

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.372.85
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-84-91>
EDN NHBOSK



КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

Управление амплитудно-частотной характеристикой узкополосного фильтра для X-диапазона частот на основе фотонного кристалла с подвижным цилиндрическим дефектом

Е.А. Рябов[®],
А.А. Андреев,
С.А. Сергеев,
А.И. Михайлов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, 410012 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: k1u2r3ka@mail.ru

• Поступила: 12.11.2024 • Доработана: 14.02.2025 • Принята к опубликованию: 21.03.2025

Резюме

Цели. Цель работы – исследовать возможность и эффективность использования в конструкции фотонного кристалла подвижного цилиндрического дефекта с металлическими штырями для управления амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) узкополосного фильтра на прямоугольном волноводе с сечением 23×10 мм в трехсантиметровом диапазоне (X-диапазоне), определить способы наиболее эффективного управления АЧХ.

Методы. Для численного моделирования АЧХ фильтра используется программный пакет *openEMS*, в основе которого лежит система уравнений Максвелла, решаемая методом конечных разностей во временной области. Проведено также экспериментальное исследование АЧХ действующего макета предложенной и созданной конструкции фильтра в трехсантиметровом диапазоне (X-диапазоне).

Результаты. Результаты численного моделирования показывают, что введение в центр конструкции фотонного кристалла подвижного цилиндрического дефекта с двумя металлическими штырями приводит к появлению в полосе запираания на АЧХ фильтра резонансного пика пропускания, положение которого эффективно управляется поворотом цилиндрического дефекта вокруг его оси. При неизменном положении цилиндрического дефекта уменьшение периода фотонного кристалла приводит к увеличению частоты пика пропускания. На частоту резонансного пика пропускания наиболее сильное влияние оказывает изменение размера отверстий в конструкции фотонного кристалла, что может использоваться как эффективный фактор для управления положением пика пропускания и формой всей АЧХ; при этом значение коэффициента пропускания при повороте цилиндрического дефекта вокруг его оси практически не изменяется. Проведены также экспериментальные исследования АЧХ фотонных кристаллов, изготовленных с использованием технологии 3D-печати из пластика PETG (полиэтилентерефталатгликоль), данные которых согласуются с результатами моделирования.

Выводы. Предложенные спроектированные и изготовленные экспериментальные модели узкополосных фильтров в трехсантиметровом диапазоне (X-диапазоне) на основе фотонного кристалла показали достаточные для практики изменения значения коэффициента пропускания и возможности эффективного управления частотой резонансного пика и всей формой АЧХ, что делает их весьма перспективными для практических применений в радиоэлектронной аппаратуре.

Ключевые слова: узкополосный фильтр, резонансный фильтр, СВЧ-диапазон, фотонный кристалл, 3D-печать, openEMS

Для цитирования: Рябов Е.А., Андреев А.А., Сергеев С.А., Михайлов А.И. Управление амплитудно-частотной характеристикой узкополосного фильтра для X-диапазона частот на основе фотонного кристалла с подвижным цилиндрическим дефектом. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):84–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-84-91>, <https://www.elibrary.ru/NHBOSK>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

SHORT COMMUNICATION

Control of the frequency response of a narrow-band filter for the X-band frequency based on a photonic crystal with a movable cylindrical defect

Evgeny A. Ryabov [@],
Anton A. Andreev,
Sergey A. Sergeev,
Alexander I. Mikhailov

Saratov National Research State University, Saratov, 410012 Russia

[@] *Corresponding author, e-mail: k1u2r3ka@mail.ru*

• **Submitted:** 12.11.2024 • **Revised:** 14.02.2025 • **Accepted:** 21.03.2025

Abstract

Objectives. The work set out to investigate the possibility and effectivity of using a movable cylindrical defect with metal pins in the design of a photonic crystal to control the frequency response of a narrow-band filter in a rectangular waveguide having a cross-section of 23×10 mm in the X-band, as well as to determine the most effective methods for controlling frequency response.

Methods. A numerical simulation of the frequency response of the filter was carried out using the *openEMS* software package, which is based on Maxwell's equations solved by the finite-difference time-domain method. The frequency response of the currently proposed and implemented filter construction in the X-band was further investigated in an experimental study.

