

Исследование свойств композитного материала для СВЧ-применений на основе PTFE с различной концентрацией и размером частиц керамического наполнителя

А. Б. Козырев, А. Е. Комлев[✉], А. М. Сосунов, А. Г. Алтынников, Р. А. Платонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ aekomlev@etu.ru

Аннотация

Введение. Технология печатных плат является наиболее распространенной в современном электронном приборостроении. Платы для СВЧ-диапазона частот изготавливаются на основе фольгированных композитных материалов, в частности на основе политетрафторэтилена. В данный момент отечественное производство подобного класса материалов отсутствует. Информация, касающаяся зарубежной технологии изготовления композитного материала и влияния наполнителя на его характеристики, является закрытой. Поэтому актуальной задачей является поиск и исследование свойств композитных материалов для СВЧ-применения со свойствами, аналогичными зарубежным аналогам.

Цель работы. Экспериментальное определение зависимости электрических и механических свойств композитного материала на основе политетрафторэтилена от концентрации и размера фракции диоксида титана.

Материалы и методы. Механические свойства образцов композитного материала измерялись методом гидростатического взвешивания. Исследовались прочность и относительное удлинение при разрыве с помощью разрывной машины РМИ-250. СВЧ-параметры определялись с помощью метода Николсона–Росса–Вейра.

Результаты. Представлены результаты экспериментального исследования механических свойств и СВЧ-параметров экспериментальных образцов композитного материала на основе политетрафторэтилена: с 10 %-м содержанием керамических порошков диоксида титана (размер фракции 10, 49 и 126 мкм); с 5, 10 и 15 %-м содержанием керамического порошка диоксида титана (размер фракций у политетрафторэтилена – 49 мкм и у диоксида титана – 126 мкм).

Заключение. Результаты демонстрируют перспективность применения композиций на основе PTFE и порошка диоксида титана в качестве основы для СВЧ-материалов. Установлена корреляция между процентным содержанием вводимого керамического наполнителя и СВЧ-параметрами материала. Исследования продемонстрировали незначительное отличие в СВЧ-свойствах изготовленных образцов композитного материала при различном соотношении между размерами частиц диоксида титана и PTFE. Однако при этом наблюдается значительное снижение их механических свойств.

Ключевые слова: СВЧ-материалы, диэлектрический композит, политетрафторэтилен, диоксид титана

Для цитирования: Исследование свойств композитного материала для СВЧ-применений на основе PTFE с различной концентрацией и размером частиц керамического наполнителя / А. Б. Козырев, А. Е. Комлев, А. М. Сосунов, А. Г. Алтынников, Р. А. Платонов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 2. С. 16–24. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-16-24

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 075-01438-22-07 от 28.10.2022 г. (FSEE-2022-0019).

Статья поступила в редакцию 28.09.2022; принята к публикации после рецензирования 24.10.2022; опубликована онлайн 28.04.2023

Research into the Properties of a Composite Material for Microwave Applications Based on PTFE with Different Concentrations and Particle Sizes of Ceramic Filler

Andrey B. Kozyrev, Andrey E. Komlev✉, Alexey M. Sosunov,
Andrey G. Altynnikov, Roman A. Platonov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ aekomlev@etu.ru

Abstract

Introduction. The technology of printed circuit boards (PCBs) is widely used in modern electronic instrumentation. PCBs for the microwave frequency range are made based on foil composite materials, in particular, polytetrafluoroethylene (PTFE). At the moment, there is no domestic production of such a class of materials. Information concerning foreign manufacturing technologies in this field and the influence of the filler on the characteristics of the composite material remains confidential. Therefore, research into the properties of composite materials for microwave applications with properties similar to foreign analogues seems relevant.

Aim. Experimental determination of the dependence of the electrical and mechanical properties of a composite material based on polytetrafluoroethylene depending on the concentration and size of the titanium dioxide fraction.

