

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ
В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 201 группы кафедры физики твердого тела
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий
Алхаммуд Гхаитх Абдулраззак Хасакх

Научные руководители:

профессор, д.ф.-м.н. _____
подпись, дата

А.В. Скрипаль

доцент, к.ф.-м.н. _____
подпись, дата

Д.В. Понамарев

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н. _____
подпись, дата

Д.А. Усанов

Саратов 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Анализ современного состояния исследований фотонных кристаллов в СВЧ - диапазоне	4
2 Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона.....	6
3. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона.....	8
4. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов СВЧ-диапазона на основе отрезков коаксиальной линии передачи.....	9
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	11
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	12

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно проводятся исследования свойств, так называемых, фотонных кристаллов, которые характеризуются наличием частотных зон разрешенных состояний (полос пропускания) и запрещенных зон (полос запираания) [1–6]. Аналогично ситуации, характерной для электронов, находящихся в поле периодически расположенных атомов, энергетические состояния которых образуют для электронов зоны разрешенных и запрещенных значений энергии, свойства фотонных кристаллов связаны с периодическим расположением образующих их элементов.

Известны примеры создания фотонных кристаллов в оптическом, инфракрасном, ультрафиолетовом, СВЧ-диапазоне. В сверхвысокочастотном диапазоне фотонный кристалл может быть реализован как с помощью волноводов с диэлектрическим заполнением [7, 8], так и с использованием плоских линий передачи с периодически изменяющейся структурой полоска [9]. Для СВЧ-диапазона создать фотонный кристалл наиболее просто.

СВЧ фотонные кристаллы были использованы для создания высоконаправленных антенн, СВЧ-фильтров, улучшения характеристик СВЧ-детекторов, усилителей и т.д. [10–13]. Возможность рассчитывать характеристики фотонных кристаллов с точностью, позволяющей обеспечить хорошее совпадение с экспериментом, была использована для неразрушающего контроля структур с нанометровыми полупроводниковыми слоями [14–16]. При этом контролируемые структуры являлись элементами, нарушающими периодичность фотонного кристалла.

Целью настоящей работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование характеристик фотонных кристаллов СВЧ-диапазона в волноводном исполнении и на основе отрезков коаксиальной линии передачи.

Положение, выносимое на защиту:

При смещении нарушения из центрального слоя СВЧ фотонного кристалла наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом на частоте дефектной моды пучность стоячей волны внутри фотонного кристалла с максимальной напряженностью электрического поля наблюдается в области нарушенного слоя.

1. Анализ современного состояния исследований фотонных кристаллов в СВЧ - диапазоне

Фотонные кристаллы относятся к классу метаматериалов и представляют собой искусственно созданные периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения [17, 18]. Для этих структур свойственно периодическое изменение, как диэлектрической проницаемости слоев, так и их геометрических размеров. При взаимодействии электромагнитного излучения с такими структурами в спектрах отражения и прохождения наблюдается чередование разрешенных и запрещенных для распространения электромагнитного излучения частотных диапазонов [19, 20]. По аналогии с реальными кристаллами, частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны, получила название фотонной запрещенной зоны. При внесении нарушения («неоднородности») в периодичность структуры фотонного кристалла, которое может быть представлено в виде изменения геометрических размеров и/или электрофизических параметров одного или нескольких слоев, в запрещенной зоне фотонного кристалла возникает резонансная особенность, называемая «примесной модой колебаний».

Фотонные кристаллы по типу пространственной структуры делятся на одномерные [21–23], двумерные [24–28] и трехмерные [29–32]. Двумерные и

трехмерные фотонные кристаллы обладают большими возможностями по изменению пространственной структуры и управлению электрофизическими свойствами. Однако сложность двумерной и трехмерной конфигурации фотонного кристалла значительно затрудняет расчет взаимодействия такого рода структур с распространяющимся в них электромагнитным излучением. Одномерные фотонные кристаллы [33–36] обладают сравнительной простотой в аналитическом описании взаимодействия электромагнитной волны с периодической структурой и технологичностью создания периодической системы.

