МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НАНОПОРОШКОВ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ В ГИГАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ. КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Учебно-методическое пособие

Томск
2022

РАССМОТРЕНО И УТВЕРЖДЕНО методической комиссией радиофизического факультета
Протокол № 4/22 от «20» апреля 2022 г.

Председатель комиссии: профессор кафедры квантовой электроники и фотоники, д-р физ.-мат. наук А.П. Коханенко

В настоящем пособии рассмотрена теория, приведено описание измерительной установки и методические указания к проведению экспериментальных исследований диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь нанопорошков магнитодиэлектриков в гигагерцовом диапазоне электромагнитного излучения.

Пособие предназначено для студентов старших курсов радиофизического факультета.

СОСТАВИТЕЛИ: *Е.Ю. Коровин, А.В. Бадьин, И.О. Дорофеев, Д.В. Вагнер, Г.Е. Кулешов*

Издание подготовлено в авторской редакции

Подписано в печать 08.07.2022 г.

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, тел. (3822) 529-849.
E-mail: rio.tsu@mail.ru
Заказ № 5085 от «06» июля 2022 г. Тираж 30 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……..... 4
1 Цель работы……. 5
2 Задание……. 5
3 Теоретическая часть…… 6
3.1 Теория резонансных методов……... 6
3.2 Колебания типа E_{010} и H_{01} в цилиндрическом резонаторе……... 11
4 Описание экспериментальной установки……. 16
4.1 Измерительный комплекс на основе векторного анализатора цепей Е 8363 В фирмы Agilent Technologist….. 16
4.2 Перестраиваемый цилиндрический резонатор……... 17
5 Методические указания…….. 19
5.1 Средства измерения, вспомогательное оборудование, реактивы……... 19
5.2 Условия выполнения измерений…….. 20
5.3 Подготовка образцов…….. 20
5.3.1 Подготовка образцов насыпной плотности……... 20
5.3.2 Подготовка образцов из порошка и связующей матрице…… 21
5.4 Выполнение измерений……. 22
Контрольные вопросы…… 23
Список использованной литературы…… 24

ВВЕДЕНИЕ

Изучение диэлектрических свойств вещества, т.е. исследования поведения его комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты, температуры, давления, напряженности электрического поля и прочих факторов, имеет важное научно-практическое значение. Эти исследования позволяют выявить некоторые закономерности строения материала, недоступные другим методам, а также дают возможность получить информацию об электромагнитных свойствах новых материалах и фундаментальных характеристиках, связанных с электромагнитными параметрами. Расширение масштабов применения современных радиоэлектронных систем и систем телекоммуникаций в сторону приборов широкого потребления (мобильных телефонов, видео и фотоаппаратуры, ноутбуков) требует создания новых радиоматериалов, что неосуществимо при отсутствии сведений о поведении диэлектрической проницаемости и тангенсе угла диэлектрических потерь в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах. Создание радиоматериалов с заданными свойствами основано на связи между потребительскими свойствами полученных веществ и конструкций из них с параметрами, определяющими технологию синтеза исходных материалов.

В последнее время наблюдается быстрое развитие производства и применения наноструктурных магнитодиэлектрических устройств, обладающих новыми потребительскими свойствами, поскольку электромагнитные характеристики наноматериалов принципиально отличаются от таковых для массивных тел. Измерение диэлектрической проницаемости наноматериалов имеет ряд специфических особенностей, которые изучаются в данной работе.

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоить методику измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь наноразмерных порошков магнитодиэлектриков и композитов на их основе методом «вариации частоты» при фиксированной резонансной длине цилиндрического резонатора. Изучить теорию резонансных методов в гигагерцовом диапазоне частот. Приобрести навыки работы на «Универсальном широкополосном радиоспектроскопе на основе векторного анализатора цепей PNA E8363B фирмы Agilent Technologies».

2 ЗАДАНИЕ

Изучить понятия комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь

Изучить теорию метода измерения спектров диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь резонаторным методом.

