

Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость пластиков в СВЧ диапазоне

А.А. Андреев, Е.А. Рябов, И.В. Хайрушев, Б.В. Сергеева, С.А. Сергеев

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: В данной работе изучены характеристики пластиков, применяемых в FDM технологии 3D-печати, в диапазоне температур $20 \div 105$ °С. Исследовано влияние температуры на диэлектрическую проницаемость пластика. Показано, что рост температуры в большей степени влияет на усадку пластиков, чем на диэлектрическую проницаемость.

Ключевые слова: FDTD, прямоугольный волновод, СВЧ излучение, OpenEMS, 3D-печать

1. Введение

В настоящее время благодаря разнообразию материалов, низкой стоимости, доступности и простоте 3D-печати стало проще, чем когда-либо, создавать функциональные, красивые и высокоэффективные модели и прототипы. Изучение электромагнитных свойств материалов, используемых в технологии 3D-печати, дает новые конструктивные возможности, в частности, для создания фотонных кристаллов. Ведутся исследования изготовления структур с использованием технологии 3D-печати, например, при создании метаматериалов, фотонных кристаллов и антенн в микроволновом диапазоне [1 – 16], при реализации инновационных 3D-оптических устройств, сформированных путем слияния метаматериалов с геометрической оптикой (MEGO) [17]. Данные материалы также планируется использовать при изготовлении кювет для исследования характеристик жидких коллоидов микро- и наночастиц различной природы в СВЧ диапазоне [18 – 21], а также в учебном процессе в Саратовском государственном университете [22 – 25].

В данной работе было исследовано влияние температуры на диэлектрическую проницаемость различных пластиков в температурном диапазоне $20 \div 105$ °С.

2. Изготовление структур и методика проведения измерений

3D-печать, являясь аддитивной технологией, основана на поэтапном наращивании слоев, отображающих контуры объекта. Существуют различные способы изготовления конструкций объектов. В данной работе применялась FDM-технология (технология физического моделирования методом послойного наплавления), при которой происходит плавление термопластичной нити и последующее нанесение каждого очередного слоя. Объекты были изготовлены на 3D-принтере с кинематикой CoreXY и диаметром сопла 0,4 мм, использовались пластиковые нити диаметром 1,75 мм.

В качестве исследуемых материалов были выбраны следующие пластики: PETG (полиэтилентерефталат-гликоль), ABS (акрилонитрил бутадиен стирол), SBS (стирол-бутадиен-стирольный каучук), HIPS (ударопрочный полистирол), PLA (полимолочная кислота), композитные PLA с добавлением флуоресцентного компонента (F-PLA), с добавлением 30 % меди (PLA-Copper) и с добавлением 30 % алюминия (PLA-Aluminium).

Изготовленные образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов длиной 30 мм и сечением 23×10 мм² для полного заполнения сечения прямоугольного

волновода в 3-сантиметровом диапазоне (X-диапазоне). На внешних стенках волновода, в месте расположения образца, были расположены нагревательные элементы с датчиком температуры. Для предотвращения рассеяния тепла поверхностью волновода использовался слой теплоизоляционного материала. Измерения коэффициентов отражения и пропускания проводились с использованием панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61 в частотном диапазоне $8 \div 12$ ГГц. Результаты измерений записывались с помощью Arduino MEGA на карту памяти [26 – 29]. Схема измерительной установки представлена на рисунке 1, собранная установка представлена на рисунке 2.