Фотонные кристаллы работают в различных частотных диапазонах электромагнитного спектра: оптическом [37], инфракрасном [38], ультрафиолетовом [39, 40], СВЧ-диапазоне [41, 42]. При переходе в более высокочастотные диапазоны происходит повышение трудоемкости и стоимости процессов изготовления и контроля параметров периодических структур. Поскольку в СВЧ-диапазоне фотонные кристаллы обладают высокой технологичностью производства, состоят из макроскопических объектов, то данный диапазон выгодно отличается от других.

Благодаря свойствам фотонных кристаллов, а именно наличию запрещенных и разрешенных зон в спектрах прохождения и отражения данных структур, на их основе возможно изготовление различных типов фильтров с управляемыми характеристиками [43–45]. Управление характеристиками может осуществляться как на технологической стадии [46, 47], так и при помощи внешних воздействий [48]. Внешнее управление осуществляется воздействием на специально введенные в периодическую структуру фотонного кристалла управляющие слои и ячейки, содержащие, например, жидкие кристаллы и $p-i-n$ -диоды [48–51].

2 Компьютерное моделирование амплитудно-частотных характеристик волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона

Для расчета частотной зависимости коэффициентов отражения $R(\omega)$ и прохождения $D(\omega)$ электромагнитной волны при её нормальном падении на многослойную структуру, полностью заполняющую волновод по поперечному сечению и имеющую плоскости слоев, перпендикулярные направлению распространения излучения (рис.1), воспользуемся матрицей передачи волны между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны γ_j и γ_{j+1} [6, 15, 158].

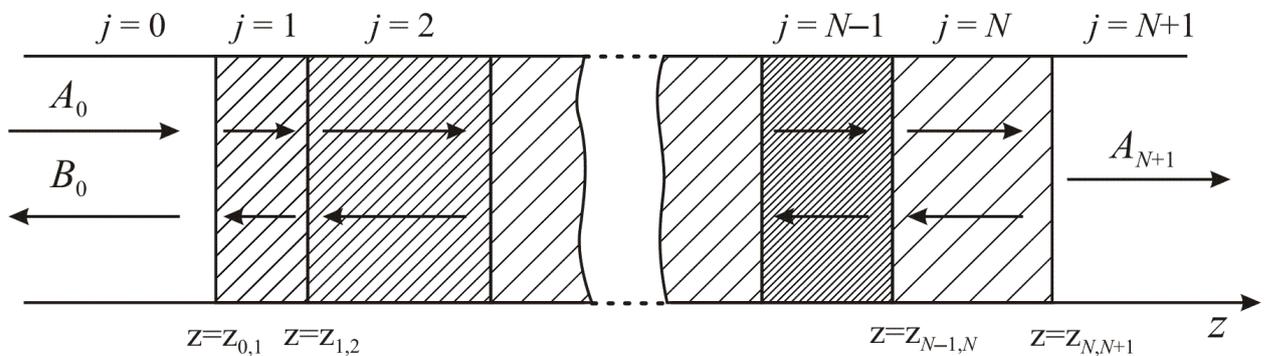


Рис. 1 Слоистая структура, состоящая из N слоев

Постоянные распространения электромагнитной волны $\gamma_0, \gamma_d, \gamma_{п, под}$ соответственно в пустом волноводе, в диэлектрических и полупроводниковых слоях, полностью заполняющих волновод по поперечному сечению, будем рассчитывать с использованием выражений [2, 180]:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0} \quad (1)$$

$$\gamma_d = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_d \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (2)$$

$$\gamma_{п, под} = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_{п, под}^* \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{п, под}^* = \varepsilon'_{п, под} - j\varepsilon''_{п, под}$ – комплексные диэлектрические проницаемости сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки; $\varepsilon'_{п, под} = \varepsilon_{п, под} - \frac{\sigma_{п, под}^2 m_{п, под}^*}{\varepsilon_0 e^2 n_{п, под}}$, $\varepsilon''_{п, под} = \frac{\sigma_{п, под}}{\varepsilon_0 \omega}$ – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки; $\varepsilon_{п, под}$ – относительная диэлектрическая проницаемость решетки сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки; $\sigma_{п, под}$ – электропроводность сильнолегированного полупроводникового n^+ -слоя и полупроводниковой подложки; $m_{п, под}^*$, $n_{п, под}$ – эффективная масса и концентрация электронов в сильнолегированном полупроводниковом n^+ -слое и полупроводниковой подложке; a – размер широкой стенки волновода; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота электромагнитной волны; ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя.