Ознакомится с руководством по эксплуатации векторного анализатора цепей PNA E8363B.

Изучить методику изготовления экспериментальных образцов на основе нанопорошков магнитодиэлектриков для измерений в цилиндрическом резонаторе.

Провести экспериментальное измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при помощи цилиндрического резонатора методом «вариации частоты» при фиксированной резонансной длине.

Оценить погрешность измерения.

Оформить отчет о проделанной работе.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Теория резонансных методов

Резонансные методы (объемные, открытые резонаторы) хорошо зарекомендовали себя для исследования диэлектрических свойств вещества в диапазоне частот от 3 до 30 ГГц. Идея резонансных методов состоит в изменении параметров резонатора: сдвиг его резонансной частоты и падение добротности при контакте с исследуемым образцом. Решение электродинамической задачи с той или иной точностью устанавливает связь между этими изменениями и значениями комплексной диэлектрической проницаемости.

Рис. 1. Резонансная полость с диэлектрическим образцом

Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь сводится к решению уравнений электромагнитного поля [1] для определенной конфигурации резонатора и учету влияния исследуемого образца диэлектрика на это поле.

Рассмотрим некоторый объем V, ограниченный замкнутой поверхностью S (рисунок 1).

Электромагнитное поле в указанном объеме описывается уравнениями Максвелла:

$$rotH = j\omega_0 \varepsilon E\,, \tag{1}$$

$$rotE = -j\omega_0 \mu H\,, \tag{2}$$

где E и H – векторы напряженностей электрического и магнитного полей, ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, заполняющей объем V.

Используя комплексный вектор Умова–Пойтинга, установим связь между мощностью, поглощаемой внутри полости V, и энергией, входящей через поверхность S в единицу времени. Записывая уравнения (1) в комплексно сопряженной форме:

$$rotH^* = j\omega_0 \varepsilon E^* \tag{3}$$

и умножая (3) на E, а (2) на H^* и складывая, получим, используя формулу векторного анализа $div\left[AB\right] = BrotA - ArotB$,

$$-div\left[EH^*\right] = j\left[\mu HH^* - \varepsilon EE^*\right]. \tag{4}$$

Взяв интеграл по объему V и преобразуя левую часть уравнения (4) по формуле Гаусса–Остроградского в интеграл по поверхности S, получим поток вектора Умова–Пойтинга, характеризующий энергию, втекающую внутрь объема V:

$$N_S = \frac{1}{2}\int_S \left[EH^*\right]dS = j\frac{\omega_0}{2}\left[\int_V \mu HH^* dV - \int_V \varepsilon EE^* dV\right]. \tag{5}$$

Используя метод возмущений при небольших вариациях всех входящих в уравнения (1), (2) и (3) величин, т.е. δE, δE^*, δH, δH^*, δε, δμ, $\delta\omega_0$, δN, δS и δV, получим соотношение:

$$rot\delta H = j\delta\omega_0 \varepsilon E + j\omega_0 \delta\varepsilon H + j\omega_0 \varepsilon \delta E \tag{6}$$

$$rot\delta E = -j\delta\omega_0 \mu E - j\omega_0 \delta\mu H - j\omega_0 \varepsilon \delta H \tag{7}$$

$$\delta N_{S+\delta S} = j\delta\omega_0\left[\int_V \mu HH^* dV - \int_V \varepsilon EE^* dV\right] +$$
$$+ j\omega_0\left[\int_V \delta\mu HH^* dV - \int_V \delta\varepsilon EE^* dV\right] +$$
$$+ j\omega_0\int_V\left[\delta\mu HH^* + \mu\delta HH^* - \varepsilon E\delta E^* - \varepsilon\delta EE^*\right]dV + \quad (8)$$
$$+ j\omega_0\int_{\delta V}\left[\mu HH^* - \varepsilon EE^*\right]dV$$

