

УДК 621.372.41

Ю.В. Диденко, В.И. Молчанов, канд.техн.наук, **В.М. Пашков**, канд.техн.наук,
Д.Д. Татарчук, канд.техн.наук, **Д.А. Шмыгин**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, г. Киев, 03056, Украина.

СВЧ методы измерения параметров диэлектрических материалов на основе составного диэлектрического резонатора

В статье проанализированы СВЧ методы измерения параметров материалов, показаны их достоинства и недостатки, обсуждены критерии выбора конкретного метода измерений. Авторами предложена модификация метода составного диэлектрического резонатора. Предложенный метод обладает высокой чувствительностью при измерении диэлектрической проницаемости и потерь. Библ. 4, рис. 6., табл. 1.

Ключевые слова: диэлектрические материалы, фактор потерь, тангенс угла потерь, диэлектрическая проницаемость, СВЧ параметры.

I. Введение

Развитие современной электроники значительной мерой определяется наличием материалов с требуемыми свойствами. Поэтому для дальнейшего технического прогресса необходимы новые материалы с заданным комплексом свойств. Однако создание таких материалов невозможно без фундаментального исследования их физических свойств. Одним из необходимых условий таких исследований является наличие точных методов измерения электрофизических параметров материалов и сред, что актуально прежде всего, для электронной промышленности, а также для изучения малоразмерных объектов. Для измерения соответствующих характеристик материалов и сред необходима линейка приборов, к которым предъявляются следующие требования: простота в эксплуатации, портативность, возможность проведения измерений без разрушения образца и т.д. [1].

Измерение параметров материалов часто производится при наличии непосредственного контакта измерительного зонда с исследуемым образцом. Возникающие при этом контактные явления часто приводят к появлению дополнительных источников погрешностей, которые

трудно учесть или устранить. Затруднительно исследование зондовыми методами поликристаллических образцов, а также образцов малой площади с произвольной геометрией. Поэтому, несмотря на целый ряд достоинств, зондовые методы не могут в полной мере удовлетворить потребности современного производства и исследователей [1,2].

СВЧ методы измерения являются бесконтактными, что позволяет проводить исследования без разрушения образца и без наличия дополнительных погрешностей, связанных с контактными явлениями. Использование СВЧ методов исследования параметров материалов открывает принципиально новые возможности при изучении и контроле свойств материалов. Поэтому данная статья посвящена анализу существующих СВЧ методов исследования свойств материалов, обсуждению критериев выбора конкретного метода измерений, исходя из условий и потребностей, а также возможностей их адаптации для исследования листовых, дисперсных, жидких и газообразных материалов при сохранении высокой точности измерений.

II. СВЧ методы исследования параметров диэлектрических материалов

Собственно измерения микроволновых характеристик материалов является сложной задачей и требует высокоточного и совершенного измерительного оборудования [1,2,3,4].

Кроме того, для измерений диэлектрических свойств материала необходимо наличие измерительного устройства, в котором размещается образец (или держателя образца), чтобы можно было предсказуемым образом приложить электромагнитные поля и обеспечить подключение к измерительному прибору. Тип необходимого устройства будет зависеть от выбранного способа измерений и физических свойств материала (твердый, жидкий, порошок, газ).

Множество факторов, таких как точность, удобство, а также вид и форма материала, являются важными при выборе наиболее подходящего метода измерения. Наиболее существенные из них приведены ниже:

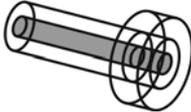
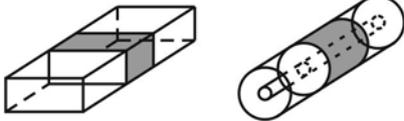
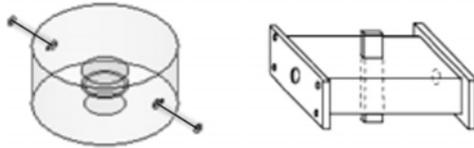
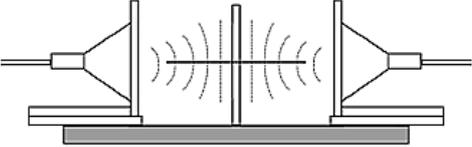
- диапазон частот;
- ожидаемые значения диэлектрической проницаемости (ϵ_r) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$);
- необходимая точность измерений;
- свойства материала (однородность, изотропность и пр.);
- вид материала (жидкий, порошок, твердый, листовой);

- ограничения на размер образца;
- разрушающий или неразрушающий метод;
- контактный или бесконтактный метод;
- температура;
- стоимость.

