

**Сорокин Дмитрий Анатольевич** – НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров; e-mail: jotun@inbox.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79508668253; начальник отдела; к.т.н.

**Касаркин Алексей Викторович** – e-mail: kav589@mail.ru; тел.: +79045065636; научный сотрудник; к.т.н.

**Sorokin Dmitriy Anatolyevich** – Supercomputers and Neurocomputers Research Center; e-mail: jotun@inbox.ru; Taganrog, Russia; phone: +79508668253; chief of department; cand. of eng. sc.

**Kasarkin Alexey Viktorovich** – e-mail: kav589@mail.ru; phone: +79045065636; research scientist; cand. of eng. sc.

УДК 537.876

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-185-194

**М. Пленингер, С.В. Балакирев, М.С. Солодовник**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКОМ ЛОГИЧЕСКОМ  
КОМПАРАТОРЕ НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА GaAs**

*Фотонные кристаллы – полупроводниковые структуры с фотонной запрещенной зоной – вызывают большой интерес у научного сообщества. Они представляют собой новый класс оптических материалов, обладающих пространственной периодической модуляцией диэлектрической проницаемости с периодом, близким к длине волны излучения. Интерес к этим структурам объясняется их значимостью для фундаментальных исследований взаимодействия излучения с веществом и потенциалом создания оптоэлектронных устройств следующего поколения. В данной работе представлены результаты моделирования компактного оптического логического компаратора на фотонном кристалле GaAs, работающем во втором окне прозрачности оптического волокна (длина волны 1.3 мкм). Модельный компаратор представляет собой среду с двумя входными и двумя выходными оптическими каналами. При вводе излучения в один из входов компаратора соответствующий выходной канал пропускает излучение, символизируя логическую единицу. В случае отсутствия сигналов на входных каналах либо ввода сигналов в оба входа, оба выходных канала не пропускают излучение, символизируя логические нули. Каналы в компараторе создаются с помощью пересекающихся волноводов, сформированных в двумерном фотонном кристалле GaAs, который состоит из набора цилиндрических кристаллов (столбцов) GaAs с диаметром от 130 до 170 нм, встроенных в вакуумную среду с периодом от 450 до 750 нм. Для обеспечения затухания электромагнитных волн, вводимых в компаратор в оба входных канала, в месте пересечения волноводов встроены дефектные столбцы GaAs с меньшим диаметром. Проведено исследование влияния диаметра столбцов и периода между столбцами фотонного кристалла GaAs на закономерности распространения электромагнитного излучения в среде оптического компаратора. На основании анализа отношения уровней интенсивности сигналов на входах и выходах устройства, установлено, что оптимальный диаметр столбцов GaAs и расстояние между ними, при которых структура в наибольшей степени соответствует требованиям работы оптического логического компаратора, составляет 155 и 600 нм соответственно.*

*Фотонный кристалл GaAs; оптический компаратор; моделирование.*

**M. Pleninger, S.V. Balakirev, M.S. Solodovnik**

**SIMULATION OF THE ELECTRIC FIELD STRENGTH DISTRIBUTION IN  
AN ALL-OPTICAL LOGIC COMPARATOR BASED ON THE GaAs PHOTONIC  
CRYSTAL**

*Photonic crystals, semiconductor structures with a photonic band gap, are of great interest to the scientific community. They represent a new class of optical materials with spatial periodic modulation of permittivity with a period close to the wavelength of radiation. Interest in these structures is explained by their importance for fundamental studies of the interaction of radiation with matter and the potential for creating next-generation optoelectronic devices. This paper presents the results of modeling a compact optical logic comparator based on a GaAs photonic crystal operating in the second transparency window of an optical fiber (wavelength of 1.3 μm). The model comparator is a medium with two input and two*

output optical channels. When radiation is input to one of the comparator inputs, the corresponding output channel transmits radiation, indicating a logical one. In the absence of signals on the input channels or when signals are input to both input channels, both output channels do not transmit radiation, indicating logical zeros. The channels in the comparator are created using intersecting waveguides formed in a two-dimensional GaAs photonic crystal, which consists of a set of cylindrical GaAs crystals (pillars) with a diameter of 130 to 170 nm, embedded in a vacuum medium with a period of 450 to 750 nm. To ensure attenuation of electromagnetic waves introduced into the comparator in both input channels, defective GaAs pillars with a smaller diameter are embedded at the intersection of the waveguides. The influence of the diameter and period between the GaAs photonic crystal pillars on the propagation patterns of electromagnetic radiation in the optical comparator medium is studied. Based on the analysis of the ratio of signal intensity levels at the inputs and outputs of the device, it is established that the optimal diameter of the GaAs pillars and the distance between them, at which the structure best meets the requirements of the logic comparator, is 155 and 600 nm, respectively.