Если в рассматриваемом объеме нет потерь, поверхность S идеально-проводящая и полость не содержит магнитных материалов (μ=1), то, если в полость внесен диэлектрик объемом δV_ε с проницаемостью, которая на $\delta\varepsilon$ отличается от проницаемости среды, заполняющей объем V, уравнение (8) примет вид:

$$j\delta\omega_0\left[\int_V \mu HH^* dV - \int_V \varepsilon EE^* dV\right] -$$
$$- j\omega_0\int_V \delta\varepsilon EE^* dV +$$
$$+ j\omega_0\left[\int_V \mu H\delta H^* dV + \int_V \mu\delta HH^* dV - \int_V \varepsilon E\delta E^* dV - \int_V \varepsilon\delta EE^* dV\right] = 0$$

так как вариация энергии, втекающей в объем, равна нулю. Подставляя в последнее уравнение значения δH, δH^* из (6) и заменяя E и E^* их выражениями, полученными из (1) и (2), используя тождества

$$\delta E rot H^* - H^* rot\delta E = div\left[\delta EH^*\right]$$
$$\int_V div\left[\delta EH^*\right]dV = \int_S\left[\delta EH^*\right]dS = 0$$

и преобразуя, получим:

$$\frac{\delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{\int\limits_{\delta V_\varepsilon} \delta\varepsilon EE^* dV}{\int\limits_V \mu HH^* dV + \int\limits_V \varepsilon EE^* dV} \qquad (9)$$

Используя соотношение (5), из которого для рассматриваемого случая проводящей поверхности S (поток энергии N_S=0) следует, что

$$\int\limits_V \mu HH^* dV = \int\limits_V \varepsilon EE^* dV$$

получим окончательно:

$$\frac{\delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{\delta f_0}{f_0} = -\frac{\int\limits_{\delta V_\varepsilon} \delta\varepsilon EE^* dV}{2\int\limits_V \varepsilon EE^* dV}, \qquad (10)$$

где f_0 – собственная частота невозмущенной резонаторной полости, $\delta f = f_0 - f_1$ – изменение частоты при внесении диэлектрика, а

$$2\int\limits_V \varepsilon EE^* dV = W \qquad (11)$$

представляет собой энергию, запасенную в резонаторе.

Добротность пустого резонатора выражается формулой

$$Q_0 = \frac{\omega_0 W}{P}, \qquad (12)$$

где P – мощность потерь в резонаторе.

При внесении образца диэлектрика добротность изменяется за счет небольших изменений ω_0, W и P так, что добротность резонатора с образцом будет иметь вид:

$$Q_1 = \frac{(\omega_0 + \Delta\omega)(W + \Delta W)}{P + \Delta P}. \qquad (13)$$

Вычитая $\frac{1}{Q_0}$ из $\frac{1}{Q_1}$ и сравнивая (11) и (12) получим:

$$\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}\right)\omega_0 W = \frac{P + \Delta P}{\left(1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)\left(1 + \frac{\Delta W}{W}\right)} - P$$

Если объем внесенного диэлектрика значительно меньше объема резонатора, то изменениями частоты и запасенной энергии в последнем выражении можно пренебречь, т.е. считать $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 1$, $\frac{\Delta W}{W} = 1$; что дает для изменения добротности резонатора:

$$\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2}\right)\omega_0 W = \Delta P, \qquad (14)$$

где ΔP – изменение мощности потерь за счет внесения диэлектрика.

Соотношения (10) и (14), полученные методом малых возмущений, справедливы для любой формы резонатора при условии, что внесенный в резонатор диэлектрик имеет объем значительно меньший, чем объем самого резонатора, и не искажает структуры полей в нем.

Для получения формул для конкретного резонатора в (10) и (14) необходимо подставить значения полей, соответствующие выбранному типу резонатора и виду колебаний в нем. Далее, на основе полученных соотношений можно рассмотреть распределение полей в цилиндрическом резонаторе.

3.2 Колебания типа E_{010} и H_{01} в цилиндрическом резонаторе

Рассмотрим основные низкочастотные типы колебаний в цилиндрических резонаторах.

