

Коаксиальный СВЧ-зонд для исследования параметров диэлектрических материалов

С.В. Ковалев, А.В. Дроздовский, А.А. Семенов, В.С. Лунченко, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе приведены результаты создания коаксиального СВЧ-зонда для измерения диэлектрических параметров материалов. Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования диэлектрических пластин с различными параметрами.

Ключевые слова: коаксиальный резонатор, диэлектрики, диэлектрическая проницаемость

1. Введение

Одной из часто встречающихся задач, стоящих перед производителями СВЧ-устройств является оперативный неразрушающий контроль диэлектрических параметров подложек. Наиболее точными методами измерения, позволяющими одновременно проводить измерения как диэлектрической проницаемости, так и тангенса угла диэлектрических потерь, являются резонансные методы измерений. При использовании данных методов, как правило, требуется изготовление образцов материала заданного размера, что сильно ограничивает оперативность проведения измерений.

В последнее время ведется поиск путей повышения скорости измерения параметров диэлектрических материалов. Для решения данной задачи представляется удобным использование измерительных зондов, принцип работы которых основан на изменении коэффициента отражения от конца коаксиальной линии [1]. Например, зонды, предназначенные для измерения диэлектрической проницаемости, имеются в линейке различных компаний, таких как Keysight [2, 3], Anritsu [4] и организаций, представляющих услуги по измерению параметров материалов [5]. Использование в качестве СВЧ-зонда коаксиального резонатора позволяет увеличить точность измерения диэлектрической проницаемости и дополнительно измерять тангенс угла диэлектрических потерь материала.

2. Моделирование измерительного зонда

Предлагаемый измерительный зонд представляет собой четвертьволновый резонатор, выполненный в виде отрезка коаксиальной линии передач, состоящей из полого цилиндра, выполняющего роль экрана и внутренней жилы в виде сплошного металлического цилиндра. Один из концов коаксиального резонатора является короткозамкнутым.

В конструкции присутствуют порты для ввода/вывода сверхвысокочастотного сигнала. При измерении открытый конец экрана и центральная жила коаксиального резонатора касаются диэлектрического образца в виде пластины, которая, в частном случае, может быть металлизирована с обратной стороны. Диэлектрическая пластина при приложении к открытому концу коаксиальной линии передачи изменяет коэффициент отражения. Изменение комплексного коэффициента отражения приводит к двум эффектам.

Первым эффектом, возникающим за счёт изменения фазы коэффициента отражения, является изменение резонансной частоты зонда, определяемой условием

баланса фаз. Вторым эффектом, проистекающим из изменения величины модуля коэффициента отражения, является изменение добротности резонатора.

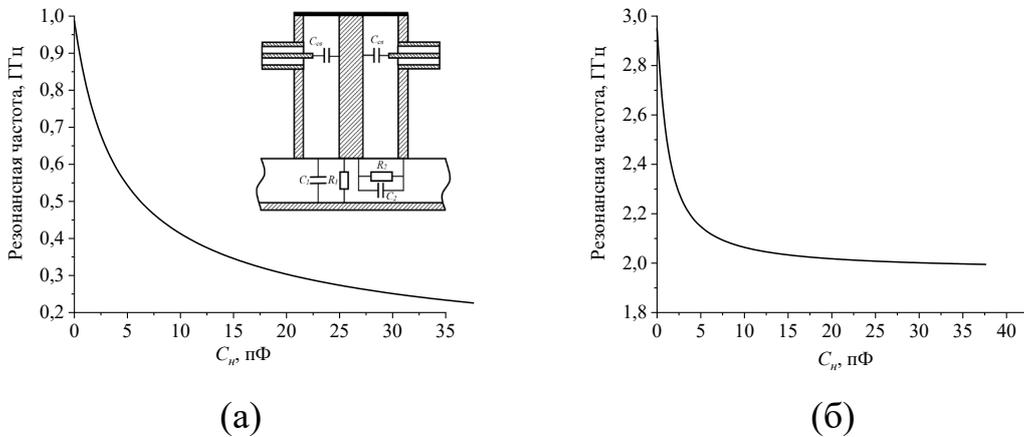


Рисунок 1. График зависимости резонансной первой (а) и второй (б) резонансных частот от эквивалентной нагрузочной емкости.

На основе матриц передачи была создана аналитическая модель разрабатываемого зонда. В рамках использованной аналитической модели полагается, что контакт открытого конца резонатора с диэлектрической пластиной эквивалентен подключению к концу коаксиального резонатора двух параллельных емкостей и двух нагрузок (см. вставку на рисунке 1). Изменение нагрузочных емкостей ведет к нелинейному сдвигу частот резонатора (рисунок 1). Как видно из рисунка диапазон сдвига резонансных частот составляет сотни мегагерц. При этом наиболее чувствительная к изменению емкости (и диэлектрической проницаемости пластины) ограничена диапазоном нагрузочных емкостей 0 – 20 пФ. Работоспособность аналитической модели была проверена путем сопоставления с результатами моделирования в программах Ansys HFSS и AWR microwave office. Результаты моделирования сдвига частоты первого резонанса для пластин различной толщины представлены на рисунке 2. Зависимость добротности резонатора от тангенса угла диэлектрических потерь пластины приведена на рисунке 3.

