

УДК 537.8

## МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ИЗ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO

© 2016 г. В.М. Мухортов<sup>1</sup>, С.И. Масычев<sup>1</sup>, П.Е. Тимошенко<sup>2</sup>

**Аннотация.** Проведен электродинамический расчет частотных характеристик микрополосковых кольцевых резонаторов, связанных через емкостный зазор с микрополосковой линией, сформированных на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO. Расчет проведен для кольцевых резонаторов квадратной и трапециевидной формы. Показано, что при изменении формы резонатора за счет нарушения его симметрии происходит качественное изменение характера частотной зависимости фазы его коэффициента передачи  $S_{21}$ . Для имеющего форму трапеции кольцевого резонатора, связанного через емкостный зазор с микрополосковой линией, наблюдается ярко выраженное замедление электромагнитной волны вблизи его первой собственной частоты. В отличие от кольцевого резонатора квадратной формы, у которого нет какого-либо замедления электромагнитной волны во всем исследованном частотном диапазоне, у резонатора, имеющего форму трапеции, отсутствует «расщепление» частотной характеристики модуля коэффициента передачи на собственных частотах, свидетельствующее о двухмодовом режиме возбуждения. Проведен электродинамический расчет характеристик периодической структуры, состоящей из связанных через емкостный зазор с микрополосковой линией кольцевых резонаторов, сформированных на поверхности сегнетоэлектрической гетероструктуры (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO. Указанная структура имеет три периода, каждый из которых образован последовательным соединением двух кольцевых резонаторов с формой трапеции, отличающихся друг от друга длиной области связи с микрополосковой линией. Установлено, что исследованная структура является фотонным кристаллом, о чем свидетельствует неизменность фазы коэффициента передачи в пределах частотного диапазона с бесконечно большим коэффициентом отражения. Показано, что при подаче напряжения смещения на тонкую сегнетоэлектрическую пленку можно эффективно управлять параметрами фотонной запрещенной зоны такого фотонного кристалла, перемещая ее в случае увеличения напряжения в более высокочастотную область. Установленные особенности частотной характеристики фазы коэффициента передачи исследованного фотонного кристалла могут быть использованы при разработке перестраиваемых устройств обработки сигналов СВЧ-диапазона длин волн.

**Ключевые слова:** фотонный кристалл, фотонная запрещенная зона, сегнетоэлектрическая тонкая пленка, микрополосковая линия, кольцевой резонатор.

### MICROSTRIP TUNABLE PHOTONIC CRYSTAL WITH THE PERIODIC STRUCTURE OF RING RESONATORS FORMED ON THE SURFACE OF THE (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO FERROELECTRIC HETEROSTRUCTURES

V.M. Mukhortov<sup>1</sup>, S.I. Masychev<sup>1</sup>, P.E. Timoshenko<sup>2</sup>

**Abstract.** The microstrip ring resonator linked to the microstrip line via a capacitive gap and located on the surface of ferroelectric heterostructure (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO is studied. The numerical results of electrodynamic

<sup>1</sup> Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; e-mail: mukhortov1944@mail.ru

<sup>2</sup> Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42; e-mail: p.e.timoshenko@gmail.com

modeling are presented for ring resonators with square and trapezoidal shapes. It is shown that the frequency dependency of  $S_{21}$  scattering parameter phase changes qualitatively due to the violation of shape symmetry. The electromagnetic wave near its first Eigen-frequency of resonator has a strong deceleration when the shape of ring resonator is a trapezoid one. In case of square-shaped resonators, the wave deceleration is negligible. The trapezoid-shaped ring resonator doesn't split the resonances of transmission coefficient module at its Eigen-frequencies. It proves that the resonator with a trapezoidal shape has no dual-mode excitation. The array of ring resonators linked to the shared microstrip line via capacitive gaps and located on the surface of ferroelectric heterostructure (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub>/MgO is also studied. The investigated array contains three pairs of trapezoid-shaped resonators, in which the longitudinal gap size varies periodically. It has been ascertained that this planar structure is a photonic crystal. It is proved by the invariance of the transmission coefficient phase and the significantly large reflection coefficient in a certain wide frequency range. The properties of a photonic band gap may be tuned flexibly by the bias electric field applied to the thin ferroelectric film. For instance, when the bias voltage increases, the frequency range of a band gap moves up. The numerical results presented in this paper may be employed in the development of tunable microwave devices of analog signal processing.