На рисунке 2 изображен цилиндрический резонатор с колебаниями типа E_{010}, электрическое поле, обладает только продольной компонентой E_Z, представляется в виде:

$$E_Z = E_0 J_0(kr), \tag{15}$$

где $J_0(kr)$ – функция Бесселя нулевого порядка, $k=2\pi/\lambda_0$ – волновое число, λ_0 – длина волны рассматриваемого колебания, а r – расстояние от оси резонатора до точки наблюдения. Из (15) видно, что поле имеет максимальную напряженность в центре резонатора.

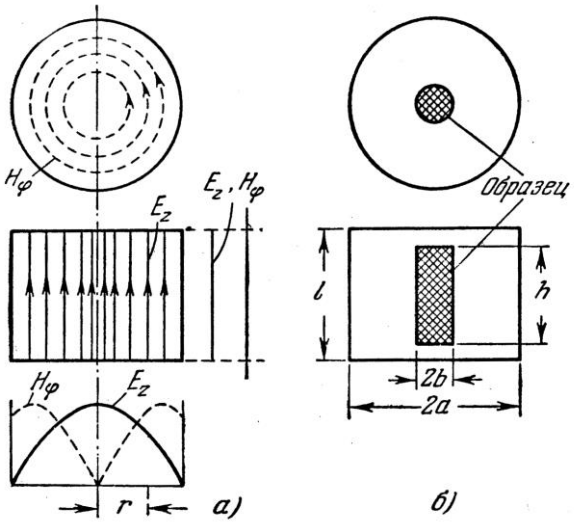

Рис. 2. Цилиндрический резонатор, возбужденный на волне E_{010}: (*а*) распределение полей, *б*) расположение образца

Помещая в такой резонатор, вдоль его оси, образец в виде тонкого цилиндрического стержня радиуса b и высоты h (рисунок 2), можно считать, что при выполнении условия $b \ll a$ поле в образце будет однородным.

Недостатком цилиндрических резонаторов с колебаниями типа E_{010} является то, что он не позволяет исследовать материалы с высокими значениями проницаемости и потерь, что обусловлено расположением образца в максимуме электрического поля и, следовательно, его значительным влиянием на параметры резонатора.

Применение цилиндрических резонаторов с колебаниями типа H_{01} позволяет использовать образцы значительно большего диаметра и исследовать материалы, обладающие сравнительно большими потерями, соответствующими $tg\delta \leq 1$, без искажения структуры поля.

Компонента E_φ электрического поля для этого типа колебаний может быть записана в виде (рисунок 3):

$$E_\varphi(z,r) = A\sin\frac{\pi z}{l} J_1\left(3{,}832\frac{r}{a}\right), \qquad (16)$$

где l – высота резонатора, а 3,832 – численное значение корня функции Бесселя J_1. Пользуясь соотношением (10) для частоты при внесении диэлектрического образца

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{\int\limits_{\delta V_\varepsilon} E^2 dV}{\int\limits_V E^2 dV}$$

далее проводиться интегрирование числителя и знаменателя при условии, что за элемент объема взято выражение $dV=2\pi rdrdz$.

В результате получаем следующее соотношение, характеризующее добротность круглого цилиндрического резонатора:

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{\int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^b J_1^2 \left(3{,}832 \frac{r}{a}\right) r dr}{\int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^a J_1^2 \left(3{,}832 \frac{r}{a}\right) r dr} =$$

$$= \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{\int_0^b J_1^2 \left(3{,}832 \frac{r}{a}\right) r dr}{\int_0^a J_1^2 \left(3{,}832 \frac{r}{a}\right) r dr}$$

где b и a – радиусы образца и резонатора соответственно.

