

УДК 006.91:621.37/39

**РАБОТЫ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ФИЛИАЛА ФГУП
«ВНИИФТРИ» В ОБЛАСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**В.Н. Егоров, М.В. Кащенко, В.Л. Масалов,
Е.Ю. Токарева, Н.С. Тарасов**

Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ»

Введение

Информационно-телекоммуникационные системы, микроэлектроника, опто-, радио- и акустоэлектроника, разработка новых композитных материалов для авиационной промышленности и ракетно-космической техники являются приоритетными направлениями развития науки, новейших технологий и техники. Технологии миллиметровых волн очень перспективны для микроволновой связи, широкополосного доступа в Интернет, а также для модуляции сигналов в волоконно-оптических коммуникационных системах. Современные оптические коммуникационные системы должны обеспечивать большую широкополосность для того, чтобы соответствовать постоянно возрастающим требованиям по скорости передачи данных. Возрастание скорости трафика требует разработки экономически эффективных высокоинтегрированных электронных устройств с соответствующими рабочими частотами. Создание радиомодемов, приемопередатчиков, антенн, модуляторов и других устройств с рабочими частотами в диапазоне 40 ГГц и выше является необходимым условием для широкого коммерческого использования миллиметровых волн.

Диэлектрические материалы, взаимодействующие с электромагнитным полем (ЭМП) в радиоэлектронных устройствах систем телекоммуникаций, управления, радиолокации, навигации, дистанционного зондирования и других, в значительной степени определяют предельно достижимые характеристики устройств (затухание, чувствительность, добротность колебательных систем, стабильность частоты) и характеристики систем в целом. Эффективное использование компьютерного проектирования радиоэлектронных устройств и систем требует достоверных данных по диэлектрическим свойствам материалов в условиях их эксплуатации. Поэтому имеется потребность в данных по диэлектрическим параметрам материалов в широком диапазоне частот, от инфранизких до диапазонов СВЧ и КВЧ включительно.

Одной из важнейших физических величин, характеризующих взаимодействие вещества с ЭМП, является комплексная относительная ди-

электрическая проницаемость $\dot{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$. Существует значительное число различных моделей, связывающих диэлектрическую проницаемость вещества с поляризуемостью его отдельных частиц (молекул, атомов), другими микроскопическими характеристиками и числом частиц в единице объема. Удовлетворительная точность расчета по этим моделям макроскопической величины - диэлектрической проницаемости, достигается только для разреженных газов с неполярными молекулами. Необходимые для таких расчетов микроскопические характеристики (поляризуемость, вириальные коэффициенты и др.) часто сами находятся по результатам диэлектрических измерений.

На практике обычно измеряют и используют относительную диэлектрическую проницаемость (вещественную часть комплексной) $\epsilon = \epsilon'$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$. Контроль относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ необходим при производстве таких изделий и компонентов как:

- конденсаторы, радиочастотные кабели и диэлектрические волноводы;
 - диэлектрические подложки для интегральных СВЧ микросхем;
 - листовые фольгированные материалы;
 - окна вывода электромагнитного излучения;
 - обтекатели антенн летательных аппаратов и радиопрозрачные оболочки (укрытия) бортовых и наземных антенн;
 - диэлектрические антенны (например, антенны-"линзы Люнеберга");
 - диэлектрические резонаторы, фильтры и другие СВЧ компоненты.
- Диэлектрические измерения проводят также при:
- дистанционном зондировании объектов, измерении влажности;
 - создании сверхпроводящих и криогенных устройств со сверхнизкими шумами и уникальной чувствительностью;
 - выработке ССД по диэлектрическим свойствам перспективных материалов, в т.ч. наноструктурированных;
 - технологических процессах в сильных электромагнитных полях (например, спекание керамик);
 - исследованиях метаматериалов с отрицательным эффективным показателем преломления;
 - исследованиях воздействия электромагнитного поля на биологические объекты.

Существующий парк средств измерений диэлектрических параметров охватывает широкий спектр частот – от 10^{-5} до 10^{11} Гц. Парк средств измерений диэлектрических параметров продолжает расти в связи с освое-

нием диапазона миллиметровых волн для высокоскоростного доступа в Интернет, развитием беспроводных телекоммуникационных сетей, систем ближней радиолокации, наведения, предупреждения столкновения автомобилей и медицинского применения миллиметровых волн.

Целью проводимых в филиале работ является обеспечение единства измерений диэлектрических параметров материалов в соответствии с современными требованиями по точности, диапазону частот, диапазонам значений воспроизводимых величин и единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110 с расширением частотного диапазона частот на первом этапе (2007-2010 гг.) до 78,33 ГГц и до 178,4 ГГц в 2012 г. С 2013 г. проводятся работы по совершенствованию Государственного первичного специального эталона единицы относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 10 Гц до 10 МГц ГЭТ 121-80. Совершенствование направлено на расширение функциональных возможностей эталона за счёт введения второй воспроизводимой единицы - тангенса угла диэлектрических потерь, условий измерений, а также решение конкретных измерительных и метрологических задач промышленных предприятий.

1. Совершенствование государственных первичных эталонов

В течение последних лет в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» проведен цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области диэлектрических измерений.

Совершенствование ГЭТ 110 выполнялось в соответствии с приоритетными направлениями и критическими технологиями развития науки, технологий и техники: «Информационно-телекоммуникационные системы», «Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники», «Транспортные и космические системы», «Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники» и «Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств». Задачи совершенствования ГЭТ 110 вызваны также необходимостью метрологического обеспечения установок, реализующих методы измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь по отечественным и международным стандартам на частотах СВЧ диапазона (ГОСТ 27496.2-87 [1], ГОСТ Р 8.623-2006 [2], ИЕС 61388-1-3 [3], ИЕС 62562-2010 [4], ИЕС 60377-2 [5]).

Совершенствование эталона было направлено также на воспроизведение единицы тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ и развитие методов и аппаратуры для измерения сверхмалых значений тан-

генса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ (до 10^{-8}) и высоких значений диэлектрической проницаемости ε (до 500). В декабре 2012 года усовершенствованный эталон утверждён с регистрационным номером ГЭТ 110-2012. Государственный первичный эталон воспроизводит и передаёт единицы:

- относительной диэлектрической проницаемости ε ...от 1,2 до 500;
- тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ от $1\cdot 10^{-8}$ до $1\cdot 10^{-2}$.

В основу воспроизведения единиц ε , $\operatorname{tg}\delta$ положены как известные методы измерений, ставшие уже классическими и усовершенствованные в ходе работы, так и вновь разработанные. Диэлектрические измерения в диапазоне СВЧ являются косвенными и сводятся к:

- измерению параметров СВЧ тракта (резонансной частоты, добротности, затухания и др.);
- измерению геометрических размеров образца (меры);
- расчёту диэлектрических параметров по сложным зависимостям (решению трансцендентных уравнений).

Резонансные методы, положенные в основу воспроизведения единиц ε и $\operatorname{tg}\delta$, различны в силу охватываемого диапазона частот и значений воспроизводимого параметра, формы и размеров мер, воспроизводящих единицы [6]. В эталоне применены совместимые с международными стандартами резонансные методы измерения и типоразмеры измеряемых образцов (мер), обеспечивающие наибольшую экономическую и метрологическую эффективность. Расширение частотного диапазона эталона до 178,4 ГГц проведено также с учётом получивших распространение в России и мировой практике методик измерений и принятых стандартов [1-5]. В эталоне используются методы объёмного H_{0mp} -резонатора (ОБР) [1-2,4-8], металлодиэлектрического резонатора (МДР) [3,9], открытого диэлектрического резонатора (ОДР) [10,11] и двухзеркального открытого резонатора (ОР) [12].

