

Методика измерения СВЧ параметров диэлектрических пластин

А.Д. Белых, С.К. Нассим, А.Г. Гагарин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: представлена комплекс методик контроля СВЧ параметров диэлектрических пластин. Для точного определения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь используется разделяемый цилиндрический объёмный резонатор, а для технологического контроля равномерности СВЧ характеристик по площади пластины используется планарный СВЧ сенсор. Произведена оценка параметров измерительных макетов и соответствующей чувствительности методов.

Ключевые слова: диэлектрические пластины, диэлектрическая проницаемость, СВЧ–потери, цилиндрический резонатор, планарный СВЧ сенсор

1. Введение

Производство диэлектрических пластин, предназначенных для использования в качестве основы для СВЧ печатных плат, требует контроля их СВЧ параметров (диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь). Причём существует необходимость как в точном измерении, так и в текущем контроле для предупреждения отклонений от технологических условий. Для решения данной комплексной задачи должен использоваться комплекс измерительных методик, имеющих различные способы применения.

Наиболее эффективным методами измерения СВЧ свойств диэлектриков, не требующими постоянной и прецизионной калибровки, являются резонансные методы измерения. Измерительные СВЧ резонаторы могут заключать образец в резонансный объём (закрытый или частично открытый), что часто требует дополнительной подготовки образца. Другим вариантом является возмущение полуоткрытого СВЧ резонатора, путём введения образцов в зону распространения полей рассеяния, такие методы, которые можно отнести к сенсорным, могут быть применены без предварительного сопряжения образца и измерительного макета. Разработка таких методик во всём их разнообразии ведётся в мире на протяжении многих десятков лет и для их применения для решения конкретной задачи требуется выбор подходящего из известных методов и его адаптация. Из множества существующих методов выделим разделяемый цилиндрический резонатор и планарный СВЧ сенсор.

Разделяемые цилиндрические резонаторы рассматриваются с конца прошлого века [1]. Если для полностью закрытого объёма данная задача имеет простое и точное решение [1], то учёт полей рассеяния в области разделения отрезков цилиндрического волновода требует либо полноволнового анализа [2], либо введения коррекции по экспериментальным калибровочным процедурам [3]. Данная методика используется в коммерчески доступных измерительных устройствах компаний Keysight и Rohde&Schwarz [4].

К планарным СВЧ сенсорам, представляющим собой резонаторы на основе планарных линий передачи (чаще всего щелевых или копланарных), в последние годы наблюдается всплеск интереса [5,6]. Их предлагается использовать для мониторинга параметров самых разных диэлектрических и слабопроводящих сред.

В представленной работе рассматривается использование разделяемого цилиндрического резонатора и планарного сенсора на основе щелевой линии передачи для точного измерения и экспресс-контроля параметров диэлектрических пластин с толщинами порядка миллиметров и диэлектрическими проницаемостями порядка

единиц до десятка на частоте около 10 ГГц.

2. Разделённый цилиндрический резонатор

Помещение диэлектрического образца внутрь объёма резонатора требует изготовления разъемного резонансного объёма. Для этого обычно используют тип колебаний H_{01} в цилиндрическом волноводе, в котором отсутствуют токи проводимости в направлении между торцами резонатора. Это позволяет разрывать продольные стенки резонатора, сохраняя условия резонанса без существенной потери собственной добротности.

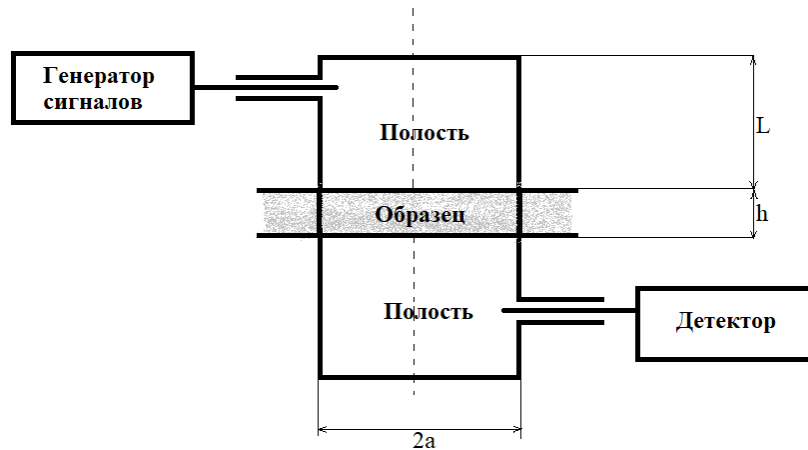


Рисунок 1. Схема измерительного макета на основе разделяемого цилиндрического резонатора.

