

ВЛИЯНИЕ БЛИЗОСТИ КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛЯ К ИССЛЕДУЕМОМУ ОБРАЗЦУ НА ИЗМЕРЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ В КВАЗИ-ТЕМ ПРИБЛИЖЕНИИ В ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

Иванов П.А. *¹, Петров Д.А.¹, Розанов К.Н.¹

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия*

Статья поступила в редакцию 13.09.2023

Одобрена после рецензирования 19.09.2023

Принята к публикации 02.10.2023

Аннотация

Численно и экспериментально исследовано влияние близости расположения образца к короткозамыкателю на результат измерения магнитной и диэлектрической проницаемостей в однопортовой полосковой измерительной ячейке в сравнении с измерениями в двухпортовой полосковой ячейке. Методом Монте-Карло и численным расчетом методом конечных элементов произведено сравнение погрешности разных методов измерения. Показано, что метод измерения на основе закороченной однопортовой полосковой ячейки способен обеспечить широкополосные измерения с высокой точностью только магнитной проницаемости. Измерение же диэлектрической проницаемости с высокой точностью возможно только в узком диапазоне частот. Двухпортовая линия, с другой стороны, позволяет проводить широкополосные измерения с высокой точностью обоих материальных параметров.

Ключевые слова: полосковая линия передачи, СВЧ измерения, измерение магнитной проницаемости, измерение диэлектрической проницаемости, квази-ТЕМ приближение

EDN AQTKT

doi:[10.24412/2949-0553-2023-46-20-29](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2023-46-20-29)

Введение

В настоящее время наиболее популярными методами широкополосных измерений диэлектрических и магнитных свойств материалов являются коаксиальный метод и квазиоптический метод [1]. Однако эти методы не являются универсальными. Существенным ограничением коаксиального метода является необходимость изготовления образца специальной формы и высокая чувствительность точности измерения диэлектрической проницаемости к любым воздушным зазорам. Использование квазиоптического метода требует больших по размеру образцов для низкочастотных измерений.

Эти ограничения можно обойти использованием полосковых линий передачи, где небольшой образец частично заполняет поперечное сечение полосковой измерительной ячейки. Стандартным подходом полоскового метода является использование одномодового квази-ТЕМ приближения, при котором отличиям распространяющейся внутри измерительной ячейки электромагнитной волны от ТЕМ-волны пренебрегают [2–10]. Существуют также методы, которые учитывают гибридную природу распространяющихся мод в полосковой линии и выходят за рамки квази-ТЕМ приближения [11–13]. Однако из-за их большой сложности они не получили широкого распространения.

При использовании стандартного квази-ТЕМ приближения возникает сложность в определении границ применимости этого приближения. Для проведения достоверных измерений необходимо знать, как влияет степень отклонения распространяющейся в измерительной ячейке электромагнитной волны от ТЕМ-моды и при каких условиях это отклонение становится существенным и доминирующим источником погрешности измерения. Дополнительная сложность возникает по причине того, что

* Автор, ответственный за переписку: Павел Алексеевич Иванов, p.ivanov.a@mail.ru

граница применимости квази-ТЕМ приближения зависит не только от конфигурации, размера и геометрии самой измерительной ячейки, но и от размера и материала образца [6]. Поэтому оценка границы применимости квази-ТЕМ приближения только частотой возникновения высших мод в пустой измерительной ячейке является недостаточной.

Распространены как однопортовые [2–7], так и двухпортовые [8–10] методы измерения на основе полосковых линий передачи. Методы на основе однопортовой короткозамкнутой полосковой ячейки чаще всего применяют для измерения магнитной проницаемости тонких пленочных материалов. В общем случае, получение второго материального параметра (диэлектрической проницаемости) осуществляется применением ряда подходов [2, 14], которые можно разделить на две категории. Первая категория включает подходы, основанные на априорной информации, в которых диэлектрическая проницаемость определяется приближенно на основе известных данных о диэлектрических свойствах всех компонентов измерительной системы, которые не учитываются калибровочными процедурами. Такие подходы имеют низкую точность и предполагают слабую зависимость результата измерения магнитной проницаемости от диэлектрической проницаемости образца. Вторая категория включает подходы, основанные на двух независимых измерениях коэффициента отражения, получаемых путем внесения изменений в измерительную конфигурацию, таких как измерение исследуемого образца в двух разных положениях, измерение образцов разной длины, введение дополнительного образца с известными свойствами или приложение внешнего постоянного магнитного поля для насыщения образца.

Если исследуемые образцы представляют собой композитные материалы, включая метаматериалы, чья толщина существенно больше, чем у обычных пленок, и измерение которых возможно только при частичном заполнении измерительной ячейки, то определение корректного способа измерения таких образцов в одномодовом приближении остается актуальным.