Materials and methods. Experimental determination of the dependence of the electrical and mechanical properties of a composite material based on PTFE depending on the concentration and size of the titanium dioxide fraction.

Results. The results of an experimental study of the mechanical properties and microwave parameters of experimental samples of composite material based on PTFE are presented, namely: composite material with 10 % content of ceramic titanium dioxide powders (fraction size 10, 49 and 126 μm); composite material with 5, 10 and 15 % content of ceramic titanium dioxide powder (fraction size 49 μm for polytetrafluoroethylene and 126 μm for titanium dioxide).

Conclusion. The results obtained demonstrate prospects for using compositions based on PTFE and titanium dioxide powder as a basis for microwave materials. A correlation was established between the percentage of the introduced ceramic filler and the microwave parameters of the material. The studies demonstrated a slight difference in the microwave properties of the manufactured composite material samples with a different ratio between the particle sizes of titanium dioxide and PTFE. However, a significant decrease in their mechanical properties was observed.

Keywords: microwave materials, dielectric composite, polytetrafluoroethylene, titanium dioxide

For citation: Kozyrev A. B., Komlev A. E., Sosunov A. M., Altynnikov A. G., Platonov R. A. Research into the Properties of a Composite Material for Microwave Applications Based on PTFE with Different Concentrations and Particle Sizes of Ceramic Filler. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 16–24. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-2-16-24

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The study was carried out within the framework of the state assignment No. 075-01438-22-07 of 28.10.2022 (FSEE-2022-0019).

Submitted 28.09.2022; accepted 24.10.2022; published online 28.04.2023

Введение. В настоящее время диэлектрические материалы находят широкое применение в различных областях науки и техники [1–3]. В частности, композиционные диэлектрические материалы являются одним из базовых материалов в микроэлектронике [4–7]. Фольгированные диэлектрические ламинаты (ФДЛ) с заданными электрофизическими параметрами (в частности, диэлектрическая постоянная (ϵ_r), тангенс

угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), проводимость металлизированной поверхности и т. д.) широко используются в технологии печатных плат при производстве различных СВЧ-устройств, что делает их доступность одним из факторов, определяющих состояние всей отрасли производства СВЧ-электроники в целом. Большая часть ФДЛ, доступных на мировом рынке, изготавливается на основе политет-

рафторэтилена (фторопласт-4, PTFE). Благодаря высокой температуре плавления PTFE, а также низкому значению $\text{tg } \delta$ в широком частотном диапазоне большая часть ФДЛ, доступных на мировом рынке, изготавливается на его основе [8–10]. Подтверждением этому является широкий выбор СВЧ-ламинатов, выпускаемых компаниями Rogers Inc. и Taconic, являющимися крупнейшими производителями данного класса продуктов. Изменение величины ϵ_r композитных материалов осуществляется введением керамических порошков с более высоким значением диэлектрической постоянной. Однако это приводит к изменению не только величины ϵ_r , но и уровня потерь в частотном диапазоне, а также к уменьшению механической прочности материалов [11, 12]. Одним из способов улучшения механических характеристик ФДЛ является армирование материала стеклотканью, однако это может привести к неравномерности свойств материала по площади пластин ламината, что может негативно сказаться на СВЧ-характеристиках плат на их основе, особенно на частотах выше 30 ГГц [13].

Существует целый спектр коммерчески доступных ФДЛ с определенным набором таких параметров, как диэлектрическая постоянная, толщина диэлектрика и толщина металлизации. Однако не всегда материал с требуемыми параметрами является доступным. В этом случае возникает необходимость изготовления ограниченной партии ФДЛ под конкретные технические задачи. Однако закрытость информации, касающейся технологии изготовления и влияния материала наполнителя, его концентрации, размера фракции на электрофизические и механические характеристики получаемого композитного материала, делает решение данной задачи крайне затруднительным. В данной работе проведено исследование свойств композитного материала на основе PTFE с добавками порошков TiO_2 (кристаллическая структура анатаз) различной концентрации и размера фракций. Установлено влияние размера фракций керамического порошка на электрофизические параметры и механические свойства композитного материала. Представлены результаты исследования диэлектрической постоянной и

уровня диэлектрических потерь в X-диапазоне частот, а также данные о плотности и механической прочности полученных материалов.

