

УДК 614.89:537.868

Кунденко Микола Петрович, докт. техн. наук. Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, м. Харків, Україна Вул. Артема, 44, м. Харків, Україна, 61002
n.p.kundenko@inbox.ru

СПОСОБИ ВИМІРУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Проведено аналіз використання резонансних систем для вимірювання електрофізичних властивостей речовин, що мають великі втрати в короткохвильовій частині міліметрового та субміліметрового діапазонів з використанням адекватних цим діапазонами довжин хвиль.

Ключові слова: об'єкт, резонатор, методи, спектр, втрати, добротність, електромагнітні коливання.

Кунденко Николай Петрович, докт. техн. наук. Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, г. Харьков. Украина. Ул. Артема, 44, г. Харьков, Украина, 61002
n.p.kundenko@inbox.ru

СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Проведено анализ использования резонансных систем для измерения электрофизических свойств веществ, имеющих большие потери в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметровом диапазонах с использованием адекватных этим диапазонам длин волн.

Ключевые слова: объект, резонатор, методы, спектр, потери, добротность, электромагнитные колебания.

Kundenko Nikolai Petrovich, D-r. Eng. Sc. Kharkiv National Technical University of Agriculture them. P. Vasilenko, Kharkov, Ukraine, Artema st., 44, Kharkov, Ukraine, 61002, n.p.kundenko@inbox.ru

METHODS OF MEASUREMENT ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF BIOLOGICAL OBJECTS

The analysis of the use of resonant systems for the measurement of electrical properties of substances with large losses in the shortwave part of the millimeter and submillimeter ranges by using adequate this wavelength range.

Keywords: object, resonator, methods, range, losses, quality factor, electromagnetic waves.

Постановка проблемы

При исследовании состояния биологических объектов, находящихся под воздействием различных физических факторов, немаловажное значение имеет выбор метода для контроля состояния биологических объектов в данное время. Взаимодействие физических факторов с биологическими системами связано с их физическими и химическими изменениями.

Под этими изменениями следует понимать: нагрев биообъектов, разрыв химических связей, изменение окраски, изменение электрофизических свойств, биологическую реакцию на воздействие. Таким образом, для измерения параметров биологических объектов можно применять следующие методы: световые, теплофизические, электрофизические, физико-химические. Из многочисленных методов измерения параметров биологических объектов внимания заслуживают диэлькометрические методы.

Основная часть

Все существующие резонансные методы определения электрофизических свойств различных веществ основаны на изменении резонансной частоты и нагруженной добротности резонатора при внесении исследуемого образца в его объем. В этом случае образец представляет собой внутреннюю неоднородность, которая влияет как на энергетические, так и на спектральные характеристики резонансной системы. Преимущества этих методов состоят в том, что они дают высокую точность и позволяют уверенно регистрировать малые потери в измеряемом веществе ($\text{tg } \delta = 10^{-8} - 10^{-9}$). В то же время измерение резонансными методами параметров веществ, особенно если в их состав входит вода, возможно только при малых коэффициентах заполнения измеряемым образцом объема

резонатора, т.е. когда диэлектрические потери в образце уменьшают собственную добротность Q_0 резонансной системы до $500 \div 1000$.

