

Применение метода разъемного цилиндрического резонатора для измерения СВЧ-параметров двухслойной диэлектрической структуры

Д.Д. Цыганова, А.Г. Гагарин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе стандартный метод разъемного цилиндрического резонатора был адаптирован для измерения СВЧ-параметров (диэлектрической проницаемости и потерь) тонких диэлектрических плёнок в составе двухслойной диэлектрической структуры. Математическая модель была модифицирована для расчета резонансной частоты разъемного цилиндрического резонатора для структуры «тонкая диэлектрическая пленка - подложка».

Ключевые слова: разъемный цилиндрический резонатор, СВЧ-параметры, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, диэлектрическая пленка, подложка.

1. Введение

Производство диэлектриков, предназначенных для изготовления СВЧ устройств, требует контроля их СВЧ параметров (диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь). Кроме диэлектрических пластин, для которых разработано множество измерительных методик, диэлектрики также применяются в форме тонких плёнок, нанесённых на подложку. В этом случае задача проведения измерений затрудняется невозможностью отделения тонкой плёнки, которая имеет толщину порядка микрометров, от диэлектрической подложки, имеющей толщину порядка миллиметров и диэлектрическую проницаемость около 10. В качестве примера такой структуры можно рассматривать плёнки сегнетоэлектрика. Особенности таких объектов являются их высокая диэлектрическая проницаемость ϵ (от сотен до тысяч) и относительно высокие диэлектрические потери $\text{tg}\delta$ (около 0,01).

В научной литературе представлено множество методов измерения свойств тонких сегнетоэлектрических пленок без необходимости создания металлического покрытия и преодоления неопределенности, связанной с отделением свойств металлизации от свойств самого диэлектрика [1-6]. Особый интерес представляет разработка методик, которые используют измерительные устройства, изначально предназначенные для исследования диэлектрических пластин, и которые не требуют дополнительной обработки образца. Примером является метод разъемного цилиндрического резонатора [7].

2. Модель цилиндрического резонатора с двухслойной диэлектрической структурой

К измерению параметров тонкой диэлектрической пленки на подложке, помещенной в зазор разъемного цилиндрического резонатора, можно изначально подойти упрощенно. На Рисунке 1 показано схематическое продольное сечение замкнутого цилиндрического резонатора с двухслойным диэлектрическим включением (L – длина каждой секции резонатора, заполненной воздухом, ϵ_1 и h_1 –

диэлектрическая проницаемость и толщина подложки, ϵ_2 и h_2 – диэлектрическая проницаемость и толщина тонкой пленки, a – радиус цилиндрического волновода).

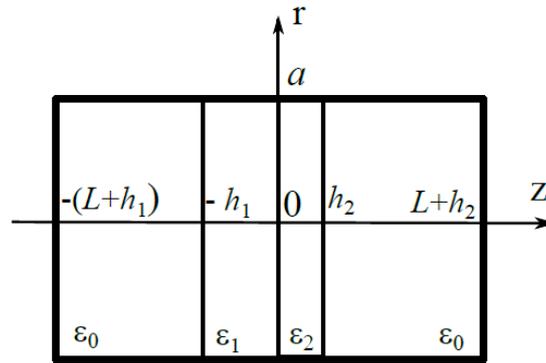


Рисунок 1. Схема цилиндрического резонатора с двухслойным диэлектриком.

Структура подобная изображённой на рисунке 1 но с однослойным диэлектриком была исследована ранее [7] и является основой методики для исследования диэлектрических пластин. Дисперсионное уравнение для однослойной структуры [7] с учетом поправочной функции P , учитывающей влияние зазора между частями резонатора и полученной в процедуре калибровки [8], имеет вид:

$$1 - \frac{\beta_1}{\beta_0} \tan \beta \frac{h_1}{2} \tan \beta_0 L = -P. \quad (1)$$

Калибровка проводилась на основе следующей функции коррекции:

$$P(\epsilon, h) = A(\epsilon - B)^2 \left(\frac{h}{2L} \right) \frac{\tan \beta_0 L}{\beta_0 L}, \quad (2)$$

где параметры функции коррекции $A = 0.7$ и $B = 1.2$.

