

УДК 621.383.049.77

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗВЕТВИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАДИУСА ИСКУССТВЕННОГО ДЕФЕКТА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗОНАНСА

Р. Jindal, Н. J. Kaur

*Chitkara Institute of Engineering and Technology,  
140401, India, Chandigarh, Patiala National Highway, NH-64  
E-mail: poonam.jindal@chitkara.edu.in  
harsimran.kaur@chitkara.edu.in*

Нанопотоника является новой областью в технологии оптических материалов, задача которой — обеспечить прогресс в развитии оптических интегральных схем. Разветвитель мощности на фотонном кристалле представляет собой полезный компонент для создания фотонных интегральных схем. Такие разветвители являются важными элементами для соединения блоков в чипе. Предлагается конструкция Y-разветвителя мощности на двумерном фотонном кристалле ( $21 \times 15$  мкм), использующая явление резонанса в отражении электромагнитной волны от вытравленных круглых воздушных отверстий, образующих гексагональную решётку с периодом  $a$ . Для анализа такой структуры были использованы методы разложения электромагнитного поля по плоским волнам и конечных разностей во временной области. Результаты моделирования показывают, что оптимальный резонанс, обеспечивающий достижение максимальной передаваемой мощности с равным разделением в плечах, наблюдается при радиусе дефектного отверстия, равном  $0,3a$  мкм.

*Ключевые слова:* фотонный кристалл, ширина запрещённой зоны для фотонов, разветвитель мощности, дефектное отверстие, метод разложения электромагнитного поля по плоским волнам.

DOI: 10.15372/AUT20180606

**Введение.** В последнее время возник существенный интерес к нанопотонным устройствам на фотонных кристаллах (ФК), позволяющим обеспечить высокие скорости передачи данных. На основе фотонных кристаллов можно сконструировать сверхкомпактные оптические устройства, поскольку они обеспечивают волноводное пропускание света в малых областях [1]. Такие кристаллы способны выявить распространение фотонов подобно тому, как полупроводники определяют движение электронов. Фотонные кристаллы — искусственные структуры с периодическим изменением показателя преломления в трёх измерениях. В соответствии с этим различают одномерные, двумерные и трёхмерные ФК, обладающие способностью отражать свет в диапазоне частот, называемом фотонной запрещённой зоной (ФЗЗ) [2]. Эта способность придаёт фотонным материалам уникальные свойства, которые могут быть использованы для изготовления различных оптических устройств, таких как оптические переключатели, соединители, мультиплексоры, фильтры, разветвители мощности и т. п. [3]. Фотонные кристаллы являются устройствами малых размеров с малыми потерями, стали важным компонентом фотонных интегральных схем (ФИС) и вызывают в последнее время значительный интерес исследователей [4]. Разработка разветвителя мощности, представляющего собой ключевой компонент ФИС для осуществления ввода мощности в различные секции схемы, обусловлена тем, что он обладает низкими потерями при передаче потоков излучения, а также эффективной и компактной конструкцией. Основные типы разветвителей мощности показаны на рис. 1: Y-разветвитель (а), T-образный разветвитель (b), разветвитель с направленным ответвлением (c).