В работе проведено исследование влияния близости расположения образца к короткозамкателью на измерение магнитной и диэлектрической проницаемостей численными и экспериментальными методами. Показано, что метод измерения на основе закороченной однопортовой полосковой ячейки может обеспечить широкополосные измерения с высокой точностью только магнитной проницаемости. Измерение же диэлектрической проницаемости с высокой точностью возможно только в узком диапазоне частот. Двухпортовая линия, с другой стороны, позволяет проводить широкополосные измерения с высокой точностью обоих материальных параметров.

Методы исследования

В настоящей работе были рассмотрены два типа методов измерения на основе однопортовой закороченной полосковой измерительной ячейки и на основе двухпортовой полосковой ячейки. Их внешний вид представлен на рисунке 1. Обе ячейки имеют одинаковые размеры поперечного сечения, соответствующие характеристическому импедансу 50 Ом. Ячейки имеют следующие размеры: ширина полоскового проводника (полоска) составляет 8,7 мм, толщина полоска – 1 мм, расстояние от полоска до экрана – 2 мм. Связь ячеек с коаксиальным портом векторного анализатора цепей осуществлена через коаксиально-полосковый переход.

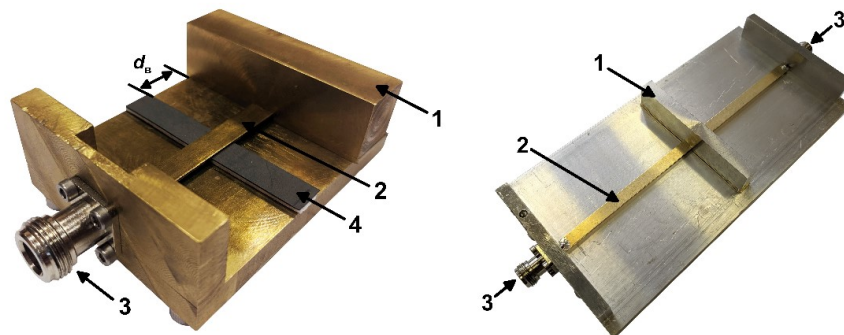


Рисунок 1 – Вид однопортовой (слева) и двухпортовой (справа) полосковых ячеек. 1 – короткозамыкатель, 2 – полосок, 3 – порт, 4 – образец. В двухпортовой ячейке после калибровки короткозамыкатель снимается и вместо него устанавливается образец

Учет влияния неоднородностей измерительной ячейки, сосредоточенных в области коаксиально-полоскового перехода, был осуществлен применением калибровки по смещаемому эталону - короткозамыкателю [15], в качестве которого используется подвижная металлическая стенка. При этом в двухпортовой ячейке короткозамыкатель после калибровки снимается, а вместо него располагается образец.

В эксперименте измерения коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны от исследуемых образцов внутри измерительных полосковых ячеек проведены при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ).

Результаты эксперимента сравниваются с численным моделированием методом конечных элементов. При моделировании измерительные полосковые ячейки были представлены в виде участков экранированных полосковых линий передачи с поперечными размерами, аналогичными ячейкам, используемым в эксперименте. Питание линии осуществлялось плоскими портами на границах участка линии, что позволило устранить влияние коаксиально-полоскового перехода. Такая модель позволяет получить высокую точность при использовании меньших вычислительных ресурсов. Сравнение результатов расчета в рассматриваемом частотном диапазоне полной модели открытой полосковой ячейки, питание которой осуществляется коаксиальными портами через коаксиально-полосковый переход, и более простой модели участка экранированной полосковой линии передачи с плоскими портами показало их пренебрежимо малое различие.

Для получения из результатов измерений магнитной $\mu = \mu' - i\mu''$ и диэлектрической $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ проницаемостей необходимо знать два независимых S-параметра образца. В случае двухпортовой ячейки независимыми S-параметрами являются коэффициенты отражения и прохождения, и расчет μ и ε выполняется с использованием метода Николсона-Росса-Уира [16]. В однопортовой ячейке в качестве двух независимых параметров используются коэффициенты отражения при двух разных смещениях d_b образца относительно короткозамыкателя. Для повышения точности измерений образец в измерительных ячейках располагался вплотную к центральному полюсу при помощи подкладки из пенопласта. Повышение точности достигается за счет того, что образец располагается в области наибольшей концентрации электромагнитного поля.

Входной импеданс $Z_{вх}$ участка линии, заполненного образцом, расположенным со смещением от короткозамыкателя на расстояние d_b , будет иметь вид:

$$Z_{вх} = \sqrt{\frac{\mu_{эфф}}{\varepsilon_{эфф}} \frac{th(2\pi id_b/\lambda) + \sqrt{\mu_{эфф}/\varepsilon_{эфф}} th(2\pi id \sqrt{\varepsilon_{эфф}\mu_{эфф}}/\lambda)}{\varepsilon_{эфф} \sqrt{\mu_{эфф}/\varepsilon_{эфф}} + th(2\pi id_b/\lambda) th(2\pi id \sqrt{\varepsilon_{эфф}\mu_{эфф}}/\lambda)}}, \quad (1)$$

