

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С ПЕТЛЕВОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ

Е.О. Ключин, Р.В. Фархутдинов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Статья посвящена оптимизации конструкции измерительной ячейки на основе цилиндрического объемного резонатора с двумя петлевыми элементами связи для определения комплексной диэлектрической проницаемости цилиндрических материалов в диапазоне частот 3–7 ГГц. Методом численного моделирования в среде CST Studio Suite 2025 исследовано влияние размеров петель связи и их глубины ввода на параметры передачи (S_{21}) и добротности резонатора. Установлено, что использование петель связи минимального диаметра и с минимальным выступом от стенки резонатора обеспечивает наилучшее совпадение резонансной частоты с расчетной, и максимальную добротность. Проведено компьютерное моделирование влияния диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь и диаметра образца на показатели S_{21} и вид преобразовательной функции. Выявлено, что для сохранения однозначности измерений диаметр исследуемого материала не должен превышать 25% от общего диаметра резонатора.

Ключевые слова: цилиндрический объемный резонатор, петля связи, комплексная диэлектрическая проницаемость, добротность, S-параметры, CST Microwave Studio.

Введение

Измерение комплексной диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ-диапазоне является актуальной задачей для радиоэлектроники, антенной техники и создания радиопрозрачных покрытий. Одним из наиболее точных методов является резонаторный, основанный на регистрации изменения резонансной частоты и добротности при внесении диэлектрического образца в замкнутую металлическую полость [1]. Для цилиндрических образцов (стержней и трубок) естественной измерительной ячейкой служит цилиндрический объемный резонатор (ЦОР), поскольку его геометрия согласуется с формой объекта и обеспечивает высокую повторяемость результатов [2, 3].

Цель настоящей работы – разработка и верификация методики измерения ϵ' и $\tan \delta$ цилиндрических диэлектрических материалов с помощью ЦОР, возбуждаемого петлями связи, а также определение допустимого диаметра образца, не нарушающего структуру поля рабочей моды.

Материалы и методы

В качестве измерительной ячейки использовался цилиндрический объемный резонатор, представляющий собой отрезок круглого волновода, замкнутый с обеих сторон проводящими стенками. Материалом резонатора и проводников коаксиального тракта

служит медь [4]. В качестве диэлектрического заполнения коаксиального тракта использован фторопласт (PTFE (lossy) $\epsilon' = 2.1$, $\operatorname{tg} \delta = 0.0002$). Возбуждение резонатора происходит с помощью двух петель связи, вертикально расположенных на противоположных стенках, что позволяет реализовать проходную схему измерения коэффициента передачи S21.

Расчет геометрических размеров цилиндрических резонаторов выполнялся по формуле для основного типа колебаний TM_{010} [5]:

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \frac{P_{01}}{R}, \quad (1)$$

где P_{01} – первый корень функции Бесселя, R – радиус резонатора, c – скорость света. Для частот 3, 4, 5, 6, и 7 ГГц получены радиусы: 38.27; 28.7; 22.9; 19.3 и 16.4 мм соответственно.

В качестве коаксиального тракта был выбран коаксиальный кабель RG-402 (CF-141-50) с размерами: диаметр центрального проводника 0.9мм, диаметр диэлектрика 3.01мм и внешний диаметр оплетки 3.4 мм.

Моделирование выполнялось в программном пакете CST Studio Suite 2025 во временной области. Модель резонатора без материала (а) и с материалом (б) можно увидеть на рисунке 1.

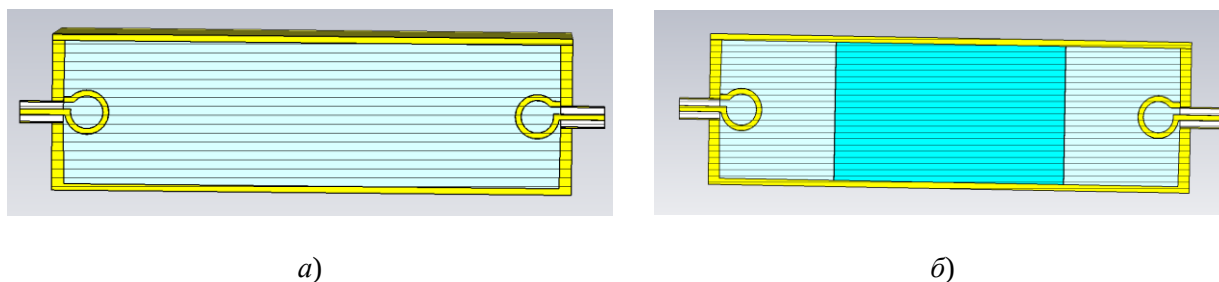


Рис.1. Модель резонатора для резонансной центральной частоты $f_0=3$ ГГц в разрезе:
а) без образца, б) с образцом диаметра заполнения = 50%

