

УДК 614.89:537.868

СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ

Кунденко Н.П., д.т.н.

(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П.Василенко)

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.

Постановка проблемы Все существующие резонансные методы определения электрофизических свойств различных материалов 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 $500 \div 1000$.

Цель статьи – определить эффективность 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.

Основные материалы исследования. В сантиметровом диапазоне длин волн для подобного рода измерений наибольшее распространение получили одномодовые цилиндрические резонаторы, в которых возбуждаются колебания TE_{01p} [2] или TM_{01p} [3,4].

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 [1], 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.

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 $\text{tg} \delta > 5 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$. Однако интересная конструкция металлодиэлектрического резонатора для измерения ϵ' и $\text{tg} \delta$ воды в трехсантиметровом диапазоне длин волн приведена в работах [5]. 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. При переходе к миллиметровому диапазону длин волн уменьшатся геометрические размеры резонаторов, которые пропорциональны длине волны.

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 запердельных цилиндрических полостей происходит полное отражение.

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.

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..

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 [6].

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 TE_{M0q} 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.

Выводы. Таким образом, ОР обеспечивает высокую точность измерения

ε' и $\operatorname{tg} \delta$ во всем миллиметровом и длинноволновой части субмиллиметрового диапазонов. 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 литературы:

1. Кунденко Н.П., Черенков А.Д. Анализ резонансных систем для измерения электрофизических параметров веществ / Н.П. Кунденко, А.Д. Черенков // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №03/97. – С.56-62.
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. 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.
5. 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.
6. Кунденко Н.П., Черенков А.Д. Исследование открытой резонансной системы с отрезком круглого волновода / Н.П. Кунденко, А.Д. Черенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №3/5 (57). – С.10-13.

Анотація

Системи виміру електрофізичних параметрів речовин

Кунденко М.П.

Проведено аналіз використання резонансних систем для виміру електрофізичних властивостей речовин, що мають великі втрати в короткохвильовій частині міліметрового і субміліметровому діапазонах з використанням адекватних цим діапазонам довжин хвиль.