

Пленингер Максимиллан, Балакирев Сергей Вячеславович,  
Солодовник Максим Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1.3  
МКМ В ЛОГИЧЕСКОМ КОМПАРАТОРЕ НА ОСНОВЕ GaAs**

*В данной работе представлены результаты моделирования компактного, полностью оптического логического компаратора на основе фотонного кристалла GaAs, работающего на длине волны 1.3 мкм. Проведено исследование влияния геометрических параметров фотонного кристалла на характеристики оптического компаратора. Целью исследования является установление оптимального значения диаметра столбиков GaAs, а также расстояния между столбиками для соблюдения требований работы оптического компаратора. Зависимости отношения уровней интенсивности сигналов (напряженности*

электрического поля) на входе и выходе компаратора позволили установить, что оптимальный диаметр столбиков фотонного кристалла GaAs равен 155 нм, а период между столбиками – 600 нм.

*Фотонный кристалл, оптический компаратор, длина волны 1.3 мкм, GaAs.*

Maximilian Pleninger, Balakirev Sergey Vyacheslavovich,  
Solodovnik Maxim Sergeevich

## **SIMULATION OF PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION WITH A WAVELENGTH OF 1.3 $\mu\text{m}$ IN A LOGIC COMPARATOR BASED ON GaAs**

*This paper presents the results of modeling a compact, all-optical logic comparator based on a GaAs photonic crystal operating at a wavelength of 1.3  $\mu\text{m}$ . A study was carried out of the influence of the geometric parameters of a photonic crystal on the characteristics of the optical comparator. The purpose of the study is to establish the optimal diameter of the GaAs pillars, as well as the distance between the pillars to meet the operating requirements of an optical comparator. The dependences of the ratio of signal intensity levels (electric field strength) at the input and output of the comparator made it possible to establish that the optimal diameter of the columns of a GaAs photonic crystal is 155 nm, and the period between the columns is 600 nm.*

*Photonic crystal, optical comparator, wavelength 1.3  $\mu\text{m}$ , GaAs.*

### **Введение**

Фотонные кристаллы — это новый класс неоднородных оптических материалов, для которых характерно наличие пространственной периодической модуляции диэлектрической проницаемости с периодом порядка длины волны света и фотонной запрещенной зоны в спектре собственных электромагнитных состояний кристалла [1]. Фотонная запрещенная зона (полная или частичная) представляет собой интервал частот, в пределах которого свет, распространяющийся в определенных направлениях, экспоненциально затухает. При этом свет, падающий на фотонный кристалл, полностью отражается. Возникновение полной фотонной запрещенной зоны состоит в перекрытии брэгговских запрещенных зон (стоп-зон) во всех направлениях [2].

Фотонные кристаллы могут иметь многочисленные практические и теоретические применения [3–6]. Они широко применяются в оптической интегральной схемотехнике и модуляции света. **В частности, важной**

**сферой исследования фотонных кристаллов является разработка на их основе логических элементов фотонных интегральных схем.**

В данной работе **впервые** проводится моделирование распределения напряженности электрического поля ( $E$ ) в **полностью оптическом** логическом компараторе, основанном на фотонном кристалле со столбиками GaAs, **работающем 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 [7]. Кроме того, на данной длине волны излучают квантовые точки InGaAs, отличающиеся высокой технологичностью изготовления [8].

### **Описание модели**

В оптическом компараторе есть 2 входных и 2 выходных канала. При вводе излучения в оба входных канала, свет, распространяющийся по волноводам, должен практически полностью затухнуть. При вводе излучения только в первый, или же во второй канал, свет должен пройти по волноводу с минимальными потерями.

Исследование проводилось для фотонного кристалла с гексагональной решеткой. Гексагональная решетка является предпочтительным вариантом структуры, так как фотонный кристалл с геометрией элемента в виде гексагона представляет особый интерес для максимального отражения излучения с частотой, принадлежащей к фотонной запрещенной зоне [9]. Структура состоит из 15 столбиков по горизонтали и 13 столбиков по вертикали. Длина структуры составляет 8,4 мкм, ширина - 7,2 мкм. В самой структуре были созданы 2 пересекающихся волновода, по которым проходит излучение при подаче сигнала (рис. 1). Диаметр столбиков GaAs ( $d$ ) варьировался от 130 до 170 нм. При этом в структуру также добавлены столбики с меньшим диаметром равным 83 нм (1 столбик) и 62 нм (4 столбика) соответственно. Расстояние между столбиками фотонного кристалла ( $a$ ), влияющее на глубину проникновения электромагнитного излучения, **варьировалось в диапазоне 450–750 нм.**

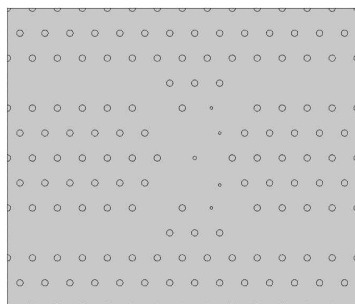


Рис. 1 Структура оптического компаратора на основе GaAs

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 (часть 1) приведены значения зависимости напряженности электрического поля от диаметра столбиков GaAs, при этом период структуры постоянен и равен 600 нм.

