

УДК 614.89:537.868

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Н.П. Кунденко, доктор технических наук

А.Н. Кунденко, магистр

*Харьковский национальный технический университет сельского
хозяйства им. П Василенко*

Проведен 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.

Резонанс, добротность, колебания, волновод, зеркала, кювета.

Взаимодействие физических факторов с биологическими системами связано с физическими и химическими изменениями. Под этими изменениями следует понимать: нагрев биообъектов, разрыв химических связей, изменение окраски, изменение электрофизических свойств, биологическую реакцию на воздействие. 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.

Цель исследований – анализ эффективности 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.

Результаты исследований. 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.

На практике необходимо измерять электрофизические параметры не только цилиндрических, но листовых материалов, толщина которых меньше в сравнении с длиной волны. Для этих целей 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.

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 [1] 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 [2]. 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.

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 [3]. Диэлектрическая полусфера из фторопласта, радиус которой 17,5 мм, возбуждается дипольной антенной, которая с помощью коаксиально – волноводного перехода связана с подводящим 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. Проведенные исследования показали, что на частоте 8,848 ГГц получаем значения $\varepsilon' = 57$, $\operatorname{tg} \delta = 0,561$, что хорошо

согласуется с результатами работы [4]. Поэтому применение такой резонансной системы в миллиметровом диапазоне столкнется с определенными техническими трудностями.

Помимо рассмотренных резонансных систем широкое распространение для исследования электрофизических параметров веществ получили волноводно-диэлектрические резонаторы. Высокий коэффициент заполнения образцом объема резонатора затрудняет измерение материалов с $\text{tg } \delta > 5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$. Кроме этого, экспериментальное наблюдение резонанса в закритическом режиме возможно не при любом расположении устройств возбуждения в резонаторе.

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. 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. Так в работе [5] 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 $\text{tg } \delta$ – 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

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 $ТЕМ_{00q}$ 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 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 $ТЕМ_{00q}$ 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 $\sim 10^{-3} - 10^{-5}$.

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 $ТЕМ_{00q}$, 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.

Список литературы

1. 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.
2. 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. 104 - 1048.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

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

Резонанс, добротність, коливання, хвилевід, дзеркала, кювета.

An analysis Using rezonansnyh systems izmerenie electrophysical properties substances, ymeyuschyh bolshye the loss in korotkovolnovoy part myllymetrovoho and submyllymetrovom bands with Using adekvatnyh etym bands Length of waves.

Resonance, quality, fluctuations, waveguide, mirrors, cuvette.