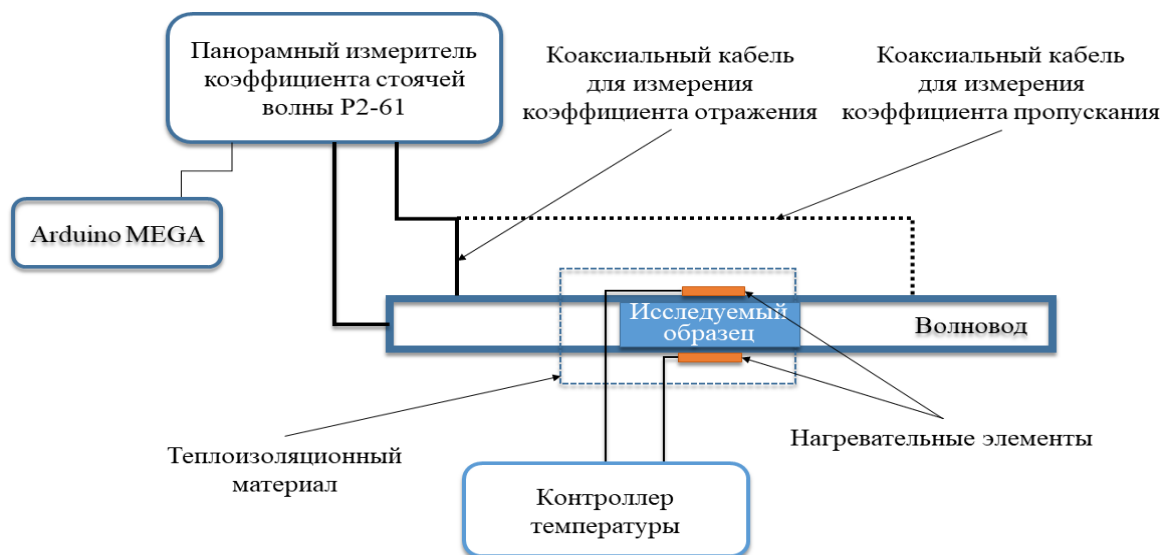


Рисунок 1. Схема измерительной установки.

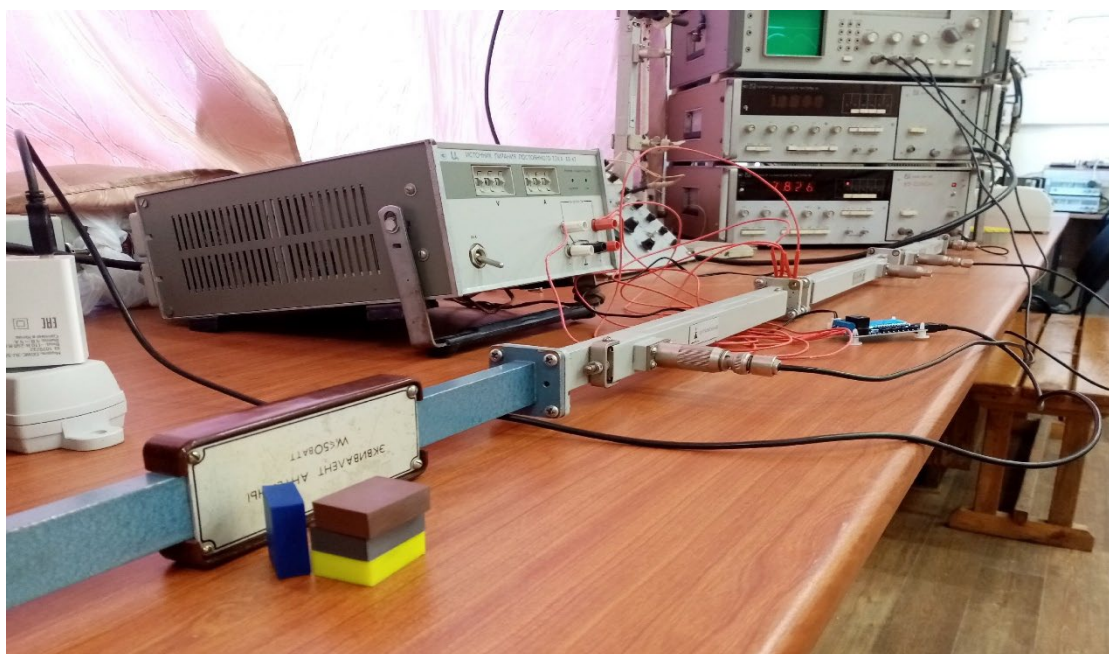


Рисунок 2. Установка для проведения измерений.