В области СВЧ наряду с методами измерений на дискретных частотах и узкополосными методами все более популярными становятся широкополосные методы, измерительные приборы с качанием частоты. Тем не менее во многих случаях требуется такая чувствительность, которая пока недостижима для широкополосных методов.

Краткое качественное сравнение принципов измерения представлено в табл. 1.

Таблица 1. Принципы СВЧ измерений параметров материалов

Суть метода	Измерительная секция	Характеристики метода
Использование коаксиального пробника		Широкополосный, неразрушающий. Используется для материалов с большими потерями. Применим для исследования жидкостей и полутвердых материалов.
Использование линии передачи		Используется для материалов со средними потерями. Применим для твердых материалов, поддающихся механической обработке. Недостаток – сложность изготовления образцов.
Использование объемного резонатора		Высокоточный и чувствительный. Используется для материалов с низкими потерями. Недостаток – применим только для небольших образцов.
Измерение в свободном пространстве		Бесконтактный. Используется для измерений при высоких температурах. Недостаток – требуются большие, плоские образцы.

Использование коаксиального пробника

Разомкнутый коаксиальный пробник является срезом коаксиальной линии передачи. Свойства материала измеряются погружением пробника в жидкость или касанием пробником плоской поверхности материала. Структура полей на конце пробника искажается, как только они входят в контакт с испытуемым материалом. Измеряется отраженный сигнал (S11).

Особенности метода:

- широкополосный;

- простой и удобный (неразрушающий);
 - ограниченные точность измерения ϵ_r и разрешение измерения $\text{tg}\delta$ при низких потерях;
 - лучший из методов для жидкостей или пластичных материалов.
- Требования к образцам:
- толщина образца более половины длины волны;
 - немагнитный;
 - изотропный и однородный;

- плоская поверхность;
- отсутствие воздушных зазоров.
- Основные источники погрешностей:
- неточность измерения величины S_{11} ;
- нестабильность кабеля;
- воздушные зазоры;
- неточность измерения толщины образца.

Использование линии передачи

Методы с использованием линии передачи включают размещение материала внутри части закрытой линии передачи. Обычно линия передачи является отрезком прямоугольного волновода или воздушной коаксиальной линии. Диэлектрическая (ϵ_r) и магнитная (μ_r) проницаемости вычисляются из результатов измерений отраженного сигнала (S_{11}) или прошедшего сигнала (S_{21}).

Особенности метода:

- широкополосность – нижнее значение ограничено длиной образца;
- ограниченное разрешение при низких потерях (зависит от длины образца);
- возможность измерения параметров магнитных материалов;
- возможность измерения параметров анизотропных материалов.

Требования к образцам:

- образец заполняет сечение устройства подключения;
- отсутствие воздушных зазоров на стенках устройства подключения;
- гладкие и плоские поверхности, расположение перпендикулярно продольной оси;
- однородность.

Основные источники погрешностей:

- неточность измерения величины S_{11} и S_{12} ;
- недостаточно плотное прилегание материала образца к стенкам линии передачи;
- погрешность расчета;
- нарушение параллельности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;
- низкое качество обработки поверхности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;
- неточность измерения толщины образца.

Использование объемного резонатора

Методы с использованием объемного резонатора условно можно разделить на две группы.

К первой группе относят методы, основанные на возбуждении резонанса непосредственно в измеряемом образце, а ко второй – на внесении образцом возмущения в поле опорного резонатора. В обоих методах измеряются параметры S_{11} и/или S_{21} . На основании измеренных величин рассчитывают требуемые характеристики диэлектрического материала.