Методики исследования свойств материалов. Методика исследования механических свойств. Для определения удельной плотности образцов композитных материалов из изготовленной пластины вырезались два диска диаметром 25 мм. Плотность измерялась методом гидростатического взвешивания при помощи весов-плотномеров AX-504 Меттлер Толедо. После чего рассчитывалось среднее значение для двух образцов.

Для определения прочности и относительного удлинения при разрыве из пластины материала вырезались образцы-лопатки типа 1 по ГОСТ 11262. Испытания проводились при помощи разрывной машины РМИ-250, со шкалой силоизмерителя до 2450 Н (250 кгс) на трех образцах, при температуре окружающего воздуха 23 ± 2 °С, со скоростью подвижного захвата 100 мм/мин.

Методика исследования СВЧ-параметров. Для определения диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь исследуемых композитных материалов использовался измерительный стенд на основе ВАЦ Планар Кобальт С4420 и волноводной линии передачи (рис. 1).

Образец исследуемого материала помещался в волноводную линию передачи, после чего происходило измерение S-параметров в диапазоне частот 8...12 ГГц. Далее пересчет эксперимен-

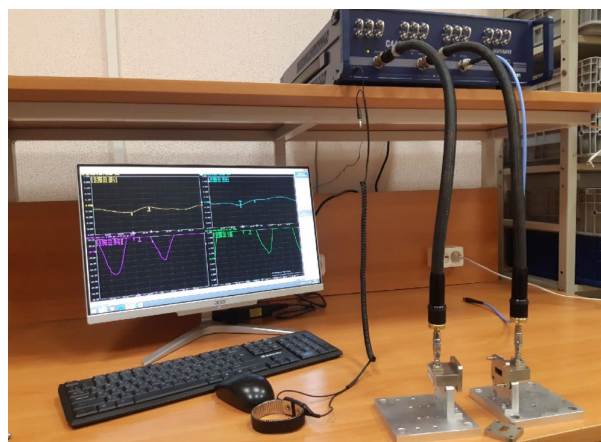


Рис. 1. Измерительный стенд на основе ВАЦ Планар Кобальт С4420 и волноводной линии передачи

Fig. 1. Measuring setup based on VNA Planar Cobalt C4420 and waveguide transmission line

тально полученных данных в искомые электрофизические параметры выполнялся с помощью метода Николсона–Росса–Вейра [14, 15].

Первым шагом являлось определение коэффициента отражения:

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1},$$

где $K = (S_{11}^2 + S_{21}^2 + 1) / (2S_{11})$.

Следующим шагом вычисляется значение коэффициента передачи по формуле

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma}.$$

Магнитная проницаемость вычисляется согласно выражению

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}},$$

где Λ – параметр, зависящий от размеров исследуемого образца; λ_0 – длина волны в свободном пространстве; λ_c – критическая длина волны в волноводе.

После этого диэлектрическая проницаемость определялась из выражения

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\mu_r \epsilon_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2,$$

где L – длина исследуемого образца; ϵ_r – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Результаты исследования. Первая серия экспериментальных образцов представляла собою композиционный материал на основе PTFE Ф-4ТМ25 с 10 %-м содержанием TiO_2 . Экспериментальные образцы материала, представляющие собою пластины толщиной 1 мм, были изготовлены методом блочной технологии. Композиция Ф-4ТМ25 и наполнителя подготавливалась на лабораторном смесителе. Смешивание компонентов происходило при комнатной температуре после предварительного захлаживания порошков до температуры 253 К. Средний размер частиц порошка PTFE составлял 22 мкм, в то время как у TiO_2 он

