

УДК

Исследование возможности использования копланарной линии передачи для характеристики взаимодействия образцов различного электрического сопротивления с электромагнитным излучением в диапазоне 50...2000 МГц

И.О. Тестов, В. Крохманский, В. Любимов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе исследовалась возможность использования копланарной линии передачи для исследования образцов композитных материалов в частотном диапазоне от 50 до 2000 МГц. Измерялись коэффициент передачи S_{21} и поверхностное сопротивление. Определена целесообразность использования диэлектрических пленок при измерении параметров проводящих материалов.

Ключевые слова: коэффициент передачи, поверхностное сопротивление, коаксиальная линия передачи, копланарная линия передачи, композитные материалы

1. Введение

Разработка и исследование материалов, предназначенных для обеспечения необходимого уровня электромагнитного экранирования или электромагнитной совместимости, связана с необходимостью определения их электрофизических параметров. Актуальный диапазон распространяющихся по эфиру электромагнитных помех – 0,05...20 ГГц. В этом интервале для характеристики материалов используются несколько основных методов измерений, из которых наиболее предпочтительны – широкополосные. К таким методам можно отнести измерения, проводимые: в безэховых камерах (БЭК), при помощи коаксиальной линии передачи (КЛП) или закрытых измерительных стендов (ЗИС) (линии передачи с встроенными измерительными рупорами) [1]. Метод КЛП позволяет использовать образцы небольших геометрических размеров (например, полый цилиндр с внешним диаметром не более 18 мм) и проводить исследования в диапазоне 0,05...18 ГГц. Основной его недостаток связан с невозможностью использования проводящих образцов. Исследования в БЭК требуют изготовления образцов достаточно больших размеров ($\geq \frac{1}{4}$ длины волны). Применение ЗИС требует наличия образцов, полностью перекрывающих раскрыт рупора [2, 3]. В работе [4] ЗИС использовался в частотном диапазоне 2...20 ГГц, в результате свойства материалов в диапазоне частот от 50 до 2000 МГц остаются не изученными. Решение такой задачи может основываться на применении копланарной измерительной ячейки (КИЯ) [5]

В настоящей работе рассматривается возможность применения копланарной измерительной ячейки (КИЯ) для исследования частотной зависимости коэффициента передачи S_{21} в диапазоне от 50 до 2000 МГц, проводится сравнение результатов, полученных при исследовании при помощи КИЯ и КЛП образцов материалов с различными значениями электрической проводимости (электрического сопротивления).

2. Получение и исследование образцов композитных материалов

Образцы композитных материалов изготавливались методом литья в форму. В состав образцов входили в качестве матрицы гипс марки Г16 и наполнители, взаимодействующие с электромагнитным излучением, технический углерод марки Т900 и феррит марки 6000НМ [6, 7]. Массовая доля компонентов определялась при помощи лабораторных весов типа «Adventurer Pro AV264С» (производство фирмы «Ohaus», США) с точностью $\pm 0,001$ г. Компоненты перемешивались до достижения однородного состава сухой смеси. Перемешивание продолжалось в процессе добавления воды (использовался дозатор). Готовая смесь заливалась в формы и выдерживалась в нормальных климатических условиях до достижения постоянной массы (разность показаний между взвешиваниями образца через 4 ч не более 0,1 %) [8]. Для каждого состава были получены по 3 шт. образцов; первый и второй (полые цилиндры с внешним диаметром – 6,96 мм и внутренним – 2,98 мм различной длины h , соответственно – 5,30 мм и 8,35 мм) использовались при исследованиях с использованием КЛП различной длины d (14,5 мм и 24,5 мм), третий (пластина размерами – 3,5×44,0×44,0) при исследованиях с использованием КИЯ. Поверхностное сопротивление измерялось при помощи мультиметра типа Fluke 15В+ («Fluke Corporation», США). Перечень и характеристики образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень и характеристики образцов композитных материалов

Обозначение	Массовая доля компонентов, %			Поверхностное сопротивление, кОм
	Г16	Т900	6000 НМ	
№1	90	10	-	80
№2	80	20	-	1,5
№3	70	30	-	0,08
№4	80	-	20	-
№5	70	-	30	-

Измерения коэффициента передачи S_{21} проводились при помощи векторного анализатора цепей типа «Planar S50244» (ООО «ПЛАНАР», Россия, диапазон рабочих частот – 0,01...44 ГГц) к которому присоединялась КЛП или КИЯ.