где d – длина образца вдоль волнового вектора электромагнитной волны, d_b – расстояние от образца до короткозамыкателя, λ – длина электромагнитной волны. Эффективные магнитная $\mu_{эфф}$ и диэлектрическая $\varepsilon_{эфф}$ проницаемости характеризуют неоднородно заполненный участок линии, состоящий из материала образца и незаполненного воздушного пространства. Связь между коэффициентом отражения и входным импедансом участка измерительной ячейки с образцом $Z_{вх}$, выражается в следующем виде:

$$R = \frac{Z_{вх} - 1}{Z_{вх} + 1}. \quad (2)$$

Для учета неполного заполнения поперечного сечения линии образцом и установления связи между фактическими материальными параметрами образца (μ , ε) и эффективными параметрами участка линии ($\mu_{эфф}$, $\varepsilon_{эфф}$), был использован вариационный метод [17, 18]. Вариационный метод входит в группу квазистатических методов и позволяет выразить эффективную магнитную $\mu_{эфф}$ и диэлектрическую $\varepsilon_{эфф}$ проницаемости следующим образом:

$$\mu_{эфф} = \frac{L}{L_0}, \quad \varepsilon_{эфф} = \frac{C}{C_0}, \quad (3)$$

где L и C – удельная индуктивность и емкость заполненной линии, а L_0 и C_0 соответствуют пустой линии без образца. Значения L , L_0 и C , C_0 определялись при помощи выражения функции Грина для конкретной конфигурации линии. Значение фактической магнитной и диэлектрической проницаемостей вычисляется при помощи процедуры оптимизации.

Двумя основными источниками погрешности измерения материальных параметров полосковым методом при частичном заполнении являются погрешность измерения S-параметров образца и влияние продольных компонент электромагнитного поля в области расположения образца, наличие которых не

учитывается при расчете магнитной и диэлектрической проницаемостей. Для оценки влияния погрешности измерения S-параметров был применен метод Монте-Карло. В качестве случайной величины была взята погрешность определения модуля S-параметров, максимум которого был ограничен значением - 60 дБ, что соответствует точности измерения ВАЦ. Максимальная погрешность измерения фазы принята равной 0,1 град. За результирующую погрешность материальных параметров принята максимальная погрешность из сформированного набора данных из 1000 случайных измерений, полученного использованием генератора псевдослучайных чисел.

Для оценки величины продольных компонент в области расположения были введены два численных интегральных параметра, характеризующих эффективную долю продольной компоненты электрического поля (A_E) и магнитного поля (A_H):

$$A_E = \frac{\int_{V_s} |E_l| dV}{\int_{V_s} \sqrt{|E_t|^2 + |E_l|^2} dV} \cdot 100\%, \quad A_H = \frac{\int_{V_s} |H_l| dV}{\int_{V_s} \sqrt{|H_t|^2 + |H_l|^2} dV} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $|E_l|$, $|H_l|$ и $|E_t|$, $|H_t|$ – амплитуды продольной и поперечной составляющих электрического и магнитного полей, а V_s – объем образца.

Результаты и их обсуждение

Для исследования был использован образец композитного материала размером 70x10x0,4 мм. В качестве контрольных данных выступали результаты измерений в коаксиальной ячейке методом Николсона-Росса-Уира, которые считаются достаточно точными. Частотные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемого образца композитного материала, измеренные в коаксиальной ячейке, представлены на рисунке 2.

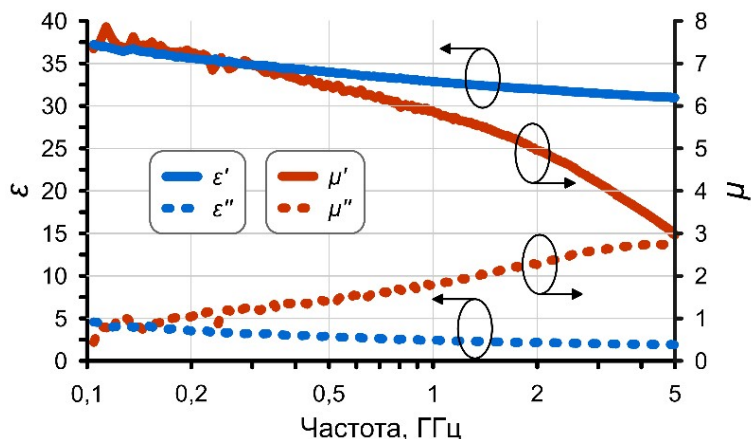


Рисунок 2 – Частотные зависимости комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемого образца композитного материала, измеренные в коаксиальной ячейке. Синие кривые относятся к диэлектрической проницаемости, значения которой отложены на левой вертикальной оси. Красные кривые относятся к магнитной проницаемости, значения которой отложены на правой вертикальной оси

На рисунке 3 представлены экспериментальные результаты измерения магнитной и диэлектрической проницаемости исследуемого образца композитного материала в однопортовой и двухпортовой полосковой ячейках в виде погрешности относительно контрольных данных коаксиального измерения ($|\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}|$, $|\frac{\Delta \mu}{\mu}|$).