**Keywords:** photonic crystal, photonic band gap, the ferroelectric thin film, microstrip line, ring resonator.

Фотонные кристаллы представляют собой искусственно созданные периодические структуры с периодом, сравнимым с длиной распространяющегося в них электромагнитного излучения [1]. При взаимодействии электромагнитного излучения с такого рода структурами в спектрах отражения и прохождения наблюдается ярко выраженное чередование разрешенных и запрещенных для распространения электромагнитного излучения частотных диапазонов [2]. Частотная область, запрещенная для распространения электромагнитной волны, получила название фотонной запрещенной зоны по аналогии с запрещенной зоной в кристаллах.

Фотонные кристаллы могут быть реализованы в различных частотных диапазонах электромагнитного спектра: оптическом, инфракрасном, ультрафиолетовом, а также в СВЧ-диапазоне [3]. Значительным достоинством фотонных кристаллов в СВЧ-диапазоне длин волн является то обстоятельство, что конструктивно фотонный кристалл может быть создан на основе стандартных элементов СВЧ-схем, например на основе различного рода линий передачи. В то же время полученные результаты исследований физических аспектов взаимодействия СВЧ-излучения с фотонным кристаллом могут быть использованы для создания структур, работающих в более высокочастотных диапазонах, в частности в оптическом диапазоне.

Наличие запрещенных и разрешенных зон в спектрах прохождения и отражения фотонных кристаллов дает возможность создания на их базе различных типов СВЧ-устройств с управляемыми характеристиками [4; 5]. Управление может осуществляться посредством воздействия на специально введенные в периодическую структуру фотонного кристалла управляющие слои и ячейки, содержащие, например, жидкие кристаллы или *p-i-n*-диоды [6–8].

Вместе с тем наиболее перспективным, на наш взгляд, способом управления характеристиками

фотонных кристаллов является их реализация на основе диэлектрических подложек с тонкой сегнетоэлектрической пленкой [9–11].

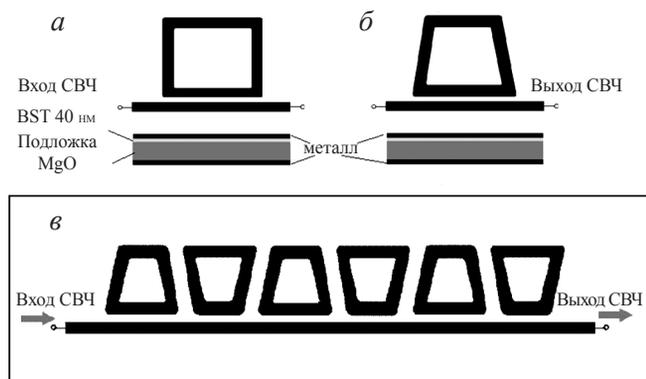
В то же время актуальным направлением стало исследование возможностей уменьшения размеров фотонных кристаллов СВЧ-диапазона. Это уменьшение возможно, во-первых, за счет применения подложек с высоким значением эффективной диэлектрической проницаемости (такая возможность реализуется при напылении на диэлектрическую подложку тонкой сегнетоэлектрической пленки [9]), во-вторых, за счет уменьшения количества периодов структуры с фотонной запрещенной зоной. Второй из указанных вариантов исследован в работах [12–14], в которых изучаются характеристики микрополосковых СВЧ-фильтров с кольцевым элементом, обладающих свойствами структур с фотонной запрещенной зоной.