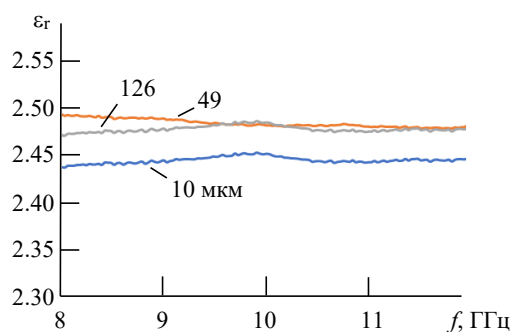


Рис. 2. Частотная зависимость диэлектрической постоянной исследуемого композитного материала при различном размере фракций TiO_2

Fig. 2. Frequency dependence of the dielectric constant of the studied composite material at different sizes of TiO_2 fractions

равнялся 10, 49 и 126 мкм. Результаты экспериментальных исследований зависимости диэлектрической постоянной образцов от частоты приведены на рис. 2. Как видно из приведенных зависимостей, значение диэлектрической постоянной для изготовленных образцов находится в диапазоне 2.44...2.48. Минимальное значение диэлектрической постоянной соответствует композитному материалу, изготовленному с использованием порошка TiO_2 с размером частиц 10 мкм. Оставшиеся два образца, несмотря на высокую разницу в размере частиц (49 и 126 мкм), используемых при изготовлении композита порошков, показывают практически идентичные результаты по значению ϵ_r . Значение тангенса угла диэлектрических потерь для всех трех материалов не превышает 0.002 в исследуемом частотном диапазоне.

В отличие от СВЧ-параметров в механических свойствах исследуемых материалов наблюдается существенная разница (табл. 1). Из приведенных данных видно, что увеличение размера фракции керамического наполнителя значительно снижает прочность материала. Однако несмотря на это, материал однороден по своей текстуре и обладает достаточно высокой прочностью для применения при производстве СВЧ-плат.

Ввиду незначительного отличия СВЧ-параметров изготовленных образцов, наибольший интерес, по мнению авторов, представляет исследование композитного материала с максимальным отличием размеров фракций PTFE и керамического наполнителя. Результаты исследования гранулометрического состава по-

Табл. 1. Механические свойства исследуемых материалов

Tab. 1. Mechanical properties of the studied materials

№	Средний размер частиц TiO ₂ , мкм	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %
1	10	2.254	30.8	330
2	49	2.230	27.7	307
3	126	2.190	15.9	200

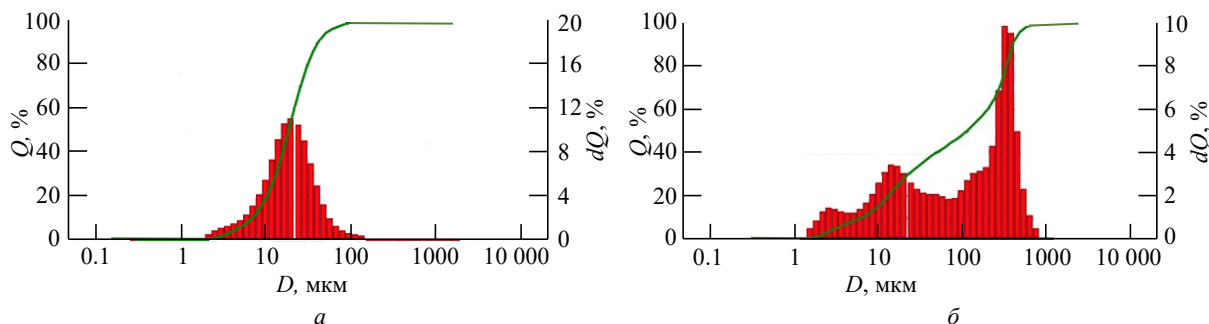


Рис. 3. Результаты анализа гранулометрического состава порошков PTFE (а) и TiO₂ (б): $Q(D)$ – интегральный гранулометрический состав; $dQ(D)$ – дифференциальный гранулометрический состав

Fig. 3. Granulometric composition of PTFE (a) and TiO₂ (b) powders: powders $Q(D)$ – integral granulometric composition; $dQ(D)$ – differential particle size distribution

рошков Ф-4ТМ25 и TiO₂, использованных для изготовления опытных образцов, приведены на рис. 3. Содержание керамического наполнителя в образцах составляло 5, 10 и 15 %.