В сантиметровом диапазоне длин волн для подобного рода измерений наибольшее распространение получили одномодовые цилиндрические резонаторы [1], в которых возбуждаются колебания TE_{01p} [2] или TM_{01p} [3, 5]. В первом случае в резонаторе можно измерять стержневые образцы, диаметр которых меньше длины волны. В этом случае При использовании цилиндрического резонатора с колебанием TE_{01p} образец, имеющий форму стержня, закрепляется в центре бесконтактного поршня, который может перемещаться с помощью прецизионного микрометрического винта. Такая конструкция резонатора позволяет применять генератор, работающий на фиксированной частоте. Это дает возможность осуществлять частотную стабилизацию генератора и повышать точность измерений. Поскольку в такой резонансной системе напряженность электрического поля на оси минимальна, то это позволяет измерять электрофизические параметры веществ, имеющих стержневую форму и обладающих большими потерями. Часть образца, проходящего через питающий волновод, экранирована от поля волновода тонкостенной металлической трубкой. Для возбуждения колебания TE_{01p} в торцевой крышке резонатора сделаны два отверстия, связанные с аналогичными отверстиями в узкой стенке питающего волновода [1]. В работе [2] описан объемный цилиндрический резонатор, который имел диаметр 59,08 мм и высоту 149,0 мм. При этом в резонансном объеме возбуждалось колебание TE_{011} . По оси резонансной системы располагалась стеклянная трубка, имеющая наружный диаметр 1,6 мм и внутренний 1,2 мм. Такая резонансная система позволила измерить диэлектрическую проницаемость и потери дистиллированной воды в трехсантиметровом диапазоне длин волн. В данном случае диаметр измеряемого образца намного меньше длины волны. Это связано с необходимостью получения приемлемого значения нагруженной добротности резонатора для проведения измерений. Для указанных геометрических размеров нагруженная добротность пустого резонатора равна 3790. При измерении цилиндрических образцов их диаметр должен быть не меньше четверти длины волны.

На практике бывает необходимо измерять электрофизические параметры не только цилиндрических, но листовых материалов, толщина которых мала в сравнении с длиной волны. Для этих целей также используются объемные цилиндрические резонаторы с колебанием TE_{01p} . При расположении плоского образца на поршне, погрешность измерения будет недопустимо большой. Поэтому тонкие образцы необходимо располагать в максимуме электрической компоненты поля стоячей волны в резонаторе, т. е. на расстоянии, равном нечетному числу четвертей волноводной длины волны, считая от торцевой стенки. Если в цилиндрическом резонаторе с колебанием TE_{01p} сделать две торцевые диаметрально расположенные тонкие щели, находящиеся в плоскости максимума электрического поля, то можно проводить такие измерения. Это связано с тем, что отсутствие продольных составляющих в поверхностных токах колебания TE_{01p} делает эти щели неизлучающими при их малой ширине (малой толщине образца). Цилиндрические резонаторы с колебанием TE_{01p} наиболее широко применяются в сантиметровом диапазоне длин волн и его коротковолновой части.

В то же время для контроля очень малых изменений концентраций определенных компонентов в водных растворах и в органических соединениях чувствительности такой резонансной системы может быть недостаточно. В этом случае исследуемый образец надо располагать в области максимальной напряженности электрического поля возбуждаемого в резонансном объеме колебания.

Для этих целей наиболее подходят одномодовые цилиндрические резонаторы, в которых возбуждаются колебания TM_{01p} . Для подобного рода исследований в торцевых крышках цилиндрического резонатора делаются отверстия, через которые вводится образец. Резонансные системы подобного типа наибольшее распространение получили в длинноволновой части сантиметрового диапазона. Так в работе [5] описан цилиндрический

резонатор, диаметр которого равен 115,172 мм, а высота – 49,998 мм. Диаметры отверстий в торцевых крышках равны 3 мм, через которые в резонансный объем вводится диэлектрическая трубка, имеющая наружный диаметр 2,077 мм и внутренний 1,062 мм. Измерения ε' и $\operatorname{tg} \delta$ этилового спирта проведены в диапазоне 2 ГГц. В зависимости от концентрации этилового спирта $\operatorname{tg} \delta$ изменялся от 0,1 до 1, а величина нагруженной добротности резонансной системы – от 400 до 180. Данные по измерению диэлектрической проницаемости и $\operatorname{tg} \delta$ воды на частоте 2,23 ГГц приведены в работе [4]. Диаметр объемного цилиндрического резонатора равен 102,63 мм, его высота – 40 мм. Вдоль оси резонатора располагалась кварцевая трубка диаметром 1,4 мм, в которую помещалась исследуемая жидкость. Внутренний диаметр трубки равен 0,608 мм. В результате проведенных исследований было получено, что $\varepsilon' = 76,8$, а $\operatorname{tg} \delta = 8,909$. Важным достоинством такого типа резонансной системы является возможность исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости образца без нагрева самого резонатора. В этом случае образец нагревается до необходимой температуры вне резонансного объема и на короткое время, достаточное для проведения измерений, помещается в резонансный объем. К недостаткам такой резонансной системы можно отнести необходимость учитывать отверстия для ввода образца и зазоры между стенками отверстия и диэлектрическим стержнем или трубкой. Для измерения с помощью такой резонансной системы малых концентраций различных компонентов, как в водных растворах, так и в органических соединениях, должно выполняться одно необходимое условие, а именно – объем, занимаемый измеряемым веществом, должен быть значительно меньше объема резонансной полости. Кроме того, для повышения чувствительности желательно переходить на более высокие частоты, а именно, в миллиметровый диапазон.