Для исключения взаимного влияния погрешностей измерения материальных параметров при использовании однопортовой ячейки была проведена отдельная оценка погрешности для каждого параметра. Для этого из коэффициента отражения образца, находящегося на определенном расстоянии от короткозамыкателя d_b , по формулам (1) и (2) были вычислены диэлектрическая и магнитная проницаемости по отдельности путем подстановки точного значения второго материального параметра, известного из контрольных данных. Такой подход позволяет определить минимальную погрешность измерения каждого материального параметра для каждого положения образца в измерительной ячейке. Полученные погрешности позволяют судить о том, какие два независимых измерения обеспечивают наибольшую точность измерения. Для однопортовой ячейки представлены результаты измерения в трех положения образца: вплотную к КЗ ($d_b = 0$ мм), на расстоянии 5 мм от КЗ ($d_b = 5$ мм) и на расстоянии 10 мм от КЗ ($d_b = 10$ мм).

Результаты численного моделирования методом конечных элементов процесса измерения магнитной и диэлектрической проницаемости исследуемого образца композитного материала в однопортовой

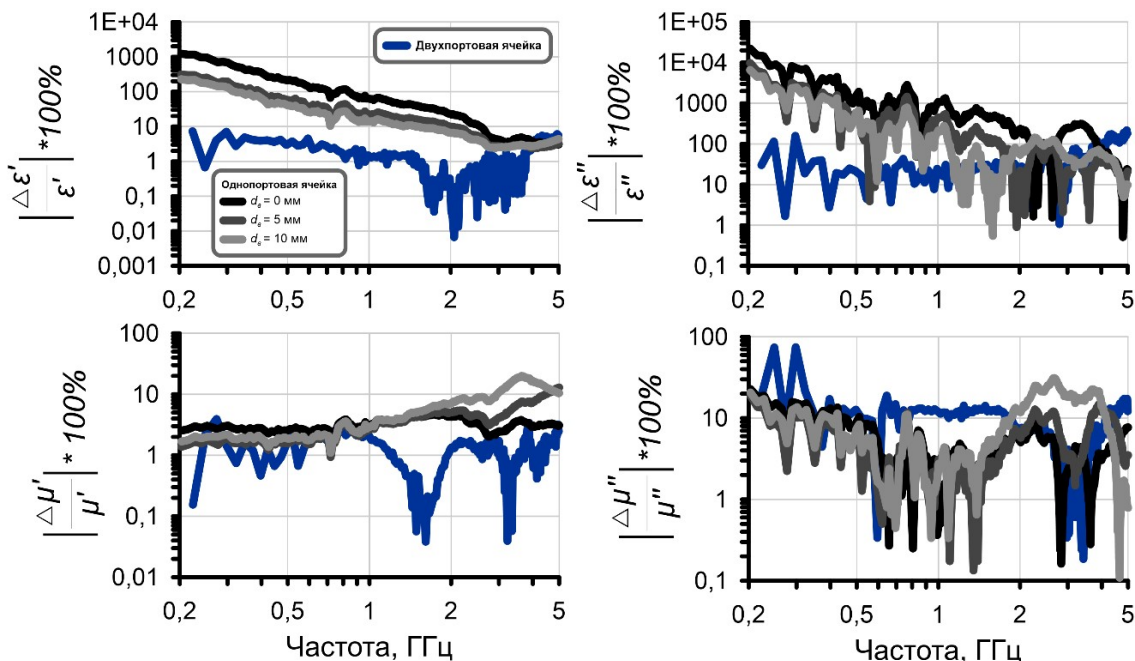


Рисунок 3 – Частотные зависимости погрешности измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемого образца композитного материала в однопортовой и двухпортовой полосковых ячейках, полученные в эксперименте

и двухпортовой полосковой ячейках представлены на рисунке 4. В численных расчетах за фактические значения материальных параметров образца приняты результаты коаксиальных измерений.