*GaAs photonic crystal; optical comparator; simulation.*

**Введение.** Фотонные кристаллы представляют собой современный тип неоднородных оптических материалов, отличительной особенностью которых является пространственная периодическая модуляция диэлектрической проницаемости. Период этой модуляции сопоставим с длиной волны излучения, а в спектре собственных электромагнитных состояний кристалла присутствует фотонная запрещенная зона [1]. Эта зона представляет собой диапазон частот, в котором излучение, распространяющееся в определенных направлениях фотонного кристалла (в зависимости от его размерности), экспоненциально теряет свою интенсивность. Следовательно, излучение, которое попадает на фотонный кристалл, будет значительно отражаться [2].

Внедрение фотонных кристаллов в качестве основы для создания различных оптических схем произвело революцию в оптической промышленности. От интегрированной фотоники до зондирования, от квантовой обработки информации до сбора солнечной энергии [3] – фотонные кристаллы обеспечивают беспрецедентный контроль над излучением и прокладывают путь для инновационных приложений и устройств [4]. Фотонные кристаллы могут иметь многочисленные практические и теоретические применения [5–9]. Они широко применяются в оптической интегральной схемотехнике, оптоэлектронных модуляторах, лазерах [10, 11] и биофотонике [12]. Важным направлением исследований фотонных кристаллов является разработка логических элементов фотонных интегральных схем на их основе. В частности, недавно были разработаны логические элементы «ИЛИ-НЕ» и «И-НЕ» на основе фотонных кристаллов [13, 14]. Также представлены результаты моделирования логического компаратора на основе фотонного кристалла арсенида галлия (GaAs) [15]. Однако до сих пор недостаточно исследований, посвященных фотонным кристаллам, работающим на практически значимой длине волны 1.3 мкм.

В данной работе проводится моделирование распределения напряженности электрического поля ( $E$ ) в полностью оптическом логическом компараторе, который основан на фотонном кристалле с использованием столбцов полупроводникового кристалла GaAs и работает на длине волны 1.3 мкм. Выбор данной длины волны обусловлен тем, что она находится в диапазоне второго окна прозрачности оптического волокна и отличается нулевой дисперсией [16]. Кроме того, на этой длине волны излучают квантовые точки InGaAs, которые изготавливаются с помощью отлаженной и воспроизводимой эпитаксиальной технологии [17, 18].

**Описание модели оптического компаратора на основе фотонного кристалла GaAs.** Моделирование проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics 6.1 с использованием модуля Wave Optics. С помощью данного модуля возможно изучение поперечных электрических (TE) волн, распространяющихся через фотонный кристалл. Для их моделирования используется скалярное уравнение для поперечной составляющей электрического поля  $E_z$ .

$$\Delta \cdot E_z - n^2 k_0^2 E_z = 0,$$

где  $n$  – показатель преломления, а  $k_0$  – волновое число в пространстве.

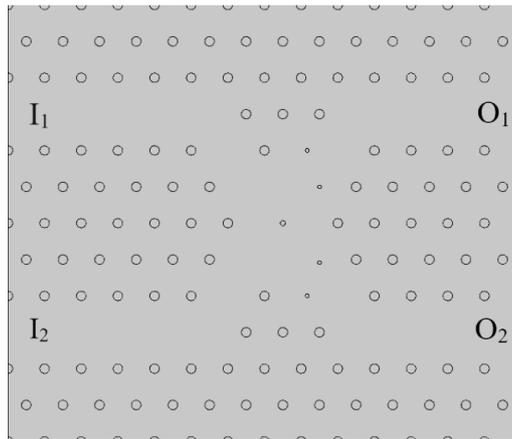
На основе фотонного кристалла возможно создание полностью оптического логического компаратора. Отличие оптического компаратора от компаратора, используемого в электронных микросхемах, состоит в том, что оптический компаратор имеет два входных и два выходных канала, тогда как электронный компаратор имеет три выходных канала. Для лучшего понимания работы оптического компаратора приведена таблица истинности данного логического элемента (табл. 1), где  $I_1$  – первый входной канал,  $I_2$  – второй входной канал;  $O_1$  – первый выходной канал,  $O_2$  – второй выходной канал.

Таблица 1

**Таблица истинности оптического логического компаратора**

$I_1$	$I_2$	$O_1$	$O_2$	Статус
0	0	0	0	$I_1 = I_2$
0	1	0	1	$I_1 < I_2$
1	0	1	0	$I_1 > I_2$
1	1	0	0	$I_1 = I_2$

В качестве моделируемого геометрического объекта был задан фотонный кристалл, состоящий из сонаправленных цилиндрических столбцов GaAs, расположенных в вакуумной среде и составляющих структуру гексагональной решетки (рис. 1). Известно, что фотонные кристаллы со структурными элементами в форме гексагонов обладают особым интересом в связи с возможностью максимального отражения излучения с частотой, принадлежащей фотонной запрещенной зоне [19].