Результаты измерения диэлектрической постоянной изготовленных образцов приведены на рис. 4. Из приведенных данных видно, что значение диэлектрической постоянной увеличивается от 2.2 до 2.9 с ростом процентного содержания TiO₂ в композитном материале. Значение тангенса угла диэлектрических потерь для всех трех материалов не превышает 0.003 в исследуемом частотном диапазоне.

Результаты исследования механических свойств экспериментальных образцов композитных материалов приведены в табл. 2. Установлено, что при увеличении процентного содержания керамических добавок в композитном материале наблюдается ухудшение механической прочности материала. В частности, при высоких уровнях механического воздей-

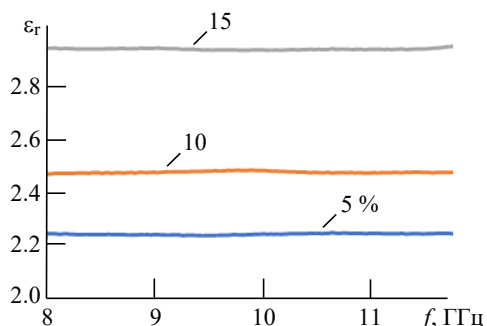


Рис. 4. Частотная зависимость диэлектрической постоянной исследуемого композитного материала при различном процентном содержании TiO₂

Fig. 4. Frequency dependence of the dielectric constant of the studied composite material at different percentages of TiO₂

ствия на материал с максимальным содержанием TiO₂ наблюдалось его частичное расслоение. Однако измеренная механическая прочность материала (более 13 МПа) позволяет рассматривать возможность применения композитного материала со столь высокой разницей в размере фракций порошков для использования

Табл. 2. Механические свойства исследуемых материалов

Tab. 2. Mechanical properties of the studied materials

№	Средний размер частиц TiO ₂ в композите, %	Плотность, г/см ³	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %
1	5	2.19	19.1	250
2	10	2.19	15.9	200
3	115	2.19	13.7	150

в технологии изготовления СВЧ-плат. Дальнейшее увеличение процентного содержания керамического наполнителя потребует использования других технологий изготовления композитного материала (на основе лакотканей или каландрированной ленты).

Выводы. Результаты проведенного исследования демонстрируют возможность применения композиций на основе PTFE и порошка диоксида титана в качестве основы для СВЧ-материалов (в том числе металлизированных) с заданными электрофизическими свойствами. Установлена корреляция между процентным содержанием

вводимого керамического наполнителя и СВЧ-параметров материала. При увеличении концентрации диоксида титана в диапазоне 0...15 % значение диэлектрической постоянной изменяется от 2 до 2.9. Материалы с таким значением диэлектрической постоянной высоко востребованы в СВЧ-технике. Исследования продемонстрировали незначительное отличие в СВЧ-свойствах изготовленных образцов композитного материала при различном увеличении соотношения между размерами частиц диоксида титана и PTFE. Однако при этом наблюдается значительное снижение их механических свойств.

Авторский вклад

Козырев Андрей Борисович – общее руководство исследованием; постановка задач; редактирование статьи.

Комлев Андрей Евгеньевич – изготовление экспериментальных образцов материала; обработка результатов экспериментов по механическим свойствам материала; написание текста статьи.

Сосунов Алексей Михайлович – проведение измерений механических свойств материала.