Исходя из выражений для компонент поля по разные стороны от границы между областями с различными значениями постоянной распространения электромагнитной волны и условия непрерывности компонент поля на границе, находящейся на расстоянии $z_{j,j+1}$ от поверхности структуры, представленных в работе [2], можно записать следующее выражение для компонент матрицы передачи:

$$\mathbf{T}(z_{j,j+1}) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} \\ \frac{\gamma_{j+1} - \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} + \gamma_j)z_{j,j+1}} & \frac{\gamma_{j+1} + \gamma_j}{2\gamma_{j+1}} e^{-(\gamma_{j+1} - \gamma_j)z_{j,j+1}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

которая связывает коэффициенты A_j, B_j и A_{j+1}, B_{j+1} , определяющие амплитуды падающих и отраженных волн по обе стороны от границы $z_{j,j+1}$, соотношением:

3. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик волноводных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона

Было экспериментально исследовано влияние количества слоев в фотонном кристалле без нарушений на вид АЧХ.

На рис. 2 представлены АЧХ 11-и слойного и 15-и слойного фотонного кристалла без нарушений.

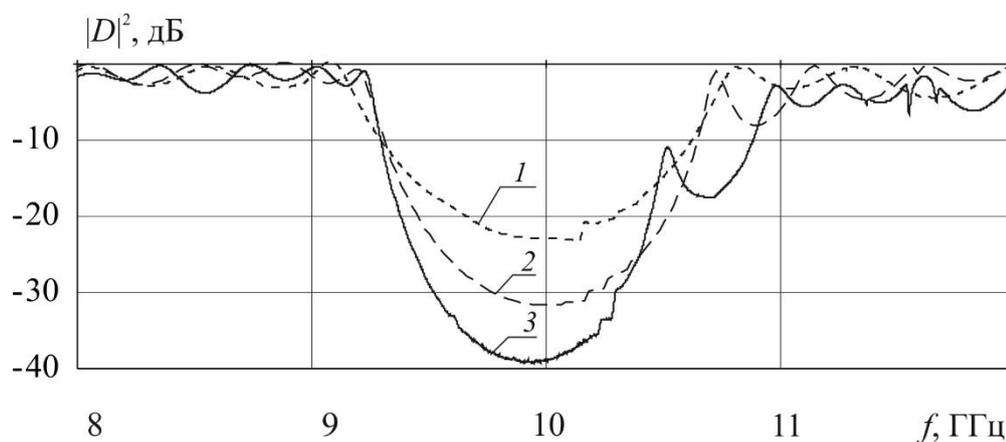


Рис. 2 АЧХ 11-и слойного (кривая 1), 15-и слойного (кривая 2) и 19-и слойного (кривая 3) фотонного кристалла без нарушений

Как следует из результатов эксперимента при увеличении числа слоев фотонного кристалла, составленного из периодически чередующихся слоев поликора и фторопласта, от 11 слоев до 19 слоев ширина запрещенной зоны уменьшилась от 1.743 ГГц до 1.294 ГГц, а её глубина увеличилась от -22.8 дБ до -39.3 дБ.

Было экспериментально исследовано влияние местоположения нарушения в фотонном кристалле на вид АЧХ фотонного кристалла с дефектной модой.

На рис. 3 представлены АЧХ 15-и слойного фотонного кристалла с различным местоположением нарушения в фотонном кристалле.