Особенности метода:

- высокая точность измерений, особенно для методов первой группы;
- методы первой группы хорошо подходят для изучения материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости, а методы второй группы – для материалов с низким значением диэлектрической проницаемости;
- методы первой группы хорошо подходят для изучения материалов с низкими потерями, а методы второй группы – для материалов с высокими потерями.

Требования к образцам:

- методы первой группы требуют изготовления образцов заданного размера и простой формы (прямоугольник, цилиндр) для упрощения последующего расчета;
- методы второй группы не предъявляют особых требований к образцам и могут быть использованы для работы с образцами малого размера.

Основные источники погрешностей:

- неточность измерения величины S_{11} и S_{12} ;
- погрешность расчета;
- для методов первой группы на погрешность влияет неточность определения размеров образцов.

Измерение в свободном пространстве

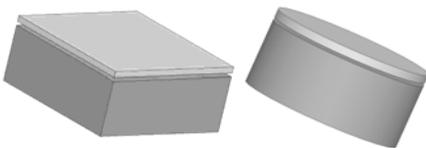
В данной группе методов образец, находящийся в свободном пространстве, облучают с помощью антенны. С помощью этой же антенны измеряют параметр S_{11} . С помощью другой антенны, расположенной по другую сторону образца, измеряют параметр S_{12} . На основании измеренных величин рассчитывают требуемые характеристики диэлектрического материала.

Особенности метода:

- бесконтактный, неразрушающий;
- высокочастотный – нижнее значение ограничено толщиной образца;
- пригоден при высоких температурах;

- возможно изменение поляризации антенны для измерения свойств анизотропных материалов;
 - возможность измерений магнитных материалов.
- Требования к образцам:
- большие, плоские образцы с параллельными сторонами;
 - однородность.
- Основные источники погрешностей:
- неточность измерения величины S_{11} и S_{12} ;
 - погрешность расчета;
 - нарушение параллельности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;
 - низкое качество обработки поверхности плоскостей, перпендикулярных к направлению распространения волны;
 - неточность измерения толщины образца.

Качественный анализ существующих методов или способов измерения микроволновых характеристик диэлектрических материалов показывает, что универсального метода нет и быть не может, ввиду многообразия свойств различных материалов. А современные разработки новейших специальных диэлектриков, наноразмерных монокристаллических диэлектрических пленок, тонкопленочных мультиферроиков, гетероструктур, магнито-реологических материалов и прочих современных, так называемых,



«smart materials» требуют новых, более совершенных и точных методов измерения электромагнитных характеристик.

III. Метод составного диэлектрического резонатора

Методы измерения, основанные на использовании объемного резонатора, обладают высокой точностью измерений. Кроме того они могут быть адаптированы для изучения свойств материалов с различными величинами диэлектрической проницаемости и различным уровнем потерь. Поэтому эта группа методов является весьма интересной и активно исследуется с целью использования для изучения свойств материалов в тех случаях, когда использование других методов неэффективно.

Нами разработано несколько методов измерения микроволновых характеристик объемных диэлектрических материалов и тонких пленок. Предлагаемые методы основаны на измерении эффективной диэлектрической проницаемости составного диэлектрического резонатора (СДР) в направлении перпендикулярном или последовательном плоскости образца (рис.1).

Поскольку диэлектрическая проницаемость и потери в направлении перпендикулярном плоскости образца могут заметно отличаться от этих значений в направлении параллельном плоскости, представляет интерес измерение параметров в обоих направлениях.

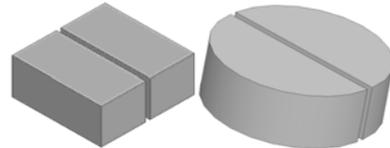


Рис. 1. Общий вид конфигурации параллельного и последовательного соединения слоев

Поскольку диэлектрическая проницаемость и потери в направлении перпендикулярном плоскости образца могут заметно отличаться от этих значений в направлении параллельном плоскости, представляет интерес измерение параметров в обоих направлениях.

Для измерений разработана и изготовлена специальная измерительная камера (рис. 2), с индикатором часового типа, имеющем цену де-

ления 1 мкм, так что можно ориентировочно зафиксировать 0,5 мкм. Части ДР приклеивались к кварцевой опоре и верхнему штоку, изготовленному из высокодобротных диэлектриков с малым значением диэлектрической проницаемости ($\epsilon \leq 4$) (кварц, полистирол). Тонкая пленка клея (БФ-2) в местах склейки, в пределах погрешности измерителя частоты, не влияла на положение резонансного пика.