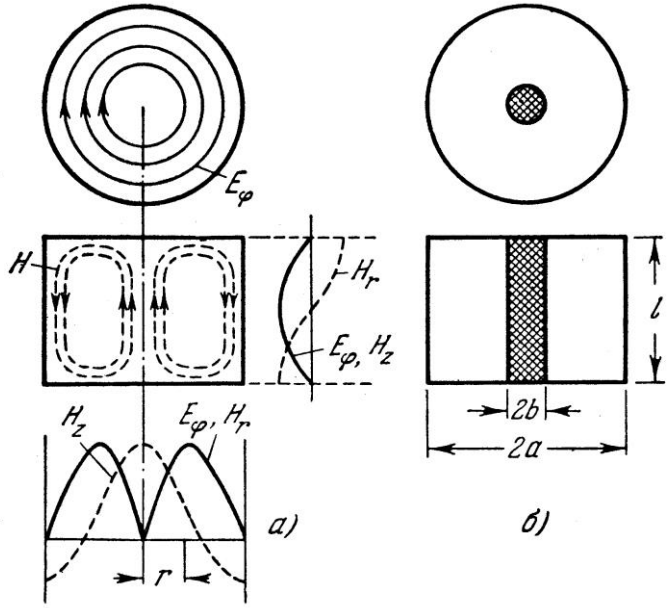

Рис. 3. Цилиндрический резонатор, возбужденный на волне H_{01}:
а) распределение полей, б) расположение образца

Аналогичным способом, используя выражения (14), зная, что потери в цилиндрическом образце, расположенном по оси резонатора, могут быть представлены в виде: $\Delta P = \sigma E_0^2 V_\varepsilon$, где σ – проводимость материала образца, а V_ε – объем образца; и запасенная энергия в резонаторе $W = 0,269 E_0^2 V$, а также соотношения $tg\delta = \dfrac{\sigma}{\omega_0 \varepsilon}$, можно получить формулу для $tg\delta$ материала образца. Для изменения мощности потерь ΔP в резонаторе при внесении образца запишем:

$$\Delta P = 2\pi\sigma A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^b J_1^2 \left(3,832 \frac{r}{a} \right) r dr ,$$

а для энергии, запасенной в резонаторе,

$$W = 2\int_V E^2 dV = 4\pi A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^b J_1^2 \left(3,832 \frac{r}{a} \right) r dr$$

Подставляя полученные выражения для ΔP и W в (14) и проведя преобразования, будем иметь:

$$tg\delta = \frac{2}{\varepsilon} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{\int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^b J_1^2 \left(3,832 \frac{r}{a} \right) r dr}{\int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^a J_1^2 \left(3,832 \frac{r}{a} \right) r dr} =$$

$$= \frac{2}{\varepsilon} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{\int_0^b J_1^2 \left(3,832 \frac{r}{a} \right) r dr}{\int_0^a J_1^2 \left(3,832 \frac{r}{a} \right) r dr}$$

Таким образом, получено предварительное выражение для тангенса угла диэлектрических потерь.

Существенным достоинством резонатора, работающего на колебаниях типа H_{01}, является возможность его перестройки при помощи подвижного поршня. Это связано с тем, что отсутствуют токи, текущие с торцевых поверхностей резонатора и, следовательно, дефекты трущегося контакта поршня не будут сказываться на добротности резонатора, в то время как у резонатора с колебаниями E_{010} они весьма ощутимы. Еще одном достоинством резонатора с колебаниями типа H_{01} является отсутствие тока, текущего через поршень через поршень на стенки резонатора, что позволяет использовать бесконтактный тип поршня. Это обстоятельство повышает надежность работы резонатора и обеспечивает постоянство величины добротности.

Следует заметить, что образец может иметь радиус значительно меньший, чем радиус резонатора, кроме того он может не лежать на дне поршня (рисунок 4).

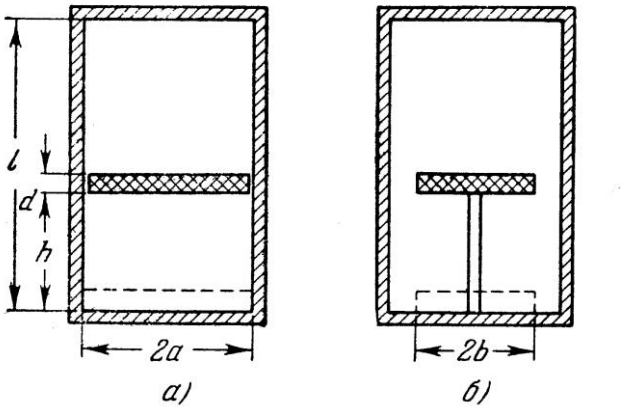

Рис. 4. Цилиндрический резонатор с образцом в виде тонкого диска: *а*) радиус образца равен радиусу резонатора, *б*) радиус образца меньше радиуса резонатора