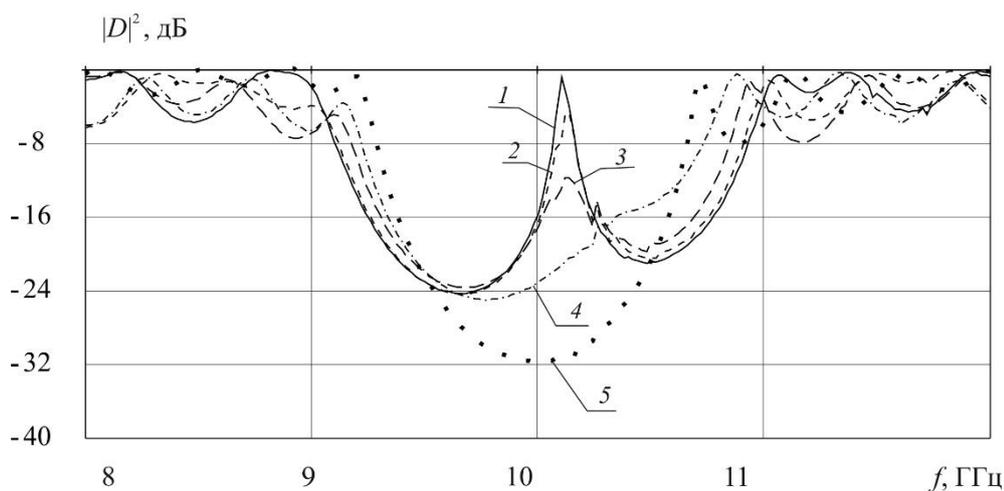


Рис. 3 АЧХ фотонного кристалла с различным местоположением нарушения в 15-и слойном фотонном кристалле: 1–8-й слой, 2–6-й слой, 3–4-й слой, 4–2-й слой, 5– без нарушения

Как следует из результатов эксперимента при смещении нарушения из центрального слоя наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом наблюдается незначительное смещение дефектной моды в низкочастотную область.

4. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик фотонных кристаллов СВЧ-диапазона на основе отрезков коаксиальной линии передачи

Исходя из результатов моделирования, был сконструирован фотонный кристалл на основе отрезков коаксиальной линии передачи, состоящий из одиннадцати последовательно соединенных отрезков коаксиальной линии передачи с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью отрезка коаксиальной линии передачи (рис.4). Нечетные отрезки коаксиальной линии передачи заполнены слоями из поликора (Al_2O_3). Четные отрезки коаксиальной линии передачи заполнены слоями из фторопласта.

Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L NetworkAnalyzer N5230A, в диапазоне от 0,1ГГц до 12,0ГГц.

Экспериментально полученная АЧХ 11-и слойного коаксиального фотонного кристалла представлена на рис. 5.1. Полученная АЧХ демонстрирует наличие запрещенной и разрешенных зон, что характеризует исследуемую структуру как фотонный кристалл.

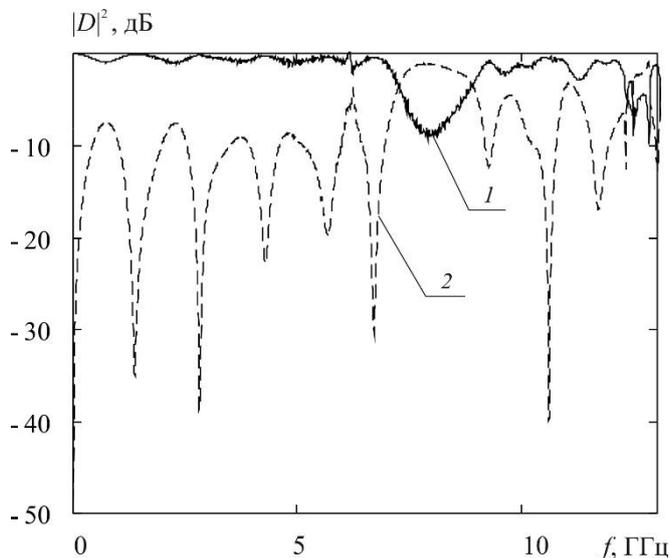


Рис. 4 Экспериментальная АЧХ 11-и слойного коаксиального фотонного кристалла без нарушений 10 мм фторопласт и 2 мм поликор

Результаты измерений АЧХ 11-и слойного коаксиального фотонного кристалла с нарушением в виде слоя фторопласта толщиной 2 мм представлены на рис. 5.