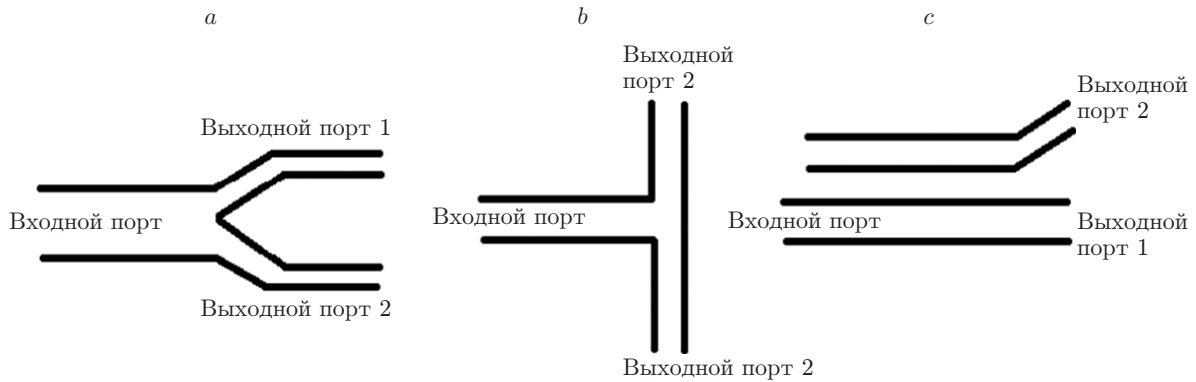


Рис. 1. Схемы разветвителей мощности

Разветвители мощности — класс устройств, осуществляющих разделение мощности излучения в поляризованных пучках света. В целях оптимизации работы разветвителей на ФК предложено и изготовлено множество разветвительных структур [5, 6]. Стержни из арсенида галлия (GaAs, показатель преломления 3,4), образующие треугольную решётку, были выбраны с радиусом  $0,18a$ , где  $a$  — постоянная решётки. Запрещённая зона для излучения с ТМ-поляризацией протягивается, начиная с  $a/\lambda = 0,2956-0,4851$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения в вакууме. Сконструированный разветвитель имеет длину  $9,92$  мкм [7]. В работе [8] дано сравнение Y-разветвителей с квадратной и гексагональной решётками. Для минимизации обратных отражений и потерь на отражение на основании рассмотрения эффективности индивидуальной решётки предложена некоторая гибридная структура. Используемая гетероструктура обеспечила эффективность передачи мощности величиной  $47\%$  в каждое плечо разветвителя. Предложена другая конструкция разветвителя оптической мощности с воздушными отверстиями на основе ФЗЗ-эффекта (эффекта существования запрещённой зоны для фотонов) в ФК-волноводе. При наличии одного дефектного отверстия в ФК-волноводе получена эффективность пропускания  $49,5\%$  в полосе  $70$  нм. Затем был сконструирован двумерный фотонный кристалл на основе карбида кремния (SiC) для ближнего ИК-диапазона. Показано, что при использовании SiC вместо традиционных полупроводниковых материалов, таких как GaAs или Si, может быть достигнута ширина запрещённой зоны для фотонов  $200$  нм и реализованы волновод с широкой полосой пропускания ( $40$  нм) и нанорезонатор с добротностью до  $4500$  [9].

Оптические разветвители мощности  $1 \times 4$ , построенные на ФК-волноводе с двумя плечами в треугольной решётке с воздушными отверстиями, сконструированы в работе [10]. Отверстия в области соединения модифицированы таким образом, чтобы можно было разделять входную мощность на четыре части с полосой пропускания до  $80$  нм. На длине волны  $1550$  нм пропускание в каждом плече составило  $24,85\%$ . Изучено множество структур разветвителей мощности на ФК. Такие структуры включают диэлектрические штыри в воздухе и/или массив отверстий, расположенных в узлах квадратной или треугольной решётки на диэлектрической пластине [11]. Однако структура из диэлектрических стержней в воздухе обладает плохим вертикальным ограничением, а её реализация для большинства оптических устройств является сложной. Основная часть конструкций разветвителей мощности на ФК была разработана с акцентом на рассмотрение таких параметров, как длина изгибов и угол разветвителя, в целях улучшения характеристик пропускания. До сих пор вопросам, касающимся соединения плеч, не уделялось достаточного внимания. Помимо этого, изготовление микроустройств на ФК требует применения очень точных и тонких технологий. Проблема изготовления сложных структур является вызовом для исследователей. Поэтому можно полагать, что важной темой является ис-

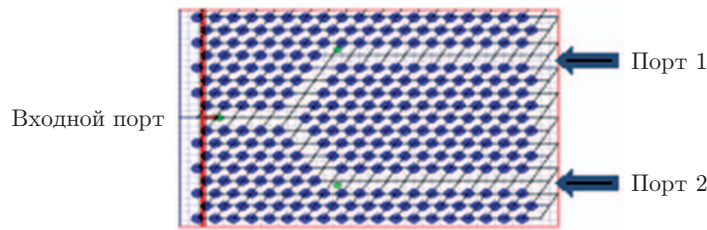


Рис. 2. Y-разветвитель мощности на фотонном кристалле

следование конструкций разветвителей мощности на ФК, которые способны обеспечить равное разделение мощности в плечах разветвителя с высокой эффективностью.

