

# Композитный материал на основе полых стеклянных микросфер для применения в антенных устройствах

И.В. Говенько, К.А. Корнев, И.Д. Неустроев, А.Е. Комлев, Р.А. Платонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** данная работа посвящена исследованию методов расчета эффективной диэлектрической проницаемости композитных материалов и способу изготовления таких материалов. В ходе работы рассчитанные значения эффективной диэлектрической проницаемости сравнивались с полученными экспериментально. В статье приведён способ изготовления композитных материалов, позволяющий контролировать объёмные доли используемых веществ. Показано, что использование полых стеклянных микросфер позволяет существенно снизить диэлектрическую проницаемость композитного материала.

**Ключевые слова:** Композитные материалы, метод конечных элементов, изготовление композитных материалов, полые стеклянные микросферы

## 1. Введение

Для телекоммуникационных систем диапазона от 30 ГГц (5G) требуются материалы с диэлектрической постоянной не выше 2,5 [1–3], что позволяет повышать КПД планарных антенн. Создание композитов с проницаемостью ниже 2 основано на введении воздушных полостей в диэлектрическую матрицу, причём качество материала определяется равномерностью распределения полостей и их объёмной долей. Среди известных материалов с проницаемостью около 2 выделяются политетрафторэтилен и полистирол (ПСТ), которые благодаря низким потерям и отработанной технологии широко применяются в СВЧ-диапазоне.

Снизить проницаемость пластин можно перфорацией (сквозными отверстиями) [4], однако её основной недостаток - неоднородность диаметра отверстий по глубине, что важно для дисперсии свойств. Перфорированные пластины используются в линзовых антеннах и метаматериалах [5, 6].

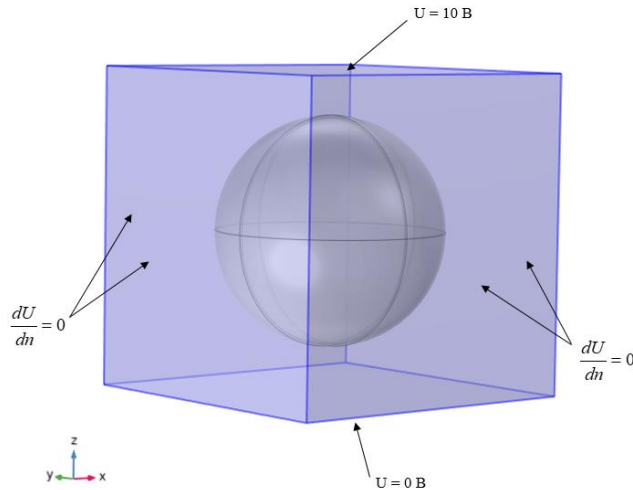
Более технологичный способ — наполнение полимерной матрицы полыми стеклянными микросферами (ПСМ). Он эффективен для матриц, не требующих прессования и допускающих смешение компонентов в жидкой фазе (например, полистирол в растворе или расплаве). Однако работа с полистиролом требует спецоборудования, поэтому в качестве модельной матрицы выбран фотополимер для 3D-печати, позволяющий смешение без сложной оснастки.

Цель работы - исследование влияния концентрации ПСМ на эффективную диэлектрическую проницаемость композита на основе фотополимерной матрицы.

## 2. Моделирование композитного материала на основе ПСМ

Среди наиболее распространённых способов определения эффективной диэлектрической проницаемости композитов - правила смеси, например, модели Максвелла-Гарнетта [7] и Лихтенекера [8]. Их ключевым ограничением является то, что они не учитывают взаимное влияние частиц наполнителя, их форму и пространственное распределение. Кроме того, результаты аналитических моделей неоднозначно соотносятся с экспериментом. В работах [9] отмечено, что выбор модели во многом определяется химическим составом компонентов, их гранулометрией и технологией изготовления.

Более универсален подход на основе численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ). Его суть - выделение из объёма композита модельной структуры, например, элементарной ячейки (ЭЯ), свойства которой определяют электрофизические параметры композита. Примером простейшая ЭЯ является простая кубическая конфигурация (см. рисунок 1): в центре куба с ребром  $a$  расположена полая сфера с толщиной оболочки  $0,75 \mu\text{м}$ . Диэлектрическая проницаемость оболочки ( $\text{SiO}_2$ ) —  $4,6$ , матрицы (фотополимер Anycubic Clear [10]) —  $2,9$ .