*Рис. 1. Топология моделируемого фотонного кристалла GaAs, на основе которого реализован оптический логический компаратор.  $I_1, I_2$  – входы,  $O_1, O_2$  – выходы компаратора. Кружками большего диаметра обозначены стандартные столбцы GaAs, кружками меньшего диаметра – дефектные столбцы, обеспечивающие взаимное гашение электромагнитных волн, поступающих на оба входа одновременно*

Диаметр столбцов GaAs ( $d$ ) варьировался от 130 до 170 нм. Период фотонного кристалла ( $a$ ), влияющий на глубину проникновения электромагнитного излучения, варьировался в диапазоне 450–750 нм. В модель также включены столбцы с меньшим диаметром в области пересечения волноводов для обеспечения достаточного затухания сигнала при двух открытых каналах. Такой подход позволяет усовершенствовать характеристики компаратора и расширить диапазон частот, на которых фотонный кристалл способен отражать излучение в области пересечения волноводов при обоих открытых каналах. Диаметр основных столбцов GaAs, при котором варьировался их период, составлял 155 нм. Диаметр меньших столбцов во всех случаях составлял 62 нм (4 столбца) и 83 нм (1 столбец) соответственно. Период структуры, при котором варьировался диаметр столбцов, составлял 600 нм.

Структура состоит из 15 столбцов в горизонтальном направлении и 13 столбцов в вертикальном направлении. Как показано на рис. 1, в фотонном кристалле, посредством удаления ряда столбцов, искусственно созданы два взаимопересекающихся волновода. Таким образом, оптический компаратор имеет два входных и два выходных канала. При подаче излучения в оба входных канала, излучение, распространяющееся по ним к области их пересечения, практически полностью затухает. Если излучение подается только в один из каналов (либо в первый, либо во второй), излучение проходит по волноводу с минимальными потерями [20].

**Результаты и обсуждение.** Проведено исследование распределения напряженности электромагнитного поля в оптическом компараторе при различных геометрических параметрах его структуры, таких как диаметр столбцов GaAs и период, т.е. расстояние между ними. В табл. 2 приведены значения напряженности электрического поля при различных диаметрах столбцов GaAs и при постоянном периоде структуры, равном 600 нм. Значения приведены при одном (один ввод) и двух (два ввода) открытых каналах.

Таблица 2

**Значения напряженности электрического поля (В/м) при различных диаметрах столбцов GaAs и периоде 600 нм**

Диаметр (нм)	Напряженность электрического поля (В/м)			
	Один ввод		Два ввода	
	На входе	На выходе	На входе	На выходе
135	1.884	0.980	1.946	0.798
140	1.934	0.956	2.045	0.715
145	1.986	0.918	2.147	0.624
150	2.025	0.877	2.233	0.533
155	2.064	0.833	2.314	0.444
160	2.103	0.786	2.392	0.366
170	2.189	0.698	2.503	0.228
180	2.252	0.622	2.596	0.162
190	2.331	0.567	2.605	0.121

Аналогичная таблица построена для значений зависимости напряженности электрического поля при различных периодах структуры и неизменном диаметре столбцов GaAs, равном 155 нм (табл. 3).

Таблица 3

**Значения напряженности электрического поля (В/м) при различных расстояниях между столбцами GaAs и диаметре 155 нм**

Период (нм)	Напряженность электрического поля (В/м)			
	Один ввод		Два ввода	
	На входе	На выходе	На входе	На выходе
450	1.931	0.022	2.099	0.004
500	2.654	0.232	3.141	0.299
550	2.110	1.541	1.858	1.681
600	2.064	0.833	2.314	0.444
650	2.051	0.064	2.017	0.050
700	2.209	0.137	2.202	0.218
750	1.990	0.271	1.962	0.495

На рис. 2 представлены результаты моделирования оптического компаратора с диаметром столбцов фотонного кристалла, равным 140 нм, и периодом, равным 600 нм. Видно, что при вводе излучения в один канал излучение проходит по волноводу с определенными потерями (рис. 2,а) – напряженность электрического поля падает примерно в 2 раза (табл. 2). Несмотря на то, что при вводе излучения в один канал, в идеальном случае, напряженность поля на выходе должна сохранять такое же значение, как и на входе, добиться этого в случае данного оптического компаратора практически невозможно из-за неизбежных потерь. В связи с этим важно определить параметры фотонного кристалла, при котором затухание излучения при вводе в один канал будет минимальным, а при вводе в оба канала – максимальным. Так, при диаметре столбцов 140 нм и периоде между ними 600 нм излучение при вводе в оба канала затухает почти в три раза (рис. 2,б): напряженность электрического поля падает с 2.0 до 0.7 В/м (табл. 2).