Исследовались цилиндрические образцы с тремя значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon' = 2$; 5; 10) и тремя значениями тангенса угла потерь ($\operatorname{tg} \delta = 0.001$; 0.01; 0.1). Диаметр образца варьировался так, чтобы объем заполнения составил 10%, 25% и 50% от общего диаметра резонатора. Далее рассчитывались S-параметры на каждой резонансной частоте для всех видов образцов.

Результаты

На рисунке 2 приведен график зависимости коэффициента передачи S21 от частоты с разными значениями глубины ввода петли связи. Заметно малое влияние данного параметра на характеристику и в дальнейшем было принято решение использовать конфигурацию с минимальным значением данного параметра (0.01мм) для увеличения вариативности в выборе диаметров заполнения материалом. Минимальным радиусом петель было принято взять значение в 3.4 мм что было равно общему диаметру коаксиального кабеля.

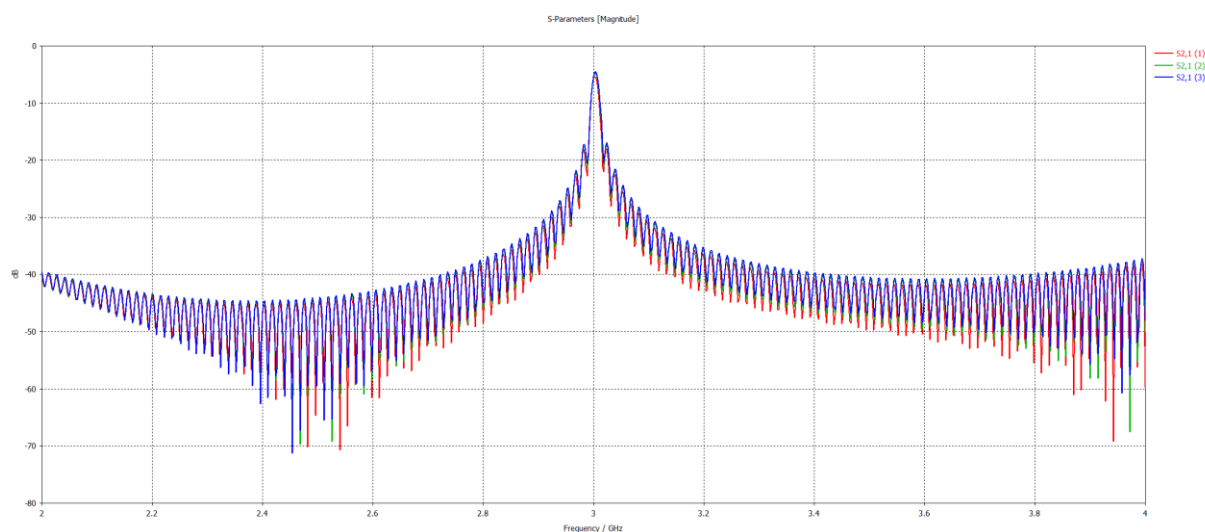


Рис.2. График зависимости коэффициента передачи S21 от частоты с разными значениями глубины ввода петли связи радиусом 3.4 мм

Добротность каждого из пиков составила $Q \approx 230$. Далее с увеличением радиуса петли было выявлено падение добротности до 167 и сдвиг резонансной частоты, что можно увидеть на рисунке 3.

