

Измерение малых диэлектрических потерь полимерных материалов в дециметровом диапазоне волн

В.Н. Егоров, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ»;

Я.О. Зуев, ведущий инженер АО «ОКБ КП»;

В.В. Костромин, канд. техн. наук, главный специалист испытательного центра АО «ОКБ КП»;

Ле Куанг Туен, магистрант ИрНИТУ;

Б.С. Романов, канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории испытательного центра АО «ОКБ КП»

Аннотация. Рассматривается измерение относительной диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan\delta$ слабопоглощающих диэлектриков на частотах дециметрового диапазона в высокодобротном коаксиальном резонаторе с «укорачивающим» ёмкостным зазором. Резонатор имеет собственную добротность более 6850 на частоте 550 МГц и позволяет измерять дисковые образцы изоляционных материалов стандартного диаметра 50 мм толщиной от 0,5 до 2,1 мм с малым $\tan\delta$. Высокая добротность резонатора достигается снижением излучательных потерь энергии СВЧ-колебания через окно для ввода измеряемого образца в резонатор.

Приведены характеристики измерительной установки с данным резонатором и результаты измерений диэлектрических параметров ряда изоляционных материалов.

Ключевые слова: коаксиальный резонатор с укорачивающей ёмкостью, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, электроизоляционные материалы.

В качестве изоляции радиочастотных кабелей (РК) используются неполярные диэлектрики с малыми диэлектрическими потерями, такие как полиэтилен низкой плотности и фторполимеры различных модификаций.

В производстве радиочастотных кабелей для обеспечения требуемых параметров готовых изделий необходим входной контроль параметров исходных материалов, в частности, диэлектрических параметров материалов изоляции. От величины относительной диэлектрической проницаемости изоляции ϵ зависит волновое сопротивление РК, а повышение $\tan\delta$ в диэлектрике приводит к росту коэффициента затухания в кабеле [1].

Для современных высокочастотных диэлектриков величина $\tan\delta$ составляет 10^{-4} и менее. Наиболее точные измерения малых диэлектрических потерь достигаются резонансными методами измерений, в которых используется резонатор с собственной добротностью Q порядка 10^4 . Высокая чувствительность измерения достигается, когда измеряемый образец занимает существенный объём резонатора, то есть имеет, по крайней мере, один размер, сопоставимый с длиной волны в частотном диапазоне измерения, и запасённая в образце энергия составляет не менее 0,1–0,3 общей запасённой в резонаторе электромагнитной энергии. Задача ввода в резонатор образца, имеющего сопоставимые с длиной волны размеры, оказывается трудноразрешимой без ухудшения собственных параметров резонатора.

Наибольшее распространение в дециметровом диапазоне электромагнитных волн получили квазистационарные цилиндрические коаксиальные измерительные резонаторы

Abstract. The article deals with the measurement of specific dielectric constant $\tan\delta$ and loss-angle tangent of low-absorption dielectric materials at ultra-high band frequencies in a high-quality coaxial resonator with a «shortening» capacitive gap. The resonator has intrinsic Q-factor over 6850 at a frequency of 550 MHz and is capable of measuring disc specimens of insulating materials with a standard diameter of 50 mm, thickness from 0.5 to 2.1 mm and low $\tan\delta$. The high Q-factor of the resonator is achieved by lowering the microwave energy loss due to radiation through the window for inserting the measured specimen into the resonator.

The characteristics of the measurement unit with this resonator and the measurement results of the dielectric parameters of certain insulating materials are presented.

Key words: coaxial resonator with a shortening capacitive gap, dielectric capacitance, loss-angle tangent, insulating materials.