Точность измерения параметров слабопоглощающих диэлектриков существенно зависит от коэффициента заполнения резонатора измеряемым образцом (отношения электрической энергии в образце к полной энергии резонатора). Классический метод ОБР с подвижным поршнем имеет малые коэффициенты заполнения. Его рабочий диапазон частот ограничен снизу критической частотой волны H_{01} . Для расширения рабочего диапазона частот вниз и получения близких к 1 коэффициентов заполнения использован закритический режим работы ОБР. В этом режиме волна H_{0m} может распространяться в заполненной образцом части резонатора и испы-

тывает полное отражение от закритических сечений незаполненных областей ОБР.

Метод МДР обеспечивает большой коэффициент заполнения, строгий электродинамический анализ, отсутствие зазоров между диэлектрическим образцом и металлическими зеркалами, а также возможность проводить измерения образцов различных геометрических размеров. Измерения ε и $\operatorname{tg}\delta$ проводят по спектру резонансных частот из нескольких симметричных $H_{\text{отр}}$ -колебаний, что позволяет повысить точность и оценить частотную зависимость $\operatorname{tg}\delta$. Метод металлодиэлектрического резонатора позволяет наиболее точно измерять высокие значения ε . Особенностью метода является отсутствие «пустого» резонатора.

Метод ОДР основан на возбуждении исследуемого дискового образца (меры) из слабопоглощающего диэлектрика как открытого диэлектрического резонатора с колебаниями типа «шепчущей галереи». Метод не требует каких-либо металлических резонаторов (измерительных ячеек), вносящих дополнительные омические потери. Добротность такого резонатора при оптимальном выборе его размеров в измеряемом диапазоне частот полностью определяется величиной $\operatorname{tg}\delta$ исследуемого образца. Метод позволяет определять $\operatorname{tg}\delta$ на частотах от 3 ГГц для слабопоглощающих диэлектриков с $\varepsilon \approx 40 - 80$ и применим до 118 ГГц для материалов $\varepsilon \approx 2 - 5$. Погрешность измерения $\operatorname{tg}\delta$ не превышает погрешности измерения собственной добротности резонатора.

Метод измерения параметров диэлектриков в ОР является наиболее распространённым при точных измерениях в миллиметровом диапазоне длин волн. В эталоне метод применяется на частотах от 26 до 178,4 ГГц и реализован в пяти открытых резонаторах с вогнутыми сферическими зеркалами.

Диэлектрическая проницаемость образца (меры) в резонансных методах в общем случае находится в результате решения трансцендентного уравнения вида

$$F(D, L, t, f_\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots) = 0, \quad (1)$$

где D, L, t - размеры резонатора и меры, f_ε - резонансная частота резонатора с образцом, ε_1 - измеряемая диэлектрическая проницаемость меры относительно вакуума, ε_2 - диэлектрическая проницаемость окружающего воздуха. Диэлектрическая проницаемость меры относительно окружающего воздуха определяется как $\varepsilon = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$.

Общее соотношение между собственными добротностями резонатора без образца и с образцом и $\operatorname{tg}\delta$ измеряемого образца имеет вид

$$\operatorname{tg} \delta = K_{1E}^{-1} (Q_{0\varepsilon}^{-1} - \eta Q_{00}^{-1}), \quad (2)$$

где $K_{1E} = W_{1E} / W_{\Sigma}$ - относительная доля электрической энергии колебания в измеряемом образце (коэффициент заполнения резонатора измеряемым образцом); W_{1E}, W_{Σ} - электрическая энергия в измеряемом образце и полная энергия резонатора соответственно; $Q_{00}, Q_{0\varepsilon}$ - собственные добротности резонатора без образца (меры) и с мерой; η - коэффициент изменения омических потерь в металлических стенках резонатора за счет перераспределения поля и токов в стенках после введения в него образца (меры). Для метода ОДР выражение (2) упрощается до

$$\operatorname{tg} \delta = K_{1E}^{-1} Q_{0\varepsilon}^{-1}, \quad (3)$$

где K_{1E} имеет значение $0,95 \leq K_{1E} < 1$.

Конкретные виды уравнения (1) и выражений для параметров K_{1E}, η в (2) зависят от метода (применяемого резонатора) и приведены, в частности, в работе [6]. Метод двухзеркального открытого резонатора (ОР) [12] применяется в миллиметровой части рабочего диапазона частот. Усовершенствованный ГЭТ 110-2010 с диапазоном частот от 1 до 78,33 ГГц рассмотрен в монографии [13]. В статье [14] рассматривается ГЭТ 110-2012 с диапазоном частот от 1 до 178,4 ГГц.

Государственный первичный эталон ГЭТ 110-2012 состоит из шести установок ЭУ-1...ЭУ-6 для воспроизведения единиц ε и $\operatorname{tg} \delta$:

- в диапазонах частот 1...18 ГГц и 18...40 ГГц, включающих в себя измеритель модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-40 и набор измерительных резонаторов;

- в диапазонах 37,5...53,57 ГГц, 53,57...78,33 ГГц, 78,33...118,1 ГГц, 118,1...178,4 ГГц, включающих в себя измерители модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-18, элементы СВЧ тракта, поляризационные аттенюаторы, умножители частоты с усилителями и наборы измерительных резонаторов.

Каждая эталонная установка имеет комплект аппаратуры и программное обеспечение. В установках ЭУ-1, ЭУ-2 используется один измеритель Р2М-40. В установках ЭУ-3, ЭУ-4 используется один измеритель Р2М-18 в режиме синтезатора частоты до 20 ГГц и интерфейса между детектором СВЧ и компьютером. В установках ЭУ-5, ЭУ-6 также используется один измеритель Р2М-18 в таком же режиме. Эталонные уста-

новки, используемые методы измерения (воспроизведения) и типоразмеры эталонных мер представлены в табл. 1.

В состав эталона входят также:

- комплект оборудования для воспроизведения единиц относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в интервале температур от 77 К до 373 К;
- меры диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, являющиеся возобновляемой частью эталона;
- средства измерений линейных размеров.

Таблица 1

Методы воспроизведения единиц и типоразмеры мер в ГЭТ 110-2012

Эталонная установка, диапазон частот, ГГц	Воспроизводимая единица и ее значение	Метод (резонатор)	Типоразмеры, диаметр \varnothing , а×b толщина t меры
ЭУ - 1 1 – 18	$\varepsilon = 2-500, \operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-5}-5 \cdot 10^{-3}$	МДР	$\varnothing 14-50$ мм, $t = 10-25$ мм
	$\varepsilon = 1,2-200, \operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-5}-5 \cdot 10^{-4}$	ОБР	$\varnothing 50$ мм, $t = 2-25$ мм
	$\varepsilon = 1,2-20, \operatorname{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-5}-1 \cdot 10^{-2}$	ЩР	$\varnothing 50$ мм, 60×48 мм, $t = 0,5-3$ мм
	$\varepsilon = 1,2-200, \operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-5}-1 \cdot 10^{-2}$	ОБР	$\varnothing 50$ мм, $t = 2-13$ мм
3-18 $T=77 \dots 373$ К	$\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-8}-1 \cdot 10^{-3}$	ОДР	$\varnothing 70-82$ мм, $t = 10$ мм
	$\varepsilon = 2-500, \operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-5}-1 \cdot 10^{-3}$	МДР	$\varnothing 14-50$ мм, $t = 10-25$ мм
ЭУ - 2 18– 40	$\operatorname{tg} \delta = 1 \cdot 10^{-5}-1 \cdot 10^{-3}$	ОДР	$\varnothing 10-50$ мм, $t = 5-10$ мм
26-40	$\varepsilon = 1,2-130, \operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-5}-1 \cdot 10^{-3}$	ОР	$\varnothing 50$ мм, 60×48 мм $t = 0,5-5$ мм