В этом случае итоговые расчетные формулы примут следующий вид:

$$\frac{f_0 - f_1}{f_0} = \frac{\varepsilon - 1}{2} \frac{\int_h^{h+d} \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^b J_1^2 \left(3{,}832 \frac{r}{a} \right) r dr}{\int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz \int_0^a J_1^2 \left(3{,}832 \frac{r}{a} \right) r dr}, \qquad (17)$$

$$tg\delta = \frac{2}{\varepsilon} \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{\int_0^l \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz}{\int_h^{h+d} \sin^2 \frac{\pi z}{l} dz}. \qquad (18)$$

4 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

4.1 Измерительный комплекс на основе векторного анализатора цепей Е 8363 В фирмы Agilent Technologist

Блок-схема экспериментальной измерительной установки с цилиндрическим резонатором представлена на рисунке 5. Ее основой является прибор поколения PNA (Performance Network Analyzers) – высокопроизводительных анализаторов цепей. Структурно данный анализатор состоит из синтезированного генератора, приемника с двумя измерительными каналами и интегрированного двунаправленного измерителя *S*-параметров.

СВЧ сигнал от анализатора цепей через коаксиальный кабель, подключенный к коаксиально-волноводному переходу, возбуждает колебания в резонаторе. Отраженный или прошедший сигнал фиксируется анализатором. Измерительный комплекс позволяет работать как в режиме на отражение, так и на проход.

Для снижения погрешности измерений в приборе предусмотрены ряд стандартных функций: усреднение по

нескольким циклам свипирования, уменьшение полосы пропускания полосового фильтра.

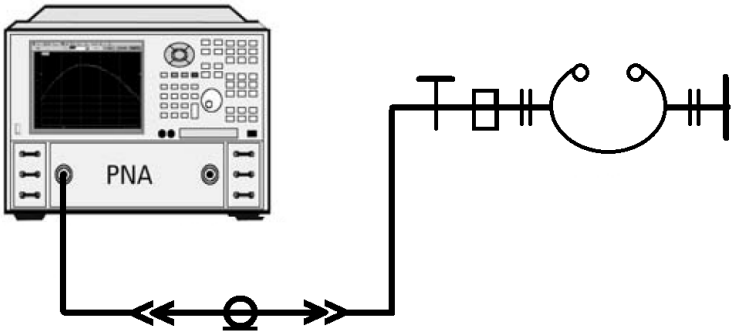

Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки на основе векторного анализатора цепей E 8363 B

Изменения параметров при внесении образца относительно ненагруженной измерительной ячейки можно фиксировать маркерами либо записывать в память анализатора, тем самым пропадает необходимость в сторонней автоматизации процесса измерения.

4.2 Перестраиваемый цилиндрический резонатор

На рисунке 6 представлен перестраиваемый цилиндрический резонатор, позволяющий измерять как на разных модах при перестройке частоты, так и при помощи вариации длины. Для этого используется поршень 1, положение которого регулируется микрометрическим винтом 2. В результате изменения положения поршня изменяется геометрическая длина резонатора L, а следовательно, и резонансные частоты мод колебаний. Для согласования в резонаторе используются поршень 3 с включением поглотителей 4 и регулирующий

микрометрический винт 5. При этом исследуемый образец имеет форму диска толщиной *h* и диаметром *D*. Он устанавливается вблизи поршня 1, на расстоянии *a*.

Так как элемент связи 6 конструктивно выполнен неподвижным, оптимальная связь подстраивается поршнем 3, который также оснащен микрометрическом винтом. Поршень 3 оснащен диэлектрическим поглотителем для затухания высших типов колебаний. Такая конструкция резонатора позволяет плавно изменять резонансные частоты за счет комбинированного применения методов вариации частоты и длины резонатора.