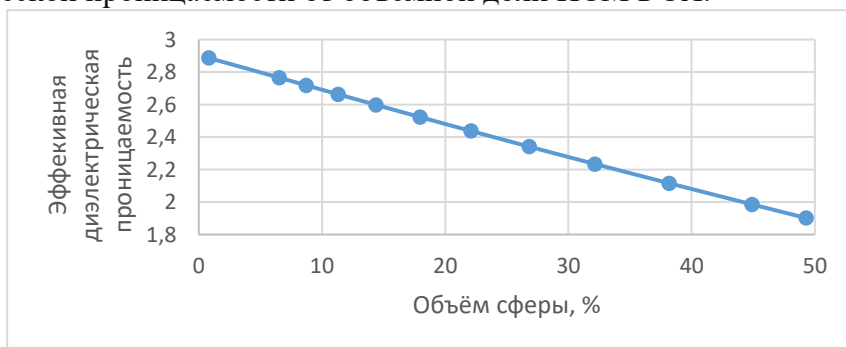


**Рисунок 1.** Модель простой кубической элементарной ячейки со сферической частицей наполнителя.

Расчет распределения электрического поля внутри ЭЯ осуществлялся в электростатическом режиме, при этом ЭЯ можно рассматривать как диэлектрическое заполнение плоскопараллельного конденсатора, формируемого граничными условиями на противоположных гранях, как показано на рисунке 1. Полученное в ходе расчета электрическое поле в объеме ЭЯ использовалось для расчета электрической энергии ( $W_E$ ) сохраняемой в конденсаторе, после чего определялась эффективная диэлектрическая проницаемость [11]:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \rightarrow \varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S} \quad (1.1)$$

На рисунке 2 приведены результаты численного моделирования эффективной диэлектрической проницаемости от объемной доли ПСМ в ЭЯ.



**Рисунок 2.** Результаты моделирования эффективной диэлектрической проницаемости в зависимости от объемной доли ПСМ в фотополимерной матрице.

### 3. Изготовление образцов композитного материала

Смесь фотополимерной жидкости с известным объемом ПСМ изготавливалась в мерной емкости. Благодаря тому, что ПСМ имеют среднюю плотность, значительно ниже плотности жидкого фотополимера, на каждую сферу, погруженную в полимер, действует выталкивающая сила, направленная вертикально вверх, в результате чего сферы всплывают в верхнюю часть емкости. Данное явление приводит к эффекту естественного гравитационного разделения: избыток чистого полимера скапливается на дне емкости, в то время как в верхней части формируется слой смеси с плотной упаковкой ПСМ. Так как сферы стремятся занять максимальный объем вверху, гравитация отжимает лишний полимер вниз, что позволяет автоматически избавиться от его излишков без применения сложного дозирующего оборудования. Используя емкость известного объема, можно ожидать, что по мере всплытия сфер верхний слой композита будет иметь стабильную и максимально возможную для данных условий объемную долю наполнителя, тогда как нижний слой чистого полимера просто удаляется. Схема процесса приготовления смеси и изготовления экспериментального образца на её основе приведена на рисунке 3.



Рисунок 3. Процесс изготовления экспериментальных образцов.

Объемную долю ПСМ в полученной смеси можно рассчитать по формуле:

$$\phi = \frac{P}{P + M - x} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

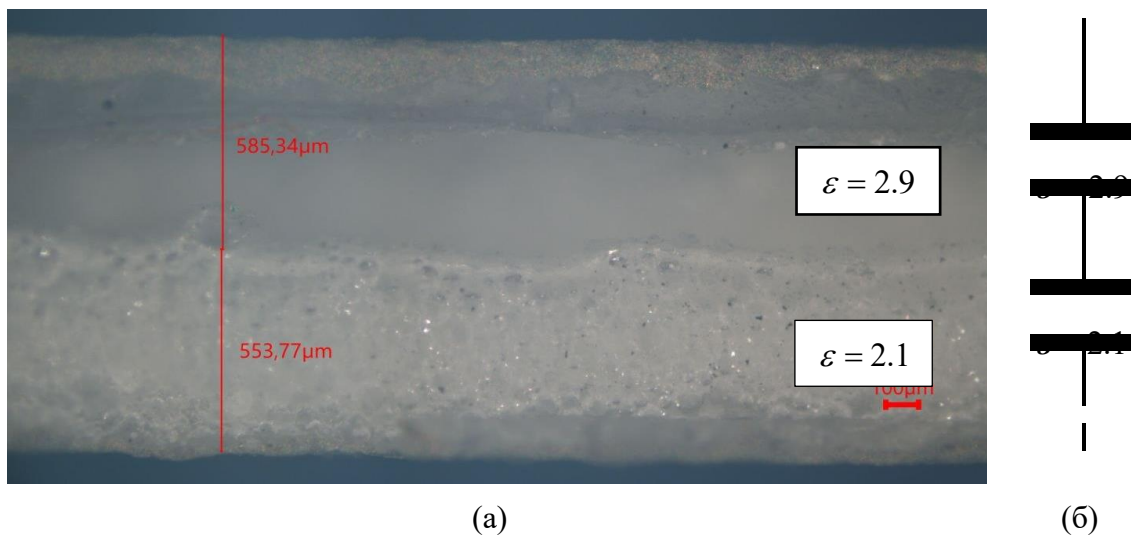
где  $P$  – начальный объем, занимаемый частицами порошка ПСМ,  $M$  – начальный объем фотополимера,  $x$  – объем фотополимера, который отделился.