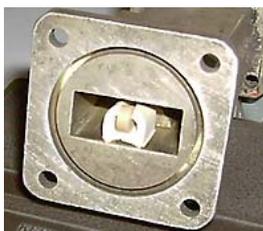


Рис. 2. Расположение ДР в волноводе и измерительной ячейке

Перемещение выполнялось в одну сторону для предотвращения погрешности из-за люфта в устройстве перемещения штока. Цилиндрическая измерительная камера рассчитана так, что в ней отсутствуют собственные резонансы в области ≤ 11 ГГц. Дополнительные контрольные измерения выполнялись в регулярном волноводе. Размеры экранирующей поверхности были выбраны так, чтобы получить оптимальную связь с СВЧ полем. Исследования проведены на резонаторах из керамического диэлектрика с $\epsilon=35$ и произведением добротности на частоту $Qf=50000$, изготовленного в нашей лаборатории. Кроме того, исследованы ДР из материала с $\epsilon=85$ и $\epsilon=150$.

Торцевые поверхности СДР шлифованные и полированные, неровности поверхности ≤ 15 мкм и ≤ 3 мкм, соответственно. Расхождение между резонансными частотами монолитного ДР и СДР со шлифованными торцами при нулевом зазоре (диаметры 6,87 мм, толщины 3,33 мм) составляет 60...100 МГц, и зависит от качества обработки торцов. Для полированных торцов, расхождение заметно меньше – 10...30 МГц. При обработке приняты меры, чтобы избежать «завала» краев торцевых поверхностей.

Одним из источников возникновения ошибок при измерениях с помощью СДР могут быть отклонения от соосности и параллельности частей резонатора при перемещении (рис. 3).

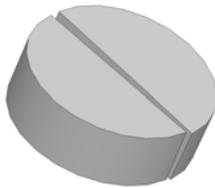


Рис. 3. Возможная неплоскопараллельность или несоосность частей составного диэлектрического резонатора

Для выяснения этого вопроса было исследовано поведение резонансной частоты СДР, в которых верхняя часть поворачивалась вокруг вертикальной оси относительно нижней, при минимальном зазоре 2 мкм и при щели 100 мкм.

На рис.4 показана частотная характеристика СДР при повороте его частей от 0° до 90° относительно друг друга.

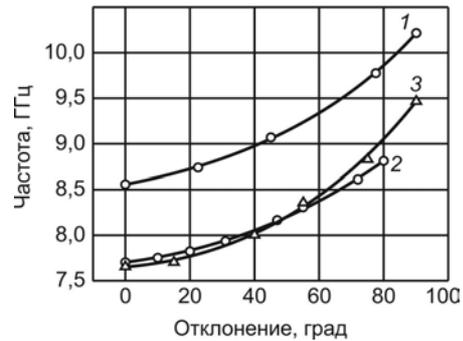


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от неплоскопараллельности и несоосности частей ДР: 1– неплоскопараллельность; 2– несоосность при зазоре 2 мкм; 3 – несоосность при зазоре 100 мкм

Из результатов этих исследований следует, что при неплоскопараллельности или несоосности менее 3° , отклонение частоты менее 0,01 %, причем при несоосности, когда зазор 100 мкм, отклонение заметно меньше, чем при зазоре 2 мкм. При неплоскопараллельности менее 3° , отклонение частоты на порядок меньше, чем при несоосности. Эти результаты весьма важны при измерении проницаемости газов или жидкостей.

Таким образом, для обеспечения максимальной точности измерений, механика измерительной приставки должна быть выполнена с максимальной точностью, без каких-либо люфтов и поворотов.

Исследование поведения резонансной частоты от величины воздушного зазора проведено в регулярном волноводе 48x24 мм на СДР изготовленном из керамики с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=85$.

Через широкую стенку волновода пропущен полистироловый шток, к нижней части которого, приклеена половина ДР. Верхняя часть штока связана с индикатором часового типа. Размеры ДР 8,6x3,96 мм, разрезан по диаметру и восстановлена цилиндричность.