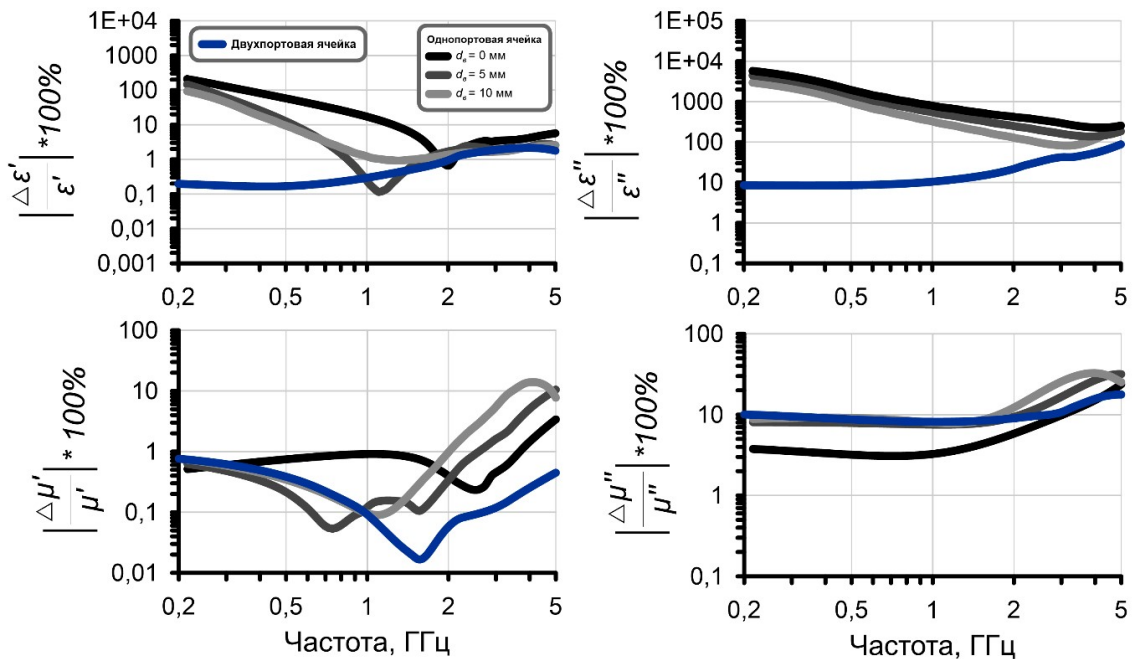


Рисунок 4 – Частотные зависимости погрешности измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей исследуемого образца композитного материала в однопортовой и двухпортовой полосковых ячейках, полученные при помощи численного моделирования методом конечных элементов

Результаты эксперимента и численного моделирования имеют схожие уровни погрешностей измерения, это позволило проводить дальнейший анализ электромагнитных волн, распространяющихся внутри измерительной ячейки, численными методами. Некоторое различие между экспериментом и моделированием во многом связано с погрешностью определения геометрических размеров измерительной ячейки и образца, а также неточностью позиционирования образца внутри ячейки.

Для оценки степени влияния продольных компонент электромагнитной волны на результаты измерений был выполнен расчет параметров A_H и A_E для исследуемого образца композитного материала

(рисунок 5).

Из рисунка 5 видно, что максимальное значение эффективной доли продольных компонент электрического поля наблюдается при расположении образца вплотную к КЗ. При удалении образца от КЗ эффективная доля продольных компонент электрического поля снижается и достигает минимума в предельном случае двухпортовой ячейки, где значение меньше максимума на порядок. Эффективная доля продольных компонент магнитного поля в низкочастотной области во всех случаях имеет одинаково низкое значение. При переходе к высокочастотной области наблюдается небольшое увеличение величины A_H с увеличением смещения образца от КЗ, что выражается в уменьшении верхней частоты измерительного диапазона с низким уровнем продольных компонент магнитного поля. Увеличение эффективной доли продольных компонент в высокочастотной области объясняется повышением вклада высших мод.

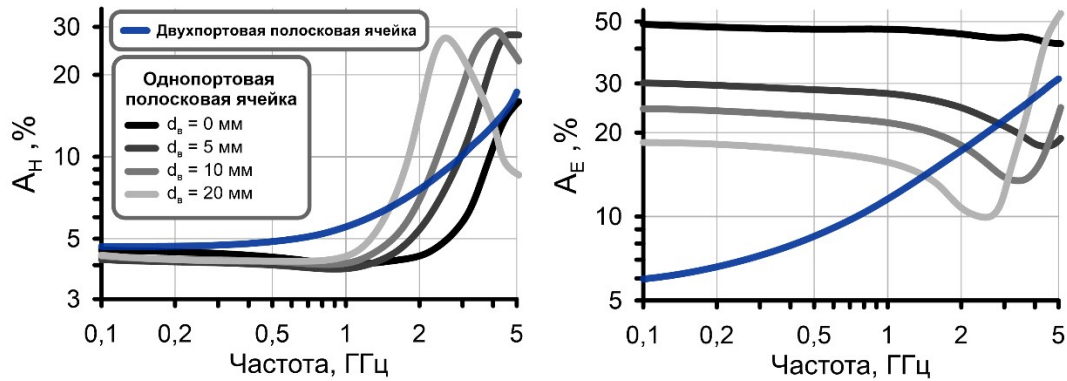


Рисунок 5 – Частотная зависимость параметров A_H и A_E для исследуемого образца композитного материала при расположении в однопортовой ячейке при разном смещении от КЗ и в двухпортовой ячейке

Стоит отметить, что параметры A_E и A_H зависят от материала образца и его размеров [19]. При уменьшении толщины образца или уменьшении его диэлектрической или магнитной проницаемости значения параметров A_E и A_H снижаются.

Для разделения вклада продольных компонент электромагнитных полей и погрешности измерения S-параметров в общую погрешность измерения материальных параметров был проведен анализ с использованием метода Монте-Карло. На рисунке 6 представлены результаты расчета погрешности определения материальных параметров исследуемого образца, полученные методом Монте-Карло.