Считая влияние тонкой плёнки на структуры электромагнитного поля внутри резонатора незначительным, результатами калибровки по однослойным диэлектрическим эталонам (подложкам) и той же самой поправочной функцией P можно воспользоваться и для двухслойной структуры. Дисперсионное уравнение с учетом поправочной функции P для двухслойной структуры имеет вид:

$$\beta_1 \left(1 - \frac{\beta_1}{\beta_0} \tan \beta_1 h_1 \tan \beta_0 L + P \right) \left(\tan \beta_2 h_2 + \frac{\beta_2}{\beta_0} \tan \beta_0 L \right) + \beta_2 \left(1 - \frac{\beta_2}{\beta_0} \tan \beta_2 h_2 \tan \beta_0 L + P \right) \left(\tan \beta_1 h_1 + \frac{\beta_1}{\beta_0} \tan \beta_0 L \right) = 0, \quad (3)$$

где

$$\beta_0 = \sqrt{\left(\frac{2\pi f_0}{c} \right)^2 - \left(\frac{\chi'}{a} \right)^2}, \quad (4)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\epsilon_1 \left(\frac{2\pi f_0}{c} \right)^2 - \left(\frac{\chi'}{a} \right)^2}, \quad (5)$$

$$\beta_2 = \sqrt{\epsilon_2 \left(\frac{2\pi f_0}{c}\right)^2 - \left(\frac{\chi'}{a}\right)^2}, \quad (6)$$

где f_0 – резонансная частота, c – скорость света.

Численное решение уравнения (3) вместе с уравнениями (4), (5) и (6), позволяет нам найти одну переменную (например, f_0 или ϵ_2), когда остальные известны.

Решение для резонансной частоты f_0 , если оно существует, должно быть найдено в диапазоне до резонансной частоты f_e пустого цилиндрического резонатора TE_{011} длиной $2L + h_1$:

$$f_e = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\pi}{2L + h_1}\right)^2 + \left(\frac{\chi'}{a}\right)^2}. \quad (7)$$

Диэлектрическую проницаемость пленки можно найти, решив уравнение (2) относительно ϵ_2 .

4. Результаты расчётов

Для расчета резонансных характеристик использовалось уравнение (3) при подстановке в него функции коррекции $P(\epsilon, h)$ (см. уравнение (2)).

Рисунок 2 иллюстрирует изменение значений резонансной частоты в зависимости от диэлектрической проницаемости пленки ϵ_2 для различной толщины пленки h_2 . Видно, что величиной, определяющей резонансную частоту конструкции, является произведение $\epsilon_2 h_2$.

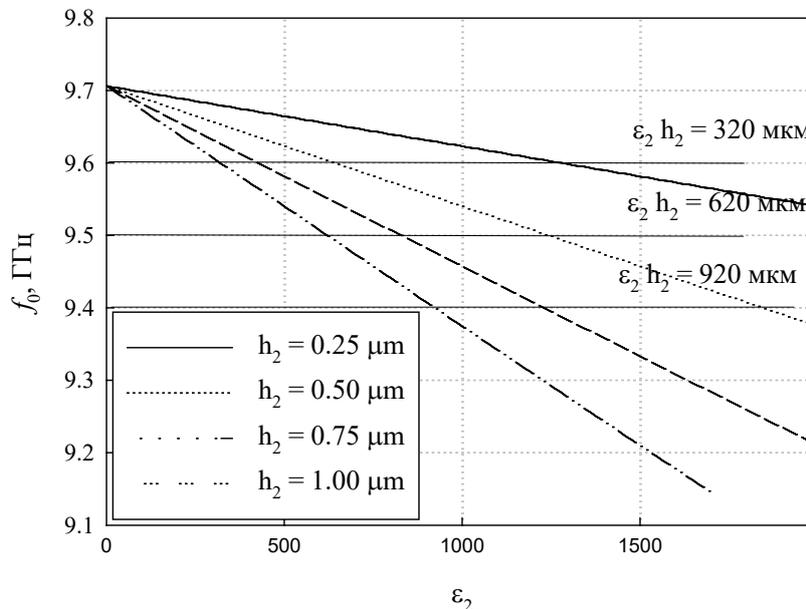


Рисунок 2. Резонансная частота в зависимости от диэлектрической проницаемости пленки ϵ_2 при различных значениях толщины пленки h_2 .