Рассмотренная в [12–14] конструкция представляет собой микрополосковую структуру, в которой кольцевой элемент – полосковый проводник, замкнутый в круглое или прямоугольное кольцо, – снабжен входным и выходным элементом в виде регулярных микрополосковых линий, а также имеет разрыв для монтажа дискретного элемента цепи – конденсатора или катушки индуктивности, используемой для управления характеристиками. Такая структура обладает характерной частотной зависимостью коэффициента передачи, содержащей полосу заграждения (стоп-зону), центральная частота которой зависит от геометрических размеров кольцевого элемента, а также от электрических параметров дискретного элемента, установленного в разрыве кольца.

В работах [13; 14] исследовалась также возможность изменения ширины стоп-зоны за счет вариации размеров и формы кольцевого элемента. При этом рассматривались квадратные и узкие U-образные схемы топологии. Полученные результаты позволяют говорить о перспективности использо-

вания кольцевой структуры для реализации компактных СВЧ-устройств, таких как перестраиваемые фильтры, выключатели и переключатели.

Еще более перспективной представляется конструкция, в которой кольцевой резонатор на диэлектрической подложке с сегнетоэлектрической пленкой связан через емкостный зазор с отрезком микрополосковой линии [15]. Один из вариантов такой конструкции приведен на рисунке 1а. Резонатор имеет симметричную квадратную форму. Симметрия является фундаментальным физическим параметром и существенно определяет свойства системы. Нарушение симметрии приводит к изменению свойств физической системы.

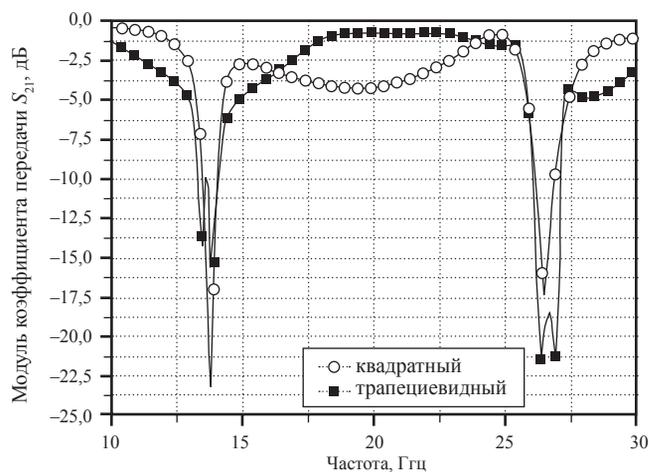


**Рис. 1.** Микрополосковая линия, нагруженная кольцевым резонатором: в форме квадрата (а), в форме трапеции (б); периодическая структура из асимметричных кольцевых резонаторов (в)  
**Fig. 1.** Microstrip line loaded with a ring resonator: in the form of a square (a), in the form of a trapezium (b); periodic structure of asymmetric ring resonators (c)

На рисунке 2 приведены рассчитанные электродинамическим методом моментов характеристики резонатора симметричной квадратной формы. Особенность резонаторов симметричной формы – их двухмодовость, что проявляется в «расщеплении» частотной характеристики модуля коэффициента передачи на собственных частотах этого резонатора. На рисунке 3 приведена частотная зависимость фазы коэффициента передачи резонатора, изображенного на рисунке 1а.

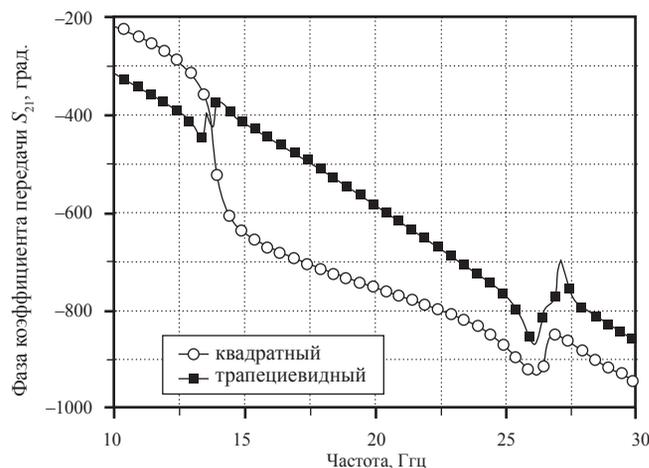
Сопоставление характеристик, приведенных на рисунках 2 и 3, показывает, что на собственных частотах резонатора симметричной формы имеет место скачок фазы на частотной зависимости фазы коэффициента передачи  $S_{21}$ .