Для исключения случайных ошибок, измерения выполнялись сериями не менее трех раз. Результаты измерений показаны на рис. 5.

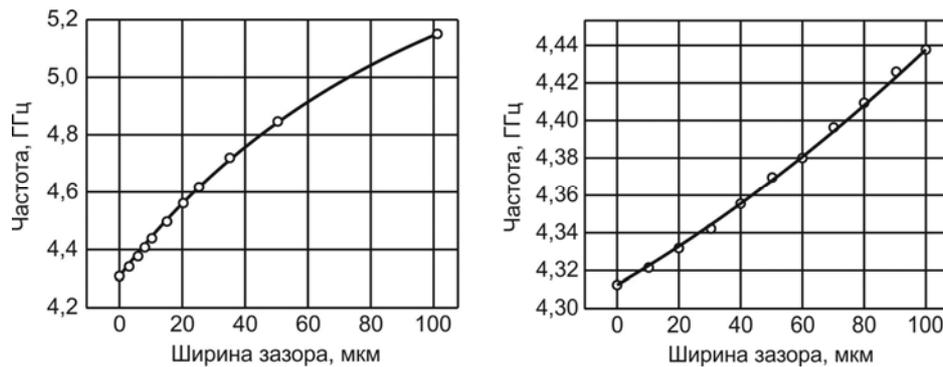


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты от величины воздушного зазора при $\epsilon=5$

Аналогичные исследования проведены с ДР из материала с $\epsilon=35$. Результаты измерений показаны на рис. 6.

Экспериментальная проверка показывает хорошую воспроизводимость от образца к образцу.

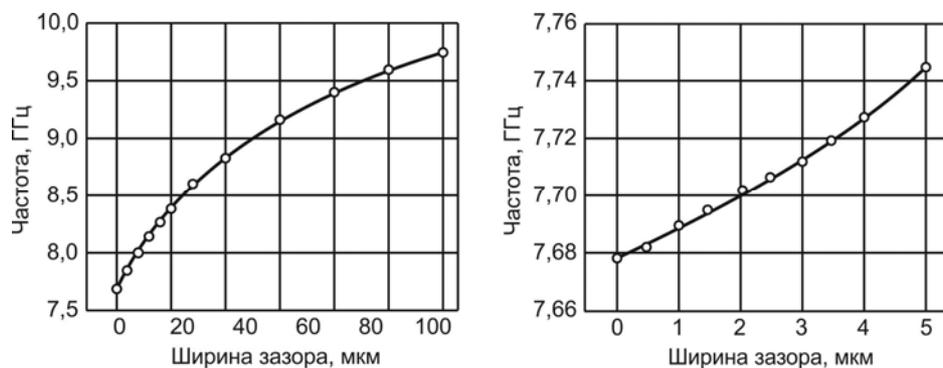


Рис. 6. Зависимость резонансной частоты от величины воздушного зазора при $\epsilon=35$

Известные модели диэлектрического резонатора позволяют легко рассчитывать по измеренной частоте TE_{018} и TE_{118} мод диэлектрическую проницаемость СДР. И далее из сравнения относительной проницаемости ДР и эффективной диэлектрической проницаемости СДР, рассчитываем проницаемость материала неоднородности.

Выводы

1. В дополнение к методам, использующим составной ДР с основным типом колебаний, предложен метод на основе поперечно разрезанного ДР. В этом случае измеряется диэлектрическая проницаемость в направлении перпендикулярном плоскости образца, но возможно измерение и в плоскости подложки, при соответствующем выборе размеров подложки.

2. Измерения могут выполняться непосредственно в регулярном волноводе, без изготовления специальных устройств. Однако удобнее использовать узкоспециализированные ячейки и держатели образцов для конкретных областей применения, определяемых типом материала, температурными требованиями, необходимостью иметь напряжение смещения и прочее.

3. Метод обладает высокой чувствительностью к потерям, а выбором диэлектрической проницаемости основного ДР, определяется оптимальная чувствительность для измерений параметров по группам ϵ контролируемых материалов. Чувствительность метода повышается с уменьшением проницаемости тестируемого материала.