Внутри КЛП образцы устанавливались в трёх различных положениях (рисунок 1 а), при которых L имело значения: 0, $(d-h)/2$ и $d-h$. Результаты измерений, приведенные на рисунке 1 а, показывают, что максимальное значение коэффициента S_{21} передачи достигается при $L = (d-h)/2$.

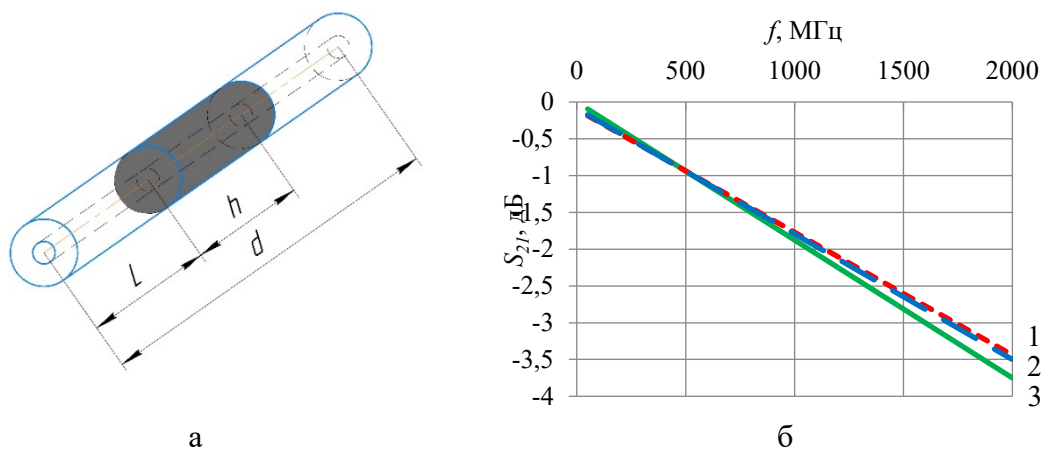


Рисунок 1 – Исследование изменения частотной зависимости S_{21} при различном положении образца №4 внутри КЛП: а – схематичное расположение образца, б – частотные зависимости: 1 – образец со стороны порта №2 (вход), 2 – образец со стороны порта №1 (выход), 3 – образец по центру

Экспериментальным путем было установлено, что образцы, которые заполняют рабочий объем КЛП на ($\sim 35\pm\%$) обеспечивают минимальное расхождение частотных зависимостей S_{21} с аналогичными полученными при использовании КИЯ (рисунок 2).