Как свидетельствуют наши электродинамические расчеты, при изменении формы резонатора за счет нарушения его симметрии происходит качественное изменение характера частотной зависимости фазы его коэффициента передачи  $S_{21}$ . На рисунке 1б изображен резонатор асимметричной формы. Его отличие от резонатора, изображенного



**Рис. 2.** Частотная зависимость модуля коэффициента передачи  $S_{21}$  кольцевого резонатора

**Fig. 2.** Frequency dependence of modulus of  $S_{21}$  transmission coefficient of the ring resonator



**Рис. 3.** Частотная зависимость фазы коэффициента передачи  $S_{21}$  кольцевого резонатора

**Fig. 3.** Frequency dependence of the phase of  $S_{21}$  transmission coefficient of the ring resonator

на рисунке 1а, состоит в том, что он имеет форму не прямоугольника, а трапеции. Собственные частоты кольцевого резонатора любой формы определяются длиной его периметра. Размеры резонаторов (рис. 1а, б) выбраны так, чтобы у них была одинаковая длина периметра, т. е. чтобы их собственные частоты совпадали. Для расчетов были использованы следующие параметры: длина стороны резонатора квадратной формы, изображенного на рисунке 1а, равна 1,15 мм, ширина полоскового проводника, из которого образован резонатор, – 0,4 мм, толщина металлизации проводников – 2 мкм, ширина микрополосковой линии, нагруженной резонатором, равна 85 мкм, ее длина – 4 мм, толщина подложки MgO – 0,5 мм, диэлектрическая проницаемость подложки – 9,8, толщина пленки (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> (BST) равна 40 нм, ее диэлектрическая

прозрачность – 1000. Для резонатора, имеющего форму трапеции (рис. 1б), основание трапеции равно 1,6 мм, другие стороны трапеции равны 1 мм. Остальные параметры те же, что и для случая квадратного резонатора, изображенного на рисунке 1а.

Сравнение рассчитанных характеристик модуля коэффициента передачи  $S_{21}$  приведено на рисунке 2. Собственные частоты у резонаторов разных форм совпадают, но резонатор с асимметричной формой, в отличие от изображенного на рисунке 1а, не является двухмодовым. На рисунке 3 приведены рассчитанные частотные зависимости фазы коэффициента передачи  $S_{21}$  для резонаторов, имеющих квадратную (симметричную) и трапециевидную (асимметричную) форму. Качественным отличием резонатора асимметричной формы является ярко выраженное замедление электромагнитной волны вблизи его первой собственной частоты. Эта особенность может быть использована при разработке устройств обработки сигналов в СВЧ-диапазоне. Для реализации фотонных кристаллов СВЧ-диапазона в том числе могут быть использованы кольцевые резонаторы с асимметричной формой.

Проведен электродинамический расчет характеристик периодической структуры, состоящей из последовательного соединения кольцевых резонаторов асимметричной (трапециевидной) формы (рис. 1б). Указанная структура имеет три периода, каждый из которых образован последовательным соединением двух совершенно идентичных кольцевых резонаторов с формой трапеции (рис. 1б). Но в каждой такой паре резонаторов, образующих период, резонаторы повернуты на  $180^\circ$  друг относительно друга, из-за чего у них различается длина области связи с микрополосковой линией. У первого входящего в период трапециевидного резонатора длина области связи с микрополосковой линией равна длине основания трапеции, т. е. 1,6 мм, у другого, повернутого на  $180^\circ$ , длина области связи – 1 мм.

