

Исследование электрофизических параметров композитных материалов с диэлектрической постоянной меньше 2 в широком диапазоне частот

К.А. Корнев, И.В. Говенько, А.Г. Алтынников, Д.А. Кудрявцева, Р.А. Платонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: данная работа посвящена исследованию композитного материала на основе полимерной матрицы, наполненной полыми сферами SiO_2 для применения в СВЧ-устройствах. Разработана модель элементарной ячейки и рассчитана эффективная диэлектрическая проницаемость при различной объемной доле наполнителя. Также проведены измерения эффективной диэлектрической проницаемости изготовленных образцов в диапазоне 8–12 ГГц методом Николсона-Росса-Вейра.

Ключевые слова: композитные материалы, эффективная диэлектрическая проницаемость, электромагнитное моделирование, метод Николсона-Росса-Вейра

1. Введение

Современная СВЧ-техника требует материалов с управляемой диэлектрической проницаемостью (ϵ) и низкими потерями ($\text{tg } \delta$). Перспективны композиты на основе полых стеклянных микросфер (ПСМ) из SiO_2 [1–3], позволяющие изменять ϵ и плотность за счёт воздушных полостей.

Объект исследования - фотополимерная матрица с ПСМ из SiO_2 . Фотополимер выбран благодаря доступности и возможности изготовления образцов в лабораторных условиях без сложного оборудования, что позволяет оперативно создавать прототипы с разным наполнением [4]. Однако большинство фотополимеров имеют высокие диэлектрические потери, поэтому в дальнейшем предполагается замена матрицы на высокочастотные термостойкие полимеры (полистирол, полиэтилен, фторопласт).

Цель работы - создание расчётной модели композита, изготовление образцов с разной объёмной долей ПСМ и измерение их эффективной ϵ в СВЧ-диапазоне.

2. Расчет эффективной диэлектрической проницаемости

Для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости композитов существует множество подходов: аналитические, полуэмпирические модели и численное моделирование [5,6]. Один из наиболее универсальных — метод конечных элементов (МКЭ) используемый для расчёта распределения электрического поля в модельной структуре. При равномерном распределении наполнителя оправдано использование кубических ячеек [7,8]. В зависимости от объёмной доли частиц применяют простую (до 52% заполнения) или объёмно-центрированную (до 68%) кубическую элементарную ячейку (ЭЯ). Пример простой кубической ЭЯ приведён на рисунке 1а).

Для расчёта эффективной диэлектрической проницаемости на основе моделирования электродинамических полей в ЭЯ можно использовать алгоритм Николсона — Росса — Вейра (НРВ), широко применяемый для широкополосного измерения диэлектрических образцов [9]. Расчётная модель — элементарная ячейка из частицы ПСМ внутри полимера с $\epsilon = 2,9$ (фотополимер Anycubic Clear). Диаметр сферы - 50 мкм, толщина стенок - 0,75 мкм. Для распространения волны ЭЯ помещена между двумя ТЕМ-волноводами. Схема модели представлена на рисунке 1б).

Объемная доля ПСМ в ПК ЭЯ определяется из выражения:

$$v = \frac{\pi D}{6a^3} \quad (1)$$

где D – диаметр сферы, a – размер грани ПК ЭЯ.

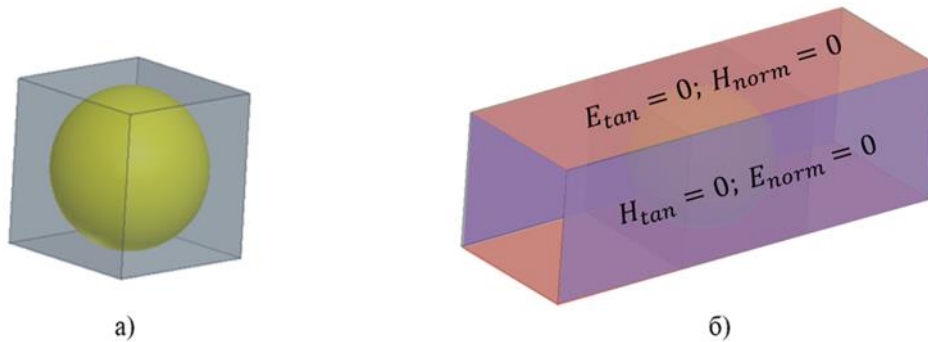


Рисунок 1. Схематическое представление простой кубической элементарной ячейки композитного материала – а), элементарная ячейка в ТЕМ-волноводе – б).