Для резонатора, показанного на рисунке 1 в приближении проводящих стенок в области диэлектрического образца (короткозамкнутого зазора) для полуволнового резонанса H_{01} , можно записать продольные компоненты магнитного поля в воздухе (1) и в диэлектрике (2)

$$H_z = J_0 \left(j_{11} \frac{r}{a} \right) A \sin \beta_0 \left(L + \frac{h}{2} - z \right), \quad (1)$$

$$H_z = J_0 \left(j_{11} \frac{r}{a} \right) B \cos \beta z, \quad (2)$$

где $j_{11} = 3.83171$ – первый корень производной функции Бесселя, соответствующей моде H_{01} , $\beta_0^2 = (2\pi/\lambda_0)^2 - (2\pi/\lambda_c)^2$, $\beta^2 = \varepsilon (2\pi/\lambda_0)^2 - (2\pi/\lambda_c)^2$, λ_0 – длина волны на резонансной частоте, $\lambda_c = 2\pi a/j_{11} = 1.64 a$ – критическая длина волны для моды H_{01} длина волны на резонансной частоте, L – длина половины резонатора, ε и h – диэлектрическая проницаемость и толщина исследуемого диэлектрика.

Константы A и B определяются из условия непрерывности и гладкости (равенства продольных компонент и производных продольных компонент магнитного поля и) на границе диэлектрика $z = h/2$. Это условие выражается в трансцендентное уравнение

$$\left(\beta \frac{h}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\beta \frac{h}{2} \right) = \left(\frac{h}{2L} \right) \beta_0 L \operatorname{ctg}(\beta_0 L), \quad (3)$$

численное решение которого позволяет найти резонансную частоту f_0 как функцию параметров резонатора и диэлектрика, в частности, как функцию диэлектрической проницаемости. Решение обратной задачи позволяет найти по известной резонансной частоте диэлектрическую проницаемость диэлектрика.

Добротность образца $Q = 1/\operatorname{tg}\delta$ определяется как из ненагруженной добротности резонатора Q_0 с учётом собственной добротности пустого резонатора Q_{00} и

коэффициента включения образца в резонатор ξ

$$\frac{1}{\xi Q} = \frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_0}, \quad (4)$$

$$\xi = -2 \frac{\varepsilon}{f_0} \frac{df_0}{d\varepsilon}, \quad (5)$$

Другим важным параметром измерительного резонатора является чувствительность S

$$S = \frac{1}{f_0} \frac{df_0}{d\varepsilon}, \quad (6)$$

показывающая относительное изменение наблюдаемой резонансной частоты при изменении диэлектрической проницаемости. Очевидно, что наибольшая точность достигается при наибольших из возможных значениях коэффициента включения и чувствительности. Результаты расчёта резонансной частоты, чувствительности и коэффициента включения для резонатора с полудлиной $L = 16$ мм и радиусом $a = 20$ мм при различных толщинах образца показаны на рисунке 2.