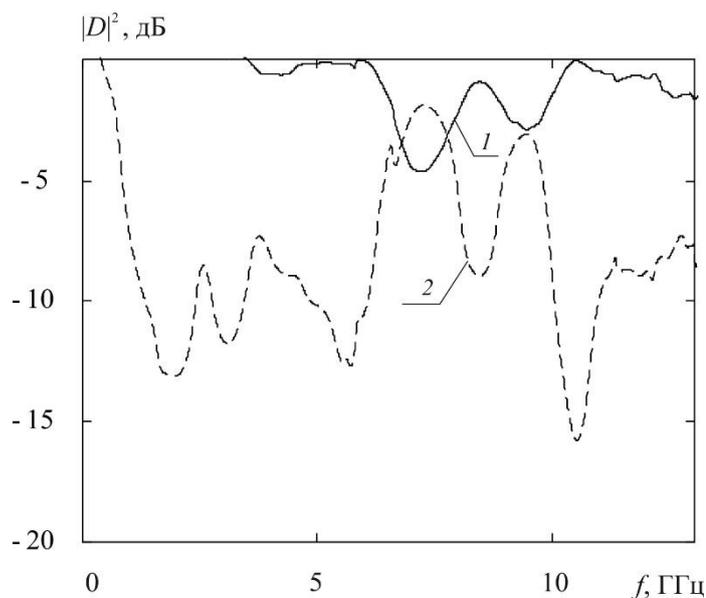


Рис. 5. Экспериментальная АЧХ 11-и слойного коаксиального фотонного кристалла с нарушением в виде слоя фторопласта толщиной 2 мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской работы были получены следующие результаты

- 1 Проведен анализ современного состояния исследований фотонных кристаллов в СВЧ – диапазоне.
- 2 Выполнено компьютерное моделирование АЧХ коэффициентов прохождения электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, взаимодействующего с фотонными кристаллами с нарушением периодичности структуры.
- 3 Исследовано влияние местоположения нарушения в виде слоя измененной толщины одного из слоёв волноводного фотонного кристалла на вид АЧХ фотонного кристалла с дефектной модой.
- 4 Выполнен расчет на частоте дефектной моды распределения напряженности электрического поля вдоль фотонного кристалла типа поликор–поликор при различном расположении нарушения в структуре.
- 5 Установлено, что при смещении нарушения из центрального слоя наблюдается значительное уменьшение коэффициента пропускания на частоте дефектной моды. При этом на частоте дефектной моды пучность стоячей волны внутри фотонного кристалла с максимальной напряженностью электрического поля наблюдается в области нарушенного слоя.
- 6 Теоретически исследованы и экспериментально реализованы структуры на основе отрезков коаксиальной линии передачи, состоящие из одиннадцати последовательно соединенных отрезков коаксиальной линии передачи с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью, характеризующиеся наличием запрещенной зоны на АЧХ коэффициента прохождения в СВЧ-диапазоне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// *Phys. Rev. Lett.* 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.
2. Yablonovitch E., Gmitter T.J., Meade R.D. Donor and acceptor modes in photonic band structure// *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 67, no. 24. pp. 3380–3383.
3. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах// *Доклады Академии Наук.* 2005. Т. 400, № 2. С. 181—185.
4. Fernandes H.C.C., Medeiros J.L.G., Junior I.M.A. et al. Photonic Crystal at Millimeter Waves Applications// *PIERS Online.* 2007. Vol. 3, no. 5. pp. 689–694.
5. Saib A., Huynen I. Periodic Metamaterials Combining Ferromagnetic Nanowires and Dielectric Structures for Planar Circuits Applications// *Electromagnetics.* 2006. Vol. 26, issue 3–4, pp. 261–277.
6. Зайцев Д. Ф. Нанопотоника и ее применение. М.:Актеон. 2012.
7. Tae-Yeoul and Kai Chang. Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2001. – Vol. 49, N. 3. — P. 549—553.
8. Dmitry Usanov, Alexander Skripal, Anton Abramov, Anton Bogolubov, Vladimir Skvortsov, MerdanMerdanov. Measurement of the Metal Nanometer Layer Parameters on Dielectric Substrates using Photonic Crystals based on the Waveguide Structures with Controlled Irregularity in the Microwave Band // *Proc. of 37th European Microwave Conference.* Munich, Germany. 8–12thOctober 2007. P. 198–201.
9. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// *Радиотехника.* 2003. №8. С. 26–30.

10. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopolos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2001. — Vol. 49. — N 2. — pp. 297—306.
11. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals// Progress In Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, pp. 185–209.
12. Gomez A., Vegas A., Solano M.A. & Lakhtakia A. On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides at Microwave Frequencies// Electromagnetics. 2005. Vol. 25, issue 5. pp. 437–460.
13. Klymyshyn D.M., Jayatilaka H.C., Börner M., Mohr J. High Aspect-Ratio Coplanar Waveguide Wideband Bandpass Filter With Compact Unit Cells// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 57, No. 11. November 2009. P. 2753–2760.
14. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В. и др. Использование волноводных фотонных структур для измерения параметров нанометровых металлических слоев на изолирующих подложках// Известия вузов. Электроника. 2007. №6. С. 25–32.
15. Определение параметров тонких полупроводниковых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов/ Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.Э. Постельга, Д.В. Пономарев// Доклады Академии Наук. Т. 443, № 5, Апрель 2012, С. 564-566.
16. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов/ С.А. Никитов, Ю.В. Гуляев, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев// Доклады Академии Наук. Т. 448, № 1, Январь 2013. С. 35-37.
17. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics// Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, no. 20. pp. 2059—2062.
18. Yablonovitch E. Photonic Crystals: Semiconductors of Light// Scientific American. 2001. Vol. 285, no. 6. pp. 47–55.

19. Yablonovitch E. Photonic band-gap structures// Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics. 1993. Vol. 10, no.2. pp. 283–295.
20. Yablonovitch E. Photonic band-gap crystals// Journal of Physics-Condensed Matter. 1993. Vol.5, no.16. pp. 2443–2460.
21. Особенности спектров отражения и поглощения одномерных резонансных фотонных кристаллов/ М.М. Воронов, Е.Л. Ивченко, В.А. Кособукин, А.Н. Поддубный // ФТТ. 2007. Т. 49, вып. 9. С. 1709–1718.
22. Dubey R.S., Gautam D.K. Propagation of electromagnetic waves in 1D finite photonic crystals for the investigation of linear properties// Journal of Modern Optics. 2009. Vol. 56, issue 4, pp. 487–495.
23. Особенности распространения электромагнитных волн в слоистых магнитных фотонных кристаллах/ Ю.И. Беспятых, И.Е. Дикштейн, В.П. Мальцев, С.А. Никитов, В. Василевский// ФТТ. 2003. Т. 45, вып. 11. С. 2056–2061.
24. Басанов Б.В., Ветлужский А.Ю. Исследование волноводных структур на основе двумерных фотонных кристаллов// ПЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 13. С. 1–7.
25. Ветлужский А.Ю. О резонансных свойствах двумерных фотонных кристаллов// ПЖТФ. 2010.Т. 36, вып. 12. С. 78–85.
26. Ветров С.Я., Тимофеев И.В., Рудакова Н.В. Зонная структура резонансного двумерного фотонного кристалла// ФТТ. 2010. Т. 52, вып. 3. С. 489–494.
27. Figotin A., Godin Y.A. Two-dimensional tunable photonic crystals// Phys. Rev B. 1998. Vol. 57, no.5, pp. 2841–2848.
28. Гуляев Ю.В., Никитов С.А. Фотонные и магнитофотонные кристаллы – новая среда для передачи информации// Радиотехника. 2003. №8. С. 26–30.
29. 3-dimensional photonic band structure/ E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, K.M. Leung, R.D. Meade, A.M. Rappe, K.D. Brommer, J.D. Joannopoulos // Optical & Quantum Electronics. 1992. Vol. 24, no. 2. pp. S273–S283.