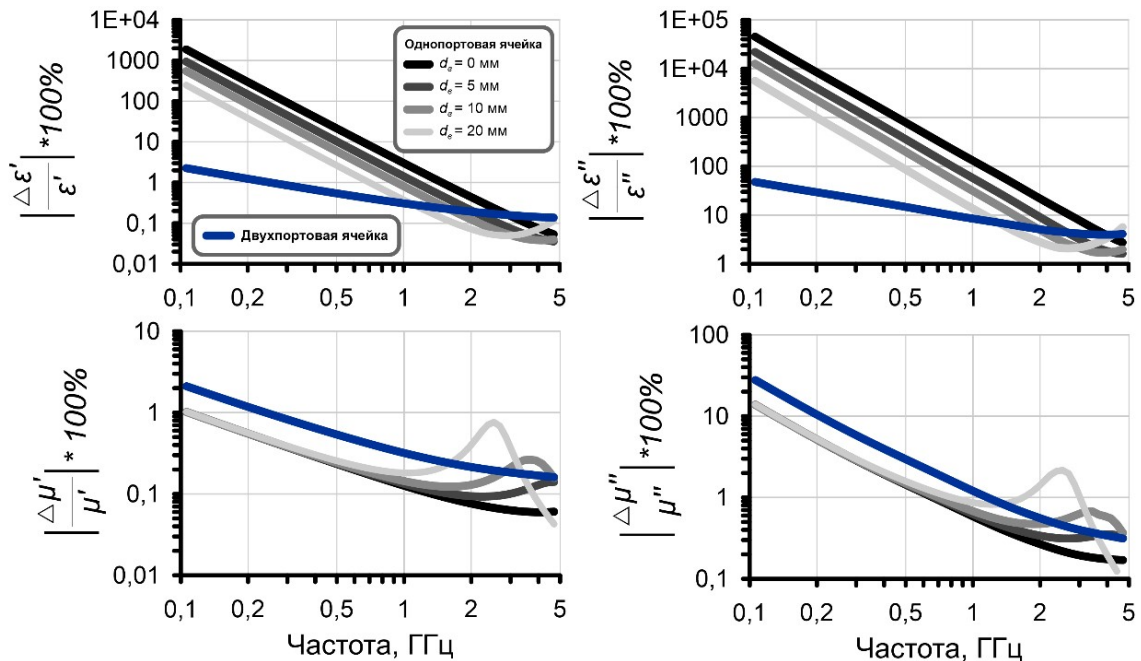


Рисунок 6 – Погрешность измерения комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей тестового композита, рассчитанная методом Монте-Карло

Из рисунка 6 видно, что метод измерения в однопортовой полосковой ячейке имеет очень высокую

погрешность определения диэлектрической проницаемости на низких частотах. Эта погрешность зависит от величины сдвига образца от КЗ. Длина используемой в работе однопортовой ячейки не позволяет проводить измерения с существенно большим сдвигом для достижения большей точности на низких частотах. Существует также ограничение, связанное с необходимостью соблюдения расстояния от коаксиально-полоскового перехода при размещении образца, что нужно для устранения влияния затухающих высших мод от перехода.

Так как вблизи КЗ расположен минимум электрического поля и максимум магнитного поля, то для получения высокой точности измерения диэлектрической проницаемости образец должен располагаться на расстоянии от КЗ, близком к $\lambda(2n - 1)/4$ при $n=1,2,\dots$, что соответствует положению максимумов электрического поля. Максимумы магнитного поля расположены на $\lambda(n - 1)/2$ при $n=1,2,\dots$, поэтому погрешность определения магнитной проницаемости в однопортовой ячейке на низких частотах при расположении образца около КЗ минимальна.

Таким образом, закороченная ячейка может обеспечить широкополосные точные измерения только магнитной проницаемости по причине того, что в ней фиксировано только положение максимума магнитного поля на короткозамыкателе. Положение же максимумов электрического поля зависит от частоты, поэтому измерение диэлектрической проницаемости с достаточной точностью возможно только в узкой полосе частот.

Двухпортовая ячейка не имеет локализованных максимумов электромагнитной волны, положение которых зависит от частоты, поэтому при любом положении образца внутри ячейки она позволяет проводить измерения с высокой точностью как магнитной проницаемости, так и диэлектрической проницаемости.

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов. На низких частотах погрешность измерения материальных параметров в основном определяется погрешностью измерения S-параметров. С увеличением частоты уменьшается вклад от погрешности S-параметров и увеличивается вклад продольных компонент электромагнитного поля в области образца.

Расположение образца близко к короткозамыкателю приводит к возникновению большой продольной компоненты электрического поля в области расположения образца, которая уменьшается при удалении образца и достигает минимума в двухпортовой линии (рисунок 5). Сопоставляя результаты, представленные на рисунках 4, 5 и 6, можно сделать вывод, что погрешность от продольных компонент сильнее влияет на погрешность определения мнимой части материальных параметров, чем на погрешность измерения действительной части.