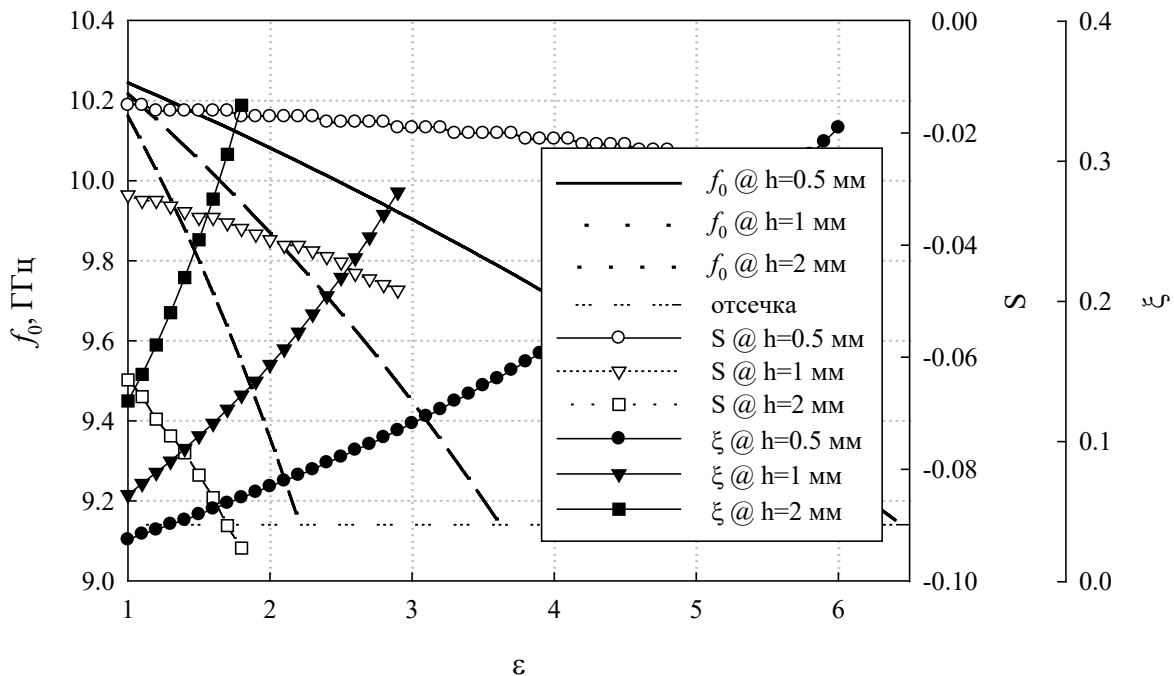


Рисунок 2. Результаты расчётов для разделяемого цилиндрического резонатора с диэлектрическим образцом.

2. Планарный сенсор на основе щелевой линии передачи

Наиболее часто используемым вариантом планарного сенсора являются различные вариации двухсторонней конструкции, где измерительный СВЧ сигнал подводится по микрополосковой линии передачи, которая связана со щелевым резонатором, сформированным в экране этой линии. Измеряемый материал помещается в поле рассеяния щелевой линии и, таким образом, влияет на характеристики резонанса.

Следует отметить, что в большинстве публикаций, посвящённых теме планарных сенсоров [5, 6], рассматривается непосредственный контакт исследуемого материала и щелевой линии. В реальной ситуации измерения твёрдого материала практически неизбежно возникновение неконтролируемого воздушного зазора, что ведёт к существенной ошибке измерения. Уменьшить влияние данного фактора можно путём

включения воздушного зазора в расчётную модель, в этом случае неконтролируемые отклонения его величины внесут меньшую ошибку. Схема модели представлена на рисунке 3.

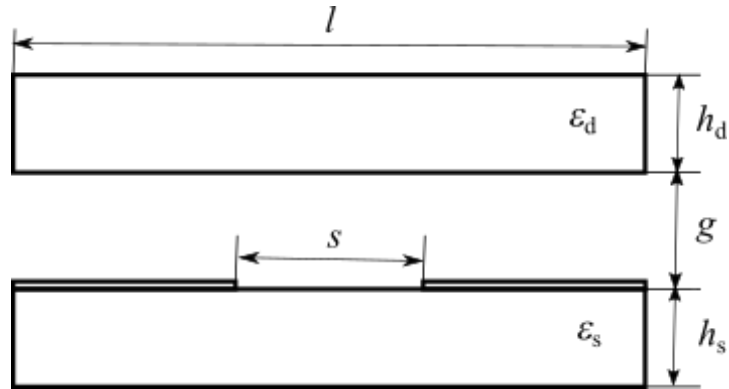


Рисунок 3. Схема расчётной модели для оценки ёмкости возмущённой щелевой линии передачи.

Оценка чувствительности данного метода измерения была проведена с использованием аппарата метода частичных емкостей [7]. При этом ёмкость конденсатора, соответствующего измеряемому материалу, включалась в последовательную цепь с плоскими конденсаторами, соответствующими воздушному зазору. Таким образом, полная ёмкость конденсатора, соответствующего возмущённой щелевой линии C_{line} , рассчитывалась как

$$C_{line} = C_{air} + C_{sub} + (C_d^{-1} + 2 C_{gap}^{-1})^{-1}, \quad (7)$$

где C_{air} и C_{sub} – воздушная и подложечная ёмкости невозмущённой щелевой линии, C_d – возмущающая ёмкость, определяемая исследуемым материалом [7], и $C_{gap} = \epsilon_0 (l - s)/(2g)$ – ёмкость воздушного зазора.

Резонансная частота полуволнового щелевого резонатора оценивалась как

$$f_0 = \frac{c}{2L \sqrt{\epsilon_{eff}}}, \quad (8)$$

где c – скорость света, L – длина щелевого резонатора, а $\epsilon_{eff} = C_{line}/C_{air}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость щелевой линии.

На рисунке 3 для щелевого резонатора на подложке с $\epsilon_{sub} = 2.2$ толщиной $h_{sub} = 1$ мм при воздушном зазоре $g = 1$ мм с длиной $L = 11$ мм приведены результаты расчёта резонансной частоты и чувствительности по выражениям (8) и (6) соответственно в зависимости от диэлектрической проницаемости образца ϵ_d толщиной $h_d = 1$ мм, рассчитанные при различных ширинах зазора s .

Следует учитывать, что такая оценка даёт завышенные значения ёмкости C_{line} , но позволяет выявить приблизительные зависимости чувствительности от основных параметров модели.