Алтынников Андрей Геннадиевич – обработка результатов экспериментов по электрическим свойствам материала; написание текста статьи.

Платонов Роман Андреевич – проведение измерений электрических свойств материала.

Author's contribution

Andrey B. Kozyrev, general management of the research; setting tasks; editing the article.

Andrey E. Komlev, production of experimental samples of the material; processing of the results of experiments on the mechanical properties of the material; writing the text of the article.

Alexey M. Sosunov, carrying out measurements of the mechanical properties of the material.

Andrey G. Altynnikov, processing the results of experiments on the electrical properties of the material; writing the text of the article.

Roman A. Platonov, carrying out measurements of the electrical properties of the material.

Список литературы

1. Recent advances in lead-free dielectric materials for energy storage / K. Zou, Y. Dan, H. Xu, Q. Zhang, Y. Lu, H. Huang, Y. He // *Materials Research Bulletin*. 2019. Vol. 113. P. 190–201. doi: 10.1016/j.materresbull.2019.02.002

2. Flexible and transparent capacitive pressure sensor with patterned microstructured composite rubber dielectric for wearable touch keyboard application / R. Shi, Zh. Lou, Sh. Chen, G. Shen // *Science China Materials*. 2018. Vol. 61, № 12. P. 1587–1595.

3. Research progress of high dielectric constant zirconia-based materials for gate dielectric application / J. Xie, Zh. Zhu, H. Tao, Sh. Zhou, Zh. Liang, Zh. Li, R. Yao, Y. Wang, H. Ning, J. Peng // *Coatings*. 2020. Vol. 10, № 7. P. 698. doi: 10.3390/coatings10070698

4. Microwave composite dielectrics based on magnesium titanates / A. G. Belous, O. Ovchar, D. Durylin, M. Valant // *J. of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27, № 8–9. P. 2963–2966. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.11.022

5. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃/ABS polymer composites / F. Castles,

D. Isakov, A. Lui, Q. Lei, C. E. J. Dancer, Y. Wang, J. M. Janurudin, S. C. Speller, C. R. M. Grovenor, P. S. Grant // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, № 1. P. 1–8. doi: 10.1038/srep22714

6. High-performance microwave dielectric composite ceramics sintered at low temperature without sintering-aids / R. Peng, Y. Li, Y. Lu, Y. Yun, W. Du, Zh. Tao, B. Liao // *J. of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 831. P. 154878. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154878

7. Electromagnonic crystals based on ferrite–ferroelectric–ferrite multilayers / A. A. Nikitin, A. A. Nikitin, I. L. Mylnikov, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2020. Vol. 14, № 12. P. 1304–1309. doi: 10.1049/iet-map.2020.0162

8. Multilayer RF PCB for space applications: technological and interconnections trade-off / M. Paillard, F. Bodereau, C. Drevon, P. Monfraix, J. L. Cazaux, L. Bodin, P. Guyon // *European Microwave Conf*. 2005. Vol. 3. P. 1642. doi: 10.1109/EUMC.2005.1610270

9. Ye Y., Guo T. L. Hole metallisation technology for microwave printed circuit board // *Transactions of*

the IMF. 2009. Vol. 87, № 4. P. 217–220. doi: 10.1179/174591909X438866

10. Broadband Dielectric Characterization of High-Permittivity Rogers Substrates via Terahertz Time-Domain Spectroscopy in Reflection Mode / W. Fuscaldo, F. Maita, L. Maiolo, R. Beccherelli, D. C. Zografopoulos // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, № 16. P. 8259. doi: 10.3390/app12168259

11. Novel high dielectric constant and low loss PTFE/CNT composites / H. Peng, H. Ren, M. Dang, Y. Zhang, X. Yao, H. Lin // Ceramics International. 2018. Vol. 44, № 14. P. 16556–16560. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.06.077