На рисунке 4 приведены характеристики указанной структуры. Характер частотной зависимости свидетельствует о том, что исследованная структура является фотонным кристаллом, поскольку, как будет показано ниже, фаза внутри стоп-зоны на частотах вблизи 20 ГГц практически не меняется. Остальные стоп-зоны соответствуют собственным частотам резонаторов, из которых образован фотонный кристалл.

При подаче напряжения смещения на тонкую сегнетоэлектрическую пленку можно эффективно управлять параметрами фотонной запрещенной зоны, перемещая ее в случае увеличения напряжения в более высокочастотную область, что хорошо видно на рисунке 5.

Общая теория возникновения фотонных запрещенных зон и необходимые условия для их появле-

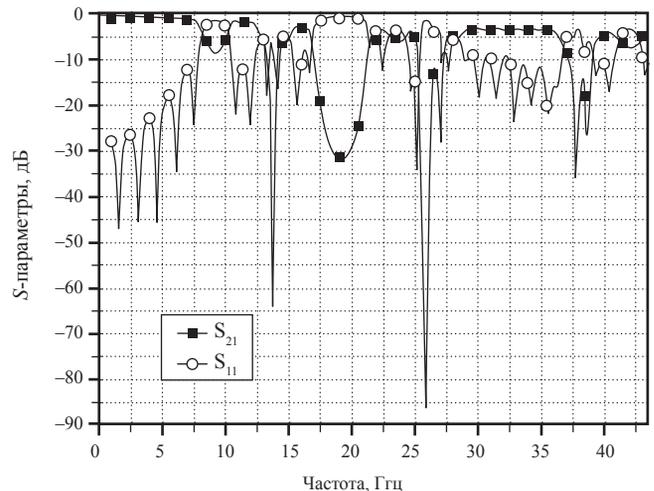


Рис. 4. Частотные характеристики фотонного кристалла с периодической структурой из кольцевых резонаторов

Fig. 4. Frequency characteristics of a photonic crystal with a periodic structure of the ring resonators

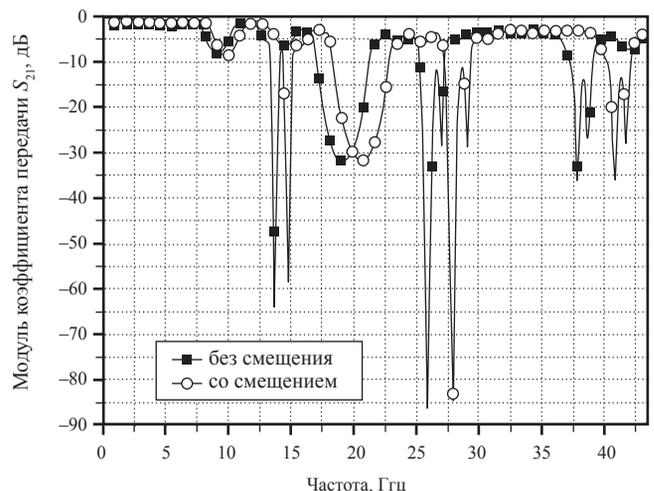
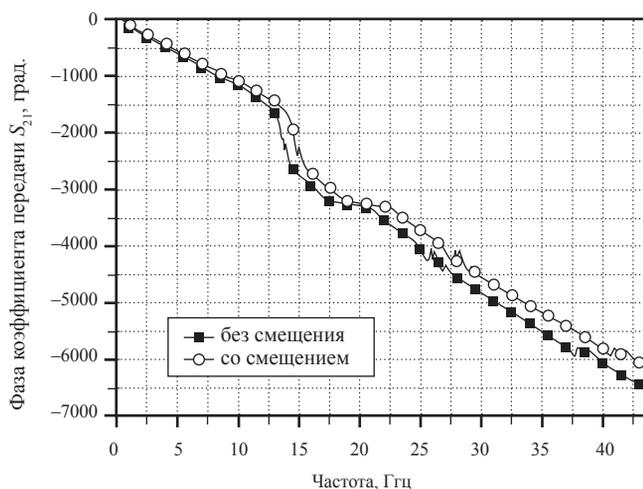