На рисунке 3 показано влияние погрешности измерения различных параметров на общую погрешность. Видно, что погрешность резонансной частоты является наиболее критичной. Однако влияние этого фактора уменьшается высокой добротностью

резонанса и применением современных измерительных установок, обеспечивающих погрешность резонансной частоты не более 0.01% (или не более $\Delta f_0 = 1$ МГц при $f_0 = 10$ ГГц). Если остальные параметры измерены с погрешностями не более 0.1%, то общая погрешность не превысит 5%.

Погрешность измерения $\Delta \epsilon_2$ можно оценить в зависимости от $\epsilon_2 h_2$. На Рисунке 4 показана относительная погрешность измерения $\Delta \epsilon_2 / \epsilon_2$ для разных значений прочих погрешностей $\Delta \epsilon_1 / \epsilon_1$, $\Delta h_1 / h_1$ и $\Delta h_2 / h_2$, которые приняты равными, и для $\Delta f_0 / f_0 = 0.01\%$.

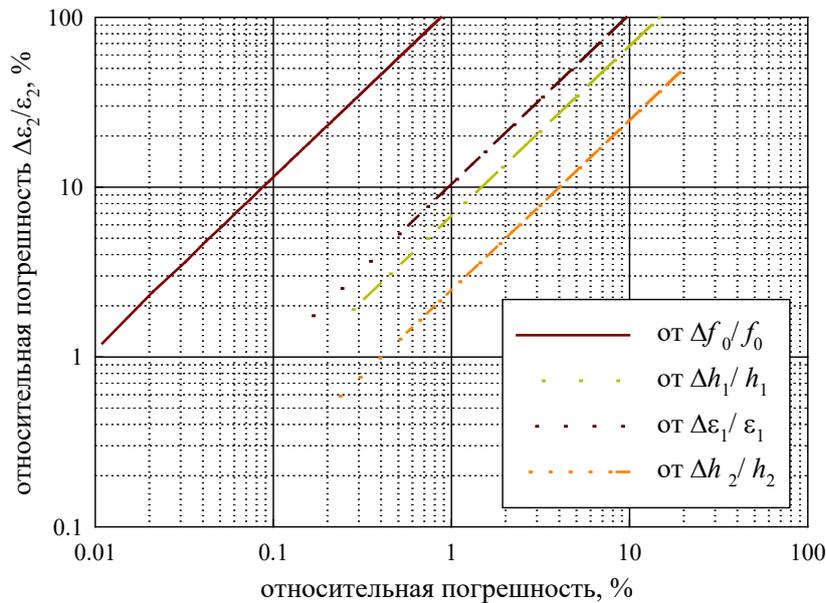


Рисунок 3. Влияние погрешностей измерения отдельных параметров на общую погрешность.