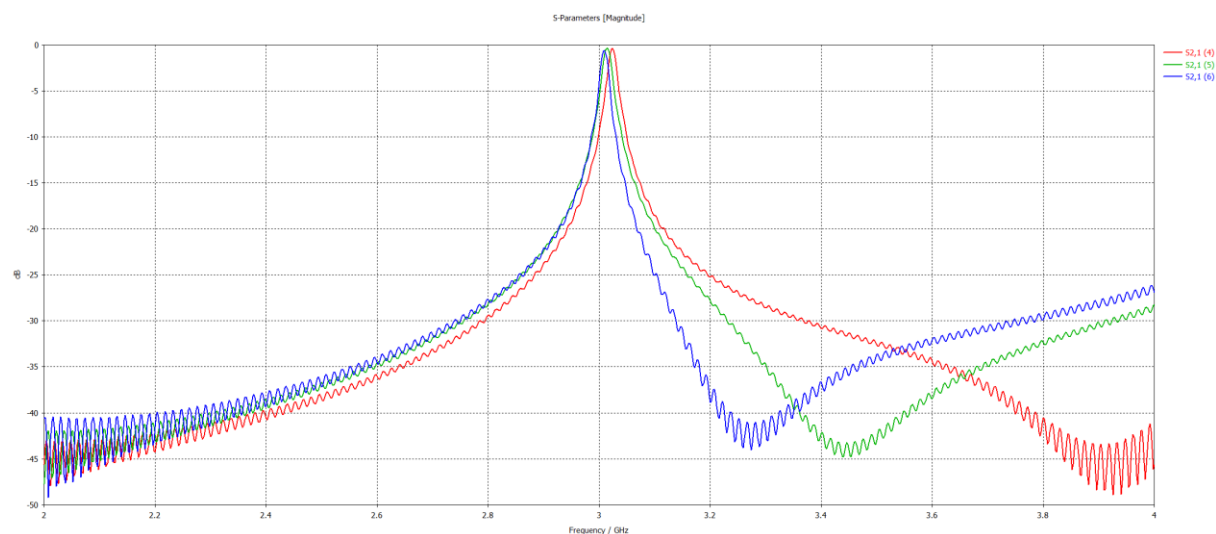


Рис.3. График зависимости коэффициента передачи S21 от частоты для петли связи радиусом 7 мм

Далее аналогичное моделирование было проведено для резонатора с частотой резонанса равной 4 ГГц. В связи с изменением диаметра резонатора также были изменены радиусы петель в процентном соотношении к резонатору с резонансной частотой для 4 ГГц с 3.4 мм и 7 мм, на 2.5 и 5.25 мм, соответственно.

На рисунке 4 показан график зависимости коэффициента передачи S21 от частоты с разными значениями глубины ввода петли связи. Так же как и на рисунке 1 мы видим попадание в резонансную частоту. Значение добротности, полученное из данного графика, равняется 308.