Основное ограничение метода НРВ связано с толщиной исследуемого образца. Образцы, кратные половине длины волны в материале, вносят неопределенность при определении фазы [9]. Для исследуемого диапазона частот 8-12 ГГц максимальная длина образца ($\lambda/2$) составляет:

$$L_{max} = \frac{\lambda_m}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r^*}} \approx 6,5 \text{ мм} \quad (2)$$

где ϵ_r^* – диэлектрическая проницаемость диоксида кремния (SiO_2), использовалась для оценки как максимальная из используемых.

Приведённые на рисунке 2 результаты численного моделирования эффективной диэлектрической проницаемости в зависимости от объемной доли ПСМ демонстрируют существенное снижение диэлектрической проницаемости.

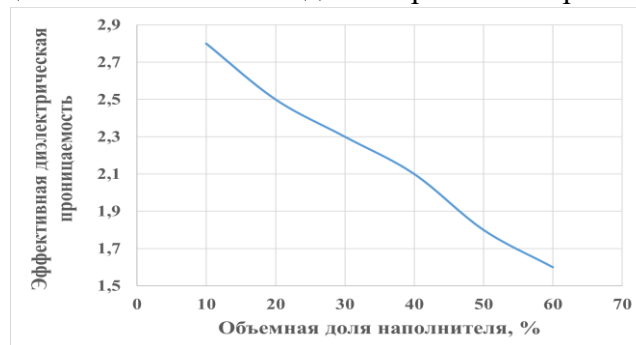


Рисунок 2. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от объемной доли наполнителя в полимере (моделирование на частоте 10 ГГц)

3. Изготовление и экспериментальное исследование образцов композитного материала

Для изготовления образцов композитного материала качестве наполнителя использовались ПСМ производства АО «НПО Стеклопластик» из диоксида кремния

(толщина оболочки 0,75 мкм) и фотополимер марки Anycubic в качестве матрицы. Смесь фотополимера и частиц ПСМ изготавливалась методом «всплытия». Так как плотность ПСМ ниже плотности жидкого полимера, это приводит к естественному гравитационному разделению. После всплытия ПСМ формируется различимая граница раздела смеси и фотополимера. По величине объема фотополимера ниже границе раздела рассчитывается объемная доля ПСМ в смеси. Более подробно процесс изготовления смеси приведен на рисунке 3.



Рисунок 3. Процесс создания образцов композитного материала

Конструкция формы для фотоактивации смеси представляет собой металлическую рамку толщиной 1 мм с прямоугольным отверстием (23×10 мм), закрытую двумя прозрачными стеклами. Указанные геометрические размеры соответствуют поперечному сечению прямоугольного волновода, используемого для измерения диэлектрической проницаемости полученных образцов. Длительность фотоактивации составляла ~ 2 минут с каждой стороны. Металлические рамки с отвержденными образцами помещались в волноводный тракт, подключенный к векторному анализатору цепей (Seuag 3672C) для измерения S-параметров. Для калибровки использовались секции короткого замыкания и отрезки волновода с воздушным заполнением по алгоритму TRL. Изготовленные образцы и используемая при измерениях оснастка приведены на рисунке 4. Были измерены S-параметры данных образцов в диапазоне частот 8-12 ГГц. Рассчитанная на основе метода НРВ эффективная диэлектрическая проницаемость приведена на рисунке 5.