Продолжение таблицы 1

ЭУ – 3 37,5 – 53,57	$\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ $\varepsilon = 1,2 - 130$ $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$	ОДР ОР	$\varnothing 50 - 10 \text{ мм}, t = 5 - 10 \text{ мм}$ $\varnothing 50 \text{ мм}, 60 \times 48 \text{ мм}$ $t = 0,5 - 5 \text{ мм}$
ЭУ – 4 53,57 - 78,33	$\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ $\varepsilon = 1,2 - 130$ $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3}$	ОДР ОР	$\varnothing 50 - 10 \text{ мм}, t = 5 - 10 \text{ мм}$ $\varnothing 50 \text{ мм}, 60 \times 48 \text{ мм},$ $t = 0,5 - 5 \text{ мм}$
ЭУ – 5 78,33 - 118,1	$\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$ $\varepsilon = 1,2 - 40$ $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	ОДР ОР	$\varnothing 25 - 10 \text{ мм}, t = 2 - 5 \text{ мм}$ $\varnothing 50 \text{ мм}, 60 \times 48 \text{ мм},$ $t = 1 - 5 \text{ мм}$
ЭУ – 6 118,1 - 178,4	$\varepsilon = 1,2 - 40$ $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$	ОР	$\varnothing 50 \text{ мм}, 60 \times 48 \text{ мм},$ $t = 1 - 5 \text{ мм}$

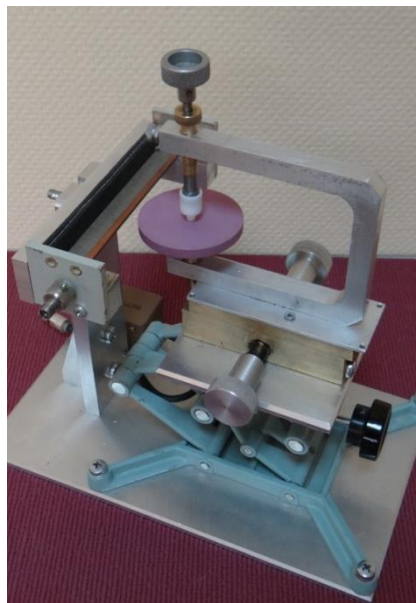
Диапазон величин ε и $\text{tg}\delta$ перекрывается набором эталонных мер с номинальными значениями ε вблизи 1,2; 2; 3; 3,8; 5,3; 10; 20; 40; 80; 100; 250; 320; 450, 520. Значения $\text{tg}\delta$ для данных мер при комнатной температуре находятся в интервале $10^{-2} - 10^{-5}$. Носителями данных свойств являются полимеры, в том числе вспененные, кварцевое стекло, оптическая керамика, сапфир, алюмоиттриевый гранат, керамики. При температуре 77 К для меры из сапфира воспроизводимое значение $\text{tg}\delta$ составляет $5 \cdot 10^{-8}$. Измерение одного и того же образца диаметром 50 мм или подложки с размерами 60x48 мм возможно несколькими методами на частотах от 3...8 ГГц до 178,4 ГГц. На рис. 1-3 приведены фото резонаторов и установок.

Точность измерения ε и особенно $\text{tg}\delta$ резонансными методами зависит от точности определения резонансной частоты f_0 , f_ε и собственной добротности Q_{00} , $Q_{0\varepsilon}$ резонатора без образца (меры) и с мерой соответственно. Для расчета Q_{00} , $Q_{0\varepsilon}$ по измеряемой нагруженной добротности Q_0 , Q_ε необходимы коэффициенты связи резонатора с трактом, которые расчи-

тываются из коэффициента передачи резонатора по мощности на резонансной частоте.



Объемный H_{0mp} - резонатор



Открытый диэлектрический резонатор

Рис. 1. Эталонные резонаторы

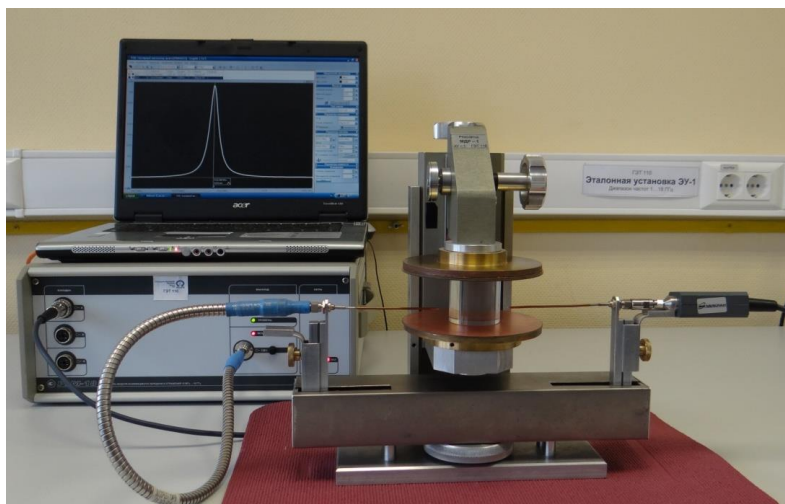


Рис. 2. Установка ЭУ-1 с металлодиэлектрическим резонатором

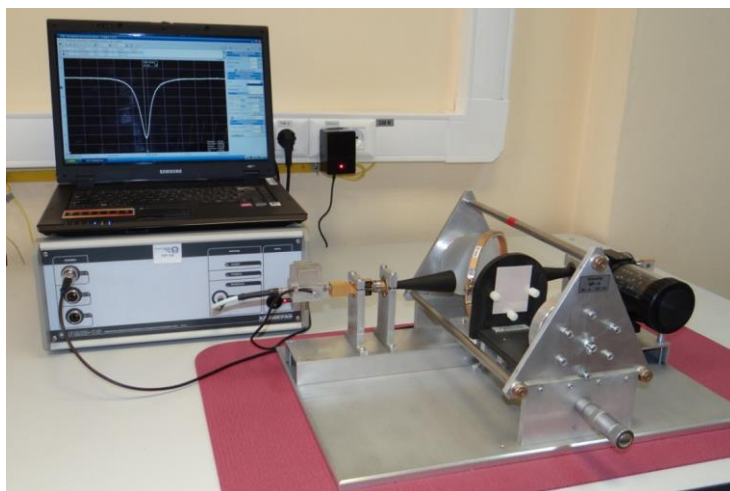


Рис. 3. Установка ЭУ-6 с открытым двухзеркальным резонатором на диапазон частот от 118,1 до 178,4 ГГц

Классическая "лоренцева" резонансная характеристика полностью определяется тремя параметрами: резонансной частотой, коэффициентом передачи на резонансной частоте и полосой пропускания (добротностью) резонатора. В открытых резонаторах, как известно, полное поле состоит из колебаний дискретного спектра (резонансов) и непрерывного спектра, представляющего прямое просачивание мощности со входа резонатора на его выход и называемого нерезонансным фоном, который в общем случае искажает резонансную кривую, приводит к смещению экстремума резонансной кривой (резонансной частоты) и к погрешности в измерении добротности. Устранение этого фона техническими средствами возможно не всегда. В отличие от обычной резонансной кривой, содержащей три параметра - резонансную частоту, нагруженную добротность и коэффициент передачи, резонансная кривая с просачиванием мощности содержит еще коэффициент просачивания и фазу сигнала просачивания [15]. Используемые в эталоне цифровые скалярные анализаторы цепей P2M-18, P2M-40 выдают измеряемую характеристику тракта в виде двумерного числового массива коэффициента передачи и соответствующей частоты, который далее обрабатывается для получения характеристик резонанса.

Пять неизвестных параметров обобщенной резонансной функции, учитывающей нерезонансный фон, определяются в результате аппроксимации экспериментальных значений коэффициента передачи по критерию "наименьших квадратов". Обобщенная резонансная функция резонатора и особенности аппроксимации резонансных характеристик описаны в [15]. На рис. 4 показана аппроксимация экспериментальной

резонансной характеристики обычной и обобщенной резонансными функциями.