**Описание конструкции Y-разветвителя мощности.** Предложенная конструкция состоит из Y-разветвителя, воздушные отверстия которого с показателем преломления, равным единице, вытравлены в кремниевой подложке с показателем преломления 3,1. Отверстия с радиусом  $0,3a$  образуют гексагональную решётку. Соединение плеч в Y-разветвителе образовано схождением трёх волноводов на ФК под углом  $120^\circ$  друг к другу для двух выходных ветвей с последующим их изгибом на  $60^\circ$  (рис. 2).

Двумерная кристаллическая структура проста в изготовлении и допускает лёгкую интеграцию в чип. Кроме того, воздушное отверстие легче реализовать, чем стержнеобразный объект [12]. Для изучения структуры использовались метод разложения электромагнитного поля по плоским волнам и метод конечных разностей во временной области. Зонная диаграмма структуры рассчитывалась по методу разложения электромагнитного поля по плоским волнам. Запрещённой зоной в периодической структуре называется диапазон частот электромагнитных волн, которые не могут распространяться в рассматриваемом кристалле [13]. Зонная диаграмма исследованной гексагональной решётки показана на рис. 3, из которого видно, что ширина запрещённой зоны для ТЕ-фотонов в структуре лежит в полосе от  $0,24$  до  $0,38 c/a$ , где  $c$  — скорость света в вакууме.

**Результаты и их обсуждение.** Материалом для изготовления пластинок размером  $21 \times 15$  мкм служит кремний. Модулированная гауссианой непрерывная волна используется в качестве входного сигнала с длиной волны  $\lambda = 1,9$  мкм. Расчёт прохождения ТЕ-моды производился для сетки отверстий с ячейкой размером  $0,05 \times 0,05$  мкм ( $\Delta X \times \Delta Z$ ) и с числом ячеек 300 (вдоль направления  $X$ ) и 420 (вдоль направления  $Z$ ). Продолжительность расчёта до получения окончательного результата составляла 24000 шагов по времени. Выходная мощность Y-разветвителя наблюдается в двух точках поперёк портов 1 и 2, показанных на рис. 2 зелёными точками. Резонатор формируется на месте пересечения входного и выходных волноводов таким образом, чтобы между ними осуществлялась хорошая связь. Резонанс наступает тогда, когда входной сигнал достигает соединения.

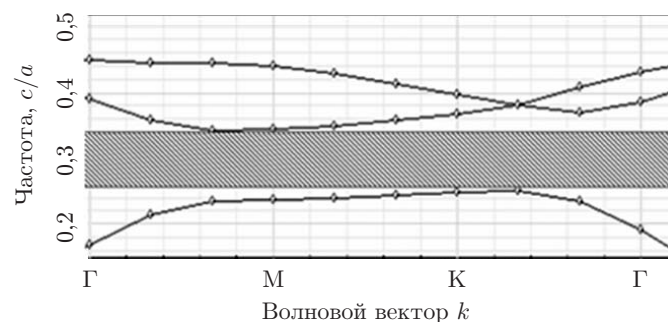


Рис. 3. Зонная диаграмма для фотонов в двумерной гексагональной решётке фотонного кристалла

