

Винахід відноситься до вимірювальної техніки міліметрового діапазону довжин хвиль і може бути використаний для виміру електрофізичних параметрів матеріалів.

Вимірювання дійсної  $\epsilon'$  і уявної  $\epsilon''$  частин діелектричної проникності в залежності від різних факторів (частоти, тиску, температури та ін.) є складною науково-технічною задачею. Особливо це стосується вивчення електричних властивостей біологічних об'єктів у міліметровому діапазоні довжин хвиль, до складу яких, як основний компонент, входить вода (Кузнецов А.Н., Турковский И.И., Волкова И.А. КВЧ - диэлектрометрия биологических жидкостей в условиях нарушенного водного обмена // Биофизика. 2001. Т. 46, № 6, с.1122-1125).

Для вимірювання електрофізичних параметрів речовин найбільше поширення одержали резонансні методи, які мають високу точність результатів. Основна ідея всіх резонансних методів полягає в спостереженні резонансних кривих коливального контуру, у який поміщений зразок досліджуваної речовини. Вивчення резонансних кривих до і після внесення діелектрика дозволяє по добротності резонатора і зрушенню частоти визначити як дійсну частину діелектричної проникності  $\epsilon'$ , так і тангенс кута втрат  $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ . При вимірюванні речовин з великими втратами зразок повинний займати лише малу частину обсягу резонатора. Тому в більш довгохвильовому сантиметровому діапазоні найбільше поширення одержали циліндричні резонатори з коливаннями типу  $H_{01n}$  (Ткач В.К., Степин Л.Д., Казанский В.Б. Резонаторный метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь жидких диэлектриков // Радиотехника и электроника. 1960. Т. 5, №12, с.2009-2014). Тут  $n$  - число напівхвиль, що укладаються уздовж осі резонатора. Однак з укороченням довжини хвилі зменшуються геометричні розміри резонатора і зростають втрати в металі, з якого він виготовлений.

Відомий циліндричний резонатор, що перебудовується, який працює на коливанні типу  $H_{01n}$ , для вимірювання діелектричної проникності речовин у сантиметровому діапазоні довжин хвиль (Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. - М.: Госуд. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963. - С.108). Використання резонатора, що перебудовується, дозволяє застосовувати генератор, який працює на фіксованій частоті. Це дає можливість здійснювати частотну стабілізацію генератора і, отже, підвищувати точність вимірювання. Циліндричний зразок чи трубка, заповнена рідиною з великими втратами, закріплюється в центрі поршня і при його переміщенні за допомогою прецизійного мікрометричного гвинта рухається разом з ним. При цьому, розташування зразка по осі резонатора, де напруженість електричного поля мінімальна, саме і дозволяє вимірювати електрофізичні параметри діелектриків з великими втратами. Частина зразка, що проходить через живильний хвилевод, екранована від поля хвилеводу тонкостінною металевою трубкою. Для збудження коливання типу  $H_{01n}$  у торцевій кришці резонатора зроблені два отвори, які зв'язані з аналогічними отворами у вузькій стінці живильного хвилеводу.

Однак, при переході до міліметрового діапазону довжин хвиль зменшуються геометричні розміри циліндричного резонатора, які пропорційні робочій довжині хвилі. У той же час при укороченні довжини хвилі  $\lambda$  зростає поверхневий опір  $R_s$  металу, з якого зроблений резонатор, тому що  $R_s = \sqrt{120/\sigma\lambda}$  (Ширман Я.Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы. - М.: Госуд. изд-во лит-ры по вопросам связи и радио, 1959. - С.89), де  $\sigma$  - питома провідність металу. Якщо ж збільшувати геометричні розміри, тобто переходити до надрозмірних резонансних систем, то в цьому випадку в резонансному обсязі поряд з коливанням типу  $H_{01n}$  будуть збуджуватися інші коливання, наприклад, коливання  $E_{11n}$ , у якого така ж фазова швидкість, як і в робочого. Тому необхідно приймати додаткові заходи для селекції спектра в таких резонаторах, що є досить складною технічною задачею. У зв'язку з цим у міліметровому діапазоні необхідно переходити до резонансних систем, що використовують поширення хвиль у вільному просторі, - відкритим резонаторам. Особливістю таких резонансних систем є те, що, крім високої добротності їхні геометричні розміри складають кілька десятків довжин хвиль, а зв'язок з вільним простором забезпечує додаткову селекцію спектра коливань.

Найбільш близьким по технічному рішенню аналогом (прототипом) є відкритий резонатор, утворений плоским і сферичним дзеркалами (Jones R.G. Precise dielectric measurements at 35 GHz using an open microwave resonator // PROC. IEEE. 1976. V. 123, №4, p.285-290), у якому зразок закріплюється проти плоского дзеркала в каустику поля робочого коливання. Цим усуваються помилки, пов'язані з визначенням кутового положення зразка. На другому дзеркалі резонатора розташовані елементи зв'язку для введення і виведення НВЧ сигналу. Вимірювання виконуються на фіксованій частоті. Для визначення діелектричної проникності зразка  $\epsilon'$  і втрат  $\tan \delta$  вимірюється добротність відкритого резонатора без зразка, а потім зі зразком. Визначається також відстань, на яку необхідно змістити одне з дзеркал резонатора для відновлення резонансу при розміщенні зразка в обсяг відкритого резонатора. Усі вимірювання виконані в міліметровому діапазоні довжин хвиль. При цьому необхідно відзначити, що використання відкритого резонатора, який має велику добротність, дозволяє вимірювати з високою точністю діелектричну проникність і тангенс кута втрат речовин з малими втратами. Розміщення ж в обсязі резонатора речовини з великими втратами, наприклад, води, навіть у дуже малих кількостях, приведе до зриву коливань у такій резонансній системі.