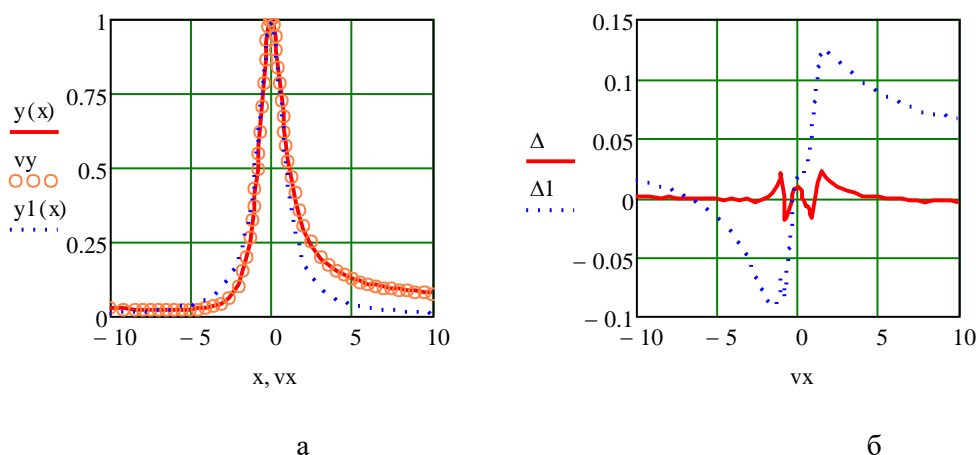


Рис.4 –Аппроксимация экспериментальной резонансной характеристики (ooo) обычной (.....) и обобщенной (—) резонансными функциями (а) и их отклонения от экспериментальных данных (б)

При создании эталона были проанализированы следующие источники погрешностей (неопределенности):

- погрешность определения геометрических размеров мер с помощью средств измерений линейных размеров, входящих в состав эталона;
- погрешность размеров измерительного резонатора;
- погрешность измерения резонансной частоты и ослабления в применяемых измерителях Р2М-18 и Р2М-40;
- погрешность определения поверхностного сопротивления зеркал МДР;
- погрешность значений относительной диэлектрической проницаемости окружающего воздуха.

Эти составляющие через коэффициенты их влияния учитываются в погрешности эталона. Проанализированы эффекты, приводящие к отличию измерительных резонаторов от их расчетных моделей: конечный размер зеркал МДР; потери энергии на излучение из ОДР и влияние элементов его крепления; влияние устройств связи резонатора; остаточные зазоры между мерой и стенками резонатора; прямое просачивание СВЧ мощности через резонатор. На часть эффектов введены поправки и выполнена коррекция программным путем, другие конструктивными и методическими способами сведены до незначительного уровня. Резонаторы имеют регулируемые устройства связи, которые позволяют установить малую связь с трактом (-30

дБ и менее). В табл. 2 приведены экспериментальные результаты определения ε , $\operatorname{tg}\delta$ ряда эталонных мер.

Таблица 2

Экспериментальные результаты определения ε , $\operatorname{tg}\delta$ ряда эталонных мер

Эталонная мера, материал, размеры, мм	Метод	f_{ε} , ГГц $Q_{0\varepsilon}$	ε	$\operatorname{tg}\delta$
ЭМ-520-15/10 Керамика BSM Ø14,996 мм; $t=9,999$ мм	МДР	1,046 670	525,8	$1,3 \cdot 10^{-3}$
ЭМ-ПСВ-50/13 Пенополистирол Ø49,300 мм; $t=12,992$ мм	ОБР	9,773 20630	1,34	$2,1 \cdot 10^{-4}$
ЭМ-130-50/1 Керамика Д130 Ø49,883 мм; $t=1,006$ мм	ОР	64,468 5360	121,6	$6,0 \cdot 10^{-3}$
ЭМ-В40П-2, Керамика В40, подложка 60×48 мм; $t=1,954$ мм	ОР	176,059 21100	44,60	$4,0 \cdot 10^{-3}$
ЭМ-ЛС-82/10 Сапфир Ø82,218 мм; $t=10,623$ мм	ОДР при T=77 К	8,248 22245590	-	$4,5 \cdot 10^{-8}$

Подробный пример расчета погрешностей (неопределенностей) эталона приведен в монографии [14]. В таблице 3 приведены метрологические характеристики ГЭТ 110-2012, оцененные в соответствии с [16,17]. Метрологические характеристики эталона не уступают зарубежным аналогам. По диапазону воспроизводимых эталоном значений диэлектрических потерь в области сверхмалых значений (10^{-8}) эталон не имеет аналогов. На рис.5 приведена резонансная характеристика сапфирового ДР (меры $\operatorname{tg}\delta$) с собственной добротностью более $2,2 \cdot 10^7$, воспроизводящая минимальное значение $\operatorname{tg}\delta$. Принятые в эталоне технические решения и методы воспроизведения единицы комплексной диэлектрической проницаемости полностью соответствуют задаче обеспечения единства измерений на частотах 1-178,4 ГГц на современном уровне точности для наиболее распространенных типоразмеров образцов. Перспективы развития диэлектрических измерений и обеспечения их единства предусматривают дальнейшее расширение частотного диапазона, решение проблем поверки, калибровки средств измерений диэлектрических параметров при температурах до 2000 °С.

Таблица 3

Метрологические характеристики ГЭТ 110-2012

Наименование характеристики	Воспроизводимая величина	Относительное значение характеристики
Среднее квадратическое отклонение	ε $\text{tg}\delta$	$5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$
Неисключенная систематическая погрешность	ε $\text{tg}\delta$	$1 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1}$
Стандартная неопределённость, оцененная по типу А	ε $\text{tg}\delta$	$5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$
Стандартная неопределённость, оцененная по типу В	ε $\text{tg}\delta$	$4 \cdot 10^{-5} - 1,5 \cdot 10^{-3}$ $4 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-1}$
Суммарная стандартная неопределённость	ε $\text{tg}\delta$	$6,4 \cdot 10^{-5} - 1,8 \cdot 10^{-3}$ $1,1 \cdot 10^{-2} - 1,1 \cdot 10^{-1}$
Расширенная неопределённость	ε $\text{tg}\delta$	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$

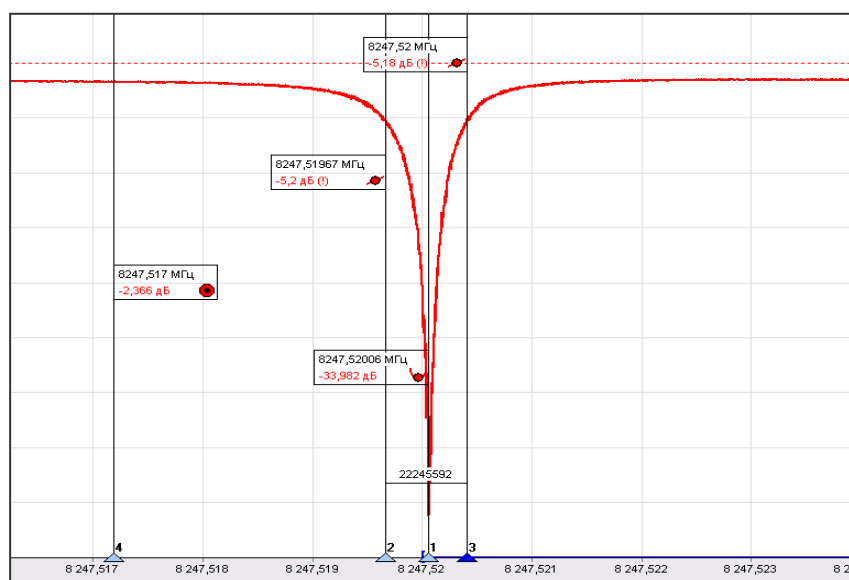


Рис. 5. Экспериментальная резонансная кривая для ОДР из сапфира ЭМ-ЛС-82/10 с добротностью 22 245 590 при температуре 77 К

2. Разработка нормативно-технических документов и поверочных схем

Разработаны государственные поверочные схемы для средств измерений диэлектрических параметров ГОСТ Р 8.711-2010 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 1 до 78,33 ГГц» и ГОСТ Р 8.711-2013 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1 до 178,4 ГГц».

Наиболее эффективным средством передачи размера единиц в данном виде измерений являются стандартные образцы (меры) диэлектрических параметров материалов. В настоящее время разработано и внесено в Реестр 14 типов государственных стандартных образцов диэлектрических параметров (СОДП) и более 20 типов отраслевых стандартных образцов и стандартных образцов предприятий [18]. Их использование позволяет минимизировать транспортную составляющую затрат на обеспечение единства измерений и не предъявляет требований к территориальному размещению эталонов.

