

16. Savin H., Repo P., von Gastrow G., Ortega P., Calle E., Garin M., Alcubilla R. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency, *Nat Nanotechnol*, 2015, Vol. 10 (7), 624-8, pp. 1-12.
17. Smirnov V.I. Fizika poluprovodnikovyykh priborov [Physics of semiconductor devices]. Ulyanovsk: UIGTU, 2022, 203 p.
18. Starosel'skiy V.I. Fizika poluprovodnikovyykh priborov mikroelektroniki [Physics of semiconductor devices of microelectronics]. Moscow: Yurayt, 2025, 463 p.
19. Durnakov A.A. Fizicheskie osnovy mikro- i nanoelektroniki [Physical Foundations of micro- and nanoelectronics]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2020, 247 p.
20. Shobitha G.S., Ghivela G.C. Potentiality of Avalanche Transit Time Devices for Biomedical Applications: A Comprehensive Review, *Biomedical Materials & Devices*, 2025. Available at: <https://doi.org/10.1007/s44174-025-00339-9>.
21. Wang B., Mu J. High-speed Si-Ge avalanche photodiodes, *PhotoniX*, 2022, Vol. 3, Issue 8, pp. 1-22.
22. Fizika poluprovodnikovyykh preobrazovateley [Physics of semiconductor converters], ed. by A.N. Saurova, S.V. Bulyarskogo. Moscow: RAN, 2018, 280 p.
23. Saurov M.A. Optimizatsiya parametrov preobrazovatelya izlucheniya na osnove kremnievogo p-i-n-dioda [Optimization of parameters of a radiation converter based on a silicon p-i-n diode], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Bulletin of Universities. Electronics], 2023, Vol. 28, Issue 4, pp. 431-440.
24. Andrianov A.V. Generatsiya teragertseвого izlucheniya v poluprovodnikakh [Generation of Terahertz Radiation in Semiconductors], *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics], 2023, Vol. 65, Issue 10, pp. 1633-1671.

Богатов Николай Маркович – Кубанский государственный университет; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79034513106; д.ф.-м.н.; профессор.

Володин Владимир Сергеевич – Кубанский государственный университет; e-mail: volodinvs1995@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79898203672; аспирант.

Григорьян Леонтий Рустемович – Кубанский государственный университет; e-mail: leonmezon@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79181681719; к.ф.-м.н.; доцент.

Коваленко Максим Сергеевич – Кубанский государственный университет; e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: +79184694954; к.ф.-м.н.; доцент.

Bogatov Nikolay Markovich – Kuban State University; e-mail: bogatov@phys.kubsu.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79034513106; dr. of phys. and math.; professor.

Volodin Vladimir Sergeevich – Kuban State University; e-mail: volodinvs1995@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79898203672; graduate student.

Grigoryan Leontiy Rustemovich – Kuban State University; e-mail: leonmezon@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79181681719; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

Kovalenko Maxim Sergeevich – Kuban State University; e-mail: m.s.kovalenko@ya.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79184694954; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.

УДК 537.876

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-133-142

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1,3 МКМ В ДВУМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ GaAs С КОНФИГУРАЦИЕЙ ВОЛНОВОД–МИКРОРЕЗОНАТОР

Фотонные кристаллы – это полупроводниковые структуры, которые характеризуются периодическим изменением диэлектрической проницаемости в пространстