



УКРАЇНА

(19) UA (11) 84051 (13) C2
(51) МПК (2006)
G01R 27/26
G01N 22/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) КВАЗІОПТИЧНИЙ ДІЕЛЕКТРОМЕТР

1

(21) а200609295
(22) 23.08.2006
(24) 10.09.2008
(46) 10.09.2008, Бюл.№ 17, 2008 р.
(72) ГУБІН ОЛЕКСІЙ ІВАНОВИЧ, UA, ЛАВРИНОВИЧ ОЛЕКСАНДР АНТОНОВИЧ, UA, ЧЕРПАК МИКОЛА ТИМОФІЙОВИЧ, UA
(73) ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ ІМ. О.Я.УСИКОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, UA
(56) UA 16396 U, 15.08.2006
UA 4983 U, 15.02.2005
SU 991828 A, 07.01.1985
SU 1626136 A1, 07.02.1991
SU 1107072 A, 07.08.1984
UA 59568 A, 15.09.2003
JP 2004177234, 24.06.2004

2

(57) 1. Квазіоптичний діелектрометр, що містить діелектричний резонатор, виконаний у вигляді диска, та з'єднані з ним дві торцеві провідні пластини, надвисокочастотний генератор для збудження хвиль типу шепочучої галереї та приймач, який відрізняється тим, що у резонаторі виконаний радіальний отвір радіусом $r_0 \leq \lambda_p / 4$, де λ_p - довжина хвилі у досліджуваній речовині, для розміщення в ньому ємності з досліджуваною речовиною.

2. Діелектрометр за п. 1, який відрізняється тим, що в резонаторі та в одній з торцевих провідних пластин виконано співвісні отвори, з'єднані з радіальним отвором і розташовані на відстані $r_1 = R/2$ (де R - радіус резонатора) від бокової поверхні резонатора, а ємність виконана з можливістю переміщення досліджуваної речовини.

Винахід, що пропонується, відноситься до вимірювальної техніки надвисоких частот (НВЧ) в галузі мікрохвильової техніки для визначення комплексної діелектричної проникності та може знайти застосування у таких галузях народного господарства, де діелектрична проникність твердих, порошкоподібних та рідких речовин або розчинів обумовлює їх якість, чи можливість використання у різноманітних пристроях.

Знання дійсної ϵ' та уявної ϵ'' частин діелектричної проникності $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ досліджуваної речовини є дуже важливим. Воно надає можливість визначити габаритні розміри розроблених пристроїв, прогнозувати їх чутливість та частотний діапазон використання. Важливим параметром діелектрометра є об'єм речовини необхідний для вимірювання дійсної та уявної частин діелектричної проникності, а також для визначення динаміки вказаних величин в залежності від частоти, тиску, температури або зміни властивостей досліджуваної речовини, наприклад, при дослідженні потоку рідини чи сипучої речовини. Мінімальна кількість необхідної для дослідження

речовини може бути вагомим фактором в біологічних та медичних дослідженнях.

Останнім часом великий розвиток отримали надвисокочастотні (НВЧ) методи для точного вивчення діелектричних властивостей рідких матеріалів, включаючи різні біооб'єкти, що містять воду (Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. - М.: Изд-во Моск. Авиационного института, 1999.- 412с.). Саме інформативність діапазону надвисоких частот (НВЧ) дає можливість реєструвати слабкі ефекти у водних розчинах, що пояснюється істотною відмінністю характеристик взаємодії "вільних і "зв'язаних" молекул" води з електромагнітним випромінюванням. У разі малих концентрацій водні розчини є діелектриками з великими втратами ($\text{tg } \delta \approx 1$), для яких стандартні методи вимірювання, як правило, неприйнятні (Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Физматгиз, 1963.- 404с; Шестопапов В.П., Яцук К.П. Методы измерения диэлектрических проницаемостей веществ на сверхвысоких частотах // Успехи физ. наук. - 1961.-74.-С.721-755.).

З укороченням довжини хвилі для дослідження різних речовин з діелектричною проникністю та

(13) C2

(11) 84051

(19) UA

тангенсом кута діелектричних втрат у діапазоні частот 20-300 ГГц більш широке застосування знайшли відкриті системи резонаторів, що володіють достатньою чутливістю, зручністю в експлуатації. Добротність їх може досягати достатньо високих значень, що дозволяє з великою точністю виміряти малі значення втрат. З цієї точки зору все більш зручними стають методи вимірювання, засновані на квазіоптичному розповсюдженні хвиль. Серед даного типу систем резонаторів особливо виділяються квазіоптичні діелектричні резонатори (КДР) з хвилями шепочучої галереї, що дозволяють працювати у достатньо широкому діапазоні довжин хвиль (Ді-електрические резонаторы. /М.Е.Ильченко, В.Ф.Взятыйшев, Л.Г.Гасанов и др./ Под ред. М.Е.Ильченко. -М.: Радио и связь, 1989.- 328 с.).

