### УДК

# Особенности измерения электромагнитных параметров дефектных образцов в коаксиальной измерительной ячейке на СВЧ

#### Г.Е. Кулешов, Р.Е. Холодов, А.В. Бадьин, Д.С. Кателина

Национальный исследовательский Томский государственный университет «НИ ТГУ»

Аннотация: в данной работе представлен анализ влияния механических дефектов экспериментальных образцов на рассчитываемые электромагнитные параметры при проведении измерений в коаксиальной волноводной ячейке на СВЧ. В диапазоне частот от 0,1 до 18 ГГц проведено моделирование электромагнитного отклика от образца с технологическими дефектами в коаксиальной измерительной ячейке. Показано, что увеличение внутреннего диаметра исследуемого образца на 1 мм приводит к снижению рассчитываемой действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости в два раза, тогда как мнимая составляющая уменьшается более чем в два раза. При этом влияние уменьшения внешнего диаметра образца на комплексную диэлектрическую проницаемость в среднем в два раза меньше, чем влияние увеличения внутреннего диаметра. Таким образом, наличие дефектов у экспериментального образца в коаксиальной волноводной ячейки непосредственным образом влияет на точность расчёта диэлектрической проницаемости.

**Ключевые слова:** СВЧ, дефекты, коаксиальная измерительная ячейка, S-параметры, диэлектрическая проницаемость

#### 1. Введение

Исследование электромагнитных параметров материалов, таких как диэлектрическая и магнитная проницаемость, имеет фундаментальное значение для понимания их взаимодействия с электромагнитными полями [1]. Эти параметры определяют распространение, поглощение и отражение электромагнитных волн в среде, что критически важно для разработки современных электронных устройств.

Методы измерения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости на микроволновых частотах можно разделить на два класса. Это методы на основе измерения коэффициентов пропускания/отражения (волноводные и свободного пространства), а также резонаторные методики [2]. Особо стоит выделить способ измерения электромагнитных параметров в коаксиальной волноводной ячейке [3 – 5]. Именно им производятся подавляющее большинство измерений комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости на CBЧ.

Данный метод обеспечивает высокую точность измерений за счёт минимизации паразитных эффектов [6], а также позволяет исследовать материалы в широком частотном диапазоне. Однако он имеет и ограничения, связанные с необходимостью тщательной подготовки образцов, которые должны иметь определённую геометрию и плотно прилегать к стенкам измерительной линии. Точность измерений электромагнитных параметров существенно снижается из-за дефектов образцов: воздушных зазоров, неоднородностей, шероховатости и отклонений геометрии. Эти дефекты влияют на распределение электромагнитного поля, что приводит к ошибкам в расчёте диэлектрической проницаемости.

В данной работе было исследовано в программе CST Studio влияние отклонения геометрических параметров измеряемого образца материала на *S*-параметры

получаемые в ходе моделирования и рассчитанную на их основе диэлектрическую проницаемость.

#### 2. Описание модели измерений и расчета

Измерения электромагнитных параметров в коаксиальной волноводной ячейке проводятся следующим образом. В начале на векторном анализаторе цепей измеряются S-параметры с фазой для пустой коаксиальной измерительной ячейки со стандартными размерами ( $d_{\text{внеш.}} = 7 \text{ мм}$ ,  $d_{\text{внут.}} = 3,04 \text{ мм}$ ) и ячейки, содержащей образец исследуемого материала в виде шайбы. Далее на основе измеренных S-параметров при известной толщине образца и электрической длине ячейки рассчитывается комплексная диэлектрическая проницаемость по выбранной методике. В данной работе для вычисления электромагнитных параметров измеряемых материалов использовался модернизированный метод Беккера-Джарвиса [7].

Для оценки влияния геометрии исследуемого образца материала на результаты измерений электромагнитного отклика была разработана модель коаксиальной измерительной ячейки (рисунок 1) в программе CST Studio.



**Рисунок 1.** Модель коаксиальной измерительной ячейки в программе CST Studio: 1 – исследуемый образец в форме шайбы; 2 – внешняя стенка коаксиальной ячейки; 3 – внутренний стержень коаксиальной ячейки; 4 – пространство, заполненное воздухом.

Наиболее распространенным видом дефекта в процессе подготовки образцов к исследованиям является отклонение внутреннего и внешнего диаметра измеряемого объекта (шайбы) (рисунок 2) от заданного. В этом случае наибольшее влияние на погрешность вычисляемой диэлектрической проницаемости оказывают слои воздуха между образцом и поверхностями коаксиальной ячейкой ввиду изменения распределения электрического поля.