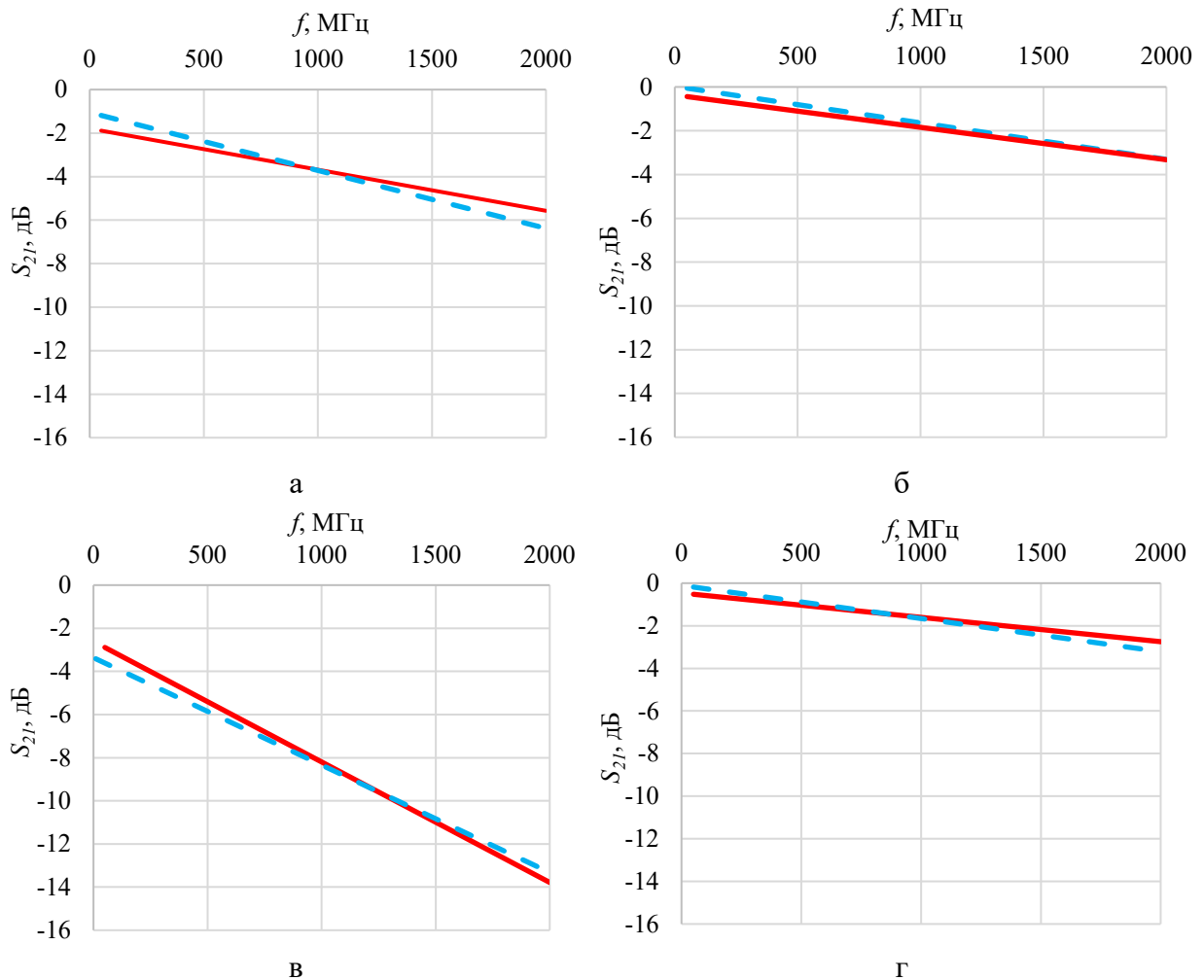


Рисунок 2- Частотные зависимости коэффициента передачи S_{21} при использовании КИЯ (сплошная линия) и КЛП (пунктирная линия): а – образец №1, КЛП $d = 14,5\text{мм}$; б – образец №5, КЛП $d = 14,5\text{мм}$; в – образец №2 КЛП $d = 24,5\text{мм}$; г – образец №4 КЛП $d = 24,5\text{мм}$

Полученные частотные зависимости S_{21} показывают, что расхождение между результатами измерений с использованием КЛП и КИЯ, составляют не более $\pm 0,4$ дБ. При этом наименьшее сопротивление имеет образец №2 – 1,5 кОм. Дальнейшее уменьшение сопротивления образцов может вызвать в КИЯ закорачивание центрального проводника и экрана, что приведет к некорректности измерений. Решение этой проблемы может быть получено путем установки между образцом и КИЯ диэлектрической пленки. В настоящей работе использовался майлар толщиной 6 мкм (рисунок 3).