30. Ивченко Е.Л., Поддубный А.Н. Резонансные трехмерные фотонные кристаллы// ФТТ. 2006. Т. 48, вып. 3. С. 540–547.
31. Характеризация фотонных кристаллов на основе композитов опал–полупроводник по спектрам брэгговского отражения света/ Г.М. Гаджиев, В.Г. Голубев, Д.А. Курдюков, А.Б. Певцов, А.В. Селькин, В.В. Травников // ФТП. 2005. Т. 39, вып. 12. С.1423–1429.
32. Фотонные кристаллы с перестраиваемой запрещенной зоной на основе заполненных и инвертированных композитов опал—кремний/ В.Г. Голубев, В.А. Кособукин, Д.А. Курдюков, А.В. Медведев, А.Б. Певцов// ФТП. 2001. Т. 35, вып. 6. С. 710–713.
33. Фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов/ Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, М.Ю. Куликов// Известия вузов. Электроника. 2008. № 5. С. 25—32.
34. Contopanagos H., Alexopoulos N.G., and Yablonovitch E. High-Q Radio-Frequency Structures Using One-Dimensionally Periodic Metallic Films// IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 1998. Vol. 46, no. 9. pp. 1310—1312.
35. СВЧ-фотонные структуры и их использование для измерения параметров материалов и создания функциональных устройств СВЧ-электроники/ Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, М.Ю. Куликов, В.С. Скворцов, М.К. Мерданов// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11, № 3. С. 51—59.
36. Contopanagos H., Yablonovitch E., Alexopoulos N.G., Electromagnetic properties of periodic multilayers of ultrathin metallic films from dc to ultraviolet frequencies// J. Opt. Soc. Am. A. 1999. Vol. 16, no. 9. pp. 2294—2306.
37. Силин Р. А. О фотонных кристаллах// Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 2. С. 133–143.
38. Three-dimensional metallodielectric photonic crystals exhibiting resonant infrared stop bands/ К.А. McIntosh, L.J. Mahoney, К.М. Molvar, О.В. McMahon, S. Verghese et al.// Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70, issue 22. pp. 2937–2939.

39. Ultraviolet photonic crystal laser/ X. Wu, A. Yamilov, X. Liu, S. Li, V. P. Dravid, R. P. H. Chang, and H. Cao// *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85, issue 17. pp. 3657–3659.
40. Radeonychev Y.V., Koryukin I.V., Kocharovskaya O. Continuous wave photonic crystal laser in ultraviolet range// *Laser Physics*. 2009. Vol. 19, issue 6, pp. 1207–1212.
41. Yablonovitch E. Photonic Crystals// *Journal of Modern Optics*. 1994. Vol. 41, no. 2, pp. 173–194.
42. Бе́ляев Б. А., Во́лошин А. С., Шаба́нов В. Ф. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах// *Доклады Академии Наук*. 2005. Т. 400, № 2. С. 181—185.
43. Spatial filtering using dielectric photonic crystals at beam-type excitation/ E. Colak, A.O. Cakmak, A.E. Serebryannikov, and E. Ozbay // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108, issue 11. pp. 113106–113106-8.
44. Kuriazidou C.A., Contopanagos H.F., Alexopoulos N.G. Monolithic waveguide filters using printed photonic-bandgap materials// *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2001. Vol. 49, no. 2. pp. 297—306.
- 45 Karmakar N.C., Mollah M.N. Investigations Into Nonuniform Photonic-Bandgap Microstripline Low-Pass Filters// *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. 2003. Vol. 51, no. 2, pp. 564—572.
46. Саму́сев А.К., Ры́бин М.В., Лимо́нов М.Ф. Селективное переключение стоп-зон в двумерных многокомпонентных фотонных кристаллах// *ФТТ*. 2009. Т. 51, вып. 3. С. 487–492.
47. Ветро́в С.Я., Тимофе́ев И.В., Руда́кова Н.В. Прохождение света через плоскопараллельную пластинку двумерного резонансного фотонного кристалла// *ФТТ*. 2011. Т. 53, вып. 1. С. 133–138.
48. Увеличение интенсивности фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света в одномерных фотонных кристаллах на основе пористого

кремния/ К.А. Гончар, Г.К. Мусабек, Т.И. Таурбаев, В.Ю. Тимошенко// ФТП. 2011. Т. 45, вып. 5, С. 625–628.

