

Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов

А.И. Михайлов, Е.А. Рябов , С.А. Сергеев 

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
410012, Россия, г. Саратов,
ул. Астраханская, 83

Аннотация – В данной работе обсуждаются возможности использования технологии 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов в X-диапазоне частот. Спроектированы и изготовлены фотонные кристаллы для прямоугольного волновода стандарта EIA WR-90 с сечением $22,86 \times 10,16$ мм² в 3-сантиметровом диапазоне (X-диапазон). Было проведено численное моделирование в программном пакете OpenEMS характеристик отражения фотонных кристаллов нескольких конструкций. Основываясь на результатах моделирования, были выбраны лучшие варианты конструкций, которые были изготовлены по технологии физического моделирования методом наплавления из пластика PETG. Проведены экспериментальное исследование изготовленных макетов и сравнение полученных экспериментальных данных с данными численного моделирования. Изготовленные модели волноводных фотонных кристаллов в лучших вариантах показали перепад пропускания и отражения в соответствующих частотных полосах порядка 15–20 дБ, что приемлемо для реальных технических приложений. Результаты численного моделирования и экспериментов хорошо согласуются, что говорит о высокой эффективности и хорошем контроле топологии и размеров конструктивных элементов изготавливаемых фотонных кристаллов в использованном варианте технологии 3D-печати.

Ключевые слова – 3D-печать; фотонные кристаллы; СВЧ-диапазон; OpenEMS; X-диапазон.

Введение

3D-печать стала очень популярной в последние годы, причем не только для коммерческого, но и для частного использования. На рынке представлены 3D-принтеры в широком ценовом диапазоне, которые используют термопластичные нити для процесса печати. Это позволяет быстро, дешево, но в то же время очень точно создавать всевозможные пластиковые детали от маленьких до больших размеров. Недавно появились публикации, которые показали, что данная технология также может быть использована в ВЧ- и СВЧ-технике, например для создания диэлектрических СВЧ волноводных фильтров и антенных деталей [1–5]. В качестве основных материалов термопластичных нитей в 3D-принтерах используются различные полимеры с добавлением других материалов в виде порошка, например стекловолокна или различных металлов. В частности, для получения электропроводности достаточно на поверхность деталей дополнительно нанести чернила, содержащие металлический порошок, что обеспечивает возможность решения многих практических задач. 3D-печать позволяет легко изготавливать структуры различной формы с хорошо контролируемыми размерами элементов, что, в частности, дает возможность изготовления фотонных кристаллов и даже метаматериалов без многих

дополнительных и трудоемких операций обработки. Применение данной технологии позволяет изготавливать структуры сложной формы, что открывает новые возможности при создании разнообразных устройств в радио- и микроволновой технике.

Как известно, фотонные кристаллы состоят из периодически расположенных элементов субволнового размера (с характерными размерами меньше или порядка длины электромагнитной волны в волноведущей структуре – волноводе, коаксиале, микрополоске и т. д.), которые оказывают существенное влияние на распространение электромагнитного излучения, образуя фотонные разрешенные и запрещенные зоны [6]. Распространение через фотонный кристалл электромагнитного излучения с частотами в пределах фотонной запрещенной зоны невозможно, что означает появление спектральных областей с высокой отражательной способностью [7]. Характеристики фотонной запрещенной зоны, такие как спектральное положение и ширина полосы, зависят от периода фотонного кристалла, геометрии элементарной ячейки и диэлектрических свойств материалов, из которых изготовлен фотонный кристалл [6].