В основу винаходу поставлено вирішення наступної задачі: у відкритому резонаторі шляхом розміщення зразка досліджуваної речовини в області, де напруженість електричного поля мінімальна, забезпечити підвищення точності вимірювання і розширення діапазону значень діелектричної проникності і тангенс кута втрат речовин, що досліджуються.

Поставлена задача розв'язується таким способом: у відкритому резонаторі, що має два дзеркала, на одному з яких розташовані елементи зв'язку для введення і виведення НВЧ сигналу. У центрі другого дзеркала розташований круглий хвилевод, довжина якого дорівнює цілому числу хвилеводних довжин хвиль, уздовж осі якого до поверхні дзеркала відкритого резонатора розташовується зразок досліджуваної речовини, що взаємодіє з хвилею  $H_{01n}$ , яка збуджується в хвилеводі за допомогою робочого коливання резонатора. При цьому діаметр круглого хвилеводу однозначно зв'язаний з робочою довжиною хвилі  $\lambda$  і радіусом плями поля  $w_0$  нижчого коливання відкритого резонатора  $TEM_{00q}$  ( $q$  - число напівхвиль між дзеркалами) на тому дзеркалі резонатора, до якого приєднаний цей хвилевод. Розташування зразка досліджуваної речовини уздовж осі круглого хвилеводу, де напруженість електричного поля мінімальна, саме і дозволяє розширити діапазон вимірюваних значень  $\epsilon'$  і  $\tan \delta$ . З іншого боку, наявність у центрі дзеркала резонатора круглого хвилеводу, у якому збуджується хвиля  $H_{01}$ , а діаметр якого може складати кілька довжин хвиль, практично не погіршує добротності такої резонансної системи в силу аномально малих втрат хвилі  $H_{01}$ , що в підсумку дозволяє підвищити точність вимірювання. Крім цього

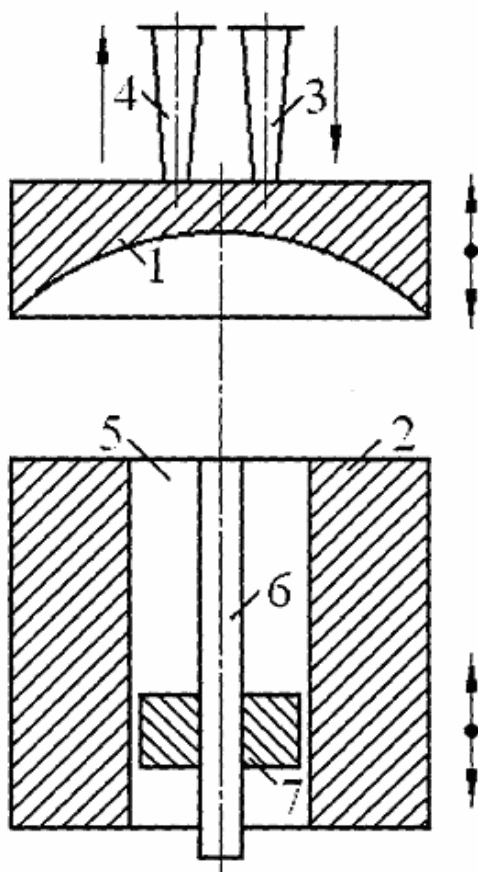
необхідно підкреслити, що оскільки діаметр круглого хвилеводу цілком визначається  $w_0$ , то можна вибрати такі геометричні розміри відкритого резонатора, при яких діаметр зразка досліджуваної речовини буде мати розміри  $\lambda/2 < d < \lambda$ , що особливо важливо при проведенні вимірювання у короткохвильовій частині міліметрового діапазону. Налагодження системи в резонанс можна здійснювати подвійно: або за допомогою дзеркала відкритого резонатора, на якому розташовані елементи зв'язку; або за допомогою поршня. Це, у свою чергу, дозволяє працювати на фіксованій частоті, що дуже важливо для частотної стабілізації НВЧ генератора і, отже, підвищення точності вимірювання.

Суть винаходу пояснюють ілюстрації: на фіг.1 показаний відкритий резонатор для виміру діелектричної проникності матеріалів; на фіг.2 показані теоретичні залежності коефіцієнта ефективності збудження  $\eta_{H_{01}}$  хвилі і хвилі  $E_{11}$ , що має таку ж фазову швидкість, у залежності від нормованого радіуса круглого хвилеводу  $\tilde{a} = a/w_0$  за допомогою коливання  $TEM_{00q}$  резонатора; на фіг.3 показані ці ж теоретичні залежності, але при збудженні хвиль  $H_{01}$  і  $E_{11}$  за допомогою вищого коливання відкритого резонатора  $TEM_{10q}$ .