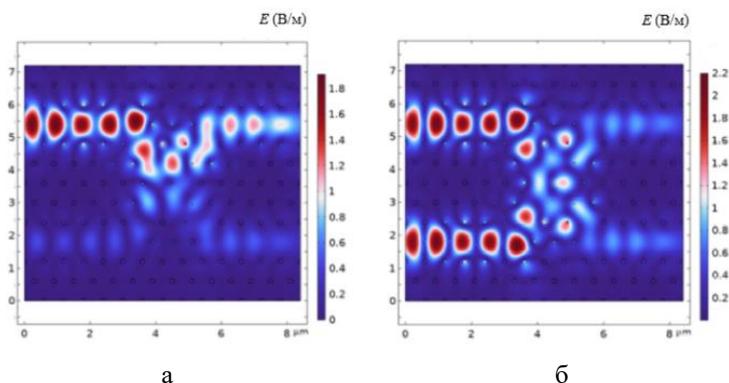


Рис. 2. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в фотонном кристалле: а – при одном открытом канале, б – при обоих открытых каналах;  $d = 140$  нм,  $a = 600$  нм

На рис. 3 представлены результаты моделирования оптического компаратора с диаметром столбцов, равным 170 нм, и периодом, равным 600 нм. Видно, что при двух открытых каналах излучение практически полностью затухает в месте пересечения волноводов (рис. 3,б) в соответствии с требуемыми критериями функционирования оптического логического компаратора: напряженность электрического поля на выходе падает более, чем на порядок, относительно значения на входе (табл. 2). Однако при одном открытом канале излучение доходит до выходного канала также с большими потерями (рис. 3,а): напряженность электрического поля падает с 2.2 до 0.7 В/м, т.е. примерно в 3 раза (табл. 2).

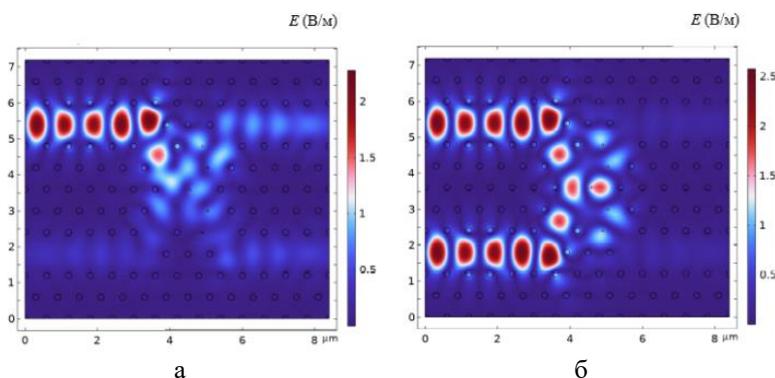


Рис. 3. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в фотонном кристалле: а – при одном открытом канале, б – при обоих открытых каналах; диаметр  $d = 170$  нм, период  $a = 600$  нм

На рис. 4 представлены результаты моделирования оптического компаратора с диаметром столбцов, равным 155 нм, и периодом, равным 500 нм. Видно, что структура не удовлетворяет требованиям работы оптического компаратора, так как при одном открытом канале излучение не проходит по волноводу, а отражается от столбцов GaAs уменьшенного диаметра, расположенных в области пересечения волноводов (рис. 4,а); при этом напряженность электрического поля падает с 2.7 до 0.2 В/м (табл. 3).

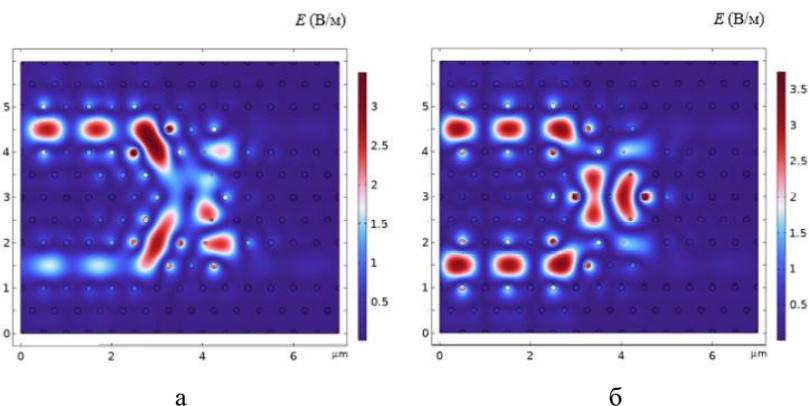


Рис. 4. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в фотонном кристалле: а – при одном открытом канале, б – при обоих открытых каналах;  $d = 155$  нм,  $a = 500$  нм