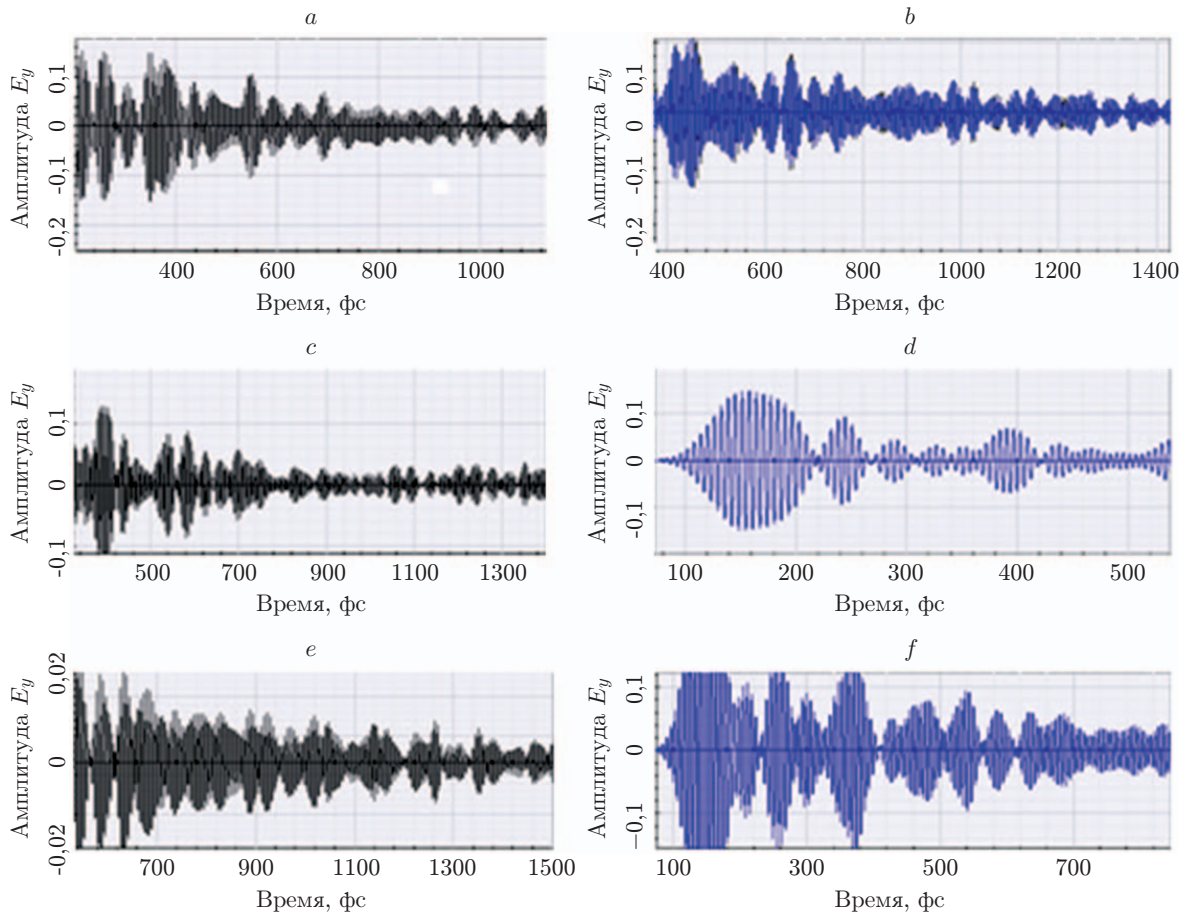


Рис. 4. Временной отклик электрического поля  $E_y$  для Y-разветвителя:  $a$  — выходной порт 1 ( $r = 0,3a$ ),  $b$  — выходной порт 2 ( $r = 0,3a$ ),  $c$  — выходной порт 1 ( $r = 0,34a$ ),  $d$  — выходной порт 2 ( $r = 0,34a$ ),  $e$  — выходной порт 1 ( $r = 0,15a$ ),  $f$  — выходной порт 2 ( $r = 0,15a$ )

Рассчитана форма электромагнитной волны, распространяющейся в разветвителе. На рис. 4,  $a$ – $f$  представлены картины электрического поля ( $E_y$ ) в направлении каждого из портов разветвителя на длине волны 1,9 мкм при различных комбинациях радиусов отверстий. Рассчитанная нормированная выходная мощность устройства для различных комбинаций радиусов показана на рис. 5,  $a$ – $f$ .