Results. Numerical simulation shows that a resonant transmission peak in the stopband of the frequency response can be caused to appear by introducing a movable cylindrical defect having two metal pins into the center of a photonic crystal structure. In addition, the position of this peak on the frequency response can be effectively controlled by rotating the cylindrical defect around its axis. If the position of the defect remains unchanged,

an increase in the frequency of the transmission peak occurs as a result of decreasing the period of the photonic crystal. However, the frequency of this resonant transmission peak is most strongly influenced by changes in the size of holes in the photonic structure. These changes can be used to control both the position and shape of the transmission peak, as well as the overall frequency response. At the same time, the difference in transmission remains practically unchanged when the cylinder rotates around its axis. The simulation results were confirmed by the data of an experimental study of the frequency response of photonic crystals made from PETG plastic using 3D printing technology.

Conclusions. The proposed, designed, and manufactured experimental samples of narrow-band filters in the X-band based on a photonic crystal demonstrated reliably variable transmission values and the possibility of controlling the resonant peak frequency and thus the entire frequency response, including operational control. This makes them very promising for practical use in radio-electronic equipment.

Keywords: narrow-band filter, resonant filter, microwave range, photonic crystal, 3D printing, openEMS

For citation: Ryabov E.A., Andreev A.A., Sergeev S.A., Mikhailov A.I. Control of the frequency response of a narrow-band filter for the X-band frequency based on a photonic crystal with a movable cylindrical defect. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):84–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-84-91>, <https://www.elibrary.ru/NHBOSK>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные волны широко используются в различных областях науки и техники: от радиолокации и навигации до информационно-телекоммуникационных технологий и медицинского оборудования. Одним из наиболее распространенных типов линий передачи сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных волн является прямоугольный волновод. Широко используются так называемые частично и полностью заполненные какими-либо конструкциями волноводы. Обычно конструкции для заполнения представляют собой диэлектрические пластины различных формы и размеров. Существует также возможность использования в качестве таких конструкций искусственных материалов и структур, в частности, основанных на фотонных кристаллах или метаматериалах [1–13]. Фотонный кристалл в СВЧ-диапазоне – определенная конструкция на базе отрезка волновода, заполнение которого представляет собой периодическую структуру, состоящую из отдельных ячеек, выполненных из материалов с разными показателями преломления, в результате чего в его спектре пропускания формируются фотонные запрещенные и разрешенные зоны (диапазоны частот), аналогичные энергетическим зонам в твердых телах [1, 2, 4–9]. Благодаря этому использование фотонных кристаллов, в частности, на основе прямоугольных волноводов дает возможность создавать частотно-селективные устройства [6, 7], которые способны выделять и практически без потерь пропускать на выход устройства СВЧ-излучение как в определенной полосе частот (полосовой фильтр), так и в области частот ниже (фильтр нижних частот) или выше (фильтр верхних частот) определенного уровня частоты среза в заданном частотном диапазоне.

Добавление в фотонный кристалл единичного дефекта приводит к нарушению периодичности его структуры и появлению на его амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) резонансного пика пропускания [10–12]. Управление положением дефекта, его формой и размерами открывает возможности создания резонансных (узкополосных) фильтров, всевозможных управляемых датчиков, поглотителей и прочих полезных устройств [1–4, 7–10].

В данной работе представлены исследования фотонных кристаллов с подвижным вращающимся цилиндрическим дефектом. Также изготовлены с использованием технологии 3D-печати образцы фотонных кристаллов и проведено сравнение результатов экспериментальных исследований с характеристиками их математических моделей, выполненных с использованием специализированного программного обеспечения *openEMS*¹.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

В настоящее время для прототипирования изделий в СВЧ-диапазоне начали широко применять весьма перспективную технологию 3D-печати [13–16]. В данной работе для изготовления фотонных кристаллов используется технология моделирования методом послойного наплавления (англ. – fused deposition modeling, FDM), являющаяся одним из видов технологии 3D-печати. Основой технологии FDM является пластиковая нить, в результате ее плавления и нанесения образуется слой, который располагается на поверхности предыдущего слоя, в дальнейшем формируется структура заданной

¹ <https://www.openems.de>. Дата обращения 20.03.2025. / Accessed March 20, 2025.