Помимо объемных цилиндрических резонаторов широкое распространение для измерения электрофизических параметров веществ получил металлодиэлектрический резонатор, который представляет собой исследуемый диэлектрический цилиндр с металлическими отражателями на торцах. Такие резонаторы удобны для измерения слабопоглощающих диэлектриков в диапазоне от дециметровых волн до длинноволновой части миллиметровых. Следует отметить, что высокий коэффициент заполнения затрудняет измерение с помощью такого резонатора материалов с $\operatorname{tg} \delta > 5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$. Однако интересная конструкция металлодиэлектрического резонатора для измерения ε' и $\operatorname{tg} \delta$ воды в трехсантиметровом диапазоне длин волн приведена в работах [6]. Диэлектрическая полусфера из фторопласта, радиус которой 17,5 мм, возбуждается дипольной антенной, которая с помощью коаксиально – волноводного перехода связана с подводным прямоугольным волноводом. Внешняя сторона полусферы закрыта металлическим экраном. В таком резонаторе возбуждается колебание TE_{111} . В центре расположен полусферический резонатор, радиус которого равен 3 мм. В этот резонатор помещается измеряемая жидкость. Сигнал из резонатора выводится опять-таки с помощью дипольной антенны, которая, в свою очередь, связана с помощью коаксиально-волноводного перехода с приемным волноводом. Проведенные исследования показали, что на частоте 8,848 ГГц $\varepsilon' = 57$, $\operatorname{tg} \delta = 0,561$, что хорошо согласуется с результатами работы [2]. При этом нагруженная добротность Q_H пустого резонатора была равна 520, а при наличии воды в измерительной ячейке добротность падала до 40. При переходе в миллиметровый диапазон размеры резонатора уменьшаются пропорционально длине волны, а объем ячейки, в которую помещается измеряемая жидкость, уменьшится пропорционально λ^3 . Поэтому применение такой резонансной системы в миллиметровом диапазоне столкнется с определенными техническими трудностями. А полученные значения нагруженной добротности даже в сантиметровом диапазоне вряд ли можно назвать приемлемыми для измерения малых изменений диэлектрической проницаемости исследуемых веществ.

Подобные проблемы возникнут и при использовании цилиндрических объемных резонаторов, рассмотренных выше. При переходе к миллиметровому диапазону длин волн уменьшаются геометрические размеры резонаторов, которые опять-таки пропорциональны длине волны. В тоже время при укорочении λ возрастает поверхностное сопротивление R_s металла, из которого сделан сам резонатор, поскольку $R_s = \pi \sqrt{120 / \sigma \lambda}$, где σ – удельная проводимость металла. Если же увеличивать геометрические размеры и переходить к сверхразмерным резонансным системам, то в этом случае в резонансном объеме наряду с колебаниями TE_{01p} или TM_{01p} будут возбуждаться и другие колебания. В частности, TM_{11p} , которое будет вырождено с колебанием TE_{01p} , поскольку имеет точно такую же резонансную частоту. Помимо этого в резонансном объеме могут возбудиться TE_{21p} , TM_{02p} и другие колебания. Это может привести к неверной трактовке результатов измерений. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры для селекции спектра колебаний в таких резонансных системах, что является довольно сложной технической задачей.