Разработан и введен в действие ГОСТ Р 8.623-2006 «Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики выполнения измерений в диапазоне сверхвысоких частот». Данный стандарт введен взамен ГОСТ 8.544-86, гармонизирован с международными стандартами, в частности ИЕС 60377, ИЕС 61338-1-3 и определяет наиболее широко применяемые на практике методики выполнения измерений в данном виде в диапазоне частот от 1 до 20 ГГц. В настоящее время ведется переработка ГОСТ Р 8.623-2006. В новой редакции документа будут включены дополнительно новые методы измерения на основе $H_{отр}$ -резонатора в закритическом режиме, измерения стержневых образцов и уточнены соотношения для измерений листовых материалов в щелевом резонаторе.

Адаптирован международный стандарт МЭК 62562:2010 и утверждён идентичный ему ГОСТ Р МЭК 62562-2012 «ГСИ. Комплексная диэлектрическая проницаемость диэлектрических пластин с малыми потерями. Метод измерения в объёмном резонаторе». За период с 2010 г. по 2013 г. выполнена аттестация 280 государственных СО и СО (мер) предприятий по диэлектрическим параметрам на частотах до 178 ГГц.

3. Исследование диэлектрических свойств перспективных материалов и разработка стандартных справочных данных

Разработаны государственные стандартные справочные данные ГСССД 192-01 «Оксид алюминия монокристаллический (лейкосапфир). Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости в

диапазоне температур 93...343 К», ГСССД 277-2011 «Кварц монокристаллический. Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне температур 77...373 К» (рис. 6, 7), ГСССД 278-2011 «Гранат иттрий-алюминиевый. Относительная диэлектрическая проницаемость в диапазоне температур 77...373 К» [19-21]. Обнаружена и исследована значительная анизотропия диэлектрических потерь в монокристаллах сапфира и кварца, как при обычных температурах, так и в криогенной области (рис. 8) [22].

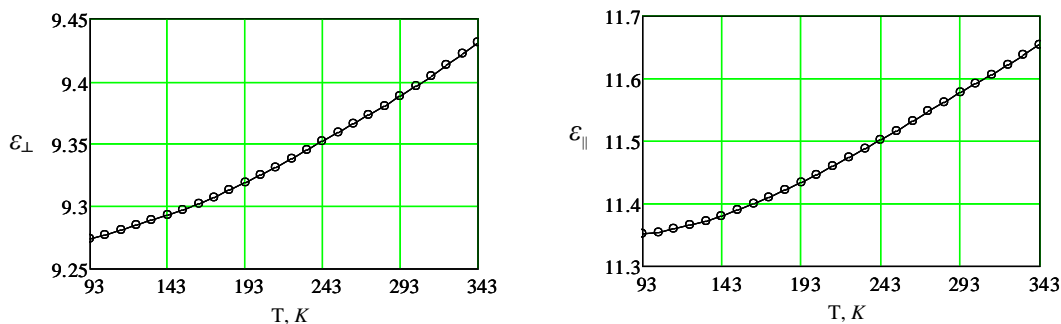


Рис. 6. Температурная зависимость тензора диэлектрической проницаемости монокристалла Al_2O_3 . Расширенная неопределённость результатов не более $\pm 0,3\%$ (Таблицы ГСССД-192-01)

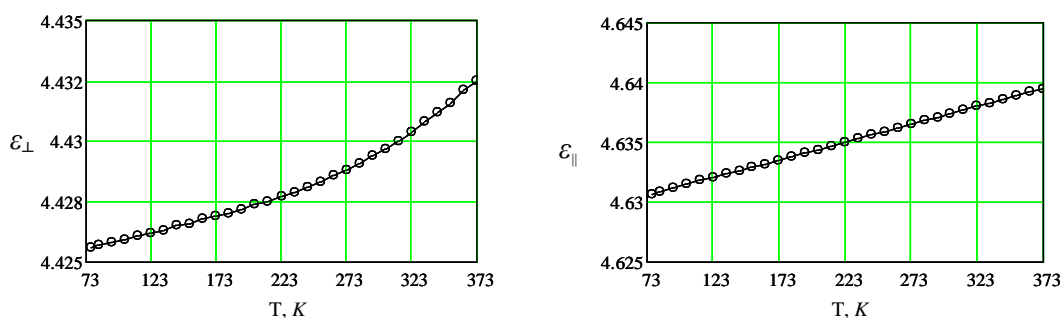


Рис.7 Температурная зависимость тензора диэлектрической проницаемости монокристалла SiO_2 . Расширенная неопределённость результатов не более $\pm 0,2\%$ (Таблицы ГСССД-227-2011)

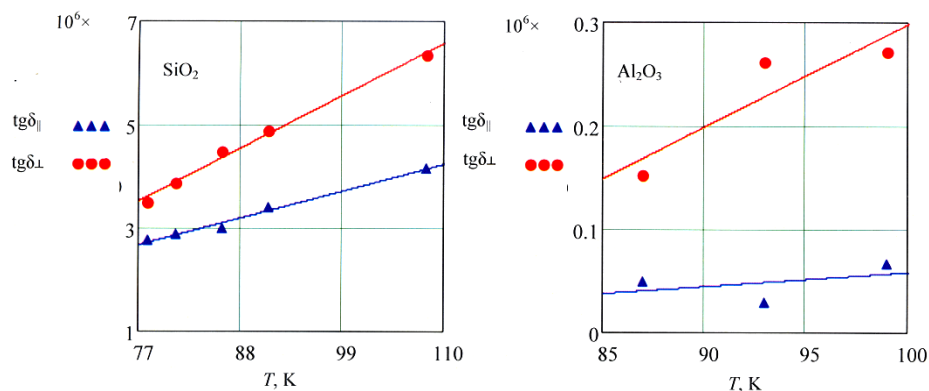


Рис.8. Анизотропия диэлектрических потерь монокристаллов сапфира и кварца

4. Решение измерительных задач для высокотехнологичных предприятий

Филиалом проводятся работы по созданию измерительных резонаторов СВЧ диапазона, измерительных ячеек в НЧ диапазоне и установок для измерений диэлектрических параметров материалов в интервале температур от 77 К до 673 К по заказам высокотехнологичных предприятий: ОАО «Композит» (г.Королев), ОАО «Особое конструкторское бюро кабельной промышленности» (г.Мытищи), ОАО «Поликор» (г. Кинешма), ОАО «ММЗ Авангард» (г. Москва), ОАО «Авитек» (г. Киров), НПП "Технология" (г.Обнинск), ФГУП «Крона» (г.Владимир), ОКБ «Сокол» (г.Казань), ОАО «Купол» (г.Ижевск) и др.

По заказу ОАО «Московский машиностроительный завод «Авангард» разработана, изготовлена и передана заказчику установка для измерения радиотехнических характеристик материалов ИРТХ-420, предназначенная для контроля параметров материалов антенных обтекателей при температуре до 420 °С. [23]

К разрабатываемому измерителю предъявлялись следующие требования:

- рабочая частота фиксированная в диапазоне 8 - 10 ГГц;
- измеряемые параметры, ε $\text{tg}\delta$;
- диапазон измерения ε от 2 до 10;
- диапазон измерения $\text{tg}\delta$ от 10^{-2} до 10^{-4} ;
- погрешность измерения не более 1 % по ε и не более 30 % по $\text{tg}\delta$;
- размеры образца: диаметр 50 мм, толщина от 2.5 до 3.5 мм;

-диапазон температур от 20 °С до 420 °С.

В разработанном измерителе в резонаторе нагревается только верхняя торцевая крышка, к которой снизу прижимается образец. Такое расположение значительно уменьшает разогрев самого резонатора за счет конвекции в сравнении с нижним расположением образца и нагревателя. На рис.9 приведены фото измерителя ИРТХ -420.