49. Термооптическое переключение в одномерном фотонном кристалле/ В.А. Гуняков, В.П. Герасимов, С.А. Мысливец, В.Г. Архипкин, С.Я. Ветров, Г.Н. Камаев, А.В. Шабанов, В.Я. Зырянов, В.Ф. Шабанов// ПЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 21. С. 76–83.

50. Управление пропусканием многослойного фотонного кристалла с жидкокристаллическим дефектом с помощью магнитного поля/ В.А. Гуняков, С.А. Мысливец, А.М. Паршин, В.Я. Зырянов, В.Г. Архипкин, В.Ф. Шабанов // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 10. С. 95–100.

51. Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми р-і-п-диодами/ Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.С. Боголюбов, В.С. Скворцов, М.К. Мерданов// Изв.вузов Электроника. 2010. № 1. С. 24—29.

52. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Посадский В.Н., Тяжлов В.С., Байкин А.В. Низкоразмерные волноводные фотонные кристаллы// Доклады академии наук. 2014. Т.458, № 4. С. 406–409.

53. Tae-Yeoul and Kai Chang. Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49, N. 3. — P. 549—553.

54. Мухортов В.М., Масычев С.И., Маматов А.А., Мухортов Вас.М. Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой // Письма в ЖТФ. том 39, вып. 20. 2013. С.70–76.

55. Md. Nurunnabi Mollaha, Nemaï C. Karmakar, Jeffrey S. Fu, Uniform circular photonic bandgap structures (PBGs) for harmonic suppression of a bandpass filter // International Journal of Electronics and Communications (AEÜ), vol. 62, 2008, p. 717—724.

56. Б. А. Беляев, А. С. Волошин, В. Ф. Шабанов, Исследование добротности резонанса примесной моды в микрополосковой модели одномерного

фотонного кристалла // Доклады Академии Наук, 2005, том 403, № 3, с. 319—324.

57. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Куликов М.Ю., Пономарев Д.В. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 8, с. 143—148.

58. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Д.С.Рязанов Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-щелевых линиях // Радиотехника и электроника. 2016. Т.61, №4. С.1–6.

59. Sung-II Kim, Mi-Young Jang, Chul-Sik Kee, Ikmo Park, H. Lim, Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic bandgap ring structures // Current Applied Physics, 2005, N. 5, pp. 619—624.

60. Chul-Sik Kee, Mi-Young Jang, Sung-II Kim, Ikmo Park, and H. Lim, Tuning and widening of stop bands of microstrip photonic band gap ring structures // Applied Physics Letters, 2005, vol. 86, 181109

61. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Фролов А.П., Орлов В.Е. Волноводы, содержащие рамочные элементы с электрически управляемыми характеристиками разрешенных и запрещенных зон. Радиотехника и электроника. 2014, том. 59. № 11. С. 1079–1084.

62. Wei T., Wu S., Huang J., Xiao H. and Fan J. Coaxial cable Bragg grating // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 99. P. 113517 (3).

63. Ozbay E., Temelkuran B., and Bayindir M. Microwave applications of photonic crystals // Progress In Electromagnetics Research, 2003. Vol. 41, pp. 185–209.

64. Photonic Crystal at Millimeter Waves Applications/ H.C.C. Fernandes, J.L.G. Medeiros, I.M.A. Junior, and D.B. Brito // PIERS Online. 2007. Vol. 3, no. 5. pp. 689–694.

65. Microwave Propagation in a Square Lattice Using Different Dielectric Materials for Device Applications/ E.D.V. Nagesh, V. Subramanian, V.

Sivasubramanian & V.R.K. Murthy // *Ferroelectrics*. 2005. Vol. 327, issue 1.
pp. 11–17.