Таблица. Наиболее значимые размеры элементов проектируемого фотонного кристалла. Форма отверстий – прямоугольная

Форма отверстий	Количество отверстий (i)	Период следования отверстий (Λ), мм	Размер отверстия вдоль оси волновода (w), мм	Расстояние между отверстиями (L), мм	Размер отверстия вдоль широкой стенки волновода (g), мм
Прямоугольная	4	24–31	5–9	19–22	18

модели. Для изготовления конструкции сначала проектируется 3D-модель, которая обычно разрабатывается в системе автоматизированного проектирования (САПР). Модель может быть сохранена в формате файла STL, который хранит трехмерную модель в виде числовых массивов, что широко используется для 3D-печати. Проектирование фотонного кристалла осуществлялось с использованием САПР *OpenSCAD*². Выбор *OpenSCAD* обусловлен ее мощными возможностями для создания сложных трехмерных моделей с высокой степенью параметризации. Это означает, что изменение одного параметра автоматически пересчитывает всю геометрию, значительно упрощая процесс оптимизации конструкции. Созданный фотонный кристалл представляет собой заполненный участок прямоугольного волновода с полностью заполненным сечением 23×10 мм. Воздушные отверстия располагаются периодически вдоль оси волновода. Сечение отверстий имеет прямоугольную форму. В качестве материала для изготовления выбран пластик полиэтилентерефталатгликоль (англ. – polyethylene terephthalate glycol, PETG), в исследуемом диапазоне частот относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon' \approx 2.5$ [15, 16].

На рис. 1 представлено схематическое изображение предлагаемой конструкции и приведены обозначения наиболее значимых размеров элементов конструкции, а в таблице приведены конкретные значения размеров. Аналогичные конструкции фотонных кристаллов предлагались и подробно анализировались в ряде работ (например, [6, 13]).

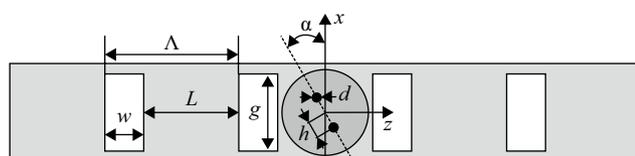


Рис. 1. Схематическое изображение предлагаемой конструкции заполнения фотонного кристалла с подвижным вращающимся дефектом (вид со стороны широкой стенки волновода – в плоскости xz)

В центре спроектированного фотонного кристалла расположен дефект – подвижный, вращающийся вокруг своей оси цилиндр, в котором симметрично на расстоянии $h = 4$ мм по обе стороны от оси располагаются 2 тонких металлических стержня круглого сечения диаметром $d = 2$ мм. Положению первого дефекта (угол поворота $\alpha = 0^\circ$) соответствует расположение пары стержней дефекта поперек оси волновода – вдоль оси x . Положению второго дефекта (угол поворота $\alpha = 90^\circ$) соответствует расположение пары стержней дефекта вдоль оси волновода – вдоль оси z .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После того, как была выбрана оптимальная конструкция фотонного кристалла, начался этап численного моделирования его характеристик. Для этого использовался пакет *openEMS*. Данный программный пакет основан на методе конечных разностей во временной области, который является одним из популярных численных методов в вычислительной электродинамике [17]. Программа поддерживает импорт и экспорт геометрических моделей из различных форматов файлов (например, PLY, STL), что значительно упрощает процесс моделирования, особенно при использовании САПР для проектирования. Для удобства управления моделированием и обработки результатов *openEMS* интегрируется со скриптовыми языками, такими как *MATLAB*³, *Octave*⁴ и *Python*⁵. Эти языки позволяют автоматизировать процесс настройки параметров модели, запуска расчетов и обработки полученных данных.

На рис. 2 изображены изготовленные с применением технологии 3D-печати конструкции фотонных кристаллов с цилиндрическим дефектом. Рисунок 3 демонстрирует АЧХ фотонных кристаллов, полученные в ходе численного моделирования и экспериментальных исследований. Конкретные

³ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Дата обращения 20.03.2025. / Accessed March 20, 2025.