Помимо рассмотренных резонансных систем широкое распространение для исследования электрофизических параметров веществ получили волноводно-диэлектрические резонаторы. При измерении образцов, имеющих достаточную толщину и повышенное значение ε' (6–10), резонансная частота может оказаться ниже критической частоты волны TE_{01} в пустом круглом волноводе. В этом случае волна TE_{01} будет распространяться только в заполненной образцом части резонатора, а от запредельных цилиндрических полостей происходит полное отражение. При достаточно большой длине запредельных участков резонатора торцевые стенки могут отсутствовать. Однако в этом случае мы сталкиваемся с той же самой проблемой, что и при измерении электрофизических параметров веществ с помощью металлодиэлектрических резонаторов. Высокий коэффициент заполнения образцом объема резонатора затрудняет измерение материалов с $\operatorname{tg} \delta > 5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$. Кроме этого, экспериментальное наблюдение резонанса в закритическом режиме возможно не при любом расположении устройств возбуждения в резонаторе. При возбуждении через торцевые крышки само колебание может оказаться несвязанным с волноводным трактом из-за экспоненциального убывания поля в запредельных участках резонатора.

В работах рассмотрен волноводно-диэлектрический резонатор, в котором цилиндрический магнитодиэлектрический стержень, помещенный в круглый волновод, имел соосно расположенную магнитодиэлектрическую втулку. Параметры этой вставки отличаются от параметров самого стержня. Такая резонансная система послужила прототипом волноводно-коаксиального резонатора, в котором в качестве внутренней втулки используется металлический стержень. Цилиндрический стержень из фторопласта имел диаметр 13,05 мм и длину 70 мм. Металлические медные втулки имели диаметры 2,5 мм и 5,9 мм. Измерения проведены в трехсантиметровом диапазоне длин волн.

Все рассмотренные выше резонансные системы используются обычно в сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазонов длин волн. В связи с этим в миллиметровом диапазоне для сохранения высокой добротности и редкого спектра резонансных частот необходимо переходить к электродинамическим системам, в которых возможно излучение части электромагнитной энергии в свободное пространство.

Таковыми свойствами обладают открытые диэлектрические резонаторы, которые представляют собой диск без проводящих торцевых поверхностей. Однако для таких резонансных систем отсутствует строгий электродинамический анализ. Поэтому в настоящее время широкое распространение получили приближенные методы расчета диэлектрических резонаторов, наряду с экспериментальными исследованиями. Благодаря связи со свободным пространством, такие резонансные системы имеют более разреженный спектр за счет увеличения радиационных потерь энергии для нежелательных типов колебаний. Именно этот положительный фактор позволил применить открытые диэлектрические резонаторы для измерения электрофизических параметров веществ в миллиметровом диапазоне длин волн.

Однако такие резонансные системы наиболее эффективны при определении параметров слабопоглощающих диэлектриков в диапазоне от сантиметровых до средневолновой части миллиметровых волн с ε' от 2 до 40 и $\operatorname{tg} \delta \sim 10^{-3} - 10^{-9}$. Что касается именно миллиметровых волн, то в диапазоне 30–100 ГГц с помощью открытого диэлектрического резонатора можно измерять материалы с $\varepsilon' \sim 2 - 15$. Резонатор такого типа применяется для измерения диэлектрических покрытий, для которых он служит одновременно и подложкой и измерительным резонатором. Также он может быть применен для измерения толстых диэлектриков при одностороннем доступе к самому материалу. Кроме того, для измерения тонких пленок используются два резонатора, между которыми фиксируется сама пленка. Так в работе [7] описаны два сапфировых резонатора, имеющие диаметры 11,73 мм и высоту 2,08 мм. Между этими резонаторами зажимались подложки, параметры которых измерялись в диапазоне 30–40 ГГц. При этом диэлектрическая проницаемость измеряемых образцов изменялась от 2 до 10, а $\operatorname{tg} \delta$ – от 10^{-4} до 10^{-2} . Таким образом, на основании всего вышесказанного можно сделать вывод, что диск из слабопоглощающего диэлектрика может быть с успехом использован в качестве высокодобротного резонатора, во внешнее поле которого помещается исследуемый образец. Однако в работах предложено интересное техническое решение, которое позволило применить такую резонансную систему для измерения в миллиметровом диапазоне параметров жидкостей в малом объеме. В то же время, полученное в эксперименте значение добротности недостаточно, если необходимо анализировать малые концентрации различных компонентов в водных растворах или в органических соединениях. Кроме этого, при расчете резонансных частот дисковых диэлектрических резонаторов необходимо учитывать электромагнитное поле вне объема резонатора. И, как было замечено выше, такой учет реализовать трудно. Поэтому в большинстве практических случаев при проведении подобного рода исследований требуется экспериментальная градуировка резонансной системы по образцам с известной диэлектрической проницаемостью.