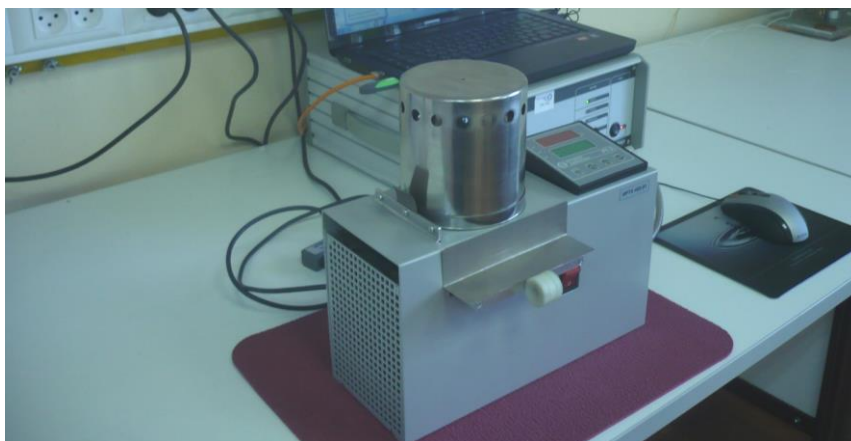


Рис.9. Измеритель радиотехнических характеристик материалов при нагреве до 420 °С

Исследования радиопрозрачных материалов при высоких температурах важны в ряде задач современной физики и технологии. Сложность таких исследований связана как с реализацией метода измерения и измерительного преобразователя (ячейки), пригодных для высоких температур, так и самого нагрева образцов в преобразователе [24]. Эта сложность резко возрастает с ростом объема исследуемого образца и преобразователя. Классический метод объемного H_{01p} -резонатора с дисковым образцом на подвижном поршне, реализованный в установках «Кварц» [25], требует точных измерений перемещения поршня для восстановления резонансной частоты. Сложность конструкции высокотемпературного резонатора с измерением положения поршня, его неконтролируемые перемещения и изменение размеров резонатора и образца при нагреве, а также большие габариты, энергопотребление и ограничение по температуре 1200 °С заставляют искать другие подходы к решению данной задачи, в частности, нагрев образца вне резонатора и его ввод в резонатор на короткое время (пролет через резонатор) [26] или частичный нагрев резонатора в области образца.

По заказу ОАО «Композит» (г. Королев) разработана и передана заказчику установка ИРТХ-1800 для исследования перспективных

высокотемпературных диэлектрических материалов [27], предназначенных для обтекателей антенн гиперзвуковых летательных аппаратов. Максимальная рабочая температура установки 1800 °С, потребляемая мощность не более 5,4 кВт. Частотный диапазон измерений 3-10 ГГц. Принцип измерения основан на смещении резонансной частоты и изменении добротности коаксиального четвертьволнового резонатора после помещения в его закритическую часть исследуемого образца. Применение коаксиального резонатора позволило расширить частотный диапазон, уменьшить размеры образца и тем самым необходимую для нагрева мощность. Конструкция резонатора в виде зонда дает возможность вводить и выводить исследуемый образец из зоны нагрева без разгерметизации печи и ее охлаждения. Цифровая обработка резонансных характеристик с компенсацией частотной зависимости коэффициента отражения самого зонда обеспечила повышение точности результатов измерения. Принятые конструктивные решения и используемые материалы в зонде позволяют проводить его нагрев до 2000 °С при использовании соответствующей печи.

Измерительный резонатор отражательного типа в виде зонда с односторонним подключением к СВЧ тракту имеет значительные преимущества, связанные прежде всего с возможностью нагрева только оконечной части зонда, содержащей образец. Тепловая развязка образуется за счет длинного участка однородной коаксиальной линии, заканчивающейся стандартным коаксиальным соединителем тракта 7/3.04 мм на другом "холодном" конце. Для измерений диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ при температурах до 1800 °С разработан зонд на основе коаксиальной линии с четвертьволновым коаксиальным резонатором отражательного типа на конце. Зонд выполнен из молибденовой трубы и внутреннего молибденового проводника. Исследуемый образец в виде цилиндра помещается в закритическую область резонатора. На рис.10 приведен внешний вид высокотемпературного зонда.



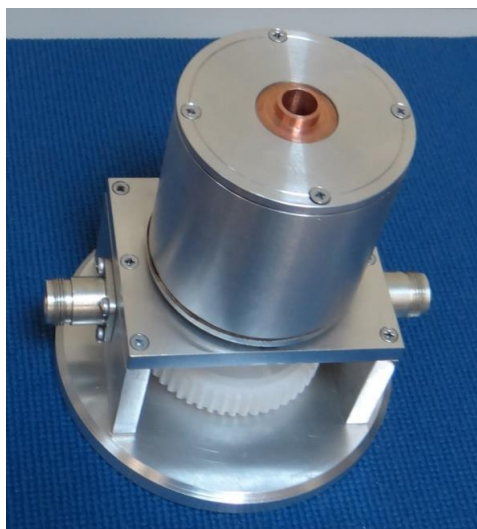
Рис. 10. Высокотемпературный измерительный преобразователь с датчиком КСВ

Измерение диэлектрических параметров ε и $\text{tg}\delta$ основано на изменении резонансной частоты и собственной добротности резонатора после помещения исследуемого образца в запредельный волновод. Измерительный коаксиальный резонатор без образца имеет резонансные частоты f_0 с интервалами, близкими к 1 ГГц и значения собственной добротности Q_{00} . После помещения исследуемого образца в запредельный волновод его резонансные частоты понижаются до значений f_ε и собственные добротности становятся $Q_{0\varepsilon}$. Для нагрева зонд помещается в трубчатую печь RHTH 120/150/18 с максимальной температурой 1800 °С. Нагреваемый объем печи имеет длину 150 мм, диаметр 40 мм с областью равномерного нагрева длиной 50 мм. Максимальная скорость нагрева 200 °С/час, номинальная потребляемая мощность 5,4 кВт. Печь допускает вакуумирование рабочего объема или его заполнение аргоном. На рис.11 приведено фото установки и температурные зависимости ε и $\text{tg}\delta$ материала СТМ.

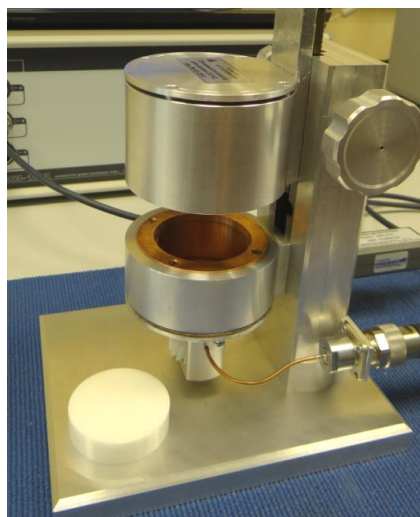


Рис. 11. Установка ИРТХ и температурные зависимости ε и $\text{tg}\delta$ высокотемпературного материала

Для определения возможности применения материалов в качестве исходной шихты для изготовления высокотемпературных диэлектрических материалов необходимо измерение диэлектрических свойств этих материалов в порошкообразном состоянии. По заказу ОАО «Композит» разработан, изготовлен и поставлен измерительный резонатор, программное обеспечение и методика измерения диэлектрических параметров стержневых образцов и материалов в порошкообразном состоянии (рис. 12а). Кроме порошков, резонатор и методика измерений позволяют проводить исследование диэлектрических свойств жидкостей.