Рис. 5. Частотные характеристики модуля коэффициента передачи  $S_{21}$  фотонного кристалла с периодической структурой из кольцевых резонаторов в зависимости от наличия напряжения смещения, подаваемого на сегнетоэлектрическую тонкую пленку  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$

Fig. 5. Frequency characteristics of modulus of  $S_{21}$  transmission coefficient of a photonic crystal with a periodic structure of the ring resonators depending on the presence of bias voltage applied to the ferroelectric thin film of  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$

ния в частотном спектре фотонного кристалла пока окончательно не сформулированы. Согласно современным представлениям, появление фотонных запрещенных зон в спектре пропускания оптического фотонного кристалла связано с взаимодействием между микроскопическим и макроскопическим резонансами в периодической системе, каковой служит диэлектрическая сверхрешетка. Макроскопический (брэгговский) резонанс обусловлен периодичностью системы (диэлектрической сверхрешетки), в то время

как микроскопический резонанс (собственные моды Ми) относится к узлу сверхрешетки [16]. Максимальная ширина фотонной запрещенной зоны имеет место тогда, когда частоты этих резонансов совпадают.



**Рис. 6.** Частотные характеристики фазы коэффициента передачи  $S_{21}$  фотонного кристалла с периодической структурой из кольцевых резонаторов в зависимости от наличия напряжения смещения, подаваемого на сегнетоэлектрическую тонкую пленку  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$

**Fig. 6.** Frequency characteristics of the phase of  $S_{21}$  transmission coefficient of a photonic crystal with a periodic structure of the ring resonators depending on the presence of bias voltage applied to the ferroelectric thin film of  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$

Для одномерных фотонных кристаллов СВЧ-диапазона по-прежнему актуальна задача идентификации стоп-зон, наблюдаемых в его частотном спектре; важно установить, какая из стоп-зон является именно фотонной запрещенной зоной, а не собственным узловым резонансом решетки. Поскольку в пределах фотонной запрещенной зоны существование бегущих (блоховских) мод невозможно, то фаза коэффициента передачи электромагнитной волны в пределах соответствующей стоп-зоны должна оставаться неизменной, что имеет место в диапазоне 17,5–20 ГГц (рис. 6). Незначительное нарастание фазы в указанном частотном диапазоне

связано с тем, что образующаяся в результате интерференционных процессов стоячая волна является экспоненциально затухающей и некоторая часть фотонов просачивается сквозь запрещенную зону. Этот процесс аналогичен туннельному эффекту для электронов в твердом теле, когда часть частиц преодолевает потенциальный барьер.

Внутри частотных диапазонов, соответствующих всем остальным стоп-зонам, изменение фазы в зависимости от частоты, как это следует из анализа рисунка 6, имеет качественно другой характер. Причина указанного различия кроется в принципиально иной физической природе возникновения макроскопических и микроскопических резонансов одномерной решетки, каковой является исследуемый фотонный кристалл, сформированный из кольцевых резонаторов асимметричной формы.

Следует отметить необычный характер частотной зависимости анализируемого фотонного кристалла. Как видно на рисунке 6, на первой собственной частоте образующих фотонный кристалл резонаторов имеет место сильное замедление электромагнитной волны, в то время как внутри фотонной запрещенной зоны фаза электромагнитной волны не меняется, в том числе и при подаче напряжения смещения на сегнетоэлектрическую пленку. Указанные особенности частотной характеристики фазы коэффициента передачи исследуемого фотонного кристалла могут быть использованы при разработке перестраиваемых устройств обработки сигналов СВЧ-диапазона длин волн.

В заключение отметим, что природа обнаруженного в результате проведенных численных экспериментов значительного замедления электромагнитной волны в резонаторах асимметричной формы до конца не ясна и требует дальнейшего теоретического и экспериментального изучения.

