

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПТФЭ
С РАЗЛИЧНЫМ ПРОЦЕНТНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ДИОКСИДА ТИТАНА***

**SIMULATION OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES
OF A COMPOSITE MATERIAL BASED ON PTFE
WITH DIFFERENT CONTENT OF TITANIUM DIOXIDE**

Д.А. КУДРЯВЦЕВА, А.Е. КОМЛЕВ, А.Г. АЛТЫННИКОВ, Р.А. ПЛАТОНОВ

D.A. KUDRYAVTSEVA, A.E. KOMLEV, A.G. ALTYNNIKOV, R.A. PLATONOV

**(Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина))**

(Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»)

E-mail: aekomlev@etu.ru

Наиболее распространенной технологией в современном электронном приборостроении является технология печатных плат. В качестве материала-основы традиционно используется политетрафторэтилен (ПТФЭ), обладающий высокой температурной стабильностью и низким значением диэлектрической проницаемости. Добавление в политетрафторэтилен различных наполнителей позволяет изменять его механические и электрофизические свойства в соответствии с требованиями производства. Например, при добавлении диоксида титана (TiO_2), свойства которого сильно отличаются от свойств ПТФЭ-матрицы, получается уникальный материал с физическими параметрами, зависящими от объемной доли включения, формы и размера его частиц. Это делает данные композиты перспективными материалами для СВЧ-применений в различных отраслях промышленности. Одним из изменяемых параметров является диэлектрическая проницаемость материала ϵ . Таким образом, возникает возможность изменения величины ϵ за счет управления процентным содержанием наполнителя, формой и размером его частиц. Это обуславливает интерес к аналитическим выражениям, описывающим диэлектрическую проницаемость композитного материала. В представленной статье рассматривается ряд математических моделей для оценки влияния процентного содержания керамического наполнителя в ПТФЭ-матрице на величину диэлектрической проницаемости композитного материала. Приведенное сравнение расчетных зависимостей с экспериментальными данными для образца ПТФЭ/ TiO_2 позволяет считать модель эквивалентных емкостей наполнителя со сферической формой частиц оптимальной для определения диэлектрической постоянной в заданном диапазоне объемных долей добавки.

The most common technology in modern electronic instrumentation is the technology of printed circuit boards. Polytetrafluoroethylene (PTFE) is traditionally used as the base material, which has high temperature stability and a low dielectric constant value of 2.1. Addition of various fillers to polytetrafluoroethylene allows

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания № 075–01438-22-07 от 28 октября 2022 года (FSEE-2022-0019).

changing its mechanical and electrophysical properties in accordance with production requirements. For example, when titanium oxide (TiO_2) is added, the properties of which are very different from those of the PTFE matrix, a unique material with physical parameters depending on the volume fraction of the inclusion, the shape and size of its particles is obtained. This makes these composites promising materials for microwave applications in various industries. One of the variable parameters is the dielectric constant of the material ϵ . Thus, it becomes possible to change the value of ϵ by controlling the percentage of filler, the shape and size of its particles. This leads to an interest in analytical expressions describing the dielectric constant of a composite material. The presented article considers a number of mathematical models to assess the effect of the percentage of ceramic filler in a PTFE matrix on the value of the dielectric constant of a composite material. The comparison of the calculated dependences with experimental data for the PTFE/ TiO_2 sample allows us to consider the model of equivalent filler tanks to a spherical particle shape as optimal for determining the dielectric constant in a given range of volume fractions of the additive.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, диэлектрическая проницаемость, композитный материал, диэлектрик, наполнитель.

Keywords: polytetrafluoroethylene, permittivity, composite material, dielectric, filler.

Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) находит широкое применение в промышленности благодаря своим механическим свойствам и электрофизическим параметрам. Отсутствие явно выраженной частотной и температурной зависимости диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь, а также высокая термостойкость, гидрофобность и химическая инертность стали причиной использования ПТФЭ в качестве матрицы композитных материалов [1]. Для увеличения диэлектрической проницаемости композита в ПТФЭ-матрицу вводят различные простые оксиды [2...4]. Одной из самых распространенных добавок является диоксид титана, диэлектрическая постоянная которого – 80, что позволяет создавать ряд композитных материалов с различной диэлектрической проницаемостью в зависимости от процентного содержания наполнителя в ПТФЭ-матрице.