Подобная конструкция измерительной ячейки позволяет проводить измерения с плотной частотной сеткой, в отличии от большинства других резонаторов.

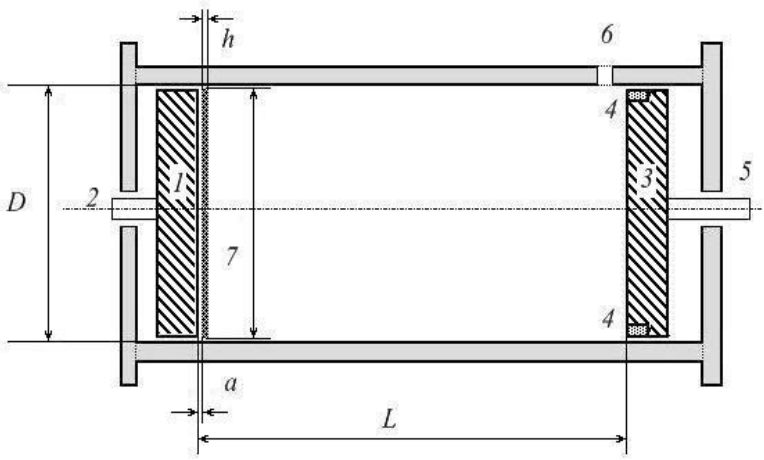

Рис. 6. Перестраиваемый цилиндрический резонатор:
1 – поршень; 2 – микрометрический винт, для настройки частоты;
3 – поршень; 4 – поглотитель, 5 – микрометрический винт для настройки связи; 6 – элемент связи; 7 – исследуемый диэлектрик

5 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

5.1 Средства измерения, вспомогательное оборудование, реактивы

При выполнении измерений применяют следующие средства измерений и другие технические средства:

1. Объемный цилиндрический резонатор, в котором возбуждается колебание H_{01p}, где p = 2, 3, 4, 5… – число полуволн, укладывающихся по длине резонатора.

В диапазоне частот 8–12 ГГц рекомендуемый внутренний диаметр резонатора D составляет 50 мм, длина резонансной полости не менее 80 мм.

Размеры резонатора на другие диапазоны частот выбирают в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые размеры резонатора

Диапазон, ГГц	Диаметр D, мм	Длина l, мм
6–8	70	100
12–16	40	60
16–20	30	50

Примечание – При использовании резонатора с волноводным входом (выходом) рабочий диапазон резонатора выбирается в соответствии со стандартным диапазоном частот волновода. Предпочтительной является конструкция измерительного резонатора с коаксиальным входом/выходом и регулируемым коэффициентом связи резонатора с СВЧ трактом. Регулировка коэффициента связи резонатора с трактом необходима при измерениях образцов с повышенными потерями.

2. Векторный анализатор цепей PNA E8363B фирмы Agilent Techologies

3. Весы лабораторные 2-го класса точности по ГОСТ 24104.

4. Спирт этиловый ректифицированный из пищевого сырья. Технические условия. ГОСТ Р 51652-2000.

5.2 Условия выполнения измерений

При выполнении измерений соблюдают следующие условия:

Температура воздуха в помещении от 18 °С до 25 ºС.

Относительная влажность воздуха от 20 % до 60 %.

Изменение температуры воздуха во время измерения не должно превышать ± 2 ºС.

5.3 Подготовка образцов

5.3.1 Подготовка образцов насыпной плотности

Исследуемый нанопорошок насыпают с «горкой» в плоскую цилиндрическую кювету высотой 2 - 4 мм, тщательно очищенной от посторонних частиц бязью, смоченной спиртом-ректификатом и высушенной естественным путем.

Порошок разравнивают линейкой. Подготовленный образец в кювете взвешивают на аналитических весах, из этого веса вычитают вес кюветы и определяют насыпную плотность порошка [2].