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2016 г. № 007-01114-16 ПР, проект № 0256-2014-0002, а также при поддержке РФФИ, грант № 16-29-14013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yablonovitch E. 2001. Photonic Crystals: Semiconductors of Light. *Scientific American*. 285(6): 47–55.
2. Yablonovitch E. 1993. Photonic band-gap structures. *J. of the Optical Society of America B-Optical Physics*. 10(2): 283–295.
3. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. 2003. Microwave applications of photonic crystals. *Progress in Electromagnetics Research*. 41: 185–209.
4. Беляев Б.А., Волошин А.С., Шабанов В.Ф. 2005. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах. *Доклады Академии наук*. 400(2): 181–185.
5. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Фролов А.П., Орлов В.Е. 2014. Волноводы, содержащие рамочные элементы с электрически управляемыми характеристиками разрешенных и запрещенных зон. *Радиотехника и электроника*. 59(11): 1079–1084.
6. Гуняков В.А., Герасимов В.П., Мысливец С.А., Архипкин В.Г., Ветров С.Я., Камаев Г.Н., Шабанов А.В., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. 2006. Термооптическое переключе-

- чение в одномерном фотонном кристалле. *Письма в ЖТФ*. 32(21): 76–83.
7. Гуняков В.А., Мысливец С.А., Паршин А.М., Зырянов В.Я., Архипкин В.Г., Шабанов В.Ф. 2010. Управление пропусканием многослойного фотонного кристалла с жидкокристаллическим дефектом с помощью магнитного поля. *ЖТФ*. 80(10): 95–100.
  8. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Скворцов В.С., Мерданов М.К. 2010. Волноводные фотонные кристаллы с характеристиками, управляемыми *p-i-n*-диодами. *Изв. вузов. Электроника*. (1): 24–29.
  9. Мухортов В.М., Масычев С.И., Маматов А.А., Мухортов Вас.М. 2013. Электрически перестраиваемый фотонный кристалл на основе копланарного волновода с наноразмерной сегнетоэлектрической пленкой. *Письма в ЖТФ*. 39(20): 70–76.
  10. Мухортов В.М., Бирюков С.В., Масычев С.И. 2015. Перестраиваемые фотонные кристаллы на основе линий передачи с наноразмерными сегнетоэлектрическими пленками. *Вестник Южного научного центра*. 11(3): 38–45.
  11. Никитин Ал.А., Никитин Ан.А., Устинов А.Б., Lahderanta E., Калиникос Б.А. 2016. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой. *ЖТФ*. 86(6): 115–120.
  12. Sung-II Kim, Mi-Young Jang, Chul-Sik Kee, Ikmo Park, Lim H. 2005. Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic bandgap ring structures. *Current Applied Physics*. 5: 619–624.
  13. Chul-Sik Kee, Mi-Young Jang, Sung-II Kim, Ikmo Park, Lim H. 2005. Tuning and widening of stop bands of microstrip photonic band gap ring structures. *Applied Physics Letters*. 86: 181109. doi: 10.1063/1.1906315
  14. Chul-Sik Kee, Mi-Young Jang, Ikmo Park, H. Lima, Jae-Eun Kim, Hae Yong Park, Jung Il Lee. 2002. Photonic band gap formation by microstrip ring: A way to reduce the size of microwave photonic band gap structures. *Applied Physics Letters*. 80(9): 1520–1522. doi: 10.1063/1.1458069
  15. Houzet G., Melique X., Lippens D. 2010. Microstrip transmission line loaded by split-ring resonators tuned by ferroelectric thin film. *Progress in Electromagnetics Research*. 12: 225–236.
  16. Рыбин М.В., Синева И.С., Самусев К.Б., Лимонов М.Ф. 2014. Каскады резонансов Фано в рассеянии Ми. *Физика твердого тела*. 56(3): 560–566.