3. Обработка полученных результатов измерений

Проведено численное моделирование с использованием программного пакета OpenEMS, в основе которого лежит метод конечных разностей во временной области (FDTD) [30 – 31]. Были рассчитаны характеристики коэффициентов отражения и пропускания образца из пластика с диэлектрической проницаемостью в диапазоне $1,00 \div 5,00$ с шагом 0,01.

Для определения диэлектрической проницаемости материалов проведено обучение классификатора SVM (машина опорных векторов) на данных, полученных в результате моделирования в OpenEMS с использованием языка Python и библиотеки для машинного обучения scikit-learn. Результаты определения диэлектрической проницаемости представлены на рисунках 3 – 4. Сравнение полученных в данной работе диэлектрических проницаемостей пластиков демонстрирует схожесть значений с результатами других работ [10 – 16, 32 – 35].

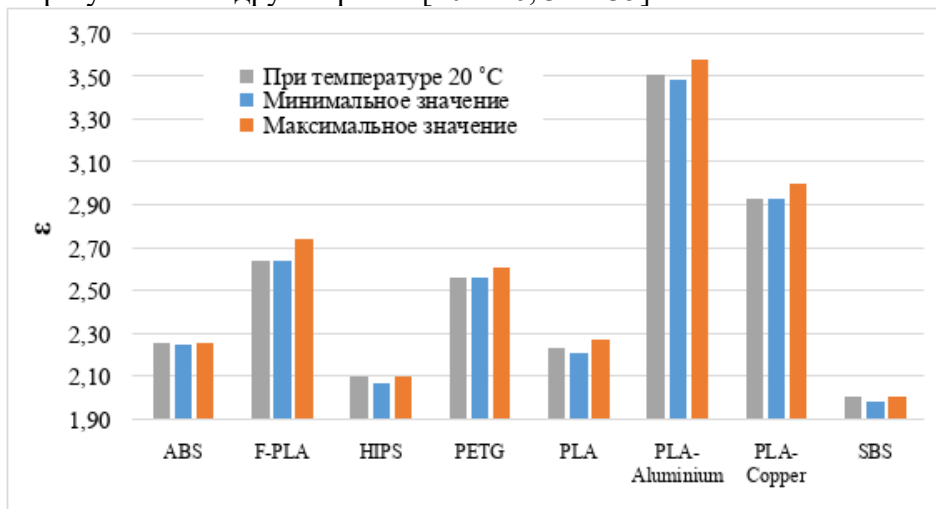


Рисунок 3. Диэлектрическая проницаемость пластиков.

Все пластики обладают усадкой, что необходимо учитывать при проектировании изделий из них.