В данной работе описываются, проектируются, изготавливаются и экспериментально исследуются фотонные кристаллы для прямоугольного волновода X-диапазона с использованием технологии

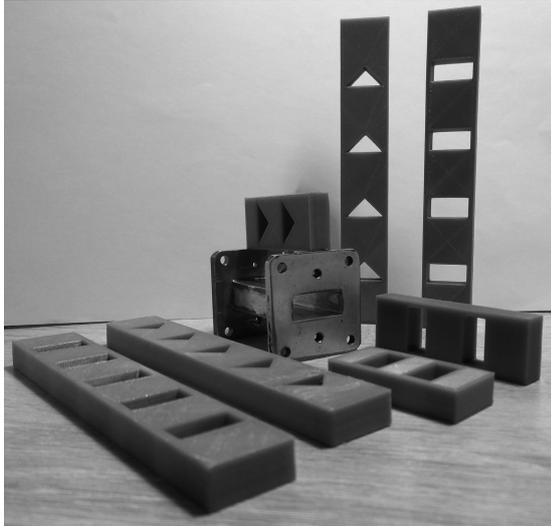


Рис. 1. Фотонные кристаллы, изготовленные по технологии 3D-печати
Fig. 1. Photonic crystals made by 3D-printing technology

3D-печати. Проводится сравнение характеристик полученных фотонных кристаллов с характеристиками математических моделей, рассчитанными в программном пакете электродинамического моделирования OpenEMS.

1. Описание конструкции

3D-печать относится к аддитивным технологиям и имеет различные варианты изготовления конструкций объектов, то есть различные способы нанесения слоев. В данной работе применяется технология физического моделирования методом наплавления (англ. – fused deposition modeling, FDM), в которой производится плавление нити пластика и последующее нанесение каждого очередного слоя. Нити для 3D-принтеров с типичными диаметрами 1,75 мм или 2,85 мм, изготовленные из пластика типа PLA (полимолочная кислота) или ABS (акрилонитрилбутадиенстирол) и намотанные на катушки, представлены на рынке в разных цветах, что обеспечивает дополнительное удобство восприятия изготавливаемых объектов. В данной работе при изготовлении конструкций фотонных кристаллов на 3D-принтере с кинематикой CoreXY и с диаметром сопла равным 0,4 мм использовались нити на основе пластика PETG (полиэтилентерефталат-гликоль) диаметром 1,75 мм и относительной диэлектрической проницаемостью в X-диапазоне $\epsilon' \approx 2,6$ [8].

Были изготовлены фотонные кристаллы для прямоугольного волновода стандарта EIA WR-90 с сечением $22,86 \times 10,16 \text{ мм}^2$ в 3-сантиметровом диапазоне (X-диапазоне), имеющие форму прямо-

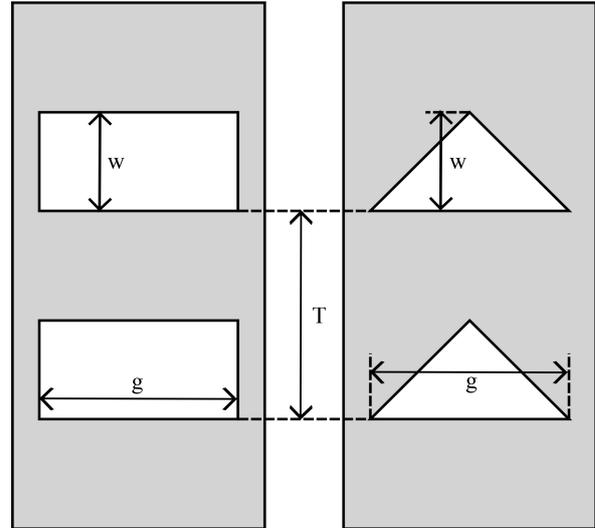


Рис. 2. Фотонные кристаллы с двумя отверстиями, спроектированные в OpenSCAD
Fig. 2. Photonic crystals with two holes designed in OpenSCAD

угольных параллелепипедов, в которых вдоль оси волновода периодически расположены поперечные воздушные отверстия либо прямоугольной, либо треугольной формы сечения. На рис. 1 показаны фотонные кристаллы с прямоугольными и треугольными отверстиями, изготовленные по технологии 3D-печати.