Таблица 1  
Значения напряженности электрического поля при разных диаметрах столбиков GaAs и периодах структуры

Напряженность (В/м)	Один вход		Два входа	
	Диаметр (нм)	На входе	На выходе	На входе
130	1,793	1,034	1,813	0,922
135	1,861	1,038	1,93	0,834
140	1,891	1,032	2,037	0,75
145	1,911	0,997	2,13	0,664
150	1,95	0,912	2,22	0,554
155	1,979	0,862	2,9	0,442
160	2,029	0,833	2,346	0,366
170	2,147	0,717	2,494	0,264
Период (мкм)	На входе	На выходе	На входе	На выходе
0,45	1,937	0,017	2,092	0,004
0,5	2,641	0,226	3,111	0,296
0,55	2,107	1,535	1,841	1,67
0,6	2,023	0,911	2,295	0,501
0,65	2,057	0,056	2,015	0,048
0,7	2,204	0,089	2,204	0,168
0,75	1,931	0,271	1,865	0,494

Аналогичное исследование было проведено для периода оптического компаратора при диаметре столбика 155 нм. В табл. 1 (часть 2) приведены результаты исследования.

Исходя из результатов моделирования следует, что оптимальный диаметр столбиков GaAs и расстояние между столбиками равны 155 нм и 600 нм, соответственно. Рис. 2 визуализирует распределение напряженности электрического поля в оптическом компараторе. Видно, что требования работы компаратора соблюдены. При одном открытом канале излучение проходит по волноводу с минимальными потерями, а при обоих открытых каналах практически полностью затухает в месте пересечения волноводов.

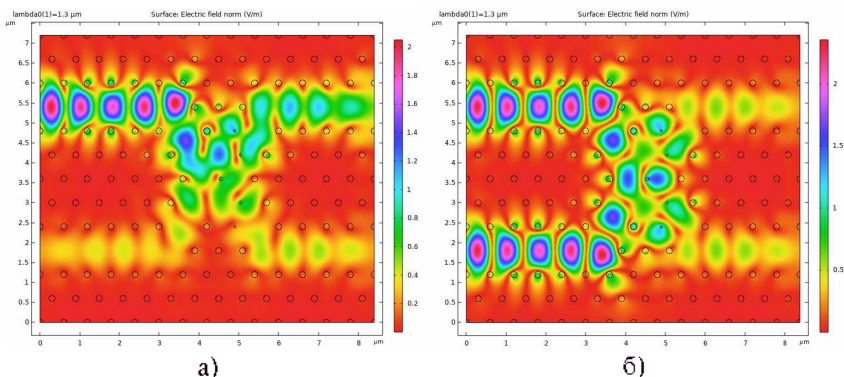


Рис. 2 Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в фотонном кристалле: (а) при обоих открытых каналах, (б) при одном открытом канале;  $d = 155$  нм,  $a = 600$  нм

Ключевыми параметрами устройств такого типа и последующего аналого-цифрового преобразования являются: отношение сигнал/шум, эффективная разрешающая способность, частота дискретизации, тепловые шумы [10]. Однако, благодаря свойствам фотонных запрещенных зон таких структур, шумовые эффекты соседних волноводов несутся.

Для визуализации был построен график зависимости интенсивности сигналов на входе и на выходе компаратора для разных диаметров столбиков GaAs (рис. 2а,б). Кривая красного цвета – отношение выходных сигналов к входным при одном открытом канале. Значение этого отношения должно быть как можно выше, что означает, что излучение проходит по

волноводу лишь с небольшим затуханием. Кривая синего цвета – отношение выходных сигналов к входным при 2 открытых каналах, значение которого должно быть как можно меньше. Это означает, что большая часть излучения затухает в месте пересечения двух волноводов. Кривая черного цвета визуализирует разницу значений отношения выходного и входного сигналов при вводе излучения в один и в оба канала. Ее значение должно быть как можно выше для достижения оптимальных характеристик компаратора.