⁴ <https://octave.org/>. Дата обращения 20.03.2025. / Accessed March 20, 2025.

⁵ <https://www.python.org/>. Дата обращения 20.03.2025. / Accessed March 20, 2025.

² <https://openscad.org>. Дата обращения 20.03.2025. / Accessed March 20, 2025.

данные приведены для двух положений дефекта: $\alpha = 0^\circ$ (положение 1) и $\alpha = 90^\circ$ (положение 2). Как видно из результатов численного моделирования и из экспериментальных результатов, при положении 2 дефекта на АЧХ наблюдается наиболее отчетливый резонансный пик пропускания. На частоте резонансного пика изменение значения коэффициента пропускания (ΔT) при изменении положения дефекта с 1 на 2 достигает более 15 дБ.

Зависимости положения частоты пика пропускания от периода фотонного кристалла представлены на рис. 4. При уменьшении периода фотонного кристалла наблюдается смещение пика пропускания в область высоких частот. Изменение размера отверстий w оказывает более сильное влияние на положение частоты пика пропускания по сравнению с изменением расстояния между отверстиями L .



Рис. 2. Общий вид изготовленных фотонных кристаллов с дефектом

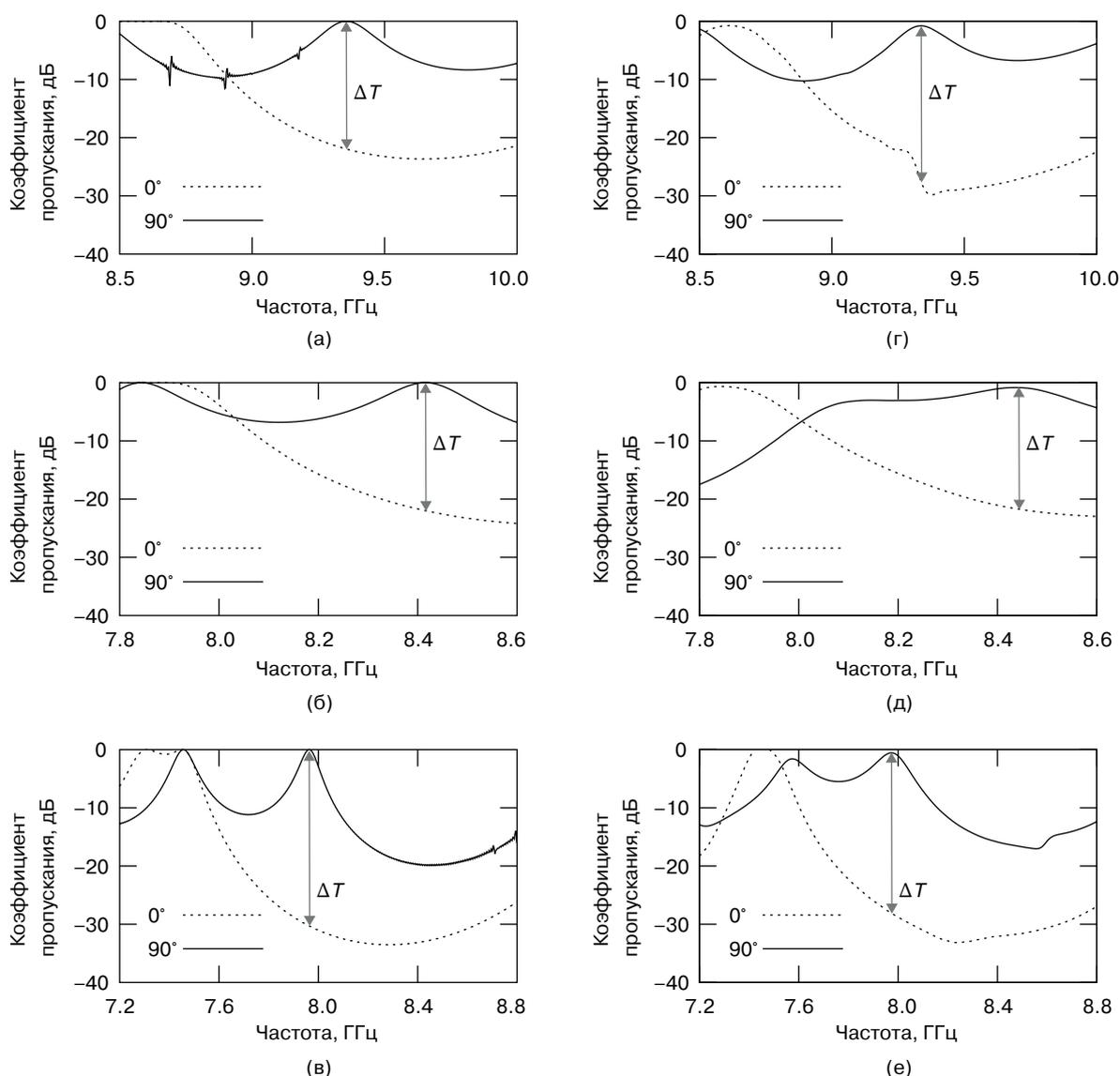


Рис. 3. АЧХ, полученные в результате численного моделирования (а, б, в) и экспериментального исследования (г, д, е) фотонных кристаллов при значениях угла поворота дефекта α , равных 0° и 90° : $L = 19$ мм, $w = 5$ мм (а, г); $L = 22$ мм, $w = 5$ мм (б, д); $L = 22$ мм, $w = 9$ мм (в, е)