После завершения процесса гравитационного разделения полученная смесь помещается в формы для ультрафиолетовой обработки. Форма фиксируется между двух стеклянных пластин, которые необходимы для обеспечения более равномерного засвечивания образцов. Затем композит засвечивается при помощи ультрафиолетового излучения в течение ~3 минут с каждой стороны, что инициирует процесс

полимеризации и придает материалу окончательную механическую прочность.

Для экспериментального исследования был изготовлен образец размерами  $23 \times 10 \times 1$  мм, с объемной долей ПСМ  $\phi \approx 40\%$ . Для измерения диэлектрической проницаемости на изготовленный образец нанесли серебрясодержащие чернила для формирования обкладок плоскопараллельного конденсатора. Ёмкость полученного конденсатора была измерена с помощью измерителя иммитанса (LCR-78201) на частоте 1 МГц. На основе измеренной емкости с помощью соотношения (1.1) была рассчитана величина эффективной диэлектрической  $\varepsilon_{\text{экс}} = 2.57$ .

Сравнение с теоретическими значениями показывают сильное отклонение, так как для модели с такой же объемной долей ПСМ значение эффективной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{МКЭ}} = 2.11$ . Столь сильное отклонение связано с не идеальностью изготовленного образца ввиду того, что во время его полимеризации продолжался процесс гравитационного разделения и из-за этого произошло образование двух областей с различными объемными долями ПСМ. На рисунке 4(а) можно заметить четкую границу раздела областей. Для учета полученного дефекта можно использовать эквивалентную схему виде двух последовательно соединенных конденсаторов, каждый из которых соответствует слою композитного материала (см. рисунок 4(б)). Сравнение результатов моделирования, расчета и измерения приведены в таблице 1.



**Рисунок 4.** Срез изготовленного образца (а) и эквивалентная схема для расчёта общей ёмкости (б)

**Таблица 1.** Сравнение полученных результатов

Диэлектрическая проницаемость		
МКЭ	Эквивалентная схема (учет дефекта образца)	Измерение на 1 МГц
~2.11	~2.44	~2.57

### 3. Заключение

В статье рассмотрены методы расчёта и создания композитных диэлектриков на основе фотополимерной матрицы с добавлением полых стеклянных микросфер

(ПСМ), позволяющих снизить эффективную диэлектрическую проницаемость. С помощью численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) и экспериментальной реализации, основанной на гравитационном разделении компонентов, показана возможность контролировать объёмную долю наполнителя. Выявлено, что неоднородность распределения ПСМ в объёме образца приводит к отклонению экспериментальных значений от расчётных, которое можно учесть с помощью эквивалентной схемы последовательно соединённых конденсаторов. Работа подтверждает перспективность предложенного подхода для создания композитов с воспроизводимыми диэлектрическими свойствами.

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

#### Список литературы

1. Tong C. PCB materials and design requirements for 5G systems. — Cham: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-17207-6
2. Wang L., Yang J., Cheng W., et al. Progress on polymer composites with low dielectric constant and low dielectric loss for high-frequency signal transmission / *Frontiers in Materials*. 2021. Vol. 8. 774843. DOI: 10.3389/fmats.2021.774843
3. Li Y., Zhou J., Shen J., et al. Ultra-low permittivity HSM/PTFE composites for high-frequency microwave circuit application / *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2022. Vol. 33. No. 13. P. 10096 – 10103.
4. Bi K., Wang Q., Xu J., et al. All-dielectric metamaterial fabrication techniques / *Advanced Optical Materials*. 2021. Vol. 9. No. 1. P. 2001474. DOI: 10.1002/adom.202001474
5. Mei Z., Bai J., Cui T. Gradient index metamaterials realized by drilling hole arrays / *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010. Vol. 43. No. 5. 055404. DOI: 10.1088/0022-3727/43/5/055404
6. Sato K., Ujiie H. A plate Luneberg lens with the permittivity distribution controlled by hole density / *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*. 2002. Vol. 85. No. 9. P. 1 – 12. DOI: 10.1002/ecja.1120
7. Koledintseva M. Y. et al. Representation of permittivity for multiphase dielectric mixtures in FDTD modeling // 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE Cat. N 04CH37559). IEEE/ 2004. V. 1. P. 309–314. DOI:10.1109/IEMC.2004.1350047.
8. K. Lichteneker. Dielectric constant of natural and synthetic mixtures. *Zeitschrift fur Physik*. 1926. P. 115–158.
9. Sebastian M.T., Jantunen H. Polymer-ceramic composites of 0-3 connectivity for circuits in electronics: A review // *Int. J. Appl. Ceram. Technol*. 2010. Vol. 7, № 4. P. 415–434.
10. Платонов Р. А. и др. Метод расчета эффективной диэлектрической проницаемости материала с периодически распределенными неоднородностями // *Пластические массы*. – 2025. – №. 6. – С. 33-35.
11. Будько А.А., Васильева О.В. Моделирование статических электромагнитных полей и расчёт параметров в COMSOL Multiphysics. – 2005. - №9.