На изображениях с результатами моделирования, представленных на рис. 5, расстояние между столбцами GaAs составляет 700 нм при диаметре 155 нм. Снова можно сделать вывод, что такая конфигурация фотонного кристалла является неприемлемой, так как не позволяет реализовать оптический компаратор: излучение распространяется через всю структуру, а не только вдоль волноводов, и практически полностью рассеивается, не доходя до выходных каналов. Это связано с тем, что расстояние между столбцами в данном случае слишком велико для обеспечения достаточного отражения излучения с длиной волны 1.3 мкм.

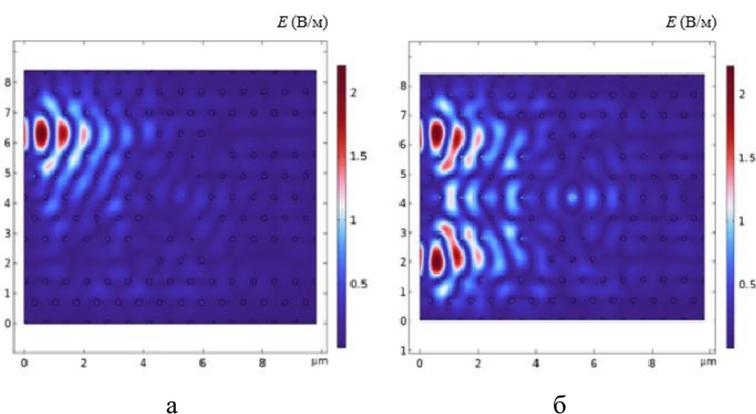


Рис. 5. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в фотонном кристалле: а – при одном открытом канале, б – при обоих открытых каналах;  $d = 155$  нм,  $a = 700$  нм

На рис. 6 представлены результаты моделирования для оптимизированной структуры фотонного кристалла с диаметром столбцов 155 нм и периодом 600 нм. При одном открытом канале (рис. 6,а) излучение проходит через волновод с относительно малыми

потерями (напряженность электрического поля падает с 2.1 до 0.8 В/м), но при этом при вводе излучения в оба канала (рис. 6,б) оно практически полностью затухает в области пересечения волноводов, а напряженность электрического поля падает с 2.3 до 0.4 В/м (табл. 3).

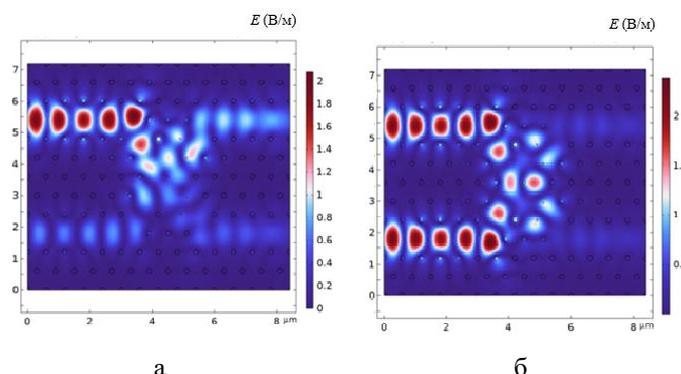


Рис. 6. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в фотонном кристалле: а – при одном открытом канале, б – при обоих открытых каналах;  $d = 155$  нм,  $a = 600$  нм

Для обобщенной количественной оценки оптимальных геометрических параметров фотонного кристалла построены графики зависимостей отношения напряженности электрического поля на выходах ( $O$ , output) и входах ( $I$ , input) оптического компаратора (рис. 7).

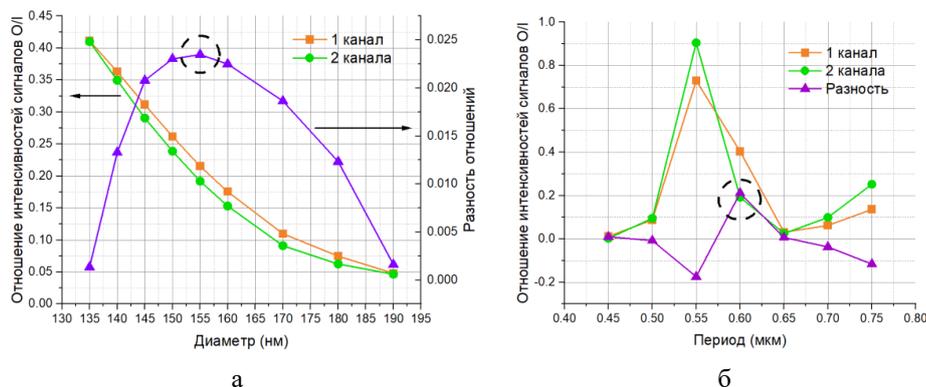


Рис. 7. Зависимость отношения интенсивностей сигналов на выходе и входе компаратора ( $O/I$ ) от диаметра столбцов GaAs (а) и от периода компаратора (б)