2. Численное моделирование и экспериментальные исследования

Перед изготовлением было проведено численное моделирование характеристик создаваемых фотонных кристаллов выбранной конструкции с использованием программного пакета OpenEMS [9]. В этом программном пакете при численном решении электродинамических задач применяются метод FDTD – метод конечных разностей во временной области, а для взаимодействия с OpenEMS используется скриптовый язык Matlab/Octave. OpenEMS позволяет рассчитывать компоненты электромагнитного поля (электродинамика) в ближней и дальней зонах, S-параметры электромагнитных систем, диаграммы направленности антенн, проводить импорт и экспорт описания объектов моделирования в заданном формате.

Были численно промоделированы различные по конструкции фотонные кристаллы, предварительно спроектированные в программном пакете OpenSCAD и в дальнейшем импортированные для численного анализа в OpenEMS. Основными отличительными особенностями спроектированных, изготовленных и исследованных в данной работе фотонных кристаллов являются форма,

Таблица 1. Характерные особенности и наиболее важные размеры элементов промоделированных фотонных кристаллов
 Table 1. Characteristic features and the most important dimensions of the elements of simulated photonic crystals

Форма отверстий	Размер отверстия вдоль волновода (w), мм	Размер отверстия вдоль широкой стенки волновода (g), мм	Период следования отверстий (T), мм	Количество отверстий (i)
прямоугольная	9	18	25	1, 3, 5, 7
треугольная				

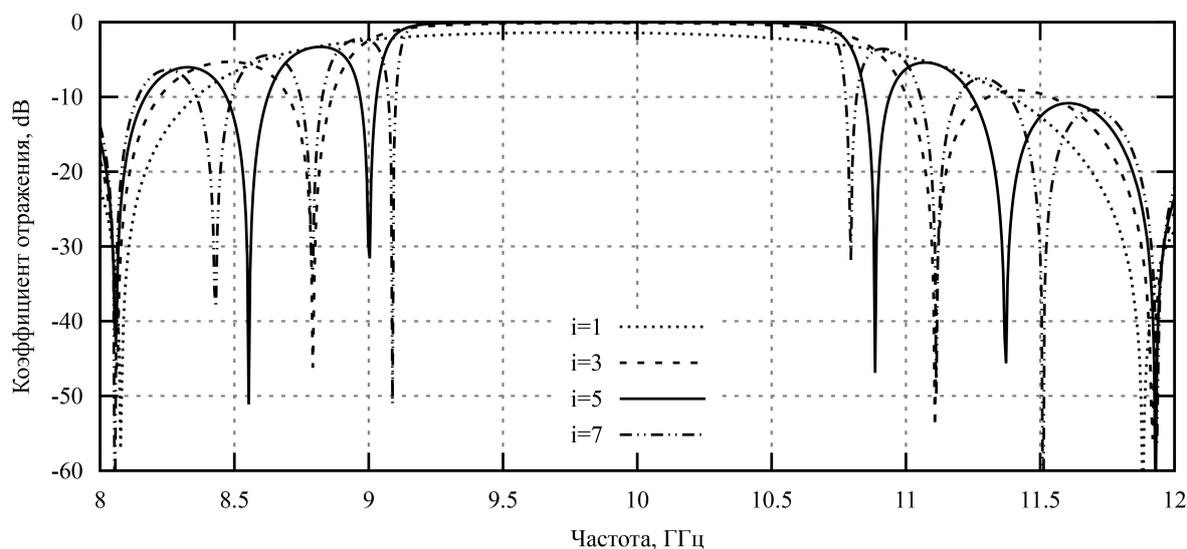


Рис. 3. Характеристики коэффициента отражения фотонных кристаллов с прямоугольными отверстиями; период следования отверстий $T = 25$ мм и количество отверстий $i = 1-7$
 Fig. 3. Characteristics of the reflection coefficient of photonic crystals with rectangular holes; hole period $T = 25$ mm and number of holes $i = 1-7$