3. Заключение

Представлена комплексная методика контроля СВЧ параметров диэлектрических пластин, в которую входит точное измерение параметров диэлектрика с помощью разделяемого цилиндрического резонатора и быстрый контроль отклонений параметров на пластине. Приведённые оценки чувствительности показали достаточные величины для применения данных методов.

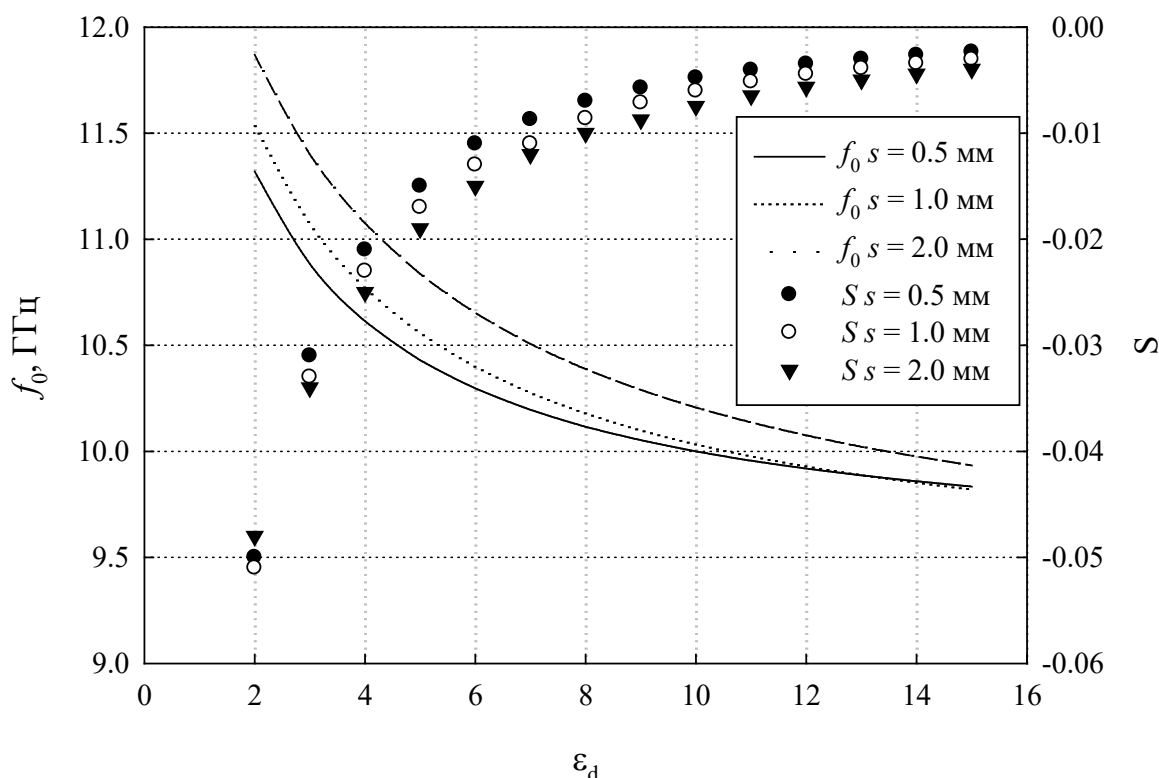


Рисунок 4. Зависимость частоты резонанса от диэлектрической проницаемости при разных значениях толщины образца h и длины цилиндрического резонатора L , но постоянной электрической длине прибора.

Исследование выполнено в рамках государственного задания №075-01438-22-07 от 28 октября 2022 года (FSEE-2022-0019).

Список литературы

1. Kent G. Nondestructive permittivity measurement of substrates //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1996. – Т. 45. – №. 1. – С. 102-106.
2. Janezic M. D., Baker-Jarvis J. Full-wave analysis of a split-cylinder resonator for nondestructive permittivity measurements //IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1999. – Т. 47. – №. 10. – С. 2014-2020.
3. Kent G., Bell S. M. The gap correction for the resonant-mode dielectrometer //IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 1996. – Т. 45. – №. 1. – С. 98-101.
4. Yaw K. C. Measurement of dielectric material properties //Application Note. Rohde & Schwarz. – 2012. – С. 1-35.
5. Muñoz-Enano J. et al. Planar microwave resonant sensors: A review and recent developments //Applied Sciences. – 2020. – Т. 10. – №. 7. – С. 2615.
6. Mohammad Abdolrazzaghi, Vahid Nayyeri and Ferran Martin: Techniques to Improve the Performance of Planar Microwave Sensors: A Review and Recent Developments // MDPI – 2022.
7. Вендик О. Г., Зубко С. П., Никольский М. А. Моделирование и расчет емкости планарного конденсатора, содержащего тонкий слой сегнетоэлектрика //Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – №. 4. – С. 1-7.