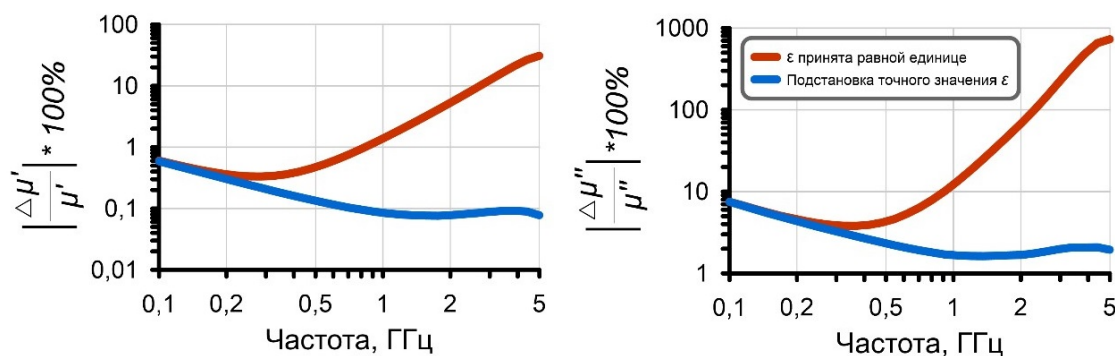


Рисунок 7 – Погрешность определения магнитной проницаемости исследуемого образца композитного материала в методе измерения, где используется только один коэффициент отражения образца, расположенного вплотную к КЗ. Расчет произведен методом Монте-Карло

Если измерение диэлектрической проницаемости не требуется, а интересует только магнитная проницаемость, то закороченная однопортовая ячейка с прижатым вплотную к КЗ образцом может обеспечить большую точность измерения магнитной проницаемости по сравнению с двухпортовой ячейкой. Это справедливо, если эффективная диэлектрическая проницаемость образца $\epsilon_{эфф}$ имеет значение, близкое к единице, что выполняется в случаях очень тонких образцов по сравнению с зазором в ячейке между полоском и экраном. Это может быть также справедливо, если диэлектрическая проницаемость образца была определена другими методами, и возможно использовать ее значение при измерении магнитной проницаемости в однопортовой полосковой ячейке.

Методом Монте-Карло была рассчитана погрешность определения магнитной проницаемости исследуемого образца композитного материала в методе измерения, где используется только один

коэффициент отражения образца, расположенного вплотную к КЗ (рисунок 7). Проведено сравнение результата подстановки диэлектрической проницаемости, равной единице, и подстановки точного значения диэлектрической проницаемости. Значение действительной части эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{эфф}}$ рассматриваемого образца находится в пределах от 1.7 до 1.8 в выбранном частотном диапазоне.

Из рисунка 7 видно, что пренебрежение диэлектрической проницаемостью при измерении рассматриваемого образца композитного материала приводит к резкому повышению погрешности с увеличением частоты. Это подтверждает необходимость точного определения диэлектрической проницаемости образцов, толщина которых сравнима с величиной зазора измерительной ячейки.

Заключение

В работе было исследовано влияние близости короткозамыкателя к исследуемому образцу на результат измерения материальных параметров в полосковой ячейке. Проведено сравнение методов измерения на основе двухпортовой и однопортовой закороченной ячеек. Показано, что влияние на точность измерения диэлектрической проницаемости погрешности измерения S-параметров образца существенно больше в однопортовом методе из-за локализованного минимума электрического поля вблизи короткозамыкателя. Кроме того, при неполном заполнении поперечного сечения измерительной полосковой ячейки исследуемым образцом близость образца к короткозамыкателю существенно увеличивает степень влияния продольных компонент электрического поля, что является дополнительным источником погрешности измерения диэлектрической проницаемости вблизи короткозамыкателя.

На низких частотах доминирующий вклад в результирующую погрешность измерения несет погрешность измерения S-параметров образца как для однопортового, так и для двухпортового методов. С увеличением частоты уменьшается влияние погрешности измерения S-параметров и увеличивается вклад ошибки, связанной с наличием продольных компонент электромагнитного поля в области расположения образца.

Было показано, что метод измерения на основе закороченной однопортовой полосковой ячейки может обеспечить широкополосные измерения с высокой точностью только магнитной проницаемости, диэлектрическая же проницаемость может быть определена с высокой точностью только в узкой полосе частот. Двухпортовая линия, с другой стороны, позволяет проводить широкополосные измерения с высокой точностью обоих материальных параметров.

Если нет необходимости в измерении диэлектрической проницаемости и интерес представляет только магнитная проницаемость, то использование закороченной однопортовой ячейки с прижатым вплотную к КЗ образцом, может обеспечить большую точность измерения магнитной проницаемости по сравнению с двухпортовой ячейкой. Это верно в случае очень тонких образцов по сравнению с зазором в ячейке между полоском и экраном. Также это справедливо, если значение диэлектрической проницаемости образца уже известно из других методов и может быть использовано при измерении магнитной проницаемости в однопортовой полосковой ячейке.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-19-00138, <https://rscf.ru/project/21-19-00138/>.