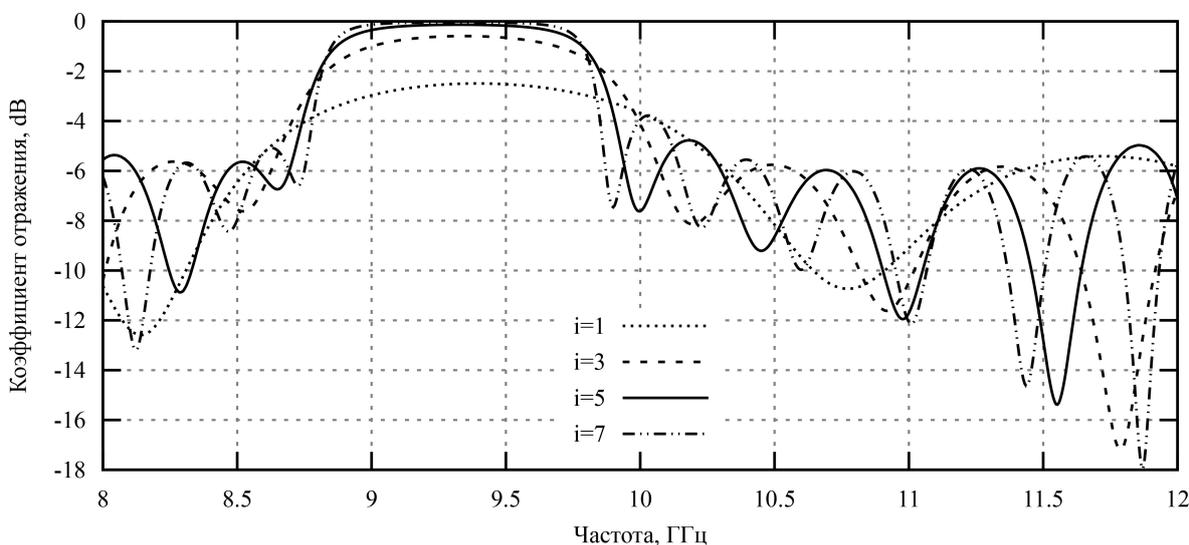


Рис. 4. Характеристики коэффициента отражения фотонных кристаллов с треугольными отверстиями; период следования отверстий $T = 25$ мм и количество отверстий $i = 1-7$
 Fig. 4. Characteristics of the reflection coefficient of photonic crystals with triangular holes; hole period $T = 25$ mm and number of holes $i = 1-7$

размер и период следования отверстий, описание которых приведено в таблице 1, а на рис. 2 представлены их обозначения.

На рис. 3 и 4 показаны коэффициенты отражения промоделированных фотонных кристаллов с прямоугольной и треугольной формой отверстий

при различном количестве отверстий. Как видно, при увеличении количества отверстий, то есть увеличении периодичности в фотонном кристалле, появляются ярко выраженные широкие области с максимальным отражением, то есть формируются ярко выраженные полосы запираения. Стоит об-

Таблица 2. Характерные особенности и наиболее важные размеры элементов изготовленных фотонных кристаллов
Table 2. Characteristic features and the most important dimensions of the elements of manufactured photonic crystals

Рисунок	Форма отверстий	Размер отверстия вдоль волновода (w), мм	Размер отверстия вдоль широкой стенки волновода (g), мм	Период следования отверстий (T), мм	Количество отверстий (i)
5	прямоугольная	9	18	25	5
6	прямоугольная			31	4
7	треугольная			25	5

