених завдань неможливе без розробки строгих математичних методів аналізу основних властивостей метаматеріалів та розглянутих вище відкритих резонансних систем з аксіально-симетричними типами коливань. Це пов'язано з тим, що наближені методи аналізу таких

складних резонансних систем, не дозволяють отримати повну картину фізичних процесів, що відбуваються в них.

Авторами було проведено попередні дослідження з вимірювання діелектричної проникності та тангенсу кута втрат відомих матеріалів за допомогою запропонованої резонансної системи у короткохвильовій частині міліметрового діапазону довжин хвиль ($\lambda=4$ мм). У якості матеріалів були досліджені відомі матеріали: фторопласт (малі втрати, $\text{tg}\delta \approx 3 \times 10^{-4}$) та плексиглас (великі втрати, $\text{tg}\delta \approx 1,1 \times 10^{-2}$). Діаметри циліндричних зразків становили 18 мм, а товщина дорівнює приблизно 3 мм. Результати отриманих вимірювань перебувають у добрій відповідності з даними інших авторів [10] і тут є широке поле подальшої діяльності. Авторами розроблено математичний апарат для аналізу подібних резонансних систем. Тому цікаво розглянути зворотне завдання щодо визначення основних електрофізичних параметрів матеріалів за відомими відгуками резонатора з речовиною та без (навантажена добротність та резонансна частота). А оскільки така резонансна система, як зазначено вище, має лише один резонансний відгук у смузі частот близько 10 ГГц і в ній практично відсутні дифракційні втрати, то вирішення подібного завдання представляється реальним не лише у вказаному діапазоні, але й на значно вищих частотах, включаючи й терагерцовий частотний діапазон [11].

Література

1. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Госуд. изд-во физ. – мат. лит-ры, 1963. – С. 108.
2. Ширман Я.Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. – М.: Госуд. изд-во лит-ры по вопросам связи и радио, 1959. – С. 89.
3. М.Н. Афсар, К.Дж. Баттон. Измерение диэлектрических характеристик материалов в диапазоне миллиметровых волн // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 1. – С. 143–167.
4. M.N. Afsar, X. Li, H. Chi. An automated 60 GHz open resonator system for precision dielectric measurement // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. - 1990. – V. 38, No 12. – P. 1845–1852.
5. K.H. Breeden, J.B. Langley. Fabry – Perot cavity for dielectric measurement // Rev. Sci. Instr. – 1969. – V. 40, No 9. – P. 1162–1163.
6. R.G. Jones. Precise dielectric measurements at 35 GHz using an open microwave resonator // Proc. IEE. - 1976. - V. 123, No 4. - P.285- 290.
7. Пат. 67978 А Україна, МПК ⁷ G 01 R 27/26. Відкритий резонатор для вимірювання діелектричної проникності матеріалів / І.К. Кузьмичов, Г.М. Глибицький, П.М. Мележик.
8. I.K. Kuzmichev, P.N. Melezhik and A.Ye. Poedinchuk. An open resonator for physical studies // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2006. – V. 27, No 6. – P. 857–869.
9. Kuzmichev I.K., Popkov A.Yu. Resonance system for analyzing cylindrical samples in millimeter wave band // Telecommunications and Radio Engineering. – 2012. – V. 71, No 14. – P. 1247-1257.
10. Kuzmichev Igor K., Popkov Aleksey. Yu. Resonant Systems for Measurement of Electromagnetic Properties of Substances at V-Band Frequencies // Emerging Microwave Technologies in Industrial, Agricultural, Medical and Food Processing. - Published in London, United Kingdom, by IntechOpen. - 2018. – 203 p. - Chapter 3. – P. 27-53. – 203 p. ISBN: 978-1-78923-408-4.
11. Авдєєнко Г. Л. Терагерцові технології в телекомунікаційних системах. Частина 1. Обґрунтування частотного діапазону, проектування функціональних вузлів телекомунікаційних систем терагерцового діапазону / Г. Л. Авдєєнко, С. Г. Бунін, Т. М. Наритник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – №4(148). – с.72-91.