Описание аналитических моделей

Введение добавок позволяет эффективно управлять электрофизическими параметрами получаемого композита, поэтому основной целью данной работы является оценка адекватности существующих

аналитических моделей для определения оптимального процентного содержания добавки без ухудшения механических свойств. Объектом исследования является композитный материал, в котором размеры частиц керамической добавки близки к размерам частиц ПТФЭ-матрицы.

Существует ряд математических моделей, описывающих зависимость диэлектрической проницаемости композита от процентного содержания добавки. Одним из подходов к аналитическому описанию диэлектрической постоянной композитного материала является теория эффективной среды [5]. Данный метод позволяет определить свойства композитного материала по усредненным по некоторому выделенному объему характеристикам. При этом размеры выделенного объема намного превышают размеры частиц компонентов. Таким образом, макроскопическая неоднородная среда рассматривается как однородная с рядом эффективных параметров.

На теории эффективной среды основываются модели Джаясундере [6] и Максвелла Гарнетта [7]. В первой из них в сплошной среде материала-матрицы находится наполнитель в виде сферических

включений одинакового радиуса. Характерной особенностью данной модели является учет дипольного взаимодействия частиц добавки. В модели Максвелла Гарнетта рассматриваются редкие сферические включения произвольного радиуса. Также существует модификация выражения Максвелла Гарнетта, позволяющая рассматривать различные формы частиц с помощью коэффициентов деполяризации для каждой из трех осей, главным условием является равенство их суммы единице [7].

Качественно иной подход к описанию свойств композитного материала лежит в основе модели эквивалентных емкостей [8]. Двухфазная система представляется периодической структурой элементарных ячеек. Ячейка – это включение с высокой диэлектрической проницаемостью, окруженное материалом-матрицей. Учитывая то, что материалы однородны и изотропны, при приложении электрического поля каждую ячейку можно рассматривать как совокупность эквивалентных параллельных и последовательных плоских конденсаторов. В рамках данной модели могут быть рассмотрены включения различной геометрической формы [8...10]. Наиболее простым является представление включения в виде куба и сферы. Для эллипсоидальных и цилиндрических форм структура ячейки перестает быть изотропной, поэтому значение диэлектрической проницаемости определяется для каждой из трех равноправных осей и усредняется.

Результаты исследования

Для сравнения расчетных электрофизических параметров материала с экспериментальными данными были изготовлены композиты на основе ПТФЕ-матрицы с различным содержанием керамического порошка TiO_2 . Объемная доля диоксида титана в образцах составила 5, 10, 15 и 20 процентов. Дальнейшее увеличение процентного содержания приводило к резкому ухудшению механических свойств образцов и не представляет практического интереса. Измерения проводились методом Николсона-Росса-Вейра. Полученные значения диэлектрической проницаемости на частоте 10 ГГц представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

	5% TiO_2	10% TiO_2	15% TiO_2	20% TiO_2
ϵ	2,15	2,35	2,6	2,8

На рис. 1 показана однородность используемого керамического порошка и преобладание сферической формы частиц.