  4. Belyaev B.A., Voloshin A.S., Shabanov V.F. 2005. [Study of microstrip models of band-pass filters in one-dimensional photonic crystals]. *Doklady Akademii nauk*. 400(2): 181–185. (In Russian).
  5. Usanov D.A., Nikitov S.A., Skripal' A.V., Frolov A.P., Orlov V.E. 2014. [Waveguides containing framework elements with electrically controlled characteristics of allowed and forbidden zones]. *Radiotekhnika i elektronika*. 59(11): 1079–1084. (In Russian).
  6. Gunyakov V.A., Gerasimov V.P., Myslivets S.A., Arkhipkin V.G., Vetrov S.Ya., Kamaev G.N., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. 2006. [Thermo-optic switching in one-dimensional photonic crystal]. *Pis'ma v ZhTF*. 32(21): 76–83. (In Russian).
  7. Gunyakov V.A., Myslivets S.A., Parshin A.M., Zyryanov V.Ya., Arkhipkin V.G., Shabanov V.F. 2010. [Control of the transmittance of a multilayer photonic crystal with a liquid crystal defect by the magnetic field]. *ZhTF*. 80(10): 95–100. (In Russian).
  8. Usanov D.A., Skripal' A.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Skvortsov V.S., Merdanov M.K. 2010. [Waveguide photonic crystals with characteristics controlled by *p-i-n*-diodes]. *Izv. vuzov. Elektronika*. (1): 24–29. (In Russian).
  9. Mukhortov V.M., Masychev S.I., Mamatov A.A., Mukhortov Vas.M. 2013. Electrically reconstructable photon crystal based on a coplanar waveguide with a nanodimensional ferroelectric film. *Technical Physics Letters*. 39(10): 921–923. doi: 10.1134/S1063785013100234 (In Russian).
  10. Mukhortov V.M., Biryukov S.V., Masychev S.I. 2015. [Tunable photonic band gap structures on the basis of transmission lines with nanodimensional ferroelectric thin films]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 11(3): 38–45. (In Russian).
  11. Nikitin Al.A., Nikitin An.A., Ustinov A.B., Lahderanta E., Kalinikos B.A. 2016. [The microwave frequencies photonic crystal on the slot transmission lines with the ferroelectric film]. *ZhTF*. 86(6): 115–120. (In Russian).
  12. Sung-II Kim, Mi-Young Jang, Chul-Sik Kee, Ikmo Park, Lim H. 2005. Characteristics of microwave filters based on microstrip photonic band gap ring structures. *Current Applied Physics*. 5: 619–624.
  13. Chul-Sik Kee, Mi-Young Jang, Sung-II Kim, Ikmo Park, Lim H. 2005. Tuning and widening of stop bands of microstrip photonic band gap ring structures. *Applied Physics Letters*. 86: 181109. doi: 10.1063/1.1906315
  14. Chul-Sik Kee, Mi-Young Jang, Ikmo Park, H. Lima, Jae-Eun Kim, Hae Yong Park, Jung Il Lee. 2002. Photonic band gap formation by microstrip ring: A way to reduce the size of microwave photonic band gap structures. *Applied Physics Letters*. 80(9): 1520–1522. doi: 10.1063/1.1458069
  15. Houzet G., Melique X., Lippens D. 2010. Microstrip transmission line loaded by split-ring resonators tuned by ferroelectric thin film. *Progress in Electromagnetics Research*. 12: 225–236.
  16. Rybin M.V., Sinev I.S., Samusev K.B., Limonov M.F. 2014. [Cascades of Fano resonances in the scattering of Mie]. *Fizika tverdogo tela*. 56(3): 560–566. (In Russian).

## REFERENCES

1. Yablonovitch E. 2001. Photonic Crystals: Semiconductors of Light. *Scientific American*. 285(6): 47–55.
2. Yablonovitch E. 1993. Photonic band-gap structures. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*. 10(2): 283–295.
3. Ozbay E., Temelkuran B., Bayindir M. 2003. Microwave applications of photonic crystals. *Progress in Electromagnetics Research*. 41: 185–209.

Поступила 26.04.2016