Список литературы

- [1] Kassem H., Vigneras V., Lunet G. Characterization techniques for materials' properties measurement // Microwave and Millimeter Wave Technologies From Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications. – IntechOpen, 2010.
- [2] Sebastian T., Clavijo S. A., Diaz R. E. Improved accuracy thin film permeability extraction for a microstrip permeameter // Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 113. – №. 3.
- [3] D Pain, M Ledieu, O Acher. et al. An improved permeameter for thin film measurements up to 6 GHz // J. Appl. Phys. – 1999. – V. 85. – №. 8. – P. 5151-5153.
- [4] Starostenko S. N., Rozanov K. N., Osipov A. V. A broadband method to measure magnetic spectra of thin films // Journal of Applied Physics. – 2008. – V. 103. – №. 7.

- [5] Wu Y., Tang ZX., Xu Y. et al. Measure the complex permeability of ferromagnetic thin films: Comparison shorted microstrip method with microstrip transmission method //Progress in electromagnetics research letters. – 2009. – V. 11. – P. 173-181.
- [6] Lepetit T., Neige J., Adenot-Engelvin AL. et al. Accurate characterization of both thin and thick magnetic films using a shorted microstrip //IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – V. 50. – №. 9. – P. 1-10.
- [7] Yousefi L., Attia H., Ramahi O. M. Broadband experimental characterization of artificial magnetic materials based on a microstrip line method //Progress In Electromagnetics Research. – 2009. – V. 90. – P. 1-13.
- [8] Fessant A., Gieraltowski J., Loaec J. et al. Influence of in-plane anisotropy and eddy currents on the frequency spectra of the complex permeability of amorphous CoZr thin films // IEEE Trans. Magn. – 1993. – V. 29. – №. 1. – P. 82-87.
- [9] Gomez S., Queffelec P., Chevalier A. et al. Asymmetrical stripline based method for retrieving the electromagnetic properties of metamaterials //Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 113. – №. 2.
- [10] Quéffélec P., Mallégo S., LeFloc'h M. Automatic measurement of complex tensorial permeability of magnetized materials in a wide microwave frequency range //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – V. 50. – №. 9. – P. 2128-2134.
- [11] Lezaca J. E., Quéffélec P., Chevalier A. Broadband permeability measurement method for ferrites at any magnetization state: direct problem //International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2011. – V. 3. – №. 3. – P. 289-294.
- [12] Chevalier A., Cortes J., Lezaca J. et al. Broadband permeability measurement method for ferrites at any magnetization state: Experimental results //Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 114. – №. 17.
- [13] Quéffélec P., Gelin P. Influence of higher order modes on the measurements of complex permittivity and permeability of materials using a microstrip discontinuity //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 1996. – V. 44. – №. 6. – P. 816-824.
- [14] Baker-Jarvis J. Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability //Nasa Sti/recon Technical Report N. – 1992. – V. 93. – P. 12084.
- [15] Hanson G. W., Grimm J. M., Nyquist D. P. An improved de-embedding technique for the measurement of the complex constitutive parameters of materials using a stripline field applicator //IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 1993. – V. 42. – №. 3. – P. 740-745.
- [16] Nicolson A. M., Ross G. F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques //IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 1970. – V. 19. – №. 4. – P. 377-382.
- [17] Bhat B., Koul S. K. Unified approach to solve a class of strip and microstrip-like transmission lines //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1982. – V. 30. – №. 5. – P. 679-686.
- [18] Koul S. K., Bhat B. Propagation parameters of coupled microstrip-like transmission lines for millimeter-wave applications //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1981. – V. 29. – №. 12. – P. 1364-1370.
- [19] Ivanov P., Bobrovskii S., Rozanov K. et al. Using a Single-Mode Approximation to Measure Magnetic Permeability in Strip Transmission Lines //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – V. 86. – №. 5. – P. 574-578.

**INFLUENCE OF PROXIMITY OF THE SHORT-CIRCUITED WALL
TO THE SAMPLE UNDER STUDY ON MEASUREMENT
OF MATERIAL PARAMETERS IN QUASI-TEM APPROXIMATION
IN A STRIPLINE**

Ivanov P.A.^{*1}, Petrov D.A.¹, Rozanov K.N.¹

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

* p.ivanov.a@mail.ru

Abstract

Influence of proximity of the sample to the short-circuit wall in the measurement of permeability and permittivity in a single-port stripline measurement cell has been numerically and experimentally investigated, in comparison to measurements in a dual-port stripline measurement cell. The comparison of the accuracy of different measurement methods was carried out using the Monte Carlo method and numerical finite element analysis. It is demonstrated that the measurement method based on the shorted single-port stripline measurement cell is capable of providing broadband measurements with high accuracy only for permeability. Accurate measurement of dielectric permittivity, on the other hand, is possible only within a narrow frequency range. In contrast, the dual-port line allows for broadband measurements with high accuracy for both material parameters.

Key words: strip transmission lines, microwave measurements, permeability measurement, permittivity measurement, quasi-TEM approximation