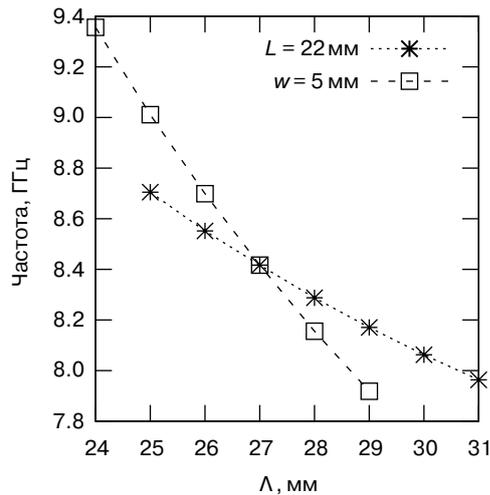


Рис. 4. Зависимости частоты пика пропускания фотонного кристалла от периода Λ при фиксированном размере отверстия w (пунктирная линия) и расстоянием между отверстиями L (штриховая линия)

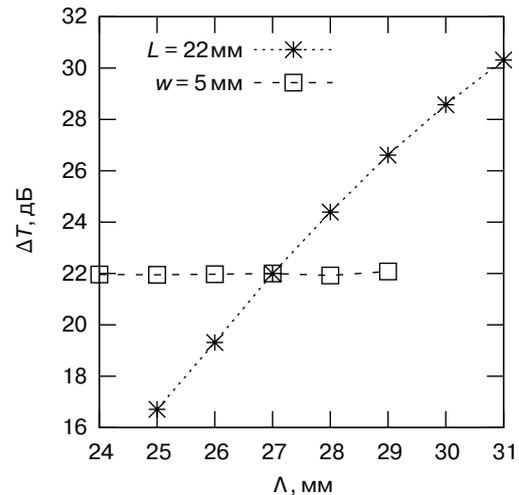


Рис. 5. Зависимость изменения значения коэффициента пропускания (ΔT) от периода фотонного кристалла Λ при фиксированном размере отверстия w (пунктирная линия) и расстоянием между отверстиями L (штриховая линия)

На рис. 5 приведены зависимости изменения значения коэффициента пропускания ΔT от периода фотонного кристалла Λ . Изменение значения коэффициента пропускания ΔT достигает 22 дБ при фиксированном размере отверстия $w = 5$ мм, а влияющие расстояния между отверстиями L минимально. При увеличении размера отверстия w от 3 до 9 мм и фиксированном расстоянии между отверстиями $L = 22$ мм изменение значения коэффициента пропускания ΔT фотонного кристалла достигает 14 дБ (с 16 до 30 дБ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована возможность эффективного использования в конструкции фотонного кристалла подвижного вращающегося вокруг своей оси цилиндрического дефекта с двумя симметрично расположенными относительно оси одинаковыми металлическими штырями для управления АЧХ узкополосного фильтра в прямоугольном волноводе X-диапазона с сечением 23×10 мм. Результаты