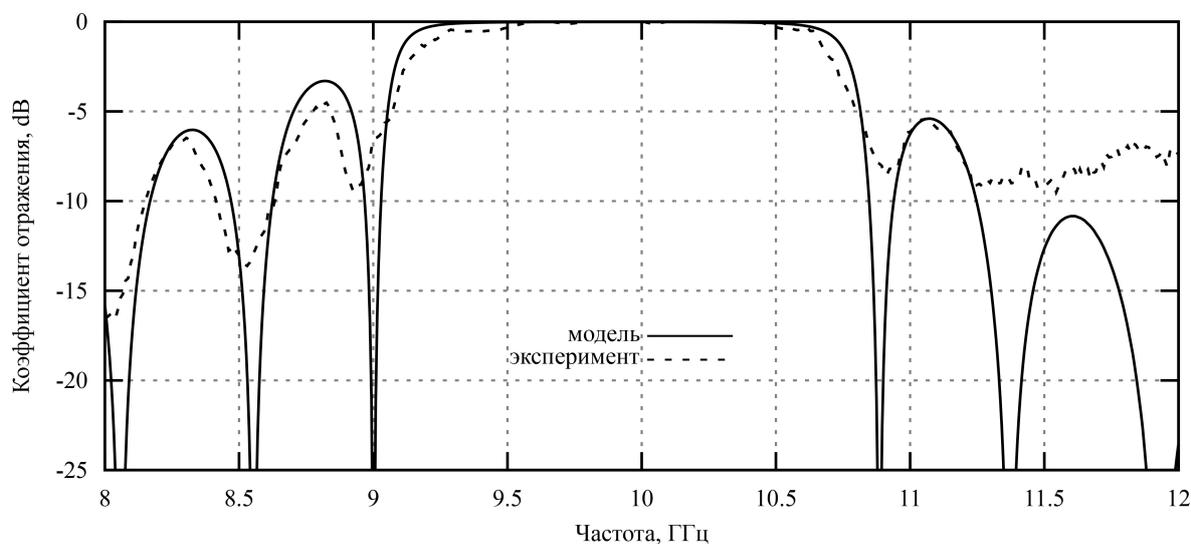


Рис. 5. Характеристики отражения фотонных кристаллов с прямоугольными отверстиями; период следования отверстий $T = 25$ мм и количество отверстий $i = 5$

Fig. 5. Reflection characteristics of photonic crystals with rectangular holes; hole period $T = 25$ mm and number of holes $i = 5$

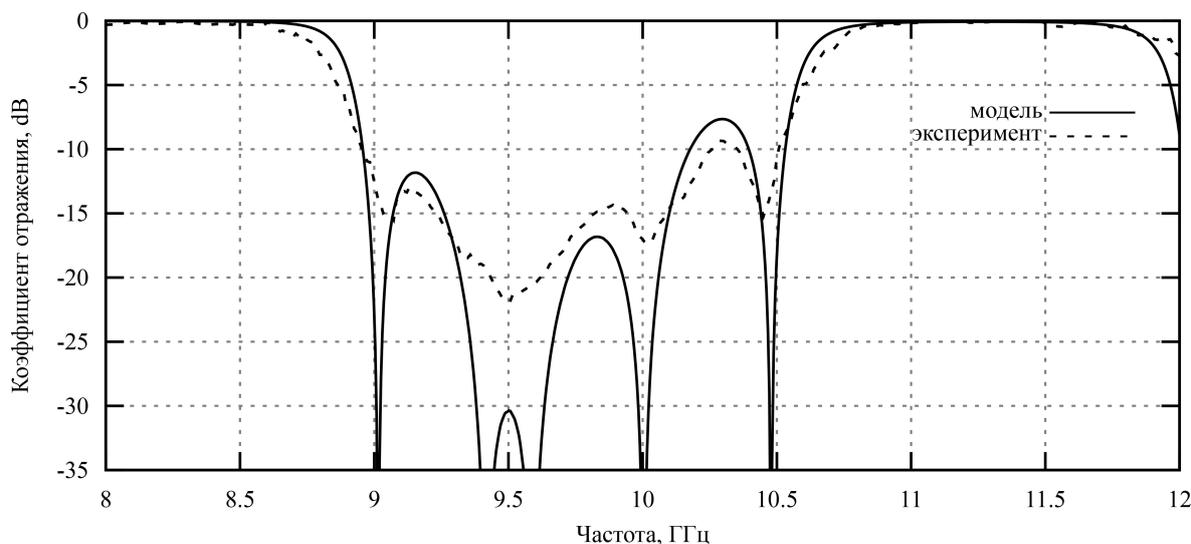


Рис. 6. Характеристики отражения фотонных кристаллов с прямоугольными отверстиями; период следования отверстий $T = 31$ мм и количество отверстий $i = 4$