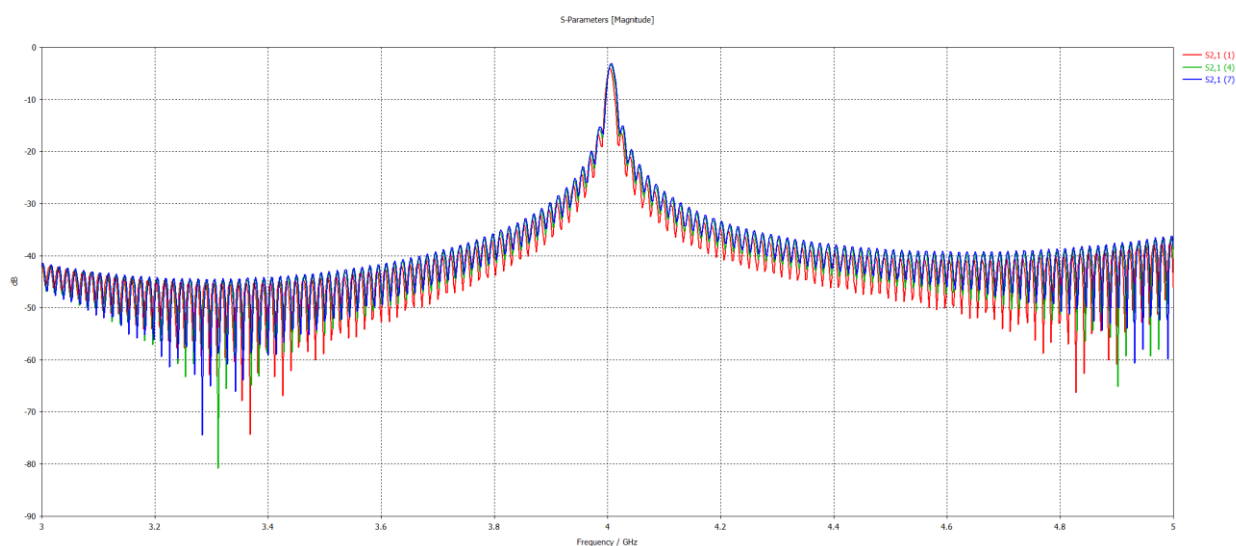


Рис.4. График зависимости коэффициента передачи S21 от частоты для петли связи радиусом 2.5 мм

Повторение тенденций смещения резонансной частоты и падения добротности можно наблюдать на графике зависимости S21 от частоты для петли связи радиусом 5.25 мм, на рисунке 5.

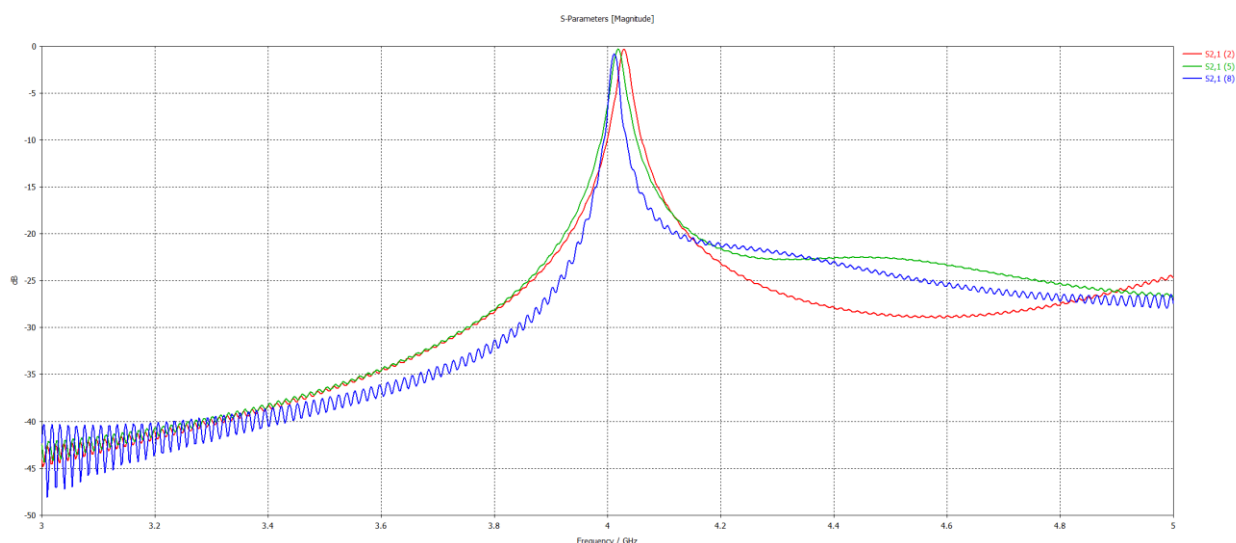


Рис.5. График зависимости коэффициента передачи S21 от частоты для петли связи радиусом 5.25 мм

По результатам моделирования было принято решение взять как основную конфигурацию резонатора модели с малым радиусом петли в связи с их высокой добротностью и с малым влиянием на значение резонансной частоты.

Следующим этапом оптимизации стал анализ и выбор оптимального диаметра для измеряемого материала. На рисунке 6 приведены графики зависимостей коэффициента передачи S21 от частоты, при материале с диаметром в 10% от диаметра резонатора. Четко выделяются 3 группы резонансных пиков, соответствующих диэлектрической проницаемости $\epsilon' = 2; 5; 10$. С ростом ϵ' резонансная частота смещается вниз от (2.95 ГГц до 2.5 ГГц). Увеличение $\tan \delta$ от 0.001 до 0.1 приводит к падению амплитуды пика вплоть до 32 дБ при сохранении его формы, что позволяет измерить добротность.