12. Yuan Y., Zhang S. R., Zhou Z. H. MgTiO₃ filled PTFE composites for microwave substrate applications // Materials Chemistry and Physics. 2013. Vol. 141, № 1. P. 175–179. doi: 10.1016/j.matchemphys.2013.04.043

13. Mechanical properties, crystallization characteristics, and foaming behavior of polytetrafluoroethylene-reinforced poly (lactic acid) composites / A. Huang, H. Kharbas, T. Ellingham, H. Mi, L. Sh. Turg, X. Peng // Polymer Engineering & Science. 2017. Vol. 57, № 5. P. 570–580. doi: 10.1002/pen.24454

14. Luukkonen O., Maslovski S. I., Tretyakov S. A. A stepwise Nicolson–Ross–Weir-based material parameter extraction method // IEEE Antennas and Wireless Propagation Let. 2011. Vol. 10. P. 1295–1298. doi: 10.1109/LAWP.2011.2175897

15. Analysis of the Nicolson–Ross–Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials / E. J. Rothwell, J. L. Fransch, S. M. Ellison, P. Chahal, R. O. Ouedraogo // Progress In Electromagnetics Research. 2016. Vol. 157. P. 31–47. doi: 10.2528/PIER16071706

Информация об авторах

Козырев Андрей Борисович – доктор технических наук (1990), профессор (1992) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – сверхпроводимость, сегнетоэлектричество, ионно-плазменная технология, устройства СВЧ, антенны. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия. E-mail: abkozyrev@etu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5859-9621>

Комлев Андрей Евгеньевич – кандидат технических наук (2011), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – технология материалов электронной техники, плазма. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия. E-mail: aekomlev@etu.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

Сосунов Алексей Михайлович – магистр по специальности "Электроника и наноэлектроника" (2020), аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 7 научных работ. Сфера научных интересов – устройства СВЧ, методики измерения СВЧ-параметров. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия. E-mail: amsosunov@stud.eltech.ru

Алтынников Андрей Геннадиевич – кандидат технических наук (2010), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 68 научных работ. Сфера научных интересов – нелинейные материалы, устройства СВЧ, антенны, тонкие пленки. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия. E-mail: agaltynnikov@etu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

Платонов Роман Андреевич – кандидат технических наук (2018), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 47 научных работ. Сфера научных интересов – электродинамика, устройства СВЧ, антенны. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия. E-mail: raplatonov@etu.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>