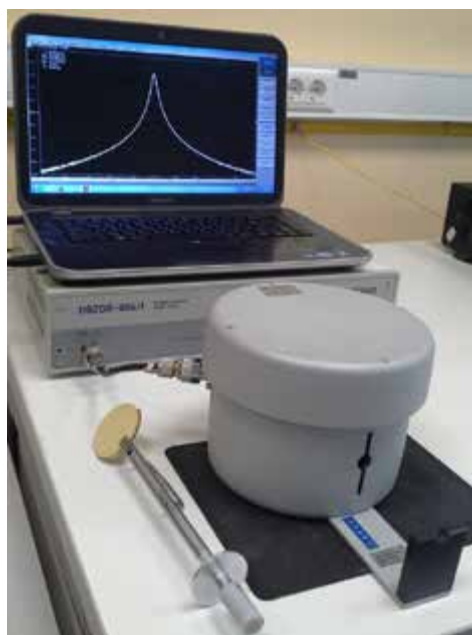
Материал поступил в редакцию 15.12.2017

Егоров В.Н. E-mail: egorov@niiftri.irk.ru

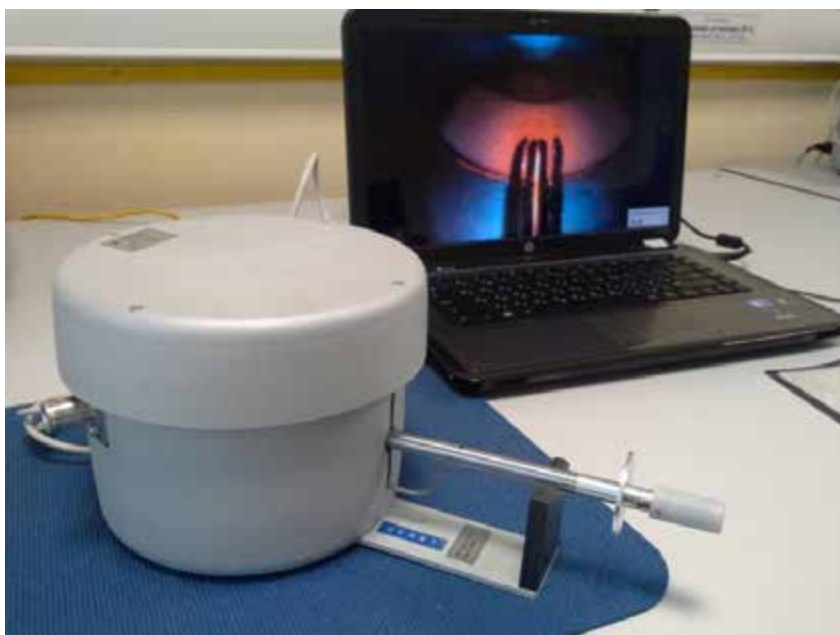
Костромин В.В. E-mail: valeriy.kostromin@okbcp.ru

с «укорачивающей» ёмкостью в центральном проводнике резонатора, состоящем из верхнего и нижнего электродов, разделённых измерительным («укорачивающим») зазором [2]. Их достоинствами являются приемлемые габариты и высокая, в сравнении с другими типами резонаторов этого диапазона, собственная добротность. Применяемые на практике коаксиальные резонаторы имеют отверстие для ввода измеряемого образца в резонатор, сопоставимое по размеру с длиной волны. Потери энергии резонатора на излучение через это отверстие обычно составляют заметную величину и ограничивают собственную добротность резонатора на уровне 1000–1500, которая недостаточна для точного измерения $\tan\delta \leq 10^{-4}$.

В [3] предложена конструкция коаксиального резонатора КР-500М с «укорачивающим» ёмкостным измерительным зазором в центральном электроде и неизлучающим окном в стенке резонатора для ввода-вывода образца. Резонатор работает на основном (низшем по частоте) типе колебания и имеет в измерительном зазоре вектор электрического поля, ортогональный плоским поверхностям зазора и образца. Для достижения максимальной добротности волновое сопротивление коаксиальных частей резонатора выбрано близким к оптимальному. С этой же целью отверстие в стенке резонатора для ввода-вывода образца сделано в виде неизлучающей щели, что требует разворота плоскости образца внутри резонатора на 90° при его вводе и выводе. Резонатор помещен в защитный кожух для снижения чувствительности к механическим воздействиям, в частности к нагрузкам на верхнюю крышку, и к изменениям окружающей температуры.



а



б

Рис. 1. Резонатор KP-500M в составе установки (а) и изображение держателя с образцом внутри резонатора (б)

Измерительный («укорачивающий») зазор высотой 3,1 мм выполнен в центральном электроде резонатора диаметром 38 мм. Для измерений используются образцы стандартного диаметра 50 мм толщиной от 0,5 до 2,1 мм.