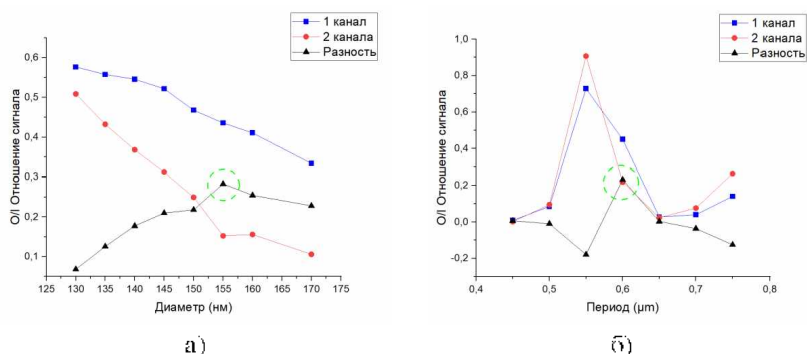


Рис. 3 Зависимость отношения интенсивностей сигналов на выходе и входе (O/I) от диаметров столбиков GaAs (а) и расстояния между ними (б)

### Заключение

В данной работе проводится анализ результатов моделирования распространения электромагнитного излучения в оптическом компараторе. В данном компараторе применяется двумерный фотонный кристалл с гексагональной кристаллической решеткой. Для отражения излучения в фотонном кристалле в его структуру встроены столбики из GaAs. Путем удаления нескольких столбиков GaAs были созданы два пересекающихся волновода. Установлено, что оптимальный диаметр столбиков GaAs для распространения излучения с длиной волны 1.3 мкм равен 155 нм, а период – 600 нм. Основными преимуществами данного компаратора являются его компактность и хорошие входные/выходные характеристики.

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, № 20. P. 2059–2062.
2. *Dyachenko P.N., Mikhvaev Y. V., Dmitrienko V.E.* Three-dimensional photonic quasicrystal with a complete band gap // *JETP Lett.* 2007. Vol. 86, № 4. P. 240–243.
3. *Zheltikov A.M.* Nonlinear optics of microstructure fibers // *Uspekhi Fiz. Nauk.* 2004. Vol. 174, № 1. P. 73.
4. *Sychov M.D. et al.* Substantiation Study of Using Immobilized Cytostatics in Management of Tumors with Peritoneal Canceromatosis // *Vestn. Exp. Clin. Surg.* 2015. Vol. 8, № 1. P. 82–86.
5. *Hassan S., Chack D., Pavesi L.* High extinction ratio thermo-optic based reconfigurable optical logic gates for programmable PICs // *AIP Adv.* 2022. Vol. 12, № 5.
6. *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, № 1. P. 596–600.
7. *Brès C.-S. et al.* Supercontinuum in integrated photonics: generation, applications, challenges, and perse
8. *Garcia de Arquer F.P. et al.* Semiconductives // *Nanophotonics.* 2023. Vol. 12, № 7. P. 1199–1244.uctor quantum dots: Technological progress and future challenges // *Science.* 2021. Vol. 373, № 6555. P. eaaz8541.
9. *Горбачевич А.А., Фриман А.В., Горелик В.С.* Двумерный гексагональный фотонный кристалл с новой геометрией элемента // *Краткие сообщения по физике ФИАН.* 2014. №6. № 6. P. 37–38.
10. *Драчев В.П.* Кремниевая фотоника: статус и перспективы развития // *Материалы X Международного семинара по волоконным лазерам 2022.* Институт автоматки и электрометрии СО РАН, 2022. P. 200–201.

**Пленингер Максимилиан**, техник-проектировщик Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, ул. Шевченко д. 2, 347922, телефон: +7 9897471548, email: [pleninger@sfedu.ru](mailto:pleninger@sfedu.ru).

**Балакирев Сергей Вячеславович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: [sbalakirev@sfedu.ru](mailto:sbalakirev@sfedu.ru).

**Солодовник Максим Сергеевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: [solodovnikms@sfedu.ru](mailto:solodovnikms@sfedu.ru).

**Pleninger Maximilian**, design technician, Laboratory of Epitaxial Technologies of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, Shevchenko street 2 , 347922, phone: +79897471548, email: [pleninger@sfedu.ru](mailto:pleninger@sfedu.ru).

**Balakirev Sergey Vyacheslavovich**, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: [sbalakirev@sfedu.ru](mailto:sbalakirev@sfedu.ru) .

**Solodovnik Maxim Sergeyevich**, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: [solodovnikms@sfedu.ru](mailto:solodovnikms@sfedu.ru) .