Відомо, що для дослідження матеріалів з діелектричною проникністю $\epsilon' = 1-100$ та тангенсом кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta = (\epsilon''/\epsilon') \leq 10^{-1}$ у діапазоні частот 20-300 ГГц доцільно використовувати в діелектрометрах вимірювальний діелектричний резонатор з азимутальними коливаннями (Диэлектрические резонаторы /М.Е.Ильченко, В.Ф.Взятыйшев, Л.Г.Гасанов и др.; Под ред. М.Е.Ильченко. - М.: Радио и связь, 1989.- 328 с.) Вибір матеріалу для виготовлення вимірювального діелектричного резонатора залежить від величин ϵ' та ϵ'' матеріалу, що досліджується. Якщо досліджуються речовини з малими втратами $\text{tg}\delta \leq 10^{-3}$ та діелектричними проникностями $\epsilon' \geq 10$, то й матеріал для виготовлення вимірювального резонатора доцільно вибрати з подібними характеристиками: наприклад, діелектричний дисковий резонатор з лейкосапфіру забезпечує похибку при вимірюванні $\epsilon' \pm 0,05\%$ а $\text{tg}\delta = 1\%$. Високі точності в таких резонаторах обумовлені їх високою власною добротністю Q_0 в міліметровому діапазоні хвиль ($Q_0 \sim 10^5$ при кімнатній температурі та $Q_0 \sim 10^8-10^9$ при температурі рідкого гелію). Недоліками цього матеріалу є анізотропія діелектричної проникності лейкосапфіру ($\epsilon_{\parallel} = 11.6$; $\epsilon_{\perp} = 9.6$), що необхідно брати до уваги в прецизійних вимірюваннях, а також труднощі при обробці цього матеріалу, його твердість дорівнює 9, а питома вага - 4, тому обробку проводять алмазними інструментами.

Відомим є діелектричний резонатор, який дозволяє вимірювати діелектричну проникність рідин, газів та сипучих матеріалів з малими втратами (А. С. СССР №1107072 МКИ³ G 01 R 27/26; G 01 K 7/10, 1984), який виготовлено у вигляді циліндра із високодобротного діелектрика з осьовим отвором, кільцевими канавками по боковій поверхні, з'єднаними з осьовим отвором радіальними проходами. Недоліками цього пристрою є відносна складність резонатора, велика кількість рідини або газу для повного занурення резонатора в досліджувану речовину, розміри резонатора повинні задовольняти певним умовам,

що пов'язують радіус резонатора з довжиною хвилі та діелектричними проникностями матеріалу резонатора та досліджуваної речовини. Діелектрична проникність речовини має бути меншою від проникності матеріалу резонатора.

Відомий пристрій для вимірювання параметрів діелектричних матеріалів (А. с. СССР №991828 МКИ⁴ G 01 R 27/26, 1985). Він має вимірювальний резонатор у вигляді діелектричного диску з вирізом, поєднаного з надвисокочастотним генератором, та індикатор. Виріз може бути виконаний у вигляді радіальної щілини або отвору, вісь якого паралельна осі діелектричного диску, окрім цього пристрій має механізм, що змінює ширину радіальної щілини. У вимірювальному діелектричному резонаторі збуджується хвиля типу "шепочучої галереї", котра двократно вироджена по азимутальному індексу. При розміщенні досліджуваного діелектричного матеріалу в щілині знімається виродження власних коливань, яке властиве резонаторам біжучої хвилі. Кожна з резонансних частот вимірювального резонатора розщеплюється на дві стоячі хвилі, одна з них має пучність поперечного (електричного) поля, а друга - вузол того ж поля в місці знаходження нерегулярності. Недоліком цього пристрою є необхідність виготовлення вимірювальних зразків за розмірами щілини або отвору у резонаторі, досить великі розміри зразків, інакше необхідно враховувати повітряні зазори у щілині чи отворі, що знижує точність вимірювання діелектричної проникності. Не можна на цьому пристрої вимірювати дійсну та уявну частини діелектричної проникності рідин, сипучих та газоподібних речовин.

Найбільш близьким за технічною суттю є квазіоптичний діелектрометр (Патент України № 59568 А МКИ⁷, G01R27/26, 2003), який містить вимірювальний діелектричний резонатор, поєднаний з надвисокочастотним генератором для збудження хвиль типу "шепочучої галереї" та приймачем. У резонаторі, затиснутому двома металевими пластинками з отворами, створена канавка з концентричними боковими поверхнями так, щоб досліджувана речовина, що заповнює цю канавку, взаємодіяла з полем хвилі "шепочучої галереї", які збуджуються діелектричними хвилями. Канавка заповнена вимірювальною речовиною фіксується знизу дном канавки, а зверху - одною з металевих пластин. Спектр резонансних частот кільцевого діелектричного резонатора вимірюється за схемою "на проходження" при слабкому зв'язку. Експериментальне вимірювання частоти та добротності коливань, що спостерігаються, визначається їх тип, а потім виміряні частоти та добротності порівнюються з теоретичними.