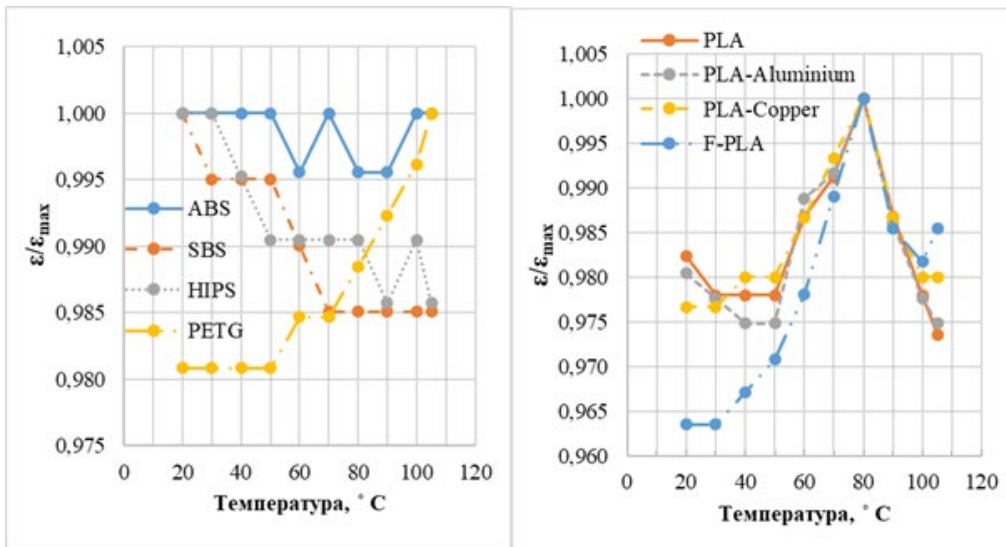


Рисунок 4. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости пластиков.

Из выбранных для проведения исследования пластиков лучший результат у ABS: при увеличении температуры усадка образца была минимальная, что говорит о малом изменении диэлектрической проницаемости и меньшей необходимости контроля за

изменением геометрии образца. Образец из пластика PETG также показал минимальную усадку при увеличении температуры, но его диэлектрическая проницаемость увеличилась на 2 %. Проанализировать изменение диэлектрической проницаемости остальных образцов пластиков затруднительно, так как усадка образцов из них была значительной, что сильно влияет на геометрию образца.

4. Заключение

В данной работе были изучены температурные зависимости пластиков для 3D-печати FDM-технологией, применяемых в X-диапазоне частот. Основной причиной изменения характеристик образцов является усадка пластика при увеличении температуры. Максимальное изменение диэлектрической проницаемости от температуры, равное 3,5 %, наблюдалось у PLA пластика, что в большей степени связано с изменением геометрии образца с ростом температуры. Лучшим результат показал в данной работе ABS: изменение геометрии образца из данного материала в X-диапазоне частот незначительно, а изменение диэлектрической проницаемости с ростом температуры составило 0,44 %.

Список литературы

1. Garcia C. R. et al. 3D printing of anisotropic metamaterials // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. – 2012. – V. 34. – P. 75-82.
2. Wang T., Lu X., Wang A. A review: 3D printing of microwave absorption ceramics // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. – 2020. – V. 17. – Is. 6. – P. 2477-2491.
3. Lei L. et al. 3D printing of carbon black/polypropylene composites with excellent microwave absorption performance // *Composites Science and Technology*. – 2020. – T. 200. – P. 108479.
4. Ahmadloo M., Mousavi P. A novel integrated dielectric-and-conductive ink 3D printing technique for fabrication of microwave devices // *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*. – IEEE, 2013. – P. 1-3.
5. Tomassoni C. et al. 3D printing of microwave and millimeter-wave filters: Additive manufacturing technologies applied in the development of high-performance filters with novel topologies // *IEEE Microwave Magazine*. – 2020. – V. 21. – Is. 6. – P. 24-45.
6. Михайлов А. И. и др. Применение технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур // *III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019. Физика и технические приложения волновых процессов: материалы конференции*. – Казань: КНИТУ-КАИ, 2019. – Т. 3. – С. 222-224.
7. Михайлов А. И. и др. Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2022. – Т. 25. – № 3. – С. 29-35. – DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.29-35.
8. Хайрушев И. В. и др. Теоретические и экспериментальные исследования фотонных кристаллов, изготовленных технологией 3D-печати, в X-диапазоне // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. – 2022. – С. 546-549.
9. Рябов Е. А. и др. Использование технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур // *Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика*. – 2020. – С. 223-224.
10. Rosker E. S. et al. Printable materials for the realization of high performance RF components: Challenges and opportunities // *International Journal of Antennas and Propagation*. – 2018. – V. 2018. – P. 1-19.
11. Arbaoui Y. et al. 3D printing for microwave: Materials characterization and application in the field of absorbers // *2015 IEEE MTT-S international microwave symposium*. – IEEE, 2015. – P. 1-3.
12. Arbaoui Y. et al. Full 3-D printed microwave termination: A simple and low-cost solution // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2015. – V. 64. – Is. 1. – P. 271-278.
13. Dankov P. I. Characterization of dielectric properties, resultant isotropy and anisotropy of 3D printed dielectrics // *2018 48th European Microwave Conference (EuMC)*. – IEEE, 2018. – P. 823-826.
14. Kronberger R., Soboll P. New 3D printed microwave metamaterial absorbers with conductive printing materials // *2016 46th European Microwave Conference (EuMC)*. – IEEE, 2016. – P. 596-599.