численного моделирования показывают, что при уменьшении периода следования отверстий Λ фотонного кристалла происходит смещение пика пропускания в сторону более высоких частот. Наиболее сильное частотное смещение пика пропускания при увеличении периода следования отверстий происходит при фиксированном расстоянии между отверстиями. При этом для значений угла поворота дефекта 90° (положение 2) наблюдается минимальное изменение значения коэффициента пропускания. Спроектированные и экспериментально разработанные модели узкополосных фильтров, основанные на фотонных кристаллах данной конструкции, демонстрируют изменение значения коэффициента пропускания в диапазоне от 16 до 30 дБ при изменении угла поворота дефекта с 0° на 90° . Эти результаты вполне подходят для использования в реальных технических приложениях.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wan B.F., Xu Y., Zhou Z.W., Zhang D., Zhang H.F. Theoretical investigation of a sensor based on one-dimensional photonic crystals to measure four physical quantities. *IEEE Sens. J.* 2020;21(3):2846–2853. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3027759>
2. Aly A.H., Mohamed D., Mohaseb M.A. Theoretical and simulation study in defective semiconductor layer that incorporated with superconducting-dielectric photonic crystal. *Int. J. Modern Phys. B.* 2019;33(32):1950397. <https://doi.org/10.1142/S0217979219503971>

3. Бучнев И.Ю., Осипов О.В. Исследование электромагнитных свойств поперечной вставки на основе планарного слоя кирального метаматериала в прямоугольном волноводе. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2023;26(1):93–105. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.93-105>
4. Ghasemi F., Aliasghary M., Razi S. Magneto-sensitive photonic crystal optical filter with tunable response in 12–19 GHz; cross over from design to prediction of performance using machine learning. *Phys. Lett. A*. 2021;401:127328. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127328>
5. Zhao L., Li Y., Chen Z.M., Liang Z.H., Wang J., Shen X., Zhang Q. A Band-Pass Filter Based on Half-Mode Substrate Integrated Waveguide and Spoof Surface Plasmon Polaritons. *Sci Rep*. 2019;9(1):13429. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50056-9>
6. Михайлов А.И., Рябов Е.А., Сергеев С.А. Оценка возможностей 3D-печати для изготовления волноводных фотонных кристаллов. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2022;25(3):29–35. <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.3.29-35>
7. Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Фёдоров С.М., Черноиваненко И.А. Активный волноводный полосовой фильтр на основе метаматериала. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2022;18(3):57–60. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.18.3.007>
8. Liu L., Ye M., Yu Z., Xue W. Notch microwave photonic filter with narrow bandwidth and ultra-high all-optical tuning efficiency based on a silicon nanobeam cavity. *J. Lightwave Technol.* 2023;41(15):5051–5058. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3248611>
9. Yu B., Yang J., Song Y., Wang Z., Zhang T., Yan B., Xu R. Terahertz Metamaterial Waveguide with I-Shaped Resonators for Phase and Absorption Modulation. *Photonics*. 2023;10(7):816. <https://doi.org/10.3390/photonics10070816>
10. Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Шаронов В.Е. Резонансные характеристики сверхвысокочастотных фотонных кристаллов с включениями в виде проводящих нанослоев. *Письма в Журнал технической физики (Письма в ЖТФ)*. 2023;49(19):27–30. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2023.19.56269.19645>
11. Kumar N., Pandey G.N., Dhayal S., Dhayal S.S. Microwave Propagation Characteristics in Magnetized-Cold-Plasma-Based Binary Photonic Crystal with Defect of MCP Layer. *Macromol. Symp.* 2023;407(1):2100515. <https://doi.org/10.1002/masy.202100515>
12. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Посадский В.Н., Тяжлов В.С., Байкин А.В. Дефектная мода в СВЧ волноводных брэгговских структурах с металлическими штырями. *Журнал технической физики*. 2019;89(10):1606–1610. <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.10.48180.6-19>
13. Хайрушев И.В., Рябов Е.А., Сергеев С.А. Теоретические и экспериментальные исследования фотонных кристаллов, изготовленных технологией 3D-печати, в X-диапазоне. *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2022;1:546–549. URL: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2022/546-549.pdf>
14. Pei Z., Xu Y., Wei F., Liu T., Su D. Electromagnetic property of a novel gradient honeycomb composite fabricated by 3D forming. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;493:165742. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165742>
15. Андреев А.А., Рябов Е.А., Хайрушев И.В., Сергеева Б.В., Сергеев С.А. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость пластиков в СВЧ диапазоне. *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2023;1:388–392. URL: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2023/novoe/388-392.pdf>
16. Zechmeister J., Lacik J. Complex Relative Permittivity Measurement of Selected 3D-Printed Materials up to 10 GHz. In: *2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. IEEE; 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/COMITE.2019.8733590>
17. Liebig T., Rennings A., Held S., Erni D. OpenEMS – a free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications. *Int. J. Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*. 2013;26(6):680–696. <https://doi.org/10.1002/jnm.1875>