Важно отметить, что из-за переотражения излучения в фотонном кристалле при вводе излучения в один из каналов во втором канале тоже может наблюдаться нежелательное возрастание напряженности электрического поля. В связи с этим отношение интенсивностей сигналов в этом случае рассчитывалось как отношение разницы напряженностей на входах  $O_1$  и  $O_2$  и напряженности на входе  $I_1$  (кривая с квадратными символами на рис. 7). Это значение должно быть максимально возможным, чтобы излучение проходило через волновод с минимальным затуханием и при этом практически не достигало второго выхода. Отношение выходных сигналов к входным при работе двух каналов должно быть минимальным, чтобы большая часть излучения, наоборот, затухала на пересечении двух волноводов (кривая с круглыми символами на рис. 7). Кривая с треугольными символами иллюстрирует разность в значениях отношения выходного и входного сигналов при подаче излучения в один и оба канала. Именно это значение должно быть

максимальным для достижения наилучших характеристик компаратора. Как видно на рис. 7,а, оптимальный диаметр столбцов фотонного кристалла для реализации на его основе оптического компаратора под излучение с длиной волны 1.3 мкм составляет 155 нм, в то время как период (расстояние между столбцами) – 600 нм (рис. 7,б).

**Заключение.** В данной работе проведено моделирование напряженности электрического поля в оптическом логическом компараторе на основе фотонного кристалла GaAs. Геометрические параметры фотонного кристалла сконфигурированы под излучение с длиной волны 1.3 мкм, находящейся во втором окне прозрачности оптического волокна. Проведено исследование влияния диаметра структурных элементов фотонного кристалла (столбцов GaAs) и расстояния между ними на степень затухания электромагнитного излучения, проходящего через волноводы, сформированные от входов к выходам компаратора. Установлено, что оптимальным значением диаметра столбцов GaAs для передачи излучения с длиной волны 1.3 мкм является 155 нм, а значение периода – 600 нм.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке проекта Минобрнауки № FENW-2022-0034.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Yablonovitch E.* Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – Vol. 58, No. 20. – P. 2059-2062.
2. *Dyachenko P.N., Miklyaev Y.V., Dmitrienko V.E.* Three-dimensional photonic quasicrystal with a complete band gap // *JETP Lett.* – 2007. – Vol. 86, No. 4. – P. 240-243.
3. *Chutinan A., Kherani N.P., Zukotynski S.* High-efficiency photonic crystal solar cell architecture // *Opt. Express.* – 2009. – Vol. 17, No. 11. – P. 8871.
4. *Shekari Firouzjaei A., Salman Afghahi S., Ebrahimi Valmoozi A.-A.* Emerging Trends, Applications, and Fabrication Techniques in Photonic Crystal Technology // *Recent Advances and Trends in Photonic Crystal Technology.* – IntechOpen, 2024.
5. *Ветлужский А.Ю.* Волноводные устройства на основе линейных дефектов в металлических электромагнитных кристаллах // *Журнал технической физики.* – 2017. – Vol. 87, No. 1. – P. 150.
6. *Xavier S.C. et al.* Compact photonic crystal integrated circuit for all-optical logic operation // *IET Optoelectron.* – 2016. – Vol. 10, No. 4. – P. 142-147.
7. *Hassan S., Chack D., Pavesi L.* High extinction ratio thermo-optic based reconfigurable optical logic gates for programmable PICs // *AIP Adv.* – 2022. – Vol. 12, No. 5.
8. *Salmanpour A., Mohammadnejad S., Omran P.T.* All-optical photonic crystal NOT and OR logic gates using nonlinear Kerr effect and ring resonators // *Opt. Quantum Electron.* – 2015. – Vol. 47, No. 12. – P. 3689-3703.
9. *Bjarklev A., Chinton Lin.* Applications of photonic crystal fibers in optical communications - What is in the future? // *2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings.* – IEEE, 2005. – P. 812-813.
10. *Welch D.F. et al.* High power, AlGaAs buried heterostructure lasers with flared waveguides // *Appl. Phys. Lett.* – 1987. – Vol. 50, No. 5. – P. 233-235.
11. *Babichev A.V. et al.* Heterostructures of Quantum-Cascade Lasers Based on Composite Active Regions // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* – 2023. – Vol. 87, No. 6. – P. 839-844.
12. *Tuchin V.V., Skibina J.S., Malinin A.V.* Photonic crystal fibers in biophotonics / ed. Popp J. – 2011. – P. 83110N.
13. *Tamer A. Moniem.* All-optical XNOR gate based on 2D photonic-crystal ring resonators // *Quantum Electron.* – 2017. – Vol. 47, No. 2. – P. 169-172.
14. *Sun Xiao-Wen et al.* Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect // *Quantum Electron.* – 2018. – Vol. 48, No. 2. – P. 178-183.
15. *Parandin F.* Ultra-compact terahertz all-optical logic comparator on GaAs photonic crystal platform // *Opt. Laser Technol.* – 2021. – Vol. 144. – P. 107399.
16. *Olyaei S., Naraghi A., Ahmadi V.* High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring // *Optik (Stuttg).* – 2014. – Vol. 125, No. 1. – P. 596-600.
17. *Brès C.-S. et al.* Supercontinuum in integrated photonics: generation, applications, challenges, and perspectives // *Nanophotonics.* – 2023. – Vol. 12, No. 7. – P. 1199-1244.