15. Mirzaee M. et al. Developing flexible 3D printed antenna using conductive ABS materials //2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. – IEEE, 2015. – P. 1308-1309.
16. Xie Y. et al. Microwave metamaterials made by fused deposition 3D printing of a highly conductive copper-based filament // Applied Physics Letters. – 2017. – V. 110. – Is. 18. – P. 181903.
17. Sadeqi A. et al. Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO) // Microsystems & nanoengineering. – 2019. – V. 5. – Is. 1. – P. 1-10.
18. Горин Д. А. и др. Влияние микроволнового излучения на полимерные микрокапсулы с неорганическими наночастицами // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – Вып. 2. – С. 45-50.
19. Сергеев С. А. и др. Исследование свойств водотопливных эмульсий с наночастицами магнетита на сверхвысоких частотах // В мире научных открытий. – 2014. – № 4(52). – С. 148-160.
20. Sergeev S. A. et al. Investigation of absorption and reflection spectra of aqueous suspensions of nanoparticles in the X band of microwave bandwidth // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Saratov Fall Meeting 2006. – Saratov, 2007. – P. 653606.
21. Сергеев С. А. и др. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: сб. статей. – Саратов: Наука, 2013. – С. 214-228.
22. Михайлов А. И. и др. Лабораторный практикум по физике полупроводниковых приборов: Учеб. пособие. Ч. 1. – Саратов: Колледж, 2002. – 72 с.
23. Михайлов А. И. и др. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие. – 2-е изд., с изм. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2020. – 192 с.
24. Сергеев С. А., Сысоев И. В. Компьютер в физической лаборатории: учеб.-метод.– Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2013. – 304 с.
25. Сергеев С. А., Синёв И. В., Горин Д. А. Основы программирования для задач биофизики и материаловедения: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во «Амирит», 2017. – 308 с.
26. Сергеев С. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1. – № 1. – С. 439-444.
27. Рябов Е. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания коллоидов микро- и наночастиц // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сборник статей шестой Всероссийской научной школы-семинара. – Саратов: Саратовский источник, 2019. – С. 188-191.
28. Рябов Е. А. и др. Установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Техно-Декор, 2019. – С. 214-216.
29. Рябов Е. А. и др. Модифицированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 586-589.
30. Liebig T. et al. OpenEMS—A free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2013. – V. 26. – Is. 6. – P. 680-696.
31. Рябов Е. А. и др. Исследование свойств материалов в прямоугольном волноводе методом FDTD // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2022. – Т. 1. – С. 555-559.
32. Zechmeister J., Lacik J. Complex relative permittivity measurement of selected 3D-printed materials up to 10 GHz // Conference on microwave techniques (COMITE). – IEEE, 2019. – P. 1-4.
33. Deffenbaugh P. I., Rumpf R. C., Church K. H. Broadband microwave frequency characterization of 3-D printed materials // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2013. – V. 3. – Is. 12. – P. 2147-2155.
34. Reyes N. et al. Complex dielectric permittivity of engineering and 3D-printing polymers at Q-band // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2018. – V. 39. – P. 1140-1147.
35. Castles F. et al. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃/ABS polymer composites // Scientific reports. – 2016. – V. 6. – Is. 1. – P. 22714.