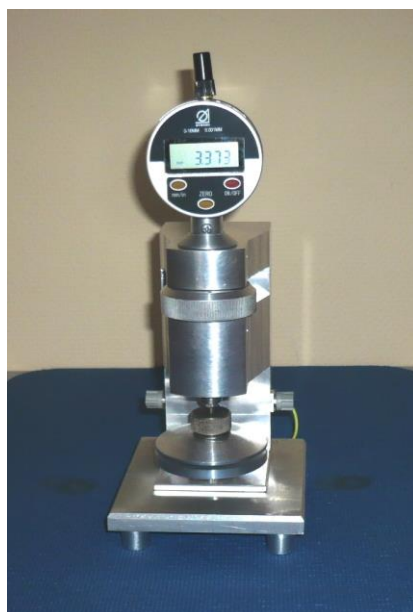
а



б



в



г

Рис.12. Измерительные резонаторы (а-в) и конденсаторная ячейка (г) для диэлектрических измерений на промышленных предприятиях

По заказам ряда предприятий разработаны и переданы заказчикам измерительные резонаторы и методика измерений диэлектрических параметров материалов для радиопрозрачных укрытий антенных систем различного назначения и материалов для многослойных линзовых антенн (линз Люнеберга), (рис. 12б); перестраиваемый измерительный резонатор, методика измерений и программное обеспечение для измерения диэлектрических параметров по ГОСТ Р 8.623-2006 - резонатор имеет электрический привод перемещения и электронный индикатор для измерения перемещения (рис. 12в), а также измерительная ячейка ИЯ-2Т и методики измерений диэлектрических параметров электроизоляционных и композитных материалов, применяемых в энергетике, кабельной промышленности, ракетно-космической технике, радиоэлектронике и связи в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц (рис. 12г).

4. Развитие методов измерений электромагнитных параметров материалов

Измерения диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ материалов проводят обычно классическим методом цилиндрического H_{01p} -резонатора на образцах в виде дисков [2]. Наиболее распространены резонаторы диаметром 50 мм, работающие в диапазоне частот 8-12 ГГц. На более низких частотах находят применение цилиндрические объемные резонаторы с колебанием E_{010} и измеряемые образцы в виде стержней. Теория такого резонатора содержит приближения, связанные с существованием отверстий для ввода образца по оси резонатора в максимум электрического поля. Достоинством метода является высокая чувствительность при относительно небольших диаметрах измеряемого образца. Повышение частоты измерения в E_{010} -резонаторе требует уменьшения диаметра исследуемых образцов. На более толстых образцах измерения можно проводить в цилиндрическом H_{01p} -резонаторе. Его приближенная теория изложена в [28]. В работе [29] изложена строгая теория цилиндрического резонатора диаметром $D = 2R_0$, высотой L с соосным магнитодиэлектрическим стержнем диаметром $d = 2a$ (рис.13).

Граничные условия $E_{1\varphi} = E_{2\varphi}$, $H_{1z} = H_{2z}$ на поверхности диэлектрического стержня при $r = a$ приводят к характеристическому уравнению колебаний H_{01p}

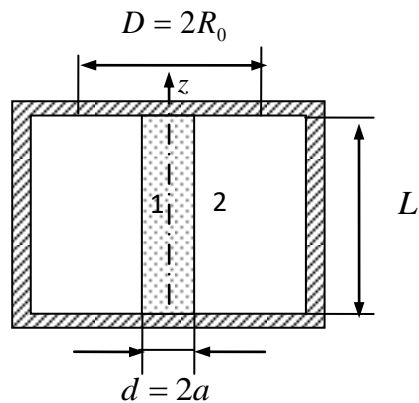


Рис. 13. Цилиндрический резонатор с магнитоэлектрическим стержнем

$$\frac{\mu J_1(x)}{x J_0(x)} - \frac{Z_1(y)}{y Z_0(y)} = 0, \quad (3)$$

где $x = \chi_1 a = \sqrt{(k_1 a)^2 - (h a)^2}$, $y = \chi_2 a = \sqrt{(k_2 a)^2 - (h a)^2}$, $\mu = \mu_1 / \mu_2$ - магнитная проницаемость стержня относительно среды,

$J_n(\chi_1 r)$ -функции Бесселя порядка $n = 0; 1$,

$$Z_0(\chi_2 r) = J_0(\chi_2 r) - (J_1(\chi_2 r b) / N_1(\chi_2 r b)) \cdot N_0(\chi_2 r),$$

$$Z_1(\chi_2 r) = J_1(\chi_2 r) - (J_0(\chi_2 r b) / N_0(\chi_2 r b)) \cdot N_1(\chi_2 r),$$

$N_n(\chi_2 r)$ -функции Неймана порядка $n = 0; 1$,

$\chi_1 = \sqrt{k_1^2 - h^2}$ - поперечное волновое число в стержне,

$\chi_2 = \sqrt{k_2^2 - h^2}$ - поперечное волновое число вне стержня,

$k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} / c$ - волновое число в стержне,

$k_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} / c$ - волновое число вне стержня,

$h = p\pi / L$ - продольное волновое число,

$p = 1, 2, 3, \dots$ - продольный индекс колебания,

$$b = D/d = R_0/a,$$

ε_1 - диэлектрическая проницаемость стержня (относительно вакуума),

ε_2 - диэлектрическая проницаемость среды в резонаторе,

$\varepsilon = \varepsilon_1/\varepsilon_2$ - диэлектрическая проницаемость стержня относительно среды;

μ_0 - магнитная постоянная вакуума,

μ_1 - магнитная проницаемость стержня (относительно вакуума),

μ_2 - магнитная проницаемость среды в резонаторе,

c - скорость света, $\omega = 2\pi f_\varepsilon$,

f_ε - резонансная частота резонатора со стержнем.

Диэлектрическая проницаемость немагнитного стержня в немагнитной среде ($\mu_1 = \mu_2 = 1$) рассчитывается из (3) как

$$\varepsilon = \frac{x^2 + (ha)^2}{(k_2 a)^2} = \frac{x^2 + (p\pi d/2L)^2}{(\pi d f_\varepsilon / c)^2 \varepsilon_2}. \quad (4)$$

Для расчета $\operatorname{tg} \delta$ по (2) необходимо найти коэффициент заполнения резонатора K_{1E} и коэффициент изменения омических потерь после ввода образца в резонатор η . Коэффициент заполнения резонатора выразится как

$$K_{1E} = \frac{W_{1E}}{W_\Sigma}, \quad (5)$$

где $W_\Sigma = W_{1E} + W_{2E}$,

$$W_{1E} = \frac{\mu_0 \mu_1}{2} \cdot \frac{\pi a^2 L}{2} \cdot \left(\frac{k_1 a}{x} \right)^2 [J_1^2(x) - J_0(x)J_2(x)],$$

$$W_{2E} = \frac{\mu_0 \mu_2}{2} \cdot \frac{\pi a^2 L}{2} \cdot \left(\frac{k_2 a}{y} \right)^2 \left[\frac{J_0(x)}{Z_0(y)} \right]^2 \left[b^2 Z_0^2(yb) - Z_1^2(y) + Z_0(y) Z_2(y) \right].$$

Коэффициент изменения омических потерь после введения образца в резонатор будет:

$$\eta = \frac{Q_{00}}{Q_{RE}} = \frac{Q_{00} P_{\Sigma}(f_{\varepsilon})}{2\pi f_{\varepsilon} W_{\Sigma}}, \quad (6)$$

где $P_{\Sigma}(f_{\varepsilon}) = P_{\text{бок}} + 2P_{\text{тор а}} + 2P_{\text{тор R}}$ - полная мощность омических потерь в стенках резонатора с образцом и

$$P_{\text{бок}} = \frac{R_s(f_{\varepsilon}) \pi DL}{2} \left[\frac{J_0(x)}{Z_0(y)} \right]^2 Z_0^2(yb),$$

$$2P_{\text{тор а}} = \frac{R_s(f_{\varepsilon})}{2} \pi a^2 \left(\frac{ha}{x} \right)^2 \left[J_1^2(x) - J_0(x) J_2(x) \right],$$

$$2P_{\text{тор R}} = \frac{R_s(f_{\varepsilon})}{2} \pi a^2 \left(\frac{ha}{y} \right)^2 \left[\frac{J_0(x)}{Z_0(y)} \right]^2 \left[b^2 Z_0^2(yb) - Z_1^2(y) + Z_0(y) Z_2(y) \right] —$$

мощности омических потерь в боковой стенке резонатора, в двух торцевых стенках резонатора в пределах сечения стержня и вне сечения стержня соответственно. Собственная добротность пустого резонатора на частоте f_0 равна

$$Q_{00} = \frac{\pi \mu_0 f_0}{R_s(f_0)} \cdot \frac{DL}{2 \left[(D-L) \left(\frac{pc}{2Lf_0 \sqrt{\varepsilon_2}} \right)^2 + L \right]}.$$

По ее экспериментальному значению находится поверхностное сопротивление стенок пустого резонатора $R_s(f_0)$ на резонансной частоте пустого резонатора f_0 . На частоте f_{ε} поверхностное сопротивление стенок резонатора с образцом в (6) будет

$$R_s(f_{\varepsilon}) = R_s(f_0) \sqrt{\frac{f_0}{f_{\varepsilon}}}.$$

Тангенс угла диэлектрических потерь стержня рассчитывается по (2), где K_{1E} , η рассчитываются по (5) и по (6) соответственно. В работе [30] изложена теория резонатора с двухслойным магнитодиэлектрическим стержнем, позволяющая проводить измерение электромагнитных параметров образцов в виде стержней, трубок, а также порошков и жидкостей.