Список использованных источников

1. Поплавко Ю. М. Мікрохвильова діелектрична спектроскопія [Текст] : навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, В. І. Молчанов, В. А. Казміренко. – К: НТУУ «КПІ», 2011. – 304 с. – Бібліогр. : с. 302–303. – 150 пр. ISBN 978-966-622-441-1
2. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот [Текст] / А. Ф. Харвей. – М. : Советское радио, 1965. – Т. 1. – 784 с. – Библиогр. : с. 759–776. – 10300 экз.
3. Bovtun V. An electrode-free method of characterizing the microwave dielectric properties of high-permittivity thin films / V. Bovtun, V. Pashkov, M. Kempa, S. Kamba, A. Eremenko, V. Molchanov [et al.] // Journal of Applied Physics, 109–115, 024106, 2011.

4. *Пашков В. М.* Метод измерения СВЧ характеристик диэлектрических пленок / В. М. Пашков, В. П. Бовтун, Ю. В. Прокопенко, М. Кемпа, В. И. Молчанов, А. В. Еременко, Ю. М. Поплавко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо–2009) : Труды 19-ой Междунар. конф. (14–18 сент. 2009, Севастополь, Крым, Украина). – Севастополь, 2009. – С. 769–770.

Поступила в редакцию 14 декабря 2014 г.

УДК 621.372.41

Ю.В. Діденко, В.І. Молчанов, канд.техн.наук, **В.М. Пашков**, канд.техн.наук,
Д.Д. Татарчук, канд.техн.наук, **Д.А. Шмигін**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, м. Київ, 03056, Україна.

НВЧ методи вимірювання параметрів діелектричних матеріалів на основі складеного діелектричного резонатора

У статті проаналізовано НВЧ методи вимірювання параметрів матеріалів, показано їх переваги й недоліки, проаналізовано критерії вибору конкретного методу вимірювань. Авторами запропоновано модифікацію методу складеного діелектричного резонатора. Запропонований метод має високу чутливість при вимірюванні діелектричної проникності та втрат. Бібл. 4, рис. 6., табл. 1.

Ключові слова: діелектричні матеріали, фактор втрат, тангенс кута втрат, діелектрична проникність, НВЧ параметри.

UDC 621.372.41

Yu.V. Didenko, V.I. Molchanov, Ph.D., **V.M. Pashkov**, Ph.D., **D.D. Tatarchuk**, Ph.D., **D.A. Shmyhin**
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
st. Polytechnique, 16, Kyiv, 03056, Ukraine.

UHF methods of measuring the parameters of the microwave dielectric materials based on composite dielectric resonator

The article analyzes the microwave methods for measuring the material parameters, showing their advantages and disadvantages, discussed the criteria for selecting the measurement method. The authors proposed a modification of the method of the composite dielectric resonator. The proposed method has a high sensitivity in the measurement of dielectric constant and loss. References 4, figures 6, tables 1.

Keywords: dielectric materials, loss factor, loss tangent, the dielectric constant, microwave parameters.

References

1. *Poplavko Y. M., Molchanov V. I., Kazmirenko V. A.* (2011), "Microwave Dielectric Spectroscopy". Kiev, NTUU «KPI». P. 304 p. (Ukr)
2. *Harvey A. F.* (1965), "Microwave Engineering". Moskva, Sovetskoe Radio. Vol. 1, P. 784. (Rus)
3. *Bovtun V., Pashkov V., Kempa M., Kamba S., Eremenko A., Molchanov V.* [et al.] (2011), "An electrode-free method of characterizing the microwave dielectric properties of high-permittivity thin films". Journal of Applied Physics. 024106, pp. 109–115.
4. *Pashkov V.M., Bovtun V.P., Prokopenko Y.V., Kempa M., Molchanov V.I., Eremenko A.V., Poplavko Y.M.* (2009), "The Method of Measuring the Characteristics of the Microwave Dielectric Films". // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo-2009) : Proc. of 19th Int. Sci. Conf. (Sept. 14–18, 2009, Sevastopol, Crimea, Ukraine), pp. 769–770. (Rus)