В таблице приведены спецификации выходных сигналов двумерного разветвителя мощности на ФК, где  $r$  — радиус дефектного отверстия;  $P_i$  — нормированная мощность на входе разветвителя;  $P_1, P_2$  — нормированные мощности на выходах разветвителя (порты 1 и 2);  $E_{y1}, E_{y2}$  —  $y$ -компоненты электрического поля в портах 1 и 2;  $H_{z1}, H_{z2}$  —  $z$ -компоненты магнитного поля в портах 1 и 2;  $\eta$  — общая эффективность разветвителя. Радиус дефектного отверстия в соединении увеличен с 0,3 до 0,5 $a$  и уменьшен с 0,3 до 0,15 $a$  в целях демонстрации реализации резонанса для получения максимальной связи. Нормированная входная мощность поддерживалась равной 1,4, затем наблюдалось нормированное распределение мощности в выходных портах 1 и 2 устройства. Также для обоих выходных портов оценивались компоненты полей  $E_y$  и  $H_z$ .

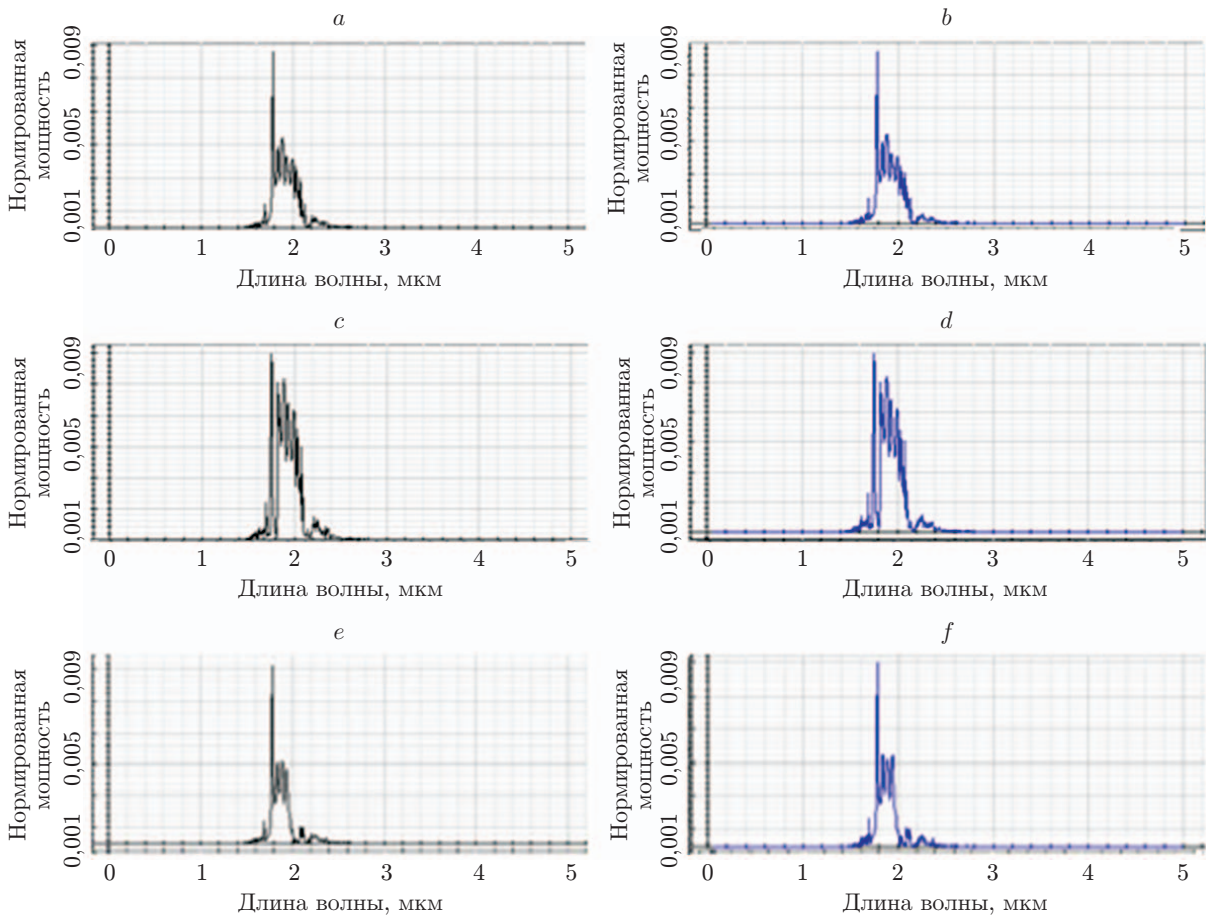


Рис. 5. Пропускная характеристика Y-разветвителя (значения радиусов выходных портов 1 и 2 см. на рис. 4)