Fig. 6. Reflection characteristics of photonic crystals with rectangular holes; hole period $T = 31$ mm and number of holes $i = 4$

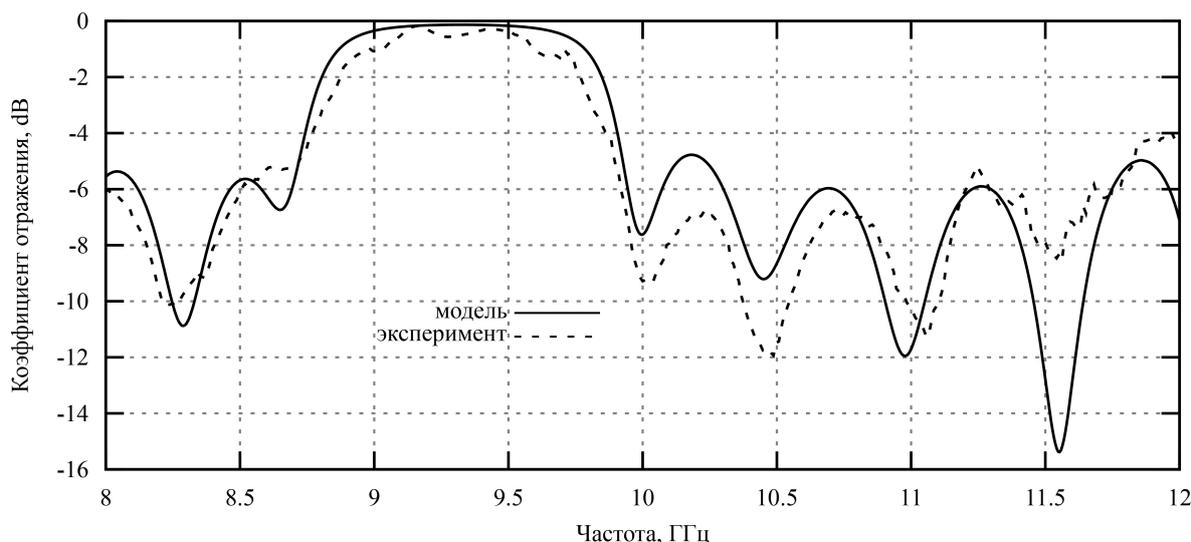


Рис. 7. Характеристики отражения фотонных кристаллов с треугольными отверстиями; период следования отверстий $T = 25$ мм и количество отверстий $i = 5$

Fig. 7. Reflection characteristics of photonic crystals with triangular holes; hole period $T = 25$ mm and number of holes $i = 5$

ратить внимание, что это отчетливо наблюдается уже при трех периодах следования отверстий.

Нужно также отметить, что в случае треугольных отверстий полоса запираания, получаемая в ходе математического моделирования, оказывается более узкой, а перепад значений отражения в полосах пропускания и запираания – меньшим.

Экспериментальные исследования характеристик отражения изготовленных фотонных кристаллов проводились с использованием панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61. В целом можно сказать, что результаты моделирования и экспериментальные данные показали очень хорошее совпадение как по положению полосы запираания, так и по ее ширине во всех исследованных вариантах конструкций, что, с одной стороны, указывает на хороший контроль топологии и размеров в использованном варианте технологии FDM 3D-печати, а, с другой стороны, также на адекватность электродинамических модельных представлений и их реализацию в программном пакете OpenEMS.

В качестве иллюстрации на рис. 5–7 приведены сравнительные данные моделирования и экспериментов для фотонного кристалла с прямоугольной и треугольной формой отверстий и периодом следования отверстий равным 25 и 31 мм: сплошные линии – результат моделирования, пунктирные линии – результаты экспериментов.