Резонатор KP-500M предназначен для работы с измерителем комплексных коэффициентов передачи и отражения «Обзор-103» или аналогичным измерителем комплексных коэффициентов передачи и отражения типа OBZOR-304/1. Собственная добротность резонатора без образца составляет 6850 на резонансной частоте 551 МГц. Значение резонансной частоты резонатора с измеряемым образцом определяется толщиной и диэлектрической проницаемостью ϵ образца, снижение добротности резонатора с образцом определяется значением $\tan\delta$ образца.

Дисковый измеряемый образец вводится в резонатор через отверстие в цилиндрическом корпусе резонатора, выполненное в виде неизлучающей щели, параллельной линиям поверхностного тока в стенке корпуса. Ввод и вывод образца в резонатор осуществляется специаль-

ным держателем образца (показан на рис. 1а), которым также выполняется разворот плоскости образца на 90° в резонаторе для последующего ввода в измерительный («укорачивающий») зазор между центральными электродами. Центрирование образца в зазоре производят три тонкие диэлектрические нити, параллельные центральным электродам. В отверстиях верхней крышки резонатора установлены веб-камера и светодиоды для подсветки внутреннего объема резонатора с целью наблюдения процесса ввода образца в измерительный зазор и извлечения обратно. Веб-камера подключается через USB-порт к компьютеру. Компьютер управляет работой анализатора цепей «Обзор-103», выводит на экран резонансную характеристику и изображение внутренней области резонатора с веб-камеры. На этом же компьютере проводится расчет ϵ и $\tan\delta$ по резонансной частоте $f_{\text{рез}}$ и добротности резонатора с образцом $Q_{\text{с образцом}}$. Общий вид резонатора в составе установки приведен на рис. 1. На рис. 2 показано расположение образца в измерительном зазоре внутри резонатора.

Технические характеристики установки с резонатором KP-500M приведены ниже.

Резонансная частота без образца, МГц	551,4
Коэффициент передачи резонатора на резонансе, дБ	- 29
Собственная добротность резонатора	6850
Высота измерительного зазора, мм	3,1
Диаметр центрального электрода, мм	38
Габаритные размеры резонатора не более, мм	280 × 200 × 152
Масса резонатора не более, кг	3
Диапазон измеряемых значений ϵ	от 1,5 до 10
Диапазон измеряемых значений $\tan\delta$	от 5×10^{-5} до 1×10^{-2}

Предел допускаемой относительной погрешности по ϵ	± 2 %
Предел допускаемой относительной погрешности по $\tan\delta$	± 25 %



Рис. 2. Изображение образца фторопласта-4 в измерительном зазоре резонатора

Результаты измерений стандартных образцов диэлектриков

Тип СО	ϵ , изм.	ϵ , атт.	$\tan\delta_{изм} \times 10^4$	$\tan\delta_{атт} \times 10^4$	$\Delta\epsilon$, %	$\Delta(\tan\delta)$, %
ДФФТД-1 фторопласт-4МБ	2,02	2,04	6,5	6,3	-1,0	3
ДФФТД-2 фторопласт-4	2,00	2,04	2,9	2,4	-2,0	21
ДППД-1 полиэтилен	2,25	2,27	5,6	5,0	-0,9	12
ДППД-2 полиэтилен	2,25	2,27	5,7	5,0	-0,9	14
ДППСД полистирол	2,58	2,54	5,7	7,5	1,6	-24
ДПАРД арилокс	2,69	2,67	33	38	0,7	-13
ДПКД кварцевое стекло КВ	3,75	3,80	0,5	0,7	1,4	-40

Электрическое поле колебания сосредоточено в зазоре между плоскими торцевыми поверхностями верхнего и нижнего центральных электродов. Магнитное поле сосредоточено в основном в пространстве между центральным электродом и цилиндрическим корпусом. Это позволяет проводить описание электромагнитного поля в резонаторе данного типа в квазистационарном приближении [4] с использованием сосредоточенных параметров цепи – емкости и индуктивности.