Рисунок 4. Изготовленные образцы и измерительная оснастка

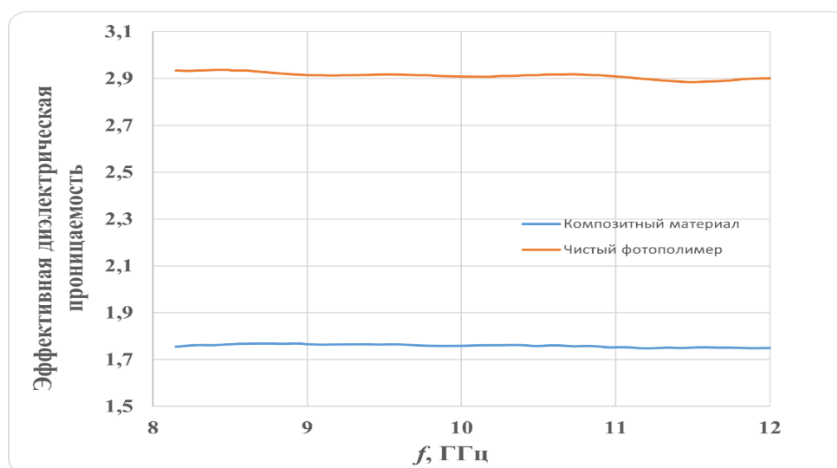


Рисунок 5. Результаты экспериментального исследования образцов фотополимера и композита на его основе с добавлением 55 об.% ПСМ

В таблице 1 приведено сравнение результатов моделирования и экспериментального исследования диэлектрической проницаемости композитного материала на основе ПСМ.

Таблица 1. Сравнение результатов моделирования и измерения

Объемная доля сфер SiO ₂ , %	Диэлектрическая проницаемость	
	Моделирование МКЭ	Измерения на частоте 10 ГГц
55	1,7	1,76

4. Заключение

В ходе работы была разработана модель композитного материала на основе полых сфер диоксида кремния. Получена теоретическая зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от объемной доли сфер SiO₂ в полимерной матрице. Изготовлен и измерен образец композитного материала с объемной долей наполнителя 55%. Также для сравнения приведены результаты измерения образца из чистого фотополимера. По полученным данным (см. рисунок 5) видно, что эффективная диэлектрическая проницаемость для образца с 55% наполнением ПСМ снижена на ~40%. Полученные результаты подтверждают целесообразность создания материалов из полимерной матрицы с ПСМ в качестве наполнителя. Однако, стоит отметить, что метод требует некоторых доработок, касающихся в частности, улучшения однородности образцов и замены материала матрицы.

Исследование выполнено в рамках **Государственного задания № 075-01438-22-07 (FSEE-2025-0009)**.

Список литературы

1. Михайлов В. А. Синтактные материалы с высокими диэлектрическими свойствами на основе кремнийорганического полимера //Успехи современного естествознания. – 2015. – №. 12. – С. 47-50.
2. Wu C., Li Q., Hong Y., et al. Development of a High-Frequency Polytetrafluoroethylene (PTFE)-Based Laminate With an Ultra-Low Dielectric Constant by Combination of Ceramic Hollow Spheres and PTFE Resin / Chemistry Select. 2024. Vol. 9. No. 13. P. e202303461. DOI: 10.1002/slct.202303461
3. Hong Z., Dongyang W., Yong F., et al. Dielectric properties of polyimide/SiO₂ hollow spheres composite films with ultralow dielectric constant / Materials Science and Engineering: B. 2016. Vol. 203. P. 13 – 18. DOI: 10.1016/j.mseb.2015.10.003

4. Федулов Б. Н. Моделирование отверждения фотополимера // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – №. 2. – С. 53-58.
5. Markel V.A. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial // J. Opt. Soc. Am. A. 2016. Vol. 33, № 7. P. 1244.
6. Fricke H. The Maxwell-Wagner Dispersion in a Suspension of Ellipsoids // J. Phys. Chem. American Chemical Society, 1953. Vol. 57, № 9. P. 934–937.
7. Effective dielectric constant of periodic composite materials/ Sareni B., Feliachi M., Marchand C. et al. // Journal of Applied Physics. – 1996. – Т. 80 – №. 3.
8. Wu D., Chen J., Liu C. Numerical evaluation of effective dielectric properties of three-dimensional composite materials with arbitrary inclusions using a finite-difference time-domain method // Journal of Applied Physics. – 2007. – Т. 102 – №. 2.
9. Rothwell E.J. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials [Text] / E.J. Rothwell [et al.] // Progress In Electromagnetics Research. – 2016. – V. 157. – P. 31-47.