Картина распространения  $y$ -компоненты электрического поля в многоплечевом разветвителе изучалась на длине волны 1,9 мкм. Обнаружено, что разветвитель имеет равные мощности в обоих выходных портах, также произведён расчёт полной эффективности разветвителя. Наибольшая полная эффективность передачи мощности для радиуса дефектного отверстия, равного  $0,3a$ , составила 60 %. Таким образом, максимальный резонанс отмечается при радиусе отверстия, равном  $0,3a$ , при этом достигается максимальная нормированная выходная мощность. Кроме того, двумерная гексагональная Y-структура на ФК является удобной для изготовления, поскольку она обладает подходящей запрещённой зоной для широкого диапазона геометрий, а также имеет малое значение показателя преломления диэлектрика. Если радиус отверстия выбирается превышающим значение  $0,3a$

**Спецификация выходных сигналов для Y-разветвителя на ФК для разных радиусов дефектного отверстия**

$r$	$P_i$	$P_1$	$E_{y1}$	$H_{z1}$	$P_2$	$E_{y2}$	$H_{z2}$	$\eta, \%$
0,3	1,4	0,42	0,015144	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,42	0,014906	$0,2 \cdot 10^{-5}$	60
0,34	1,4	0,3	0,016365	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0,3	0,015149	$0,23 \cdot 10^{-4}$	42
0,38	1,4	0,28	0,011973	$0,3 \cdot 10^{-5}$	0,28	0,0101212	$1,1 \cdot 10^{-5}$	40
0,5	1,4	0,32	0,002609	$0,1 \cdot 10^{-5}$	0,32	0,005265	$0,8 \cdot 10^{-5}$	46
0,25	1,4	0,36	0,014901	$0,2 \cdot 10^{-5}$	0,36	0,15885	$1,5 \cdot 10^{-5}$	51
0,15	1,4	0,28	0,012947	$0,16 \cdot 10^{-5}$	0,28	0,014692	$0,12 \cdot 10^{-5}$	40

или имеющим значение меньше чем  $0,3a$ , то оптимальное условие для резонанса не реализуется. Это приводит к появлению потерь на поглощение и интенсивных обратных отражений в плечах разветвителя. Таким образом, можно заключить, что оптимальный радиус дефектного отверстия равен  $0,3a$ , при этом сконструированный разветвитель представляет собой соединение трёх волноводов с резонаторной связью. Равное разделение мощности подтверждается таблицей, которая тем самым показывает, что сконструированный Y-разветвитель на ФК является симметричным разветвителем, из чего следует, что увеличение радиуса отверстия повышает объём полости. Это вводит моду полости в резонанс с волноводной модой и таким образом увеличивает выходную мощность устройства [14]. Кроме того, Y-разветвитель является базовой структурой, которая удовлетворяет условию резонанса с одним отверстием на пересечении трёх волноводов и устраняет проблемы, связанные с изготовлением более сложных структур [15]. Применение фотонных кристаллов покрывает широкий диапазон электромагнитного спектра (от 200 до 1500 нм). Инфракрасная область спектра, лежащая между видимым и СВЧ-излучением, занимает диапазон длин волн от 0,75 до 1000 мкм. Обсуждаемый в данной работе разветвитель мощности был сконструирован для ИК-приёмников, используемых для обнаружения задымлений.