Недоліком цього пристрою є неможливість його використання для дослідження рідин малих об'ємів, до яких можуть відноситись біологічні об'єкти та різні бінарні з'єднання та які мають великі значення діелектричних втрат. При роботі з даним типом резонатора досліджуваній речовині надається форма диска (кільця). В цьому випадку, при роботі з рідкими діелектриками важко забез-

печити однорідність досліджуваної речовини, що вимірюється, по товщині, яка порушується унаслідок поверхневого натягнення або утворення пухирців на поверхні в області поля. Ці труднощі особливо виразні у разі рідин, які мають високі діелектричні втрати (наприклад, вода, ацетон та інші). Наявність навіть дуже маленького пухирця повітря в канавці з рідиною може привести до великих погрешностей, що унеможливує її досліджування у динамічному режимі.

В основу винаходу поставлено задачу удосконалення квазіоптичного діелектрометра шляхом взаємодії хвилі шепочучої галереї максимальної амплітуди поля з досліджуваною речовиною, що забезпечить підвищення точності вимірювання та розширення діапазону значень діелектричних втрат.

Поставлена задача вирішується тим, що у квазіоптичному діелектрометрі, що містить вимірювальний діелектричний резонатор, виконаний у вигляді диска, з двома торцевими провідними пластинами, надвисокочастотний генератор для збудження хвиль типу шепочучої галереї та приймач, згідно винаходу, у резонаторі має місце радіальний отвір радіусом $r_0 \leq \lambda_p / 4$ (де λ_p - довжина хвилі у досліджуваній речовині) для розміщення в ньому ємності з досліджуваною речовиною. Резонатор та одна з торцевих провідних пластин можуть мати співвісні отвори, з'єднані з радіальним отвором і розташованими на відстані $r_1 = R/2$ (де R - радіус резонатора) від бокової поверхні резонатора, а ємність може бути виконана з можливістю переміщення досліджуваної речовини.

Суть винаходу пояснюється ілюстраціями: на фіг.1 зображено діелектрометр за п.1; на фіг.2 зображено діелектрометр за п.2; на фіг.3 показано порівняння частотного зсуву для досліджуваних рідин (етиловий спирт, ацетон, вода), розташованих у ємності, відносно ємності з повітряним заповненням.

Запропонований квазіоптичний діелектрометр має діелектричний резонатор 1, з радіальним отвором 2 радіусом $r_0 \leq \lambda_p / 4$ (де λ_p - довжина хвилі у досліджуваній речовині) для розміщення в ньому ємності 3 з досліджуваною речовиною, який затиснуто між двома металевими пластинами 4. Для збудження хвиль шепочучої галереї у діелектричному резонаторі використовуються дзеркальні хвилеводи 5 та 6, які з одного боку з'єднані з генератором (хвилевод 5), а з другого - з приймачем (хвилевод 6). Висоту h резонатора 1 вибрано такою, щоб збуджувалися лише коливання з аксіальним числом 1, це виконується за умови $L \leq \lambda$, де λ_n - довжина хвилі, на якій працює діелектрометр, а радіус вимірювального резонатора $R = \lambda_n / 2n\pi$, де n - число довжин хвиль по периметру резонатора. Ємність 3 може бути виконана з можливістю дослідження речовини, як фіксованого об'єму за п.1 формули, так і для проточної речовини через отвори у резонаторі 7 та металевій пластині 8, розташовані на відстані $r_1 = R/2$ (де R - радіус резонатора) від бокової

поверхні резонатора і з'єднані з радіальним отвором 2 у разі використання формули за п.2.

Запропонований пристрій працює таким чином: у діелектричному резонаторі 1 з дзеркальними діелектричними хвилеводами 5 та 6 збуджуються хвилі шепочучої галереї. Спектр резонансних частот резонатора 1 вимірюється за схемою "на проходженні" при слабкому зв'язку. Експериментальне вимірюються частоти та добротності коливач, що спостерігаються, визначається їх тип, а потім вимірює частоти та добротності порівнюються з відповідними величинами для резонатора - зразками, виміряними на цьому ж діелектрометрі, або порівнюються з теоретично розрахованими, що дає можливість, в подальшому, отримувати діелектричні характеристики досліджуваних речовин.