REFERENCES

1. Wan B.F., Xu Y., Zhou Z.W., Zhang D., Zhang H.F. Theoretical investigation of a sensor based on one-dimensional photonic crystals to measure four physical quantities. *IEEE Sens. J*. 2020;21(3):2846–2853. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3027759>
2. Aly A.H., Mohamed D., Mohaseb M.A. Theoretical and simulation study in defective semiconductor layer that incorporated with superconducting-dielectric photonic crystal. *Int. J. Modern Phys. B*. 2019;33(32):1950397. <https://doi.org/10.1142/S0217979219503971>
3. Buchnev I.Yu., Osipov O.V. Investigation of the electromagnetic properties of a transverse insert based on a planar layer of a chiral metamaterial in a rectangular waveguide. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2023;26(1):93–105 (in Russ.). <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.1.93-105>
4. Ghasemi F., Aliasghary M., Razi S. Magneto-sensitive photonic crystal optical filter with tunable response in 12–19 GHz; cross over from design to prediction of performance using machine learning. *Phys. Lett. A*. 2021;401:127328. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127328>
5. Zhao L., Li Y., Chen Z.M., Liang Z.H., Wang J., Shen X., Zhang Q. A Band-Pass Filter Based on Half-Mode Substrate Integrated Waveguide and Spoof Surface Plasmon Polaritons. *Sci Rep*. 2019;9(1):13429. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50056-9>
6. Mikhailov A.I., Ryabov E.A., Sergeev S.A. Evaluation of the possibilities of 3D-printing for the making of waveguide photonic crystals. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2022;25(3):29–35 (in Russ.). <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.3.29-35>
7. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Pendyurin V.A., Fyedorov S.M., Chernovivanenko I.A. Active rectangular waveguide bandpass filter based on the metamaterial. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2022;18(3):57–60 (in Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.18.3.007>