В связи с этим представляют практический интерес диэлектрические резонаторы в форме шара. Это связано с тем, что для таких резонансных систем граница раздела двух сред представляет одну из координатных поверхностей и поэтому возможно строгое решение граничных задач.

Всем рассмотренным открытым диэлектрическим резонаторам присущи недостатки. Общий недостаток таких резонансных систем – это излучение энергии во внешнее пространство, что в итоге приводит к значительному снижению добротности. Помимо этого, существенный недостаток такого типа резонаторов – это проблема перестройки частоты. Поэтому при измерении электрофизических параметров веществ с большими потерями необходимо использовать генераторы СВЧ, имеющие большой диапазон перестройки по частоте. А это, в свою очередь, ухудшает точность измерений, поскольку в этом случае нельзя использовать частотную стабилизацию СВЧ генератора, которая легко осуществима при работе на фиксированной частоте. С укорочением рабочей длины волны будут также уменьшаться и размеры самих резонаторов. Все это делает проблематичным использование открытых диэлектрических резонаторов в коротковолновой части миллиметрового и, тем более, в субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Поэтому при исследовании электрофизических параметров веществ необходимо переходить к резонансным системам, адекватным рассматриваемому диапазону длин волн – к открытым резонаторам (ОР).

Наибольшее распространение для проведения подобного рода измерений получили сферические и полусферические ОР. Благодаря связи со свободным пространством такие резонансные системы имеют разреженный спектр колебаний, и, что особенно важно, свободный доступ в резонансный объем. Это является положительным фактором при проведении подобного рода исследований. Измерение ε' проводится по смещению резонансной частоты основного колебания TEM_{00q} после помещения образца в резонансный

объем. При этом с помощью таких резонансных систем, как правило, исследуются электрофизические свойства веществ, имеющих плоскую форму. Это, по-видимому, можно отнести к недостаткам подобного типа резонансных систем, а к преимуществам можно отнести возможность измерений на фиксированной частоте, поскольку настройка системы в резонанс путем перемещения одного из зеркал ОР не представляет особых сложностей.

При измерении электрофизических параметров веществ с помощью ОР, у которого оба зеркала имеют сферическую форму, образец должен располагаться перпендикулярно оси резонатора и симметрично относительно обоих зеркал. Это создает определенные неудобства при проведении экспериментальных исследований. При смещении образца в сторону одного из зеркал, необходимо вводить поправку в измеряемую величину ε' , связанную с искривлением фазового фронта, возбуждаемого в ОР колебания в плоскости образца. В работе [8] измерение проводится на экспериментально определяемой резонансной частоте, при которой по толщине образца укладывается целое число полуволн. В этом случае небольшое смещение пластины вблизи плоскости симметрии ОР не приводит к сдвигам резонансной частоты, что позволяет уменьшить погрешность измерений. Радиусы кривизны зеркал равны 240,58 мм, длина резонатора изменялась в пределах (390 - 420) мм, а толщины образцов составили 19,964 мм и 3,438 мм. Исследования проведены в двухмиллиметровом диапазоне. В том случае, если толщина образца не кратна целому числу полуволн, возникают отражения от поверхности пластины. В этом случае уравнение для расчета диэлектрической проницаемости сильно усложняется и становится трансцендентным. Небольшой наклон образца к оси резонатора позволяет удалить отраженные от пластины волны из ОР. Тогда расчетное уравнение, в первом приближении, становится простым и достаточно точным линейным соотношением. Проведенные экспериментальные исследования по определению диэлектрической проницаемости тонких слабопоглощающих пленок толщиной (0,2–0,3) мм в диапазоне частот от 10 ГГц до 343 ГГц подтвердили правильность такого предположения. Здесь необходимо отметить, что, как и в случае объемных резонаторов, для повышения точности измерений тонкие образцы должны располагаться в плоскости максимальной напряженности электрической компоненты поля стоячей волны в резонаторе.