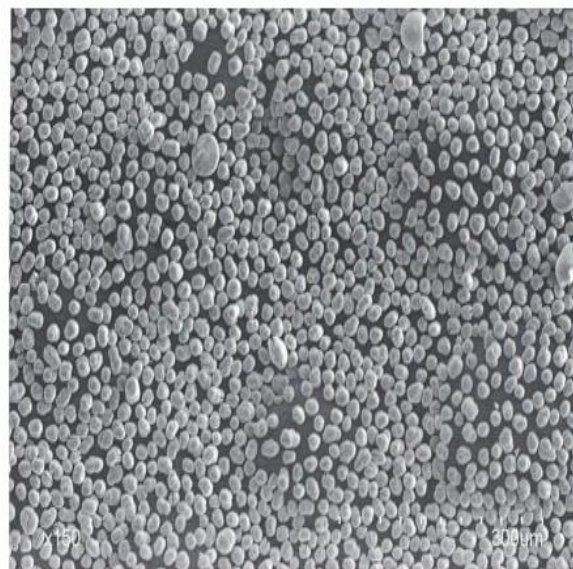


Рис. 1

Результаты расчета величины диэлектрической проницаемости композита ПТФЭ/ TiO_2 в зависимости от процентного содержания наполнителя представлены на рис.2. Наибольшую расхожимость демонстрирует модель Джаясандере. Вероятно, причиной этого является рассматриваемый диапазон малых значений объемной доли диоксида титана в ПТФЭ-матрице. При столь малых объемных долях наполнителя частицы диоксида титана могут находиться на значительном расстоянии друг от друга, что определяет слабое (пренебрежимо малое) взаимодействие между ними. Также высокое расхождение с экспериментальными данными демонстрируют результаты расчета с использованием модели Максвелла Гарнетта несмотря на то, что именно малая концентрация наполнителя является ее основным требованием. На основании этого можно утверждать, что модели, основанные на теории эффективной среды, не эффективны при малом процентном содержании наполнителя.

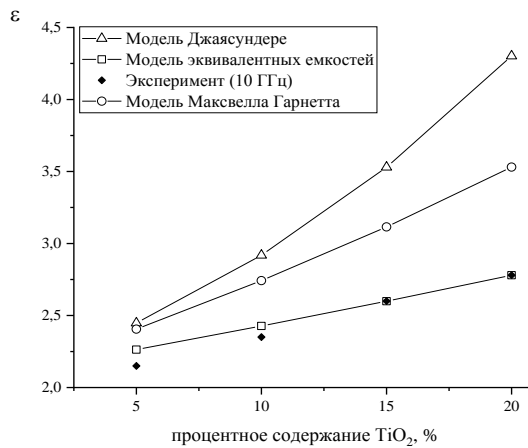


Рис. 2

Наилучшую сходимость с экспериментальными данными демонстрирует модель эквивалентных емкостей.

На рис. 3 представлено сравнение результатов моделирования включений сферической формы по моделям эквивалентных емкостей и Максвелла Гарнетта ($N_x=N_y=N_z=1/3$). Результаты расчета для различных форм представлены на рис.4. Анализ показывает, что изменение формы включений приводит к увеличению расхождения результатов расчетов с экспериментальными данными. Отсюда следует, что выбор сферической формы является оптимальным для определения диэлектрической проницаемости композитного материала, размер частиц керамического наполнителя которого близок к размеру частиц матрицы.