**Рисунок 2.** Модель коаксиальной ячейки, заполненной шайбой с отклонением по внутреннему (а) и внешнему (б) диаметру

При моделировании зазор между образцом и ячейкой для внешнего и внутреннего диаметра образца изменялся в пределах от 0 до 1 мм с шагом 250 мкм. Моделирование проводилось в диапазоне частот от 0,1 до 18 ГГц.

Из полученных в результате моделирования *S*-параметров и фазы по ранее описанной методике рассчитывалась комплексная диэлектрическая проницаемость.

#### 3. Результаты моделирования и расчета

В результате расчёта были получены графики комплексной диэлектрической проницаемости от частоты для образцов с различным отклонением внешнего (рисунок 3) и внутреннего (рисунок 4) диаметра от заданного.



**Рисунок 3.** Графики зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для образцов с различным отклонением внешнего диаметра от заданного (7 мм)



**Рисунок 4.** Графики зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для образцов с различным отклонением внутреннего диаметра от заданного (3,04 мм)

Из рисунка 3 и 4 видно, что данные моделирования в программе CST Studio коррелируют с измеренным значением диэлектрической проницаемости эталонного образца материала. При изменении внешнего диаметра на 250 мкм величина действительной части диэлектрической проницаемости (рисунок 3а) уменьшается на 10%, а при изменении на 1 мм - на 32%. Мнимая часть диэлектрической проницаемости (рисунок 3б) уменьшается в 2 раза с уменьшением внешнего диаметра образца на 1 мм.

При изменении внутреннего диаметра на 250 мкм, величина действительной части диэлектрической проницаемости (рисунок 4a) снижается на 20%, а при изменении на 1 мм снизилась на 50%. Мнимая часть диэлектрической проницаемости (рисунок 4б) уменьшается в 3 раз при увеличении внутреннего диаметра на 1 мм.

Как и предполагалось, изменение внешнего и внутреннего диаметров образца на 250 мкм приводит к погрешности вычисления диэлектрической проницаемости в 10% и 20%, соответственно.

Ниже приведены частотные зависимости (рисунок 5) диэлектрической проницаемости от отклонения внутреннего диаметра исследуемого образца в пределах 0 – 1 мм с шагом 250 мкм при различных частотах.



**Рисунок 5.** Графики зависимости диэлектрической проницаемости от отклонения внутреннего диаметра образца при различных частотах (2 ГГц, 8 ГГц, 18 ГГц)

Из рисунка 5 видно, что в диапазоне 2-18 ГГц действительная часть диэлектрической проницаемости (рисунок 5а) с увеличением отклонения внутреннего диаметра уменьшается в среднем в 1,9 раз, мнимая часть диэлектрической проницаемости (рисунок 5б) уменьшается в среднем в 5,8 раза (2 ГГц) и в 2,6 раза (8-18 ГГц).

#### 3. Заключение

Показано, что увеличение внутреннего диаметра исследуемого образца на 1 мм приводит к снижению рассчитываемой действительной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости в два раза, тогда как мнимая составляющая уменьшается более чем в два раза. При этом влияние уменьшения внешнего диаметра образца на комплексную диэлектрическую проницаемость в среднем в три раза меньше, чем влияние увеличения внутреннего диаметра.

Таким образом, точное изготовление образца под размеры коаксиальной волноводной ячейки или учет дефектов экспериментального образца является критически важным для точного расчёта диэлектрической проницаемости материала.

## Результаты получены в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0014.

#### Список литературы

- Krupka J. Microwave measurements of electromagnetic properties of materials // Materials. 2021. V. 14. – №. 17. – P. 5097.
- Sheen J. Comparisons of microwave dielectric property measurements by transmission/reflection techniques and resonance techniques //Measurement Science and Technology. – 2009. – V. 20. – №. 4. – P. 042001.
- 3. Ulmaskulov M. R., Shunailov S. A. Microwave generation modes of ferrite nonlinear transmission lines up to 20 GHz //Journal of Applied Physics. 2021. V. 130. №. 23.
- 4. Zhu C., Huang J. Coaxial cable sensing: Review and perspective //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2023. V. 72. №. 3. P. 1790-1809.
- 5. Weir W. B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies //Proceedings of the IEEE. 1974. V. 62. №. 1. P. 33-36.
- 6. Guraliuc A. R. et al. Parasitic current reduction on electrically long coaxial cables feeding dipoles of a collinear array //IEEE transactions on antennas and propagation. 2011. V. 59. №. 11. P. 4318-4321.
- Chalapat K. et al. Wideband Reference-Plane Invariant Method for Measuring Electromagnetic Parameters of Materials //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2009. – V. 57. №9. – P. 2257–2267.