При использовании полусферического ОР для исследования веществ устраняются ошибки, связанные с определением углового положения образца, поскольку пластина помещается на поверхность плоского зеркала. В случае измерения толстых образцов с помощью такого ОР необходимо вводить поправку в получаемую величину ε' , связанную с неплоским фазовым фронтом колебания TEM_{00q} в плоскости расположения верхней грани образца. При измерении тонких образцов, последние, как и в случае сферического ОР, должны располагаться в максимуме электрического поля. Использование полусферического ОР упрощает методику измерения подобных образцов. На плоское зеркало резонатора помещается подложка определенной толщины, на которой уже располагается измеряемая пленка. Благодаря этому устраняются возможные перекосы образца, что повышает точность измерений.

Таким образом, ОР обеспечивает высокую точность измерения ε' и $\operatorname{tg} \delta$ во всем миллиметровом и длинноволновой части субмиллиметрового диапазонов. Интервал измеряемых значений $\operatorname{tg} \delta$ составляет $\sim 10^{-3}$ – 10^{-5} . Помещение в объем ОР образца с большими потерями приведет к срыву колебаний в резонансном объеме. В то же время в ОР невозможно измерять образцы, имеющие форму стержня. Это связано с невозможностью помещать цилиндрический образец в точку в объеме ОР, в которой одна и та же напряженность электрического поля, при проведении подобного рода исследований.

Для подобного рода измерений применяется бочкообразный ОР. В этом случае при проведении измерений необходимо обеспечить центрирование образца. Достоинством бочкообразного резонатора является возможность измерения образцов при высокотемпературном нагреве без нагрева самого ОР и возможность неразрушающего

контроля протяженных объектов в процессе производства. Здесь необходимо отметить, что, как и в случае ОР, измеряемые образцы должны иметь малые потери.

Выводы

Измерение электрофизических свойств веществ, имеющих большие потери, в коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметровом диапазонах с использованием резонансных систем, адекватных этим диапазонам длин волн, сталкивается с определенными техническими трудностями. С одной стороны, для измерения малых концентраций различных компонентов в водных растворах и в органических соединениях желательнее использовать резонансные системы, имеющие высокую добротность и адекватные миллиметровому диапазону длин волн – это ОР. Однако, как показывают выполненные многими авторами исследования, с помощью таких резонансных систем, в которых возбуждается основной тип колебаний TEM_{00q} , практически невозможно исследовать электрофизические свойства веществ с большими потерями и имеющими цилиндрическую форму. С другой стороны, подобного рода измерения можно проводить с помощью цилиндрических объемных резонаторов, которые широко применяются в сантиметровом диапазоне длин волн. С укорочением длины волны уменьшаются геометрические размеры таких резонансных систем и возрастают омические потери, что в итоге приводит к уменьшению добротности и невозможности их использования в миллиметровом диапазоне длин волн. Поэтому открытым остается вопрос создания резонансной системы, которая при высокой нагруженной добротности сочетала бы в себе лучшие свойства как открытых, так и закрытых резонансных систем. При этом она должна иметь высокую добротность и позволять исследовать цилиндрические образцы с высокими потерями.