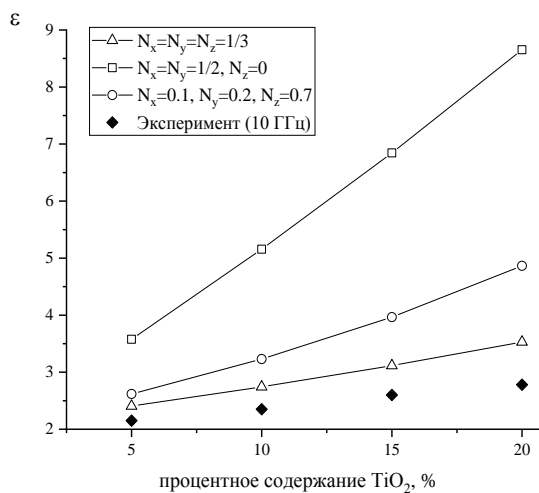


Рис. 3

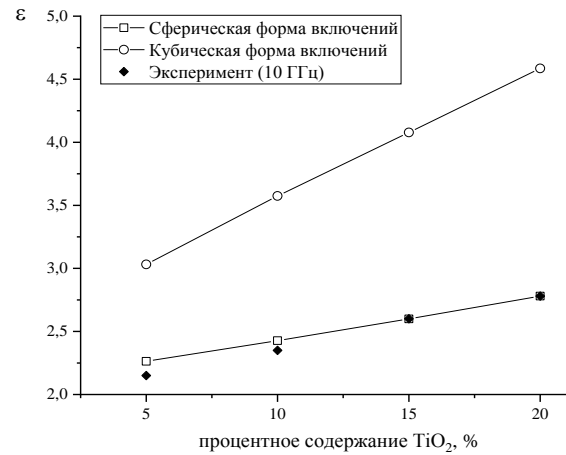


Рис. 4

ВЫВОДЫ

Сравнение результатов моделирования величины диэлектрической проницаемости композитного материала ПТФЭ/TiO₂ в зависимости от процентного содержания наполнителя и экспериментальных данных показало, что применение модели эквивалентных емкостей наиболее корректно по сравнению с моделями, основанными на теории эффективной среды. Для рассматриваемого композита, размеры частиц наполнителя которого близки к размеру частиц ПТФЭ-матрицы, выбор формы включений в виде сферы является наиболее предпочтительным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2018. V. 1. P. 247...268.
2. Anjana P.S. et al. Low dielectric loss PTFE/CeO₂ ceramic composites for microwave substrate applications // *International journal of applied ceramic technology*. 2008. V. 5, № 4. P. 325...333.
3. Murali K.P. et al. Comparison of alumina and magnesia filled PTFE composites for microwave substrate applications // *Materials Chemistry and Physics*. 2009. V. 113, № 1. P. 290...295.
4. Yuan Y. et al. TiO₂ and SiO₂ filled PTFE composites for microwave substrate applications // *Journal of Polymer Research*. 2014. V. 21, № 2. P. 1...6.
5. Rao Y. et al. A precise numerical prediction of effective dielectric constant for polymer ceramic composite based on effective-medium theory // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2000. V. 23, № 4. P. 680...683.

6. *Jayasundere N., Smith B.V.* Dielectric constant for binary piezoelectric 0-3 composites // *Journal of Applied Physics*. 1993. V. 73, №. 5. P. 2462...2466.

7. *Koledintseva M.Y. et al.* Representation of permittivity for multiphase dielectric mixtures in FDTD modeling // 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE Cat. No. 04CH37559). – IEEE, 2004. V. 1. P. 309...314.

8. *Patil S.K. et al.* Prediction of effective permittivity of diphasic dielectrics using an equivalent capacitance model // *Journal of Applied Physics*. 2008. V. 104, №. 7. P. 074108.

9. *Cheng Y. et al.* Study on the dielectric property of composite materials based on electric network // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2010. V. 33, №. 1-2. P. 439...445.

10. *Koledintseva M. Y. et al.* Prediction of effective permittivity of diphasic dielectrics as a function of frequency // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. V. 16, №. 3. P. 793...808.

REFERENCES

1. *Dhanumalayan E., Joshi G.M.* Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2018. V. 1. P. 247...268.

2. *Anjana P.S. et al.* Low dielectric loss PTFE/CeO₂ ceramic composites for microwave substrate applications // *International journal of applied ceramic technology*. 2008. V. 5, №. 4. P. 325...333.

3. *Murali K.P. et al.* Comparison of alumina and magnesia filled PTFE composites for microwave substrate applications // *Materials Chemistry and Physics*. 2009. V. 113, №. 1. P. 290...295.

4. *Yuan Y. et al.* TiO₂ and SiO₂ filled PTFE composites for microwave substrate applications // *Journal of Polymer Research*. 2014. V. 21, №. 2. P. 1...6.

5. *Rao Y. et al.* A precise numerical prediction of effective dielectric constant for polymer ceramic composite based on effective-medium theory // *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2000. V. 23, №. 4. P. 680...683.

6. *Jayasundere N., Smith B.V.* Dielectric constant for binary piezoelectric 0-3 composites // *Journal of Applied Physics*. 1993. V. 73, №. 5. P. 2462...2466.

7. *Koledintseva M.Y. et al.* Representation of permittivity for multiphase dielectric mixtures in FDTD modeling // 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE Cat. No. 04CH37559). – IEEE, 2004. V. 1. P. 309...314.

8. *Patil S.K. et al.* Prediction of effective permittivity of diphasic dielectrics using an equivalent capacitance model // *Journal of Applied Physics*. 2008. V. 104, №. 7. P. 074108.

9. *Cheng Y. et al.* Study on the dielectric property of composite materials based on electric network // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2010. V. 33, №. 1-2. P. 439...445.

10. *Koledintseva M.Y. et al.* Prediction of effective permittivity of diphasic dielectrics as a function of frequency // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. V. 16, №. 3. P. 793...808.

Рекомендована оргкомитетом XIX Международной научно-практической конференции «Новые полимерные композиционные материалы». Поступила 01.12.23.