Запропонований квазіоптичний діелектрометр було виготовлено та випробувано у діапазоні 36,5 - 41,0 ГГц, діаметр резонатора дорівнював 78 мм, його висота - $L = 7,2$ мм, внутрішній діаметр ємності для дослідження речовини змінювався від 0,3 мм до 2,6 мм. Найменший внутрішній діаметр ємності з фторопласту забезпечував мінімальну кількість досліджуваної речовини, що досить вагомо для біофізичних та медико-біологічних досліджень.

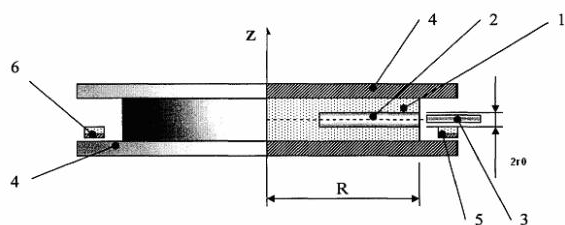
Квазіоптичний діелектрометр було випробувано на рідинах - вода, етиловий спирт, ацетон, в тому числі, в динамічному стані - при проходженні рідини через ємність розташовану у резонаторі.

Вибір розміру отвору $2r_0$ для розміщення в ньому досліджуваної речовини ($r_0 \leq \lambda/4$, де λ_p - довжина хвилі у досліджуваній речовині) пов'язано з розповсюдженням електромагнітної хвилі у такому середовищі. Встановлено, що сильний вплив речовини на частоту поля у резонаторі спостерігається тільки при окремій товщині шару (глибини проникності електромагнітної хвилі у речовину), близький до значення $\lambda_p/4$. Товщина цього шару залежить від діелектричних параметрів досліджуваних речовин (ϵ'). Звідси маємо, що товщина цього шару $x \approx \lambda_p/4$ і буде визначати максимальний розмір отвору $2r_0 \approx 2x \approx \lambda_p/2$ для дослідження тієї чи іншої речовини. Збільшення його приведе до значно більшого впливу на структуру поля у резонаторі та можливий появі ефекту зміни знака зсуву частоти та збільшення втрат, що є небажаним при проведенні таких досліджень. (Лавринович А.А. Влияние глубины проникновения поля в жидкость с большими потерями на спектральные характеристики дискового квазиоптического диэлектрического резонатора. // Радиофизика и электроника.- Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.- 2005.-9, №1.-С. 164-168).

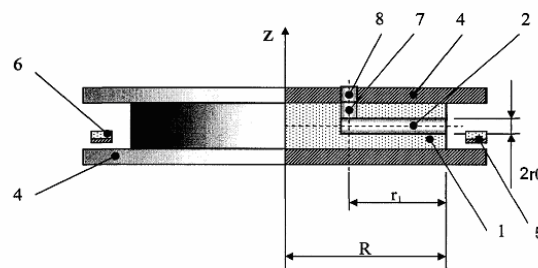
Дослідження було проведено на зазначеному діелектричному резонаторі (із фторопласту $\epsilon' = 2.07$), довжина хвилі, яка розповсюджувалась в ньому λ_n дорівнювала 5.47 мм. Звідси можна визначити довжину хвилі у речовині $\lambda_0 = \lambda_n / (\epsilon')^{1/2}$. Для застосованих при дослідженнях таких речовин як вода ($\epsilon' = 16.17$), ацетон ($\epsilon' = 14.1$), та етиловий спирт ($\epsilon' = 3.58$) вона буде дорівнювати 1.36 мм, 1.45 мм, та 2.89 мм, відповідно. Враховуючи те,

що глибина проникності електромагнітної хвилі у речовину близька до значення $\chi \approx \lambda_p/4$, можемо вирахувати значення розміру отворів $2r_0 \approx \lambda_p/2$ для досліджуваних речовин, які будуть мати такі значення - 0.68 мм, 0.72 мм, та 1.44 мм, відповідно. Ці розміри отворів є максимальними при дослідженнях зазначених речовин з використан-

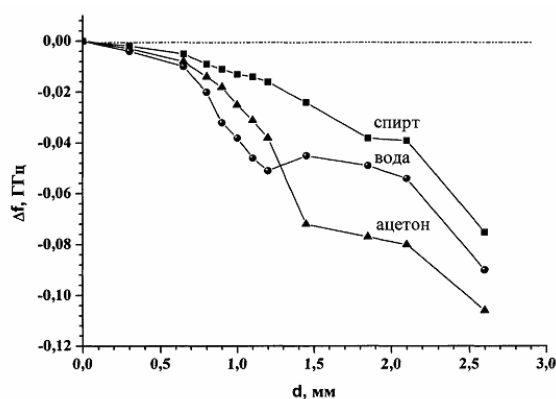
ням застосованого нами типу резонатора. Наведений приклад реалізації, в якому діаметр отворів змінюється від 0.3 мм до 2.6 мм, є підтвердженням того, що дослідження можливо проводити при досить малих значеннях об'ємів різних речовин в широкому частотному діапазоні.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3