В таблице 2 представлены характерные особенности и наиболее важные размеры элементов изготовленных фотонных кристаллов, для которых

проводилось сравнение результатов экспериментов и электродинамического моделирования в OpenEMS, отраженных на рис. 5–7.

Заключение

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность эффективного использования технологии 3D-печати для создания искусственных фотонных кристаллов для управления характеристиками электромагнитного СВЧ-излучения 3-сантиметрового диапазона в прямоугольном волноводе с сечением $22,86 \times 10,16$ мм². Точность контроля размеров спроектированных и изготовленных фотонных кристаллов, обеспечиваемая выбранным для анализа вариантом технологии 3D-печати с использованием дешевого и общедоступного оборудования, дает твердые основания рассчитывать на перспективы создания эффективных и дешевых волноводных элементов для управления электромагнитным излучением в указанном выше и других более высокочастотных диапазонах.

Спроектированные и экспериментально реализованные модели волноводных фотонных кристаллов – диэлектрических волноводных вставок с отверстиями прямоугольной и треугольной формы сечения – в лучших вариантах показали перепад пропускания и отражения в соответствующих частотных полосах порядка 15–20 дБ, что уже вполне приемлемо для реальных технических приложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00603.

Список литературы

1. Sanz-Izquierdo B., Parker E.A. 3D printed FSS arrays for long wavelength applications // The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). 2014. P. 2382–2386. DOI: <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902296>
2. Developing flexible 3D printed antenna using conductive ABS materials / M. Mirzaee [et al.] // 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2015. P. 1308–1309. DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2015.7305043>
3. 3D printing for microwave: Materials characterization and application in the field of absorbers / Y. Arbaoui [et al.] // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. 2015. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2015.7166769>
4. Применение технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур / А.И. Михайлов [и др.] // Физика и технические приложения волновых процессов. III Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019: мат. XVII Международной научно-технической конференции. 2019. Т. 3. С. 222–224.
5. Использование технологии 3D-печати для создания искусственных электродинамических структур / Е.А. Рябов [и др.] // Нанoeлектроника, нанofотоника и нелинейная физика: сб. тр. XV Всероссийской конференции молодых ученых. 2020. С. 223–224.
6. Нелин Е.А. Устройства на основе фотонных кристаллов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 3. С. 18–25.
7. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals / S. Fan [et al.] // Physical Review Letters. 1997. Vol. 78, no. 17. P. 3294–3297. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.3294>
8. Zechmeister J., Lacik J. Complex relative permittivity measurement of selected 3D-printed materials up to 10 GHz // 2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE). 2019. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMITE.2019.8733590>
9. openEMS – a free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications / T. Liebig [et al.] // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2013. Vol. 26, no. 6. P. 680–696. DOI: <https://doi.org/10.1002/jnm.1875>

References

1. Sanz-Izquierdo B., Parker E.A. 3D printed FSS arrays for long wavelength applications. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, 2014, pp. 2382–2386. DOI: <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2014.6902296>
2. 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*, 2015, pp. 1308–1309. DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2015.7305043>
3. Arbaoui Y. et al. 3D printing for microwave: Materials characterization and application in the field of absorbers. *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2015, pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2015.7166769>
4. Mikhailov A.I. et al. Application of 3D printing technology to create artificial electrodynamic structures. *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov. III Nauchnyy forum telekommunikatsii: teoriya i tekhnologii TTT-2019: mat. XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 2019, vol. 3, pp. 222–224. (In Russ.)
5. Ryabov E.A. et al. Using 3D printing technology to create artificial electrodynamic structures. *Nanoelektronika, nanofotonika i nelineynaya fizika: sb. tr. XV Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh*, 2020, pp. 223–224. (In Russ.)
6. Nelin E.A. Devices based on photonic crystals. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2004, no. 3, pp. 18–25. (In Russ.)
7. Fan S. et al. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals. *Physical Review Letters*, 1997, vol. 78, no. 17, pp. 3294–3297. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.3294>
8. Zechmeister J., Lacik J. Complex relative permittivity measurement of selected 3D-printed materials up to 10 GHz. *2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE)*, 2019, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMITE.2019.8733590>
9. 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, vol. 26, no. 6, pp. 680–696. DOI: <https://doi.org/10.1002/jnm.1875>