References

1. Zou K., Dan Y., Xu H., Zhang Q., Lu Y., Huang H., He Y. Recent Advances in Lead-Free Dielectric Materials for Energy Storage. *Materials Research Bulletin*. 2019, vol. 113, pp. 190–201. doi: 10.1016/j.materresbull.2019.02.002
2. Shi R., Lou Zh., Chen Sh., Shen G. Flexible and Transparent Capacitive Pressure Sensor with Patterned Microstructured Composite Rubber Dielectric for Wearable Touch Keyboard Application. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 12, pp. 1587–1595.
3. Xie J., Zhu Zh., Tao H., Zhou Sh., Liang Zh., Li Zh., Yao R., Wang Y., Ning H., Peng J. Research Progress of High Dielectric Constant Zirconia-Based Materials for Gate Dielectric Application. *Coatings*. 2020, vol. 10, no. 7, p. 698. doi: 10.3390/coatings10070698
4. Belous A. G., Ovchar O., Durylin D., Valant M. Microwave Composite Dielectrics Based on Magnesium Titanates. *J. of the European Ceramic Society*. 2007, vol. 27, no. 8–9, pp. 2963–2966. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.11.022
5. Castles F., Isakov D., Lui A., Lei Q., Dancer C. E. J., Wang Y., Janurudin J. M., Speller S. C., Grovenor C. R. M., Grant P. S. Microwave Dielectric Characterisation of 3D-Printed BaTiO₃/ABS Polymer Composites. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–8. doi: 10.1038/srep22714
6. Peng R., Li Y., Lu Y., Yun Y., Du W., Tao Zh., Liao B. High-Performance Microwave Dielectric Composite Ceramics Sintered at Low Temperature without Sintering-Aids. *J. of Alloys and Compounds*. 2020, vol. 831, p. 154878. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154878
7. Nikitin A. A., Nikitin A. A., Mylnikov I. L., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Electromagnonic Crystals Based on Ferrite–Ferroelectric–Ferrite Multilayers. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2020, vol. 14, no. 12, pp. 1304–1309. doi: 10.1049/iet-map.2020.0162
8. Paillard M., Bodereau F., Drevon C., Monfraix P., Cazaux J. L., Bodin L., Guyon P. Multilayer RF PCB for Space Applications: Technological and Interconnections Trade-Off. *European Microwave Conf. 2005*, vol. 3, p. 1642. doi: 10.1109/EUMC.2005.1610270
9. Ye Y., Guo T. L. Hole Metallisation Technology for Microwave Printed Circuit Board. *Transactions of the IMF*. 2009, vol. 87, no. 4, pp. 217–220. doi: 10.1179/174591909X438866
10. Fuscaldo W., Maita F., Maiolo L., Beccherelli R., Zografopoulos D. C. Broadband Dielectric Characterization of High-Permittivity Rogers Substrates via Terahertz Time-Domain Spectroscopy in Reflection Mode. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 16, p. 8259. doi: 10.3390/app12168259
11. Peng H., Ren H., Dang M., Zhang Y., Yao X., Lin H. Novel High Dielectric Constant and Low Loss PTFE/CNT Composites. *Ceramics International*. 2018, vol. 44, no. 14, pp. 16556–16560. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.06.077
12. Yuan Y., Zhang S. R., Zhou Z. H. MgTiO₃ filled PTFE Composites for Microwave Substrate Applications. *Materials Chemistry and Physics*. 2013, vol. 141, no. 1, pp. 175–179. doi: 10.1016/j.matchemphys.2013.04.043
13. Huang A., Kharbas H., Ellingham T., Mi H., Turng L. Sh., Peng X. Mechanical Properties, Crystallization Characteristics, and Foaming Behavior of Polytetrafluoroethylene-Reinforced Poly (Lactic Acid) Composites. *Polymer Engineering & Science*. 2017, vol. 57, no. 5, pp. 570–580. doi: 10.1002/pen.24454
14. Luukkonen O., Maslovski S. I., Tretyakov S. A. A Stepwise Nicolson–Ross–Weir-based Material Parameter Extraction Method. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Let.* 2011, vol. 10, pp. 1295–1298. doi: 10.1109/LAWP.2011.2175897
15. Rothwell E. J., Frasch J. L., Ellison S. M., Chahal P., Ouedraogo R. O. Analysis of the Nicolson–Ross–Weir Method for Characterizing the Electromagnetic Properties of Engineered Materials. *Progress in Electromagnetics Research*. 2016, vol. 157, pp. 31–47. doi: 10.2528/PIER16071706

Information about the authors

Andrey B. Kozyrev, Dr Sci. (Eng.) (1990), Professor (1992) of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: superconductivity, ferroelectricity, ion-plasma technology, microwave devices, antennas. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: abkozyrev@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5859-9621>

Andrey E. Komlev, Cand. Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: technology of electronic equipment materials, plasma. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aekomlev@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1017-5587>

Alexey M. Sosunov, Master in Electronics and Nanoelectronics (2020), Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 7 scientific publications. Area of expertise: microwave devices, methods of measuring microwave parameters.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: amsosunov@stud.eltech.ru

Andrey G. Altynnikov, Cand. Sci. (Eng.) (2010), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 68 scientific publications. Area of expertise: nonlinear materials, microwave devices, antennas, thin films.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: agaltynnikov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5932-2504>

Roman A. Platonov, Cand. Sci. (Eng.) (2018), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 47 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics, microwave devices, antennas.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: raplatonov@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4556-629X>