Заключение

В результате выполненного комплекса работ расширен частотный диапазон Государственного первичного эталона ГЭТ 110 с повышением верхней рабочей частоты с 10 до 178,4 ГГц, расширен диапазон воспроизводимых значений диэлектрической проницаемости до 500 и введено воспроизведение единицы тангенса угла диэлектрических потерь. Характеристики эталона соответствуют измерительным возможностям ведущих стран в этой области. Создана современная измерительная база и обеспечено единство измерений диэлектрических параметров материалов на ведущих высокотехнологичных предприятиях России, разрабатывающих и применяющих диэлектрические материалы в системах нового поколения, том числе аэрокосмического и оборонного назначения. Разработаны установки для диэлектрических измерений при нагреве до 1800 °С.

Литература

1. ГОСТ 27496.2-87 Материалы электроизоляционные. Методы определения диэлектрических свойств на частотах свыше 300 МГц. Резонансные методы.
2. ГОСТ Р 8.623-2006 ГСИ. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твёрдых диэлектриков. Методики выполнения измерений в диапазоне сверхвысоких частот.
3. IEC 61338 1-3 Waveguide type dielectric resonators-Part 1-3: General information and test condition – Measurement method of complex relative permittivity for dielectric resonator materials at microwave frequency.
4. IEC 62562-2010 Cavity resonator method to measure the complex permittivity of low-loss dielectric plates.
5. IEC 60377-2 Methods for the Determination of the Dielectric Properties of Insulating Materials at Frequencies Above 300 MHz Part 2: Resonance Methods.
6. Егоров В.Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента.- 2007.- Т.50.- № 2.- С.5.
7. Егоров В.Н., Кащенко М.В. Измерение малых диэлектрических потерь в объемном резонаторе//Измерительная техника.- 2002.- №1.- С. 61.

8. Егоров В.Н., Кащенко М.В., Онхонов Р.Р. Точность диэлектрических измерений в объёмном цилиндрическом H_{01p} -резонаторе // Измерительная техника.- 2003.- № 10.- С. 41-45.
9. Егоров В.Н., Токарева Е.Ю. Метод металлодиэлектрического резонатора в измерениях параметров радиоматериалов // Измерительная техника.- 2005.- № 9.- С. 65- 70.
10. Взятых В.Ф., Добромислов В.С. Метод дискового диэлектрического резонатора для измерения высококачественных диэлектриков в миллиметровом диапазоне длин волн // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника.- 1978.- Вып.10(164).- С.6.
11. Егоров В.Н., Костромин В.В. Методика измерения $\text{tg}\delta$ полимеров в миллиметровом диапазоне волн при температурах 4,2...350 К // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.- 1988.- Вып.10(414).- С.34.
12. Gullen A.L. Millimeter-Wave Open Resonator Techniques // Infrarad and Millimeter Waves. 1983. Vol.10. Pt.2. P.233.
13. Балаханов М.В., Уздин Р.И., Пругло В.И., Маневич В.З., Егоров В.Н. Радиотехнические эталоны для приоритетных научно-технических направлений и новейших технологий. Менделеево: ФГУП "ВНИИФТРИ".- 2012.- 119 с.
14. Егоров В.Н., Кащенко М.В., Масалов В.Л., Токарева Е.Ю., Нонг Куок Куанг. Государственный первичный эталон единиц комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 1 до 178,4 ГГц// Измерительная техника.- 2014.- №1.- С.3-7.
15. Егоров В.Н. Характеристики резонаторов сверхвысоких частот с нерезонансным просачиванием мощности// Известия вузов. Радиофизика.- 2010.- №8.- С. 493-503.
16. РМГ 43-2001 ГСИ Применение «Руководства по выражению неопределённости измерений».
17. ГОСТ 8.381-2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.
18. О.И. Гудков, М.В. Кащенко Стандартные образцы относительной диэлектрической проницаемости// Измерительная техника.- 1981.- №2.
19. ГСССД 192-2001 Оксид алюминия монокристаллический (лейкосапфир). Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне температур 93...343 К/В.Н. Егоров, М.В. Кащенко. М., 2001.- 11 с., деп. во ВНИЦСМВ 20.03.2001, № 792 а-01 кк.

20. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 277-2011. Кварц монокристаллический. Компоненты тензора относительной диэлектрической проницаемости в диапазоне температур 77...373 К/ В.Н. Егоров, М.В. Кащенко, В.Л. Масалов, Е.Ю. Токарева. М., 2011.-13 с., деп. В ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 02.06.2011, № 869-2011 кк.
21. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 278-2011. Гранат иттрий-алюминиевый. Относительная диэлектрическая проницаемость в диапазоне температур 77...373 К/ В.Н. Егоров, М.В. Кащенко, В.Л. Масалов, Е.Ю. Токарева. М., 2011.- 11 с., деп. В ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 02.06.2011, № 870-2011 кк.
22. Егоров В.Н., Масалов В.Л., Ожогов И.Б. Анизотропия диэлектрических потерь в монокристаллах Al_2O_3 и SiO_2 //Письма в ЖТФ.- 2009.- Т.35.- №23.- С. 23-31.
23. Егоров В.Н., Кащенко М.В., Масалов В.Л., Токарева Е.Ю. Измеритель диэлектрических параметров материалов на СВЧ при температуре до 420 °С//Материалы Междунар. Сибирской конференции "Сибкон". 15-16 сент. 2011.- Красноярск.- Сиб. фед. универ.- С. 493-496.
24. Воробьев Е.А., Михайлов В.Ф., Харитонов А.А. СВЧ диэлектрики в условиях высоких температур.- М.: Сов. радио.- 1977.- С. 207.
25. Батура В.Г., Моисеев В.К., Рыбалко Н.В.//Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.- 1974.- № 1.- С. 66.
26. Полонский Ю.А., Мишин В.Б., Бернштейн Р.С., Смыслов Ю.И. Определение диэлектрических характеристик материалов в диапазоне сверхвысоких частот при температурах до 2300К//Теплофизика высоких температур.-1989.-Т.27.-№3.-С.499-505.
27. Егоров В.Н., Масалов В.Л., Кащенко М.В., Токарева Е.Ю. Установка для диэлектрических измерений на СВЧ при нагреве до 1800 °С//Изв. вузов. Физика.-2013.- Т. 56.- №.8/2- С. 347-349.
28. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: ГИФМЛ.-1963.
29. Егоров В.Н., Костромин В.В., Токарева Е.Ю. Метод H_{01p} –резонатора для измерения диэлектрических параметров стержней// Кабели и провода.- 2013.- №1.- С.22-24.
30. Егоров В.Н., Токарева Е.Ю. Метод H_{01p} – резонатора для измерения электромагнитных параметров стержней, трубок, порошков и жидкостей// Изв. вузов. Физика.- 2013.- Т. 56.- №.8/2- С. 350-352.