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2022, vol. 25, no. 3, pp. 29–35

DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.3.29-35

Received 30 March 2022
Accepted 4 May 2022

Evaluation of the possibilities of 3D-printing for the making of waveguide photonic crystals

Aleksandr I. Mikhailov, Evgeniy A. Ryabov , Sergey A. Sergeev Saratov State University
83, Astrakhanskaya Street,
Saratov, 410012, Russia

Abstract – The paper considers the possibilities of 3D printing technology for the manufacture of X-band waveguide photonic crystals. The photonic crystals for an EIA WR-90 standard rectangular waveguide with a cross section of $22,86 \times 10,16 \text{ mm}^2$ in the X-band were designed and manufactured. Numerical modeling of the reflection characteristics of photonic crystals of several designs in the OpenEMS software package was carried out. Based on the simulation results, the best types of the structures were selected, which were manufactured using the physical modeling technique by the fusion method of PETG plastic. Experimental study of the manufactured layouts and comparison of the experimental data with the numerical simulation data were performed. The best types of manufactured models of waveguide photonic crystals showed transmittance and reflection drop in the corresponding frequency bands of the order of 15–20 dB, which is acceptable for technical applications. The numerical modeling results are in good agreement with experiments, thus indicating the high efficiency and good control of the topology and dimensions of the manufactured photonic crystals' structural elements in the used type of 3D printing technology.

Keywords – 3D-printing; photonic crystals; microwave range; OpenEMS; X-band.

Информация об авторах

Михайлов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики полупроводников Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия.

Область научных интересов: твердотельная электроника и радиофизика СВЧ и КВЧ, параметрические и нелинейные колебательные и волновые процессы в полупроводниковых структурах и приборах в СВЧ- и КВЧ-диапазонах, квантово-размерные полупроводниковые структуры и эффекты, математическое моделирование физических процессов, педагогические инновации.

E-mail: mikhailovai13@mail.ru

Рябов Евгений Александрович, ассистент кафедры физики полупроводников Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия.

Область научных интересов: радиотехника, 3D-печать.

E-mail: k1u2r3ka@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4777-7346>

Сергеев Сергей Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия.

Область научных интересов: распространение и параметрическое взаимодействие волн пространственного заряда в тонкопленочных полупроводниковых структурах с отрицательной дифференциальной проводимостью, функциональные устройства СВЧ- и КВЧ-диапазонов, влияние СВЧ-излучения на полимерные микрокапсулы с неорганическими наночастицами, синтез и исследование свойств нано- и микрочастиц различной природы.

E-mail: ssergeev@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4442-6797>

Information about the Authors

Aleksandr I. Mikhailov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the Department of Semiconductor Physics, Saratov State University, Saratov, Russia.

Research interests: solid-state electronics and radiophysics microwave and EHF, parametric and nonlinear vibrational and wave processes in semiconductor structures and devices in the microwave and EHF ranges, quantum-sized semiconductor structures and effects, mathematical modeling of physical processes, pedagogical innovations.

E-mail: mikhailovai13@mail.ru

Evgeniy A. Ryabov, assistant of the Department of Semiconductor Physics, Saratov State University, Saratov, Russia.

Research interests: radio engineering, 3D printing.

E-mail: k1u2r3ka@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4777-7346>

Sergey A. Sergeev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Semiconductor Physics, Saratov State University, Saratov, Russia.

Research interests: spatial charge wave propagation and parametric interaction in thin-film semiconductor structures with negative differential conductivity, functional microwave and EHF devices, effect of microwave radiation on polymeric microcapsules with inorganic nanoparticles, synthesis and study of properties of nano- and microparticles of different nature.

E-mail: ssergeev@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4442-6797>