8. Liu L., Ye M., Yu Z., Xue W. Notch microwave photonic filter with narrow bandwidth and ultra-high all-optical tuning efficiency based on a silicon nanobeam cavity. *J. Lightwave Technol.* 2023;41(15):5051–5058. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3248611>
9. Yu B., Yang J., Song Y., Wang Z., Zhang T., Yan B., Xu R. Terahertz Metamaterial Waveguide with I-Shaped Resonators for Phase and Absorption Modulation. *Photonics*. 2023;10(7):816. <https://doi.org/10.3390/photonics10070816>
10. Skripal A.V., Ponomarev D.V., Sharonov V.E. Resonance characteristics of microwave photonic crystals with inclusions in the form of conducting nanolayers. *Technical Physics Letters*. 2023;10:23–26.
[Original Russian Text: Skripal A.V., Ponomarev D.V., Sharonov V.E. Resonance characteristics of microwave photonic crystals with inclusions in the form of conducting nanolayers. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2023;49(19):27–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.61011/PJTF.2023.19.56269.19645>]
11. Kumar N., Pandey G.N., Dhayal S., Dhayal S.S. Microwave Propagation Characteristics in Magnetized-Cold-Plasma-Based Binary Photonic Crystal with Defect of MCP Layer. *Macromol. Symp.* 2023;407(1):2100515. <https://doi.org/10.1002/masy.202100515>
12. Usanov D.A., Skripal' A.V., Posadskii V.N., et al. Defect Mode in Microwave Waveguide Bragg Structures with Metal Pins. *Tech. Phys.* 2019;64(10):1523–1526. <https://doi.org/10.1134/S1063784219100232>
[Original Russian Text: Usanov D.A., Skripal' A.V., Posadskii V.N., Tyazhlov V.S., Baikin A.V. Defect Mode in Microwave Waveguide Bragg Structures with Metal Pins. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2019;89(10):1606–1610 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/JTF.2019.10.48180.6-19>]
13. Khairushev I.V., Ryabov E.A., Sergeev S.A. Theoretical and experimental studies of photonic crystals manufactured by 3D printing technology in the X-band. *Microwave Electronics and Microelectronics*. 2022;1:546–549 (in Russ.). Available from URL: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2022/546-549.pdf>
14. Pei Z., Xu Y., Wei F., Liu T., Su D. Electromagnetic property of a novel gradient honeycomb composite fabricated by 3D forming. *J. Magn. Magn. Mater.* 2020;493:165742. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165742>
15. Andreev A.A., Ryabov E.A., Khairushev I.V., Sergeeva B.V., Sergeev S.A. The influence of temperature on the dielectric constant of plastics in the microwave range. *Microwave Electronics and Microelectronics*. 2023;1:388–392 (in Russ.). Available from URL: <https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2023/novoe/388-392.pdf>
16. Zechmeister J., Lacik J. Complex Relative Permittivity Measurement of Selected 3D-Printed Materials up to 10 GHz. In: *2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE)*. IEEE; 2019. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/COMITE.2019.8733590>
17. Liebig T., Rennings A., Held S., Erni D. OpenEMS – a free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications. *Int. J. Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*. 2013;26(6):680–696. <https://doi.org/10.1002/jnm.1875>

Об авторах

Рябов Евгений Александрович, ассистент, кафедра физики твердого тела, Институт физики, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: k1u2r3ka@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 9110-4151, <https://orcid.org/0000-0003-4777-7346>

Андреев Антон Андреевич, инженер, учебная лаборатория по полупроводниковой электронике, Институт физики, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: andreev25304@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 6173-0839, <https://orcid.org/0009-0003-3212-6484>

Сергеев Сергей Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент, кафедра физики твердого тела, Институт физики, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: ssergeev@bk.ru. SPIN-код РИНЦ 6883-7787, <https://orcid.org/0000-0002-4442-6797>

Михайлов Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, кафедра физики твердого тела, Институт физики, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, д. 83). E-mail: mikhailovai13@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 2491-0488, <https://orcid.org/0000-0002-4158-9195>

About the Authors

Evgeny A. Ryabov, Assistant, Department of Solid State Physics, Institute of Physics, Saratov National Research State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: k1u2r3ka@mail.ru. RSCI SPIN-code 9110-4151, <https://orcid.org/0000-0003-4777-7346>

Anton A. Andreev, Engineer, Semiconductor Technology Educational Laboratory, Institute of Physics, Saratov National Research State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: andreev25304@mail.ru. RSCI SPIN-code 6173-0839, <https://orcid.org/0009-0003-3212-6484>

Sergey A. Sergeev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Solid State Physics, Institute of Physics, Saratov National Research State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: ssergeev@bk.ru. RSCI SPIN-code 6883-7787, <https://orcid.org/0000-0002-4442-6797>

Alexander I. Mikhailov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of State Physics, Institute of Physics, Saratov National Research State University (83, Astrakhanskaya ul., Saratov, 410012 Russia). E-mail: mikhailovai13@mail.ru. RSCI SPIN-code 2491-0488, <https://orcid.org/0000-0002-4158-9195>