Список использованной литературы:

1. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А. Брандт. – М.: Госуд. Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963. – 404 с.
2. Ткач В. К. Резонаторный метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь жидких диэлектриков / В. К. Ткач, Л. Д. Степин, В. Б. Казанский. // Радиотехника и электроника. – 1960. – Т. 5. – № 12. – С. 2009–2014.
3. Parkash A. Measurement of dielectric parameters at microwave frequencies by cavity perturbation technique / A. Parkash, J. K. Vaid, A. Mansingh // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1979. – Vol. 27, No. 9. – P. 791–795.
4. Li S. Precise calculations and measurements on the complex dielectric constant of lossy materials using TM_{010} cavity perturbation techniques / S. Li, C. Akyel, R. G. Bosisio // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1981. – Vol. 29, No. 10. – P. 1041–1048.
5. Kawabata H. Accurate measurements of complex permittivity of liquid based on a TM_{010} mode cylindrical cavity method / H. Kawabata, Y. Kobayashi // The 35th European Microwave Conference: inter. conf., 3-7 October 2005: conf. proc. - Paris, 2005. – P. 369–372.
6. Eremenko Z. E. Method of microwave measurement of dielectric permittivity in a small volume of high loss liquid / Z.E. Eremenko, E.M. Ganapolskiy // Measurement Science and Technology. – 2003. – Vol. 14, No. 10. – P. 2096-2103.
7. Egorov V. N. Dielectric constant loss tangent, and surface resistance of PCB materials at K-band frequencies / V.N. Egorov, V.L. Masalov, Y.A. Nefyodov // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 2005. – Vol. 53, No. 2. – P. 627–635.
8. Власов С. Н. Об измерении диэлектрической проницаемости резонансным методом / С. Н. Власов, Е. В. Копосова, А. Б. Мазур [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. – 1996. – Т. 39, № 5. – С. 615–623.

References:

1. Brandt A. A. Investigation of dielectrics at microwave frequencies [Issledovanie dijelektrikov na sverhvysokih chastotah] / A. A. Brandt. – M.: Gosud. Publ. Sci. lit-ry, 1963. – 404 p.
2. Tkach V. K. Resonator method for measuring the dielectric constant and loss tangent of dielectric fluids [Rezonatornyj metod izmerenija dijelektricheskoy pronicaemosti i tangensa ugla poter' zhidkih dijelektrikov] / V. K. Tkach, L. D. Stepin, V. B. Kazansky. // Technology and Electronics. – 1960. – Т. 5. – № 12. – P. 2009–2014.
3. Parkash A. Measurement of dielectric parameters at microwave frequencies by cavity perturbation technique / A. Parkash, J. K. Vaid, A. Mansingh // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1979. – Vol. 27, No. 9. – P. 791–795.

4. Li S. Precise calculations and measurements on the complex dielectric constant of lossy materials using TM_{010} cavity perturbation techniques / S. Li, C. Akyel, R.G. Bosisio // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1981. – Vol. 29, No. 10. – P. 1041–1048.
5. Kawabata H. Accurate measurements of complex permittivity of liquid based on a TM_{010} mode cylindrical cavity method / H. Kawabata, Y. Kobayashi // The 35th European Microwave Conference: inter. conf., 3–7 October 2005: conf. proc. – Paris, 2005. – P. 369–372.
6. Eremenko Z. E. Method of microwave measurement of dielectric permittivity in a small volume of high loss liquid / Z. E. Eremenko, E. M. Ganapolskiy // Measurement Science and Technology. – 2003. – Vol. 14, No. 10. – P. 2096–2103.
7. Egorov V. N. Dielectric constant loss tangent, and surface resistance of PCB materials at K-band frequencies / V. N. Egorov, V. L. Masalov, Y. A. Nefyodov // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 2005. – Vol. 53, No. 2. – P. 627–635.
8. Vlasov S. N. On the measurement of the dielectric constant of the resonance method [Ob izmerenii dijelektricheskoy pronicaemosti rezonansnym meto] / S. N. Vlasov, E. V. Kopusova, A. Mazur [et al.] // Math. universities. Radio. – 1996. – V. 39, № 5. – P. 615–623.

Поступила в редакцию 09.02 2015 г.