18. Gorelik V.S. et al. Three-dimensional quantum photonic crystals and quantum photonic glasses // *Russ. J. Gen. Chem.* – 2013. – Vol. 83, No. 11. – P. 2125-2131.
19. Горбачевич А.А., Фриман А.В., Горелик В.С. Двумерный гексагональный фотонный кристалл с новой геометрией элемента // *Краткие сообщения по физике ФИАН.* – 2014. – Т. 6. – С. 37-38.
20. Драчев В.П. Кремниевая фотоника: статус и перспективы развития // *Матер. X Международного семинара по волоконным лазерам 2022. Институт автоматизации и электротехники СО РАН, 2022.* – С. 200-201.

## REFERENCES

1. Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics, *Phys. Rev. Lett.*, 1987, Vol. 58, No. 20, pp. 2059-2062.
2. Dyachenko P.N., Miklyaev Y.V., Dmitrienko V.E. Three-dimensional photonic quasicrystal with a complete band gap, *JETP Lett.*, 2007, Vol. 86, No. 4, pp. 240-243.
3. Chutinan A., Kherani N.P., Zukotynski S. High-efficiency photonic crystal solar cell architecture, *Opt. Express.*, 2009, Vol. 17, No. 11, pp. 8871.
4. Shekari Firouzjaei A., Salman Afghahi S., Ebrahimi Valmoozi A.-A. Emerging Trends, Applications, and Fabrication Techniques in Photonic Crystal Technology, *Recent Advances and Trends in Photonic Crystal Technology*. IntechOpen, 2024.
5. Vetluzhskiy A.Yu. Volnovodnye ustroystva na osnove lineynykh defektov v metallicheskih elektromagnitnykh kristallakh [Waveguide devices based on linear defects in metallic electromagnetic crystals], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2017, Vol. 87, No. 1, pp. 150.
6. Xavier S.C. et al. Compact photonic crystal integrated circuit for all-optical logic operation, *IET Optoelectron.*, 2016, Vol. 10, No. 4, pp. 142-147.
7. Hassan S., Chack D., Pavesi L. High extinction ratio thermo-optic based reconfigurable optical logic gates for programmable PICs, *AIP Adv.*, 2022, Vol. 12, No. 5.
8. Salmanpour A., Mohammadnejad S., Omran P.T. All-optical photonic crystal NOT and OR logic gates using nonlinear Kerr effect and ring resonators, *Opt. Quantum Electron.*, 2015, Vol. 47, No. 12, pp. 3689-3703.
9. Bjarklev A., Chinlon Lin. Applications of photonic crystal fibers in optical communications - What is in the future?, *2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings*. IEEE, 2005, pp. 812-813.
10. Welch D.F. et al. High power, AlGaAs buried heterostructure lasers with flared waveguides, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, Vol. 50, No. 5, pp. 233-235.
11. Babichev A.V. et al. Heterostructures of Quantum-Cascade Lasers Based on Composite Active Regions, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2023, Vol. 87, No. 6, pp. 839-844.
12. Tuchin V.V., Skibina J.S., Malinin A.V. Photonic crystal fibers in biophotonics, ed. Popp J., 2011, pp. 83110N.
13. Tamer A. Moniem. All-optical XNOR gate based on 2D photonic-crystal ring resonators, *Quantum Electron.*, 2017, Vol. 47, No. 2, pp. 169-172.
14. Sun Xiao-Wen et al. Design and analysis of logic NOR, NAND and XNOR gates based on interference effect, *Quantum Electron.*, 2018, Vol. 48, No. 2, pp. 178-183.
15. Parandin F. Ultra-compact terahertz all-optical logic comparator on GaAs photonic crystal platform, *Opt. Laser Technol.*, 2021, Vol. 144, pp. 107399.
16. Olyae S., Naraghi A., Ahmadi V. High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring, *Optik (Stuttg.)*, 2014, Vol. 125, No. 1, pp. 596-600.
17. Brès C.-S. et al. Supercontinuum in integrated photonics: generation, applications, challenges, and perspectives, *Nanophotonics*, 2023, Vol. 12, No. 7, pp. 1199-1244.
18. Gorelik V.S. et al. Three-dimensional quantum photonic crystals and quantum photonic glasses, *Russ. J. Gen. Chem.*, 2013, Vol. 83, No. 11, pp. 2125-2131.
19. Gorbachevich A.A., Friman A.V., Gorelik B.C. Dvumernyy geksagonal'nyy fotonnyy kristall s novoy geometriey elementa [Two-dimensional hexagonal photonic crystal with a new element geometry], *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Brief communications on physics of the Lebedev Physical Institute], 2014, Vol. 6, pp. 37-38.
20. Drachev V.P. Kremnievaya fotonika: status i perspektivy razvitiya [Silicon photonics: status and development prospects], *Mater. X Mezhdunarodnogo seminar po volokonnym lazeram 2022. Institut avtomatiki i elektrometrii SO RAN, 2022* [Proceedings of the X International Seminar on Fiber Lasers 2022. Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 2022], pp. 200-201.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор К.Е. Румянцев.