**Заключение.** Предложена конструкция разветвителя мощности излучения на двумерном ( $21 \times 15$  мкм) фотонном кристалле с варьируемым радиусом дефектного отверстия. Для анализа структуры были использованы метод разложения электромагнитного поля по плоским волнам и метод конечных разностей во временной области. Численное моделирование проводилось с помощью программного пакета optiFDTD. Результаты моделирования показывают, что оптимальный размер радиуса дефектного отверстия в соединении плеч разветвителя, обеспечивающий достижение резонанса, составляет  $0,3a$ . Такая конструкция разветвителя обуславливает равное и однородное распределение мощности на выходных портах устройства с эффективностью передачи мощности 60 %. Сконструированный Y-разветвитель мощности излучения представляет собой базовую структуру, удовлетворяющую условию резонанса на одном отверстии на пересечении трёх волноводов (при её использовании удаётся избежать проблем, встречающихся при изготовлении более сложных структур).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Joannopoulos J. D., Villeneuve P. R., Fan S.** Photonic crystals: Putting a new twist on light // *Nature*. 1997. **386**, N 6621. P. 143–149.
2. **Noda S.** Recent progresses and future prospects of two and three dimensional photonic crystals // *Journ. Lightwave Technol.* 2006. **24**, N 12. P. 4554–4567.
3. **Singal T. L.** *Optical Fiber Communication — Principles and Applications*. Delhi: Cambridge University Press, 2016. 450 p.
4. **Zhen Y. R., Li L.-M.** A novel application of two-dimensional photonic crystals: Polarization beam splitter // *Journ. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. **38**, N 18. P. 3391–3394.
5. **Liu T., Zakharian A., Fallahi M.** Multimode interference-based photonic crystal waveguide power splitter // *Journ. Lightwave Technol.* 2004. **22**, N 12. P. 2842–2846.
6. **Yu T. B., Wang M. H., Jiang X. Q. et al.** Ultracompact and wideband power splitter based on tripple photonic crystal waveguides directional coupler // *Journ. Opt. A: Pure and Appl. Opt.* 2007. **9**, N 1. P. 37–42.
7. **Ghaffari A., Monifi F., Djavid M., Abrishamian M.** Analysis of photonic crystal power splitters with different configurations // *Journ. Appl. Sci.* 2008. **8**, N 8. P. 1416–1425.
8. **Yu T., He L., Deng X. et al.** Power splitter based on photonic crystal waveguides with an air holes array // *Opt. Eng.* 2011. **50**, N 11. P. 114601–114604.

9. **Song B. S., Yamada S., Asano T., Noda S.** Demonstration of two-dimensional photonic crystals based on silicon carbide // Journ. Opt. Express, Opt. Soc. Am. 2011. **19**, N 12. P. 11084–11089.
10. **Wang H., He L.** Proposal for high efficiently  $1 \times 4$  power splitter based on photonic crystal waveguides // Modern Phys. Lett. B. 2015. **29**, N 15. P. 1550073–1550076.
11. **Yang D., Tian H., Ji Y.** High-bandwidth and low-loss photonic crystal power-splitter with parallel output based on the integration of Y-junction and waveguide bends // Opt. Commun. 2012. **285**, N 18. P. 3752–3757.
12. **Danaie M., Nasirifar R., Dideban A.** Design of adjustable T-shaped and Y-shaped photonic crystal power splitters for TM and TE polarizations // Turkish Journ. Electr. Eng. & Computer Sci. 2017. **25**, N 5. P. 4398–4408.
13. **Chantakit T., Srinuanjan K., Yupapin P. P.** Two dimension photonic crystal Y-branch beam splitter with variation of splitting ratio based on hybrid defect controlled // Appl. Phys. A. 2014. **117**, N 2. P. 547–552.
14. **Danaie M., Nasiri Far R., Dideban A.** Design of a high-bandwidth Y-shaped photonic crystal power splitter for TE modes // Intern. Journ. Opt. and Photon. 2018. **12**, N 1. P. 33–42.
15. **Sridarshini T., Indira Gandhi S., Rakshitha M.** Design and analysis of  $1 \times N$  symmetrical optical splitters for photonic integrated circuits // Optik. 2018. **169**. P. 321–331.

*Поступила в редакцию 14 августа 2018 г.*

---