Условием резонанса, как известно, является равенство нулю полного реактивного сопротивления, то есть $X_C + X_{L1} + X_{L2} = 0$, где X_C – реактивное (ёмкостное) сопротивление области зазора в резонаторе, $X_{L1, L2}$ – реактивное (индуктивное) сопротивление отрезков коаксиальной линии от зазора до короткозамыкающей торцевой крышки (верхней и нижней) соответственно. В резонаторе без измеряемого образца это условие приводит к уравнению

$$\frac{1}{\rho \cdot \omega C_{\Sigma}} - \tan(kL_1) - \tan(kL_2) = 0, \quad (1)$$

где $\rho = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_2}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$ – волновое сопротивление коаксиальной линии;

D – внутренний диаметр цилиндрического корпуса резонатора;

d – диаметр центрального электрода резонатора;

ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость воздуха в резонаторе;

$k = \frac{2\pi \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_2}}{c}$ – волновое число в воздухе;

c – скорость света в вакууме;

f – резонансная частота;

L_1 и L_2 – высота (длина) верхнего и нижнего центральных электродов.

Полная ёмкость зазора C_{Σ} равна сумме ёмкости плоского конденсатора-зазора C_0 и ёмкости боковых поверхностей центральных электродов C_6 . Ёмкость плоского конденсатора-зазора C_0 рассчитывается по обычной формуле

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_2 \cdot \frac{\pi d^2}{4h_0}, \quad (2)$$

где h_0 – высота измерительного зазора;

ϵ_0 – электрическая постоянная вакуума.

Боковая ёмкость центральных электродов C_6 рассчитывалась приближенно по формуле [4]:

$$C_6 = \epsilon_0 \epsilon_2 \cdot d \cdot \ln\left[\frac{D-d}{h_0}\right], \quad (3)$$

Высота измерительного зазора h_0 измерялась по специально разработанной методике. Её окончательное значение уточнялось из условия совпадения расчётного и экспериментального значений резонансной частоты. При введении образца в измерительный зазор резонатора изменяются ёмкость зазора, резонансная частота, индуктивный импеданс закороченных отрезков коаксиальной линии и уровень потерь энергии колебания (добротность).

Описанный резонатор успешно применяется в АО «ОКБ КП» для измерения ϵ и $\tan\delta$ материалов, используемых для изоляции РК при входном контроле.

В данной работе для оценки возможностей установки с резонатором КР-500М при измерении ϵ и $\tan\delta$ использовались стандартные образцы (СО) в виде дисков диаметром 50 мм, толщиной от 1,05 до 2,03 мм, откалиброванные по Государственному первичному эталону комплексной диэлектрической проницаемости с погрешностью не более 0,5 % по ϵ и 25 % по $\tan\delta$. За результат принимались усредненные по трём измерениям значения. Частоты измерений (резонансные частоты КР-500М с измеряемым образцом) зависели от толщины и диэлектрической проницаемости образцов и находились в интервале 530–490 МГц. В таблице приведены измеренные в КР-500М и аттестованные значения ϵ и $\tan\delta$ указанных СО.

Из таблицы видно, что:

- отклонения измеренных значений ϵ от аттестованных значений СО не превышают 2 % для всех образцов;
- отклонение измеренных значений $\tan\delta$ от аттестованных значений не превышает 25 % для всех СО, кроме образца ДПКД (кварцевое стекло КВ) для которого оно составляет 40 %.

Проведённые исследования показали, что измерительная установка с резонатором КР-500М [3] решает задачи входного контроля диэлектрических параметров изоляционных материалов для радиочастотных кабелей и может быть использована при исследовании диэлектрических свойств новых высокочастотных слабопоглощающих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
2. ГОСТ 27496.2–87 (МЭК 377-2–77). Материалы электроизоляционные. Методы определения диэлектрических свойств на частотах свыше 300 МГц. Резонансные методы. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 40 с.
3. Егоров В.Н., Костромин В.В. Коаксиальный измерительный резонатор с неизлучающим окном для ввода образца // Патент России № 2626746. 31.07.2017. Бюл. № 22.
4. Орлов С.И. Расчёт и конструирование коаксиальных резонаторов. – М.: Советское радио, 1970. – 256 с.