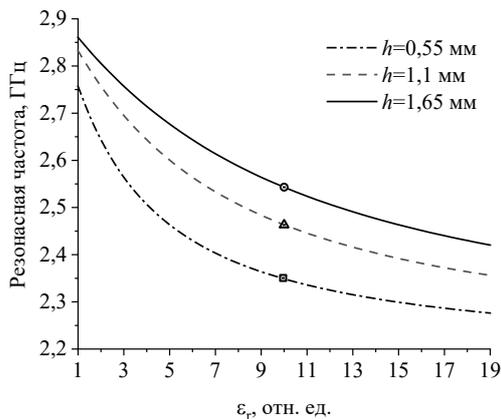


Рисунок 2. Влияние диэлектрической проницаемости исследуемого материала на положение резонансной частоты измерительного зонда. Точками показаны экспериментальные значения для материала с диэлектрической проницаемостью 9,91.

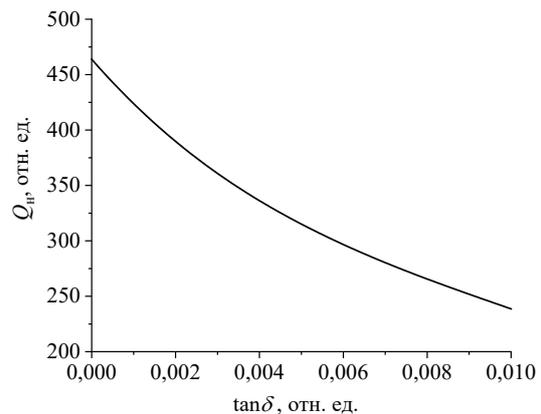


Рисунок 3. Влияние тангенса угла диэлектрических потерь на добротность передаточной характеристики измерительного зонда.

На основе полученных результатов, для значений толщин исследуемых

диэлектрических пластин в пределах 0,1 – 1,5 мм и диапазоном измеряемых диэлектрических проницаемостей 1 – 20 мм была выбрана геометрия и изготовлен зонд. Основные размеры зонда составили: длина – 72,4 мм, внутренний диаметр зонда – 1,3 см, диаметр центральной жилы – 5,2 мм.

3. Результаты измерений

Экспериментальное исследование работы проводилось при помощи векторного анализатора цепей Обзор-804/1 производства ООО «ПЛАНАР». Для этого зонд подключался к двум портам и измерялись передаточные характеристики зонда. Для точного определения значений диэлектрической проницаемости исследуемых материалов была разработана методика измерений, включающая в себя два этапа калибровки. На первом этапе калибровки измерялась передаточная характеристика зонда без нагрузки. Данный этап позволял учесть элементы связи резонатора с подводящими линиями. В рамках второго этапа измерялась передаточная характеристика зонда, нагруженного на эталонный материал с известными диэлектрическими параметрами. Данный этап позволял учесть дополнительные паразитные емкости, возникающие, вследствие шероховатости конструкции зонда.

На рисунке 4 представлены типичные передаточные характеристики зонда без нагрузки и при нагрузке на диэлектрические пластины толщиной 0,5 мм с различными диэлектрическими проницаемостями. Видно, что взаимодействие зонда с пластинами с проницаемостью 4,4 и 9,4 приводило к сдвигу частот с 3 ГГц до 2,53 и 2,38 ГГц, соответственно. Полученные на основе анализа добротности значения тангенса угла диэлектрических потерь составили $2,1 \cdot 10^{-2}$ и $1,8 \cdot 10^{-3}$ соответственно. Сопоставление величины сдвига резонансных кривых при различных толщинах диэлектрических пластин с диэлектрической проницаемостью 9,91 представлено точками на рисунке 3.

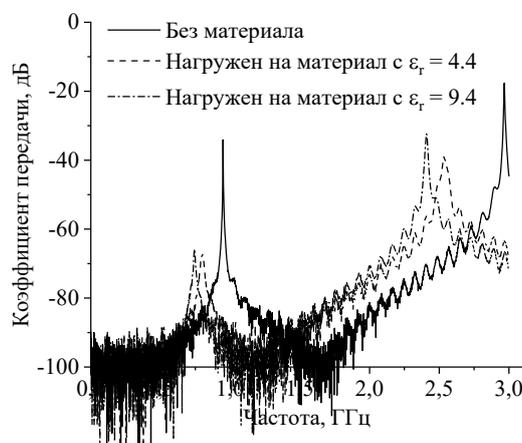


Рисунок 4. Передаточные характеристики зонда без нагрузки и при нагрузке на диэлектрические пластины с различным значением диэлектрической проницаемости.

3. Заключение

В рамках работы был разработан зонд на основе четвертьволнового коаксиального резонатора для проведения измерений диэлектрических параметров материала. Зонд позволяет проводить измерение подложек с относительной диэлектрической проницаемостью от 1 до 20 с минимальной погрешностью измерений 0,01. Минимальный тангенс угла диэлектрических потерь, который можно определить с помощью зонда составляет 0,001.

Работа поддержана проектом “Госзадание” № FSEE-2020-0005.

Список литературы

1. Stuchly M. A., Stuchly S. S. Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies-a review // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 1980. – Т. 29. – №. 3. – С. 176-183.
2. Keysight Dielectric probe kit N1501A // URL: <http://www.keysight.com/us/en/product/N1501A/dielectric-probe-kit.html> (дата обращения: 25.04.2023).
3. Keysight Technologies Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials // URL: https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2019/08/Basics_Of_MeasuringDielectrics_5989-2589EN.pdf (дата обращения: 25.04.2023).
4. Open-ended coaxial probe for permittivity measurements to 125 GHz // URL: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Technical-Notes/White-Paper/11410-00826A.pdf> (дата обращения: 25.04.2023).
5. <https://www.npl.co.uk/products-services/electromagnetic-materials/electromagnetic-measurements-on-materials>