Примечание – В данном случае измеряют эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость композиционной смеси порошка и воздуха, либо порошка в связующей матрице (эпоксидная смола, каучук, латекс и др.)

5.3.2 Подготовка образцов из порошка и связующей матрице

Композиционный материал на основе нанопорошка выполняется в форме диска диаметром *D*.

Отклонение от параллельности торцов контролируется толщиномером и не должно превышать величину – 0,02 мм.

Толщина образца измеряют в 10 точках (рисунок 6) в соответствии с ГОСТ 8.544, в расчетах используют среднее арифметическое значение этих измерений [2].

Перед установкой образца в резонатор его поверхности и боковые грани протирают бязью, смоченной этиловым спиртом-ректификатом и высушивают естественным путем.

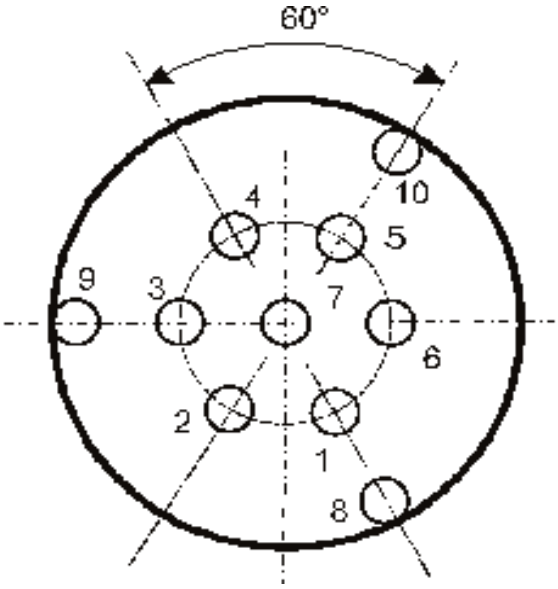

Рис. 6. Расположение точек, в которых проводится измерение толщины образца

5.4 Выполнение измерений

При выполнении измерений выполняют следующие действия [3–4]:

- приборы подготавливают к работе в соответствии с инструкцией по эксплуатации;
- анализатор цепей калибруют с помощью электронного калибратора или набора механических мер в выбранном диапазоне частот;
- анализатор цепей подключают к измерительной ячейке;
- анализатор цепей настраивают на выбранную моду колебаний $H_{01}p$;
- фиксируют показания частоты f_0;
- измеряют собственную добротность резонатора без образца Q_0;
- образец помещают в резонатор;
- измеряют резонансную частоту резонатора с образцом f_1;
- измеряют собственную добротность резонатора с образцом Q_0;
- проводят расчет диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь по формулам (17) и (18).

Примечание – При измерении диэлектрической проницаемости образцов насыпной плотности за f_0 принимают резонансную частоту измерительной ячейки с установленной в ней пустой кюветой.

При определении диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, исследуемых образцов, измерения проводят не менее трёх раз, при повороте образца на 120 градусов. За результат принимается среднее арифметическое значение.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается основная идея использования резонаторных методов для исследования электромагнитных характеристик материалов?
2. В чем отличия методов «вариации частоты» и «вариации длины»?
3. При каких упрощениях получены расчетные формулы?
4. В каких случаях предпочтительнее использовать резонаторы с колебаниями типа H_{10}, а каких E_{010}?
5. С какой целью выполняются многократные измерения геометрических размеров образцов?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брандт А.А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М. : Наука, 1963. 370 с.

2. *СТО ТГУ* 031–2009. Методика измерений эффективных значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь нанопорошков и композитов на их основе в диапазоне сверхвысоких частот. Введ. 2009.04.01. Томский государственный университет. Томск, 2009. 10 с.

3. *ГОСТ Р* 8.623–2006. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Введ. с 01.06.2008. М. : Издательство Стандартинформ, 2008. 27 с.

4. *ГОСТ Р* 8.563–2009. Методики (методы) измерений. Введ. с 15.04.2010. М. : Издательство Стандартинформ, 2010. 15 с.