**Пленингер Максимилиан** – Южный федеральный университет; e-mail: pleninger@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79897471548; техник-проектировщик Лаборатории эпитаксиальных технологий.

**Балакирев Сергей Вячеславович** – e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; тел.: +78634371611; к.т.н.; ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий.

**Солодовник Максим Сергеевич** – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; тел.: +78634371611; к.т.н.; ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий.

**Pleninger Maximilian** – Southern Federal University; e-mail: pleninger@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79897471548; the design technician of Laboratory of Epitaxial Technologies.

**Balakirev Sergey Vyacheslavovich** – e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; phone: +78634371611; cand. of eng. sc.; leading researcher of Laboratory of Epitaxial Technologies.

**Solodovnik Maxim Sergeevich** – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; phone: +78634371611; cand. of eng. sc.; leading researcher of Laboratory of Epitaxial Technologies.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2024-5-194-204

**А.Н. Самойлов, Н.Е. Сергеев, С.М. Гушанский, В.С. Потапов****РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ  
ДЛЯ СЖАТИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Подробно рассматриваются методы и подходы к применению квантовых алгоритмов для решения задач оптимизации и обработки изображений. Особое внимание уделено квантовой приближённой оптимизации (КПО) и применению квантовых сетей для задач сжатия и реконструкции данных. КПО представляет собой гибридный алгоритм, который объединяет квантовые и классические вычислительные процессы, позволяя эффективно решать сложные комбинаторные задачи. Основой КПО являются параметризованные унитарные операции, которые подвергаются оптимизации в ходе итераций. Этот подход даёт возможность учитывать уникальные особенности квантовой природы информации, что в ряде случаев позволяет достичь более высокой производительности, чем при использовании исключительно классических методов. В процессе реализации КПО одним из главных препятствий остаётся проблема шума, который может возникнуть, например, при использовании CNOT-гейтов. В статье обсуждаются различные стратегии снижения уровня шума, что является важной задачей для обеспечения стабильности и повышения точности работы квантовых алгоритмов. Например, рассматриваются методы изоляции отдельных операций и коррекции ошибок, что позволяет минимизировать влияние шума на результаты вычислений и улучшить точность квантовой оптимизации. Авторы также предлагают графовую интерпретацию квантовых моделей, которая основана на применении тензорных сетей. Такой подход позволяет эффективно упрощать вычислительные графы, за счёт чего удаётся оптимизировать ресурсы, требуемые для выполнения сложных квантовых операций. Этот метод также демонстрирует высокую эффективность в задачах сжатия и восстановления изображений, что открывает новые перспективы для применения квантовых сетей в области обработки данных. В статье описывается структура квантовых сетей, включающая многослойные квантовые гейты, которые позволяют более глубоко и детализированно обрабатывать изображения, обеспечивая как эффективное сжатие, так и качественное восстановление данных. Также был проведён анализ различных типов квантовых гейтов, таких как Адамар, Паули-Х, Паули-У и Т-гейты. Эти гейты играют ключевую роль в эффективности квантовых алгоритмов, так как каждый из них вносит свой вклад в квантовую динамику и в способ манипуляции квантовыми состояниями.*

*Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового компьютера; запутанность; суперпозиция; квантовый оператор.*