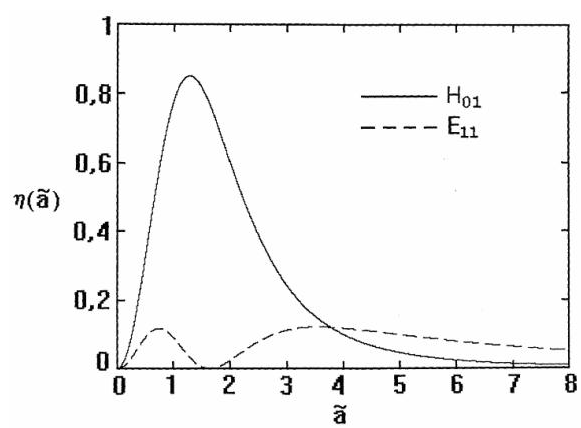
Відкритий резонатор, що заявляється, утворений двома металевими дзеркалами 1 і 2, на одному з яких розташовані елементи зв'язку 3 і 4, призначені для введення і виведення НВЧ сигналу. У центрі дзеркала 2 знаходиться круглий хвилевод 5, по осі якого розташований циліндричний зразок досліджуваної речовини 6, який фіксується за допомогою рухливого поршня 7. При цьому діаметр хвилеводу вибирається: або рівним  $d = (2,09 \div 3,093)w_0$  за п. 1, коли в резонаторі збуджується коливання  $TEM_{00q}$  і ефективність збудження хвилі  $H_{01}$ , у хвилеводі 5 не гірше 80%, а ефективність збудження хвилі  $E_{11}$  при цьому не більш 3%; або рівним  $d = (3,105 \div 4,043)w_0$  за п. 2, коли у відкритому резонаторі збуджується коливання  $TEM_{00q}$ , що забезпечує збудження  $H_{01}$  з ефективністю не менш 75%, а ефективність збудження хвилі  $E_{11}$  у цьому випадку не перевищує 8%.

Запропонований відкритий резонатор працює таким способом: за допомогою живлюючого хвилеводу 3 у резонансній системі збуджується одне з коливань типу "стрибучого м'ячика":  $TEM_{00q}$  чи  $TEM_{10q}$ . Тут необхідно підкреслити, що відкритий резонатор, у якому збуджується робоче коливання, і круглий хвилевод 5 із хвилею  $H_{01}$ , у центрі одного з дзеркал утворюють єдину резонансну систему. Визначаються навантажена добротність і резонансна відстань між дзеркалами 1 і 2 "порожнього" резонатора при роботі на фіксованій частоті, потім по осі круглого хвилеводу, розміри якого вибираються в залежності від типу коливань із приведених вище інтервалів, розташовується зразок вимірюваної речовини 6 і знову виміряється навантажена добротність і відстань, на яку необхідно змістити дзеркало 1 відкритого резонатора чи поршень 7 для настроювання системи в резонанс. При цьому необхідно відзначити, що настроювання системи в резонанс здійснюється за максимальним значенням сигналу, виведеного в навантаження резонатора за допомогою хвилеводу 4. Після цього за допомогою формул, отриманих при розв'язанні електродинамічної задачі, визначаються  $\varepsilon'$  і  $\text{tg}\delta$ .

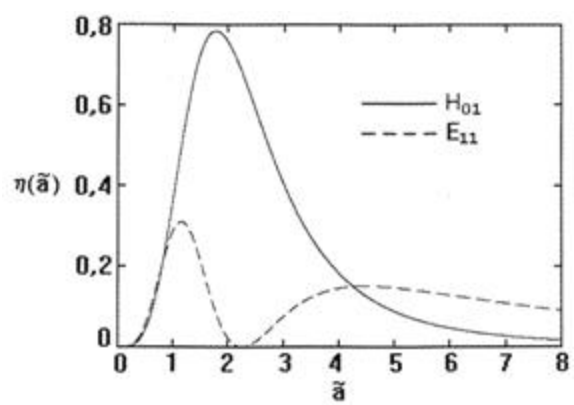
Був виготовлений експериментальний зразок запропонованого відкритого резонатора. Резонатор утворений плоским і сферичним дзеркалами діаметром 40мм, радіус кривизни сферичного дзеркала теж 40мм, діаметр круглого хвилеводу 17мм, поршень розташований на відстані 8,78мм від площини дзеркала, що складає дві хвилеводні довжини хвилі. Вимірювання проведені на фіксованій частоті  $f=72,55\text{ГГц}$  для коливання  $TEM_{1010}$ . Як зразок, у круглий хвилевод розміщувалася кварцова трубка з дистильованою водою, зовнішній діаметр якої дорівнює 2мм, а внутрішній -1мм. Обчислені значення  $\varepsilon'$  і  $\text{tg}\delta$  порівнювалися з розрахунковими, які отримані за допомогою формул Дебая. Спостерігається задовільний збіг.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3