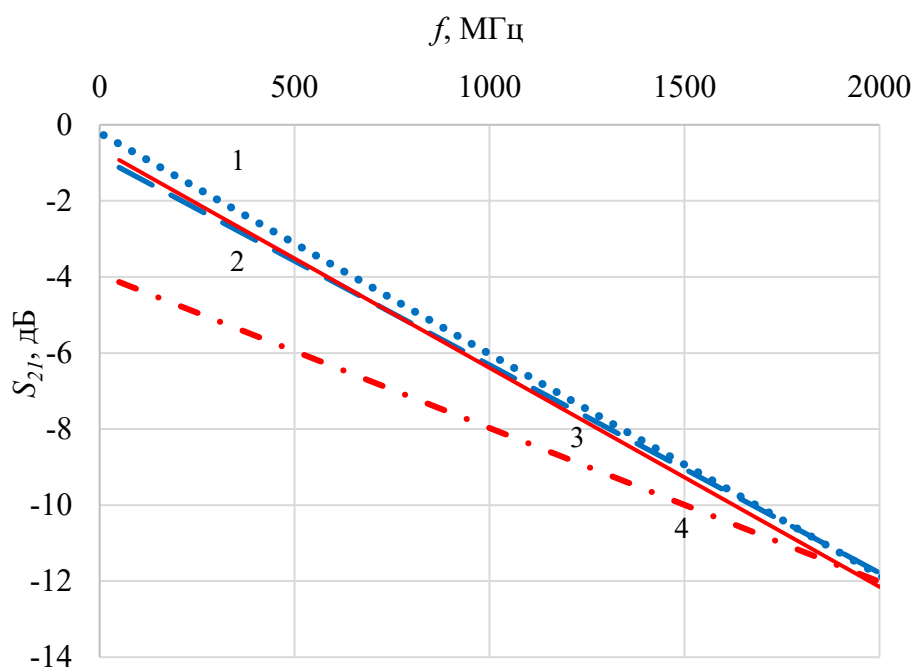


Рисунок 3 –Частотные зависимости коэффициента передачи S_{21} для образца №3 при использовании КИЯ (красные линии) и КЛП (синие линии): 1 – КЛП $d = 24,5\text{мм}$; 2 – КЛП $d = 14,5\text{мм}$; 3 – КИЯ с диэлектрической пленкой; 4 – КИЯ без диэлектрической пленки

Использование диэлектрической пленки при измерениях с помощью КИЯ образцов с низким сопротивлением позволяет предотвратить короткое замыкание и получить результаты, которые незначительно в рамках погрешности $\pm 0,3$ дБ отличаются от измерений, проведенных при помощи КЛП.

3. Заключение

КИЯ можно использовать для исследований коэффициента передачи S_{21} в частотном диапазоне от 50 до 2000 МГц, при этом погрешность не более чем $\pm 0,4$ дБ. КИЯ позволяет измерять параметры образцов материалов, которые не могут быть изготовлены в виде полого цилиндра, например, тонких пленок. Образцы материалов с низким значением поверхностного сопротивления, в том числе металлов, могут быть исследованы при помощи КИЯ; в этом случае необходимо использовать тонкую диэлектрическую пленку, погрешность $\pm 0,3$ дБ.

Экспериментальные исследования, представленные в работе, проводились на базе **Центра коллективного пользования «Безэховая камера» СПбГЭТУ «ЛЭТИ».**

Исследование частично выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект №21-19-00719).**

Список литературы

1. Гареев К. Г., Мирошкин В. П., Тестов О. А. Применение магнитных материалов: учеб. пособие. СПб: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 343 с.
2. Marvin, A.C., Dawson, L., Plintoft, I.D., & Dawson, J.F. (2009). A method for the measurement of shielding effectiveness of planar samples requiring no sample edge preparation or contact. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51, 255–262.
3. V. Volski, G.A.E. Vandenbosch & A. Vasylychenko. A dedicated technique to measure shielding effectiveness of textiles using a two-horn antenna set-up. February 2011 Journal of the Textile Institute 102(2): 164-171

4. Providing a specified level of electromagnetic shielding with nickel thin films formed by dc magnetron sputtering. Testov O.A., Gareev K.G., Khmel'nitskiy I.K., Luchinin V.V., Sevost'yanov E.N., Testov I.O., Komlev A.E. *Coatings*. 2021. Т. 11. № 12.
5. Matthieu Bailleul , "Shielding of the electromagnetic field of a coplanar waveguide by a metal film: Implications for broadband ferromagnetic resonance measurements", *Appl. Phys. Lett.* 103, 192405 (2013).
6. ГОСТ 7885–86. Углерод технический для производства резины. – Введ. 01.01.1988. – М.: Издательство стандартов, 1988.
7. ГОСТ 8.377–80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. – Введ. 28.03.1980. – М: Государственный комитет СССР по стандартам, 1980.
8. ГОСТ Р 58767–2019. Растворы строительные. Методы испытаний по контрольным образцам. – Введ. 13.12.2019. – М: Стандартиформ, 2020.