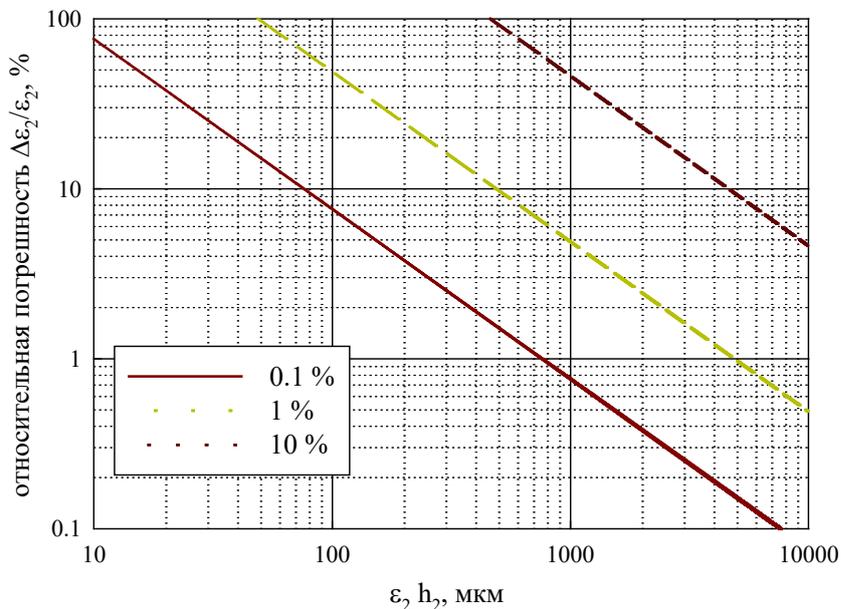


Рисунок 4. Погрешность измерения в зависимости от произведения $\epsilon_2 h_2$ для $\Delta f_0 / f_0 = 0.01\%$ при различных погрешностях остальных параметров.

3. Заключение

Предложенный метод позволяет измерять параметры двухслойных диэлектрических структур с использованием оборудования, изначально

предназначенного для измерения СВЧ-параметров однородных диэлектрических пластин миллиметровых толщин. В методе используется функция коррекции зазора P , полученная путем калибровки, проведённой для однослойного диэлектрика.

Общей проблемой при измерении параметров тонких пленок является сложность точного измерения их толщины. Текущий метод показывает, что ключевые параметры резонанса зависят от произведения $\varepsilon_2 h_2$. Это означает, что результаты измерений ε_2 и $\text{tg}\delta$ действительны для диапазона значений $\varepsilon_2 h_2$, а не для конкретных значений h_2 , что помогает уменьшить влияние погрешности измерения толщины пленки и связано с тем, что ε_2 и $\text{tg}\delta$ прямо пропорциональны h_2 .

Анализ погрешности измерения показывает, что метод обеспечивает погрешность измерения диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon_2/\varepsilon_2 < 10\%$ для тонких диэлектрических пленок с $\varepsilon_2 h_2 > 100$ мкм, учитывая, что ошибки для ε_1 , h_1 и h_2 не превышают 0.1%, а для $\varepsilon_2 h_2 > 500$ мкм – 1%. Эти ограничения в целом соответствуют сегнетоэлектрическим пленкам и позволяют измерять их СВЧ характеристики.

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

Список литературы

1. Deleniv A. Characterization techniques for thin and thick ferroelectric films //Journal of the European Ceramic Society. – 2007. – Т. 27. – №. 8-9. – С. 2759-2764.
2. Kotelnikov I. V. et al. Electrodeless measurement technique of complex dielectric permittivity of high-K dielectric films in the millimeter wavelength range //Progress In Electromagnetics Research M. – 2016. – Т. 52. – С. 161-167.
3. Kang C. Y. et al. The investigation of dielectric characteristics of (Ba, Sr) TiO₃ thin films in millimeter wavelength range //Integrated Ferroelectrics. – 2006. – Т. 86. – №. 1. – С. 131-140.
4. Queffelec P. et al. Intercomparison of permittivity measurement techniques for ferroelectric thin layers //Journal of Applied Physics. – 2014. – Т. 115. – №. 2.
5. Krupka J., Huang W. T., Tung M. J. Complex permittivity measurements of thin ferroelectric films employing split post dielectric resonator //Ferroelectrics. – 2006. – Т. 335. – №. 1. – С. 89-94.
6. Acosta M. et al. BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives //Applied Physics Reviews. – 2017. – Т. 4. – №. 4. – С. 041305.
7. Kent G. Nondestructive permittivity measurement of substrates //IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1996. – Т. 45. – №. 1. – С. 102-106.
8. 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.