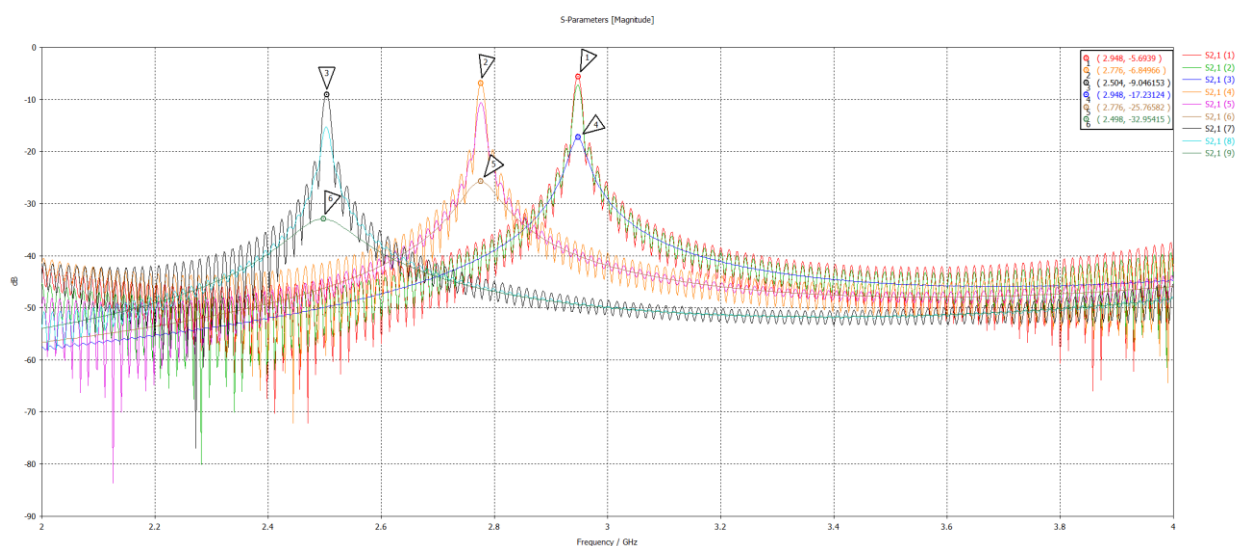


Рис.6. График зависимости коэффициента передачи S21 от частоты, при материале с диаметром в 10% при $f_0 = 3$ ГГц

На рисунке 7 показан график зависимости коэффициента передачи S21 от частоты при увеличении диаметра образца до 25%, вследствие которого смещение частоты становится более резким, а при диэлектрической проницаемости $\epsilon' = 10$ на частотной характеристике появляется дополнительный пик, соответствующий высшей моде.

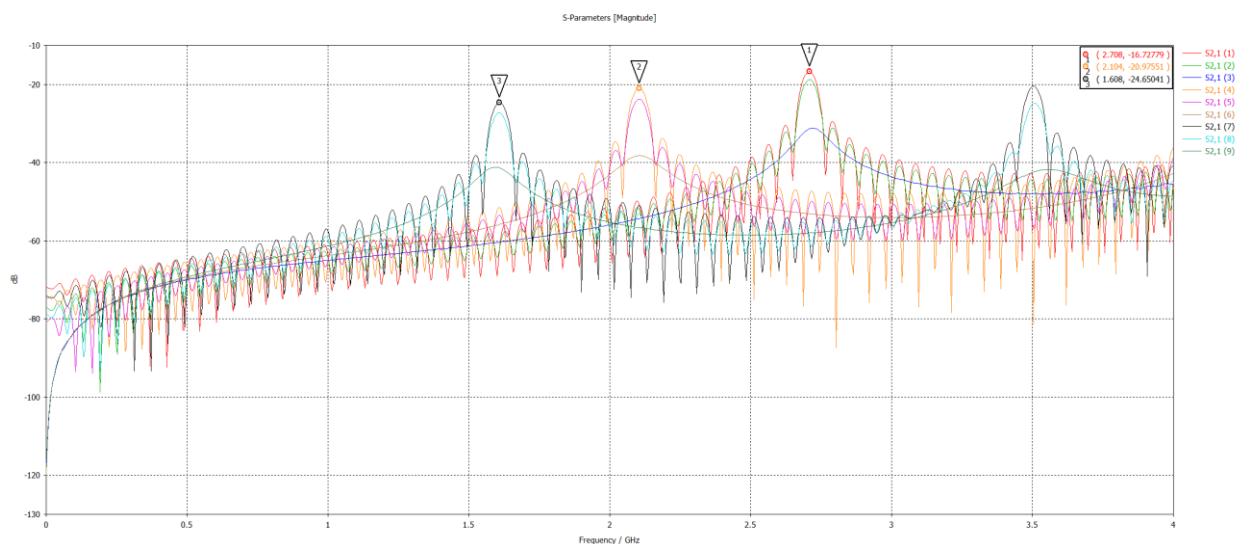


Рис.7. График зависимости коэффициента передачи S21 от частоты, при материале с диаметром в 25% при $f_0 = 3$ ГГц

На рисунке 8 представлен график S21 с 50% заполнением, в котором наблюдаем большое количество побочных резонансов, что свидетельствует о значительном искажении поля рабочей моды TM_{010} .

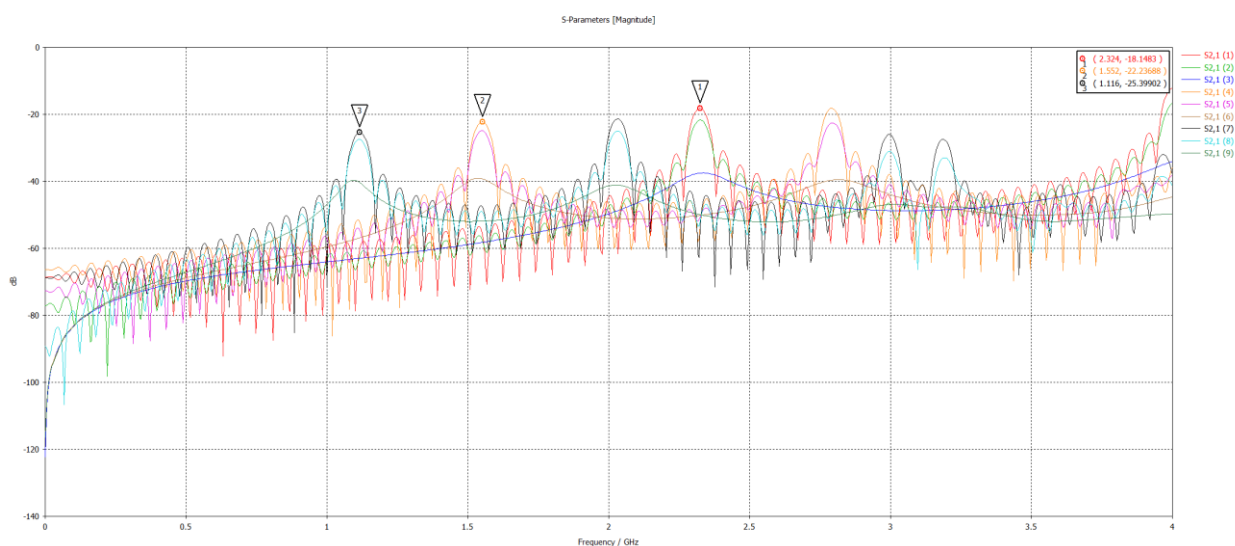


Рис.8. График зависимости коэффициента передачи S21 от частоты, при материале с диаметром в 50% при $f_0 = 3$ ГГц

По результатам моделирования построены графики зависимостей резонансной частоты от ϵ' для трех степеней заполнения (10%, 25%, 50%) (Рис 9). Для 10% заполнения зависимость близка к линейной. При 25% и 50% наблюдается нелинейность преобразовательной функции, но при этом увеличивается диапазон изменения резонансной частоты, что говорит об увеличении чувствительности.

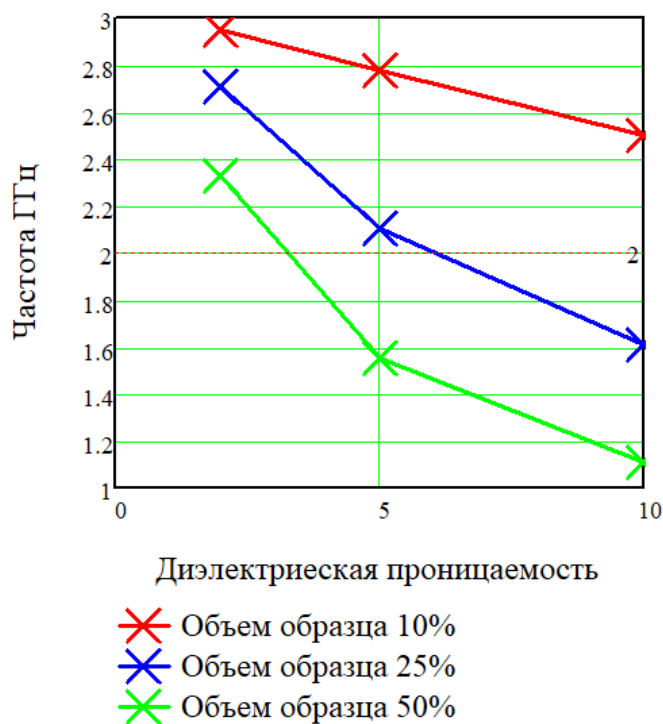


Рис.9. График зависимости резонансной частоты от значений комплексной диэлектрической проницаемости для разных процентов заполняемости материалом резонатора с частотой резонанса 3 ГГц

Аналогичные графики зависимостей получены для резонаторов с частотами 4, 5, 6, и 7 ГГц. Общей закономерностью является увеличение чувствительности резонатора с ростом рабочей частоты: для фиксированного диаметра образца сдвиг на частоте 7 ГГц, больше, чем для 3 ГГц.

Проведенные исследования демонстрируют, что увеличение комплексной диэлектрической проницаемости приводит к уменьшению резонанса, а рост тангенса угла потерь к снижению амплитуды резонансных пиков. Оптимальный диаметр заполнения варьируется от 10% и примерно до 20% для резонаторов с высокими значениями f_0 , так как при значениях 25% начиная с резонатора с $f_0 = 5$ ГГц вблизи резонансной частоты начинают появляться высшие моды и появляется нелинейность преобразовательной функции, затрудняющие измерение. Повышение рабочей частоты увеличивает чувствительность, но требует диаметр образца близкий к оптимальному.

S-параметры в табличном виде или файлы проектов CST предоставляются по запросу.

Список литературы

1. Крылов В.П. Определение диэлектрической проницаемости материала в объёмном резонаторе с учётом шероховатости поверхности // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. – Т. 87, № 5. – С. 37–43.
2. Семенов Н.А., Заргано Г.Ф., Лерер А.М. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие. – М.: Радиотехника, 2007. – 352 с.
3. Подлиннов С.А., Фатеев А.В., Гошин Г.Г. Измерение ϵ и $\tan\delta$ диэлектрических материалов резонаторным методом: руководство к лабораторной работе. – Томск: ТУСУР, 2023. – 14 с.
4. Volkov V.V., Suslin M.A. Microwave thickness and permittivity gauge for coatings with cylindrical cavity resonator of asymmetric perturbation // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. – 2017. – Vol. 83, No. 3. – P. 41–45.
5. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012. XVII, 732 p.

OPTIMIZATION OF THE CONFIGURATION OF A CYLINDRICAL RESONATOR WITH LOOP COUPLER FOR MEASURING THE COMPLEX PERMITTIVITY OF MATERIALS AT DIFFERENT FREQUENCIES

E.O. Klyushin, R.V. Farkhutdinov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Absrtact. This article focuses on optimizing the design of a measuring cell based on a cylindrical cavity resonator with two coupling loops for determining the complex permittivity of cylindrical materials in the 3–7 GHz frequency range. Using numerical simulation in CST Studio Suite 2025, we studied the influence of the coupling loop size and insertion depth on the transmission parameters (S21) and the resonator quality factor. It was found that using coupling loops with a minimum diameter and minimal protrusion from the resonator wall ensures the best match between the resonant frequency and the calculated one, and the highest quality factor. Computer modeling was performed to examine the influence of permittivity, loss tangent, and sample diameter on the S21 parameters and the type of the transfer function. It was found that to maintain measurement accuracy, the diameter of the test material should not exceed 25% of the total resonator diameter.

Keywords: cylindrical cavity resonator, coupling loop, complex permittivity, quality factor, S-parameters, CST Microwave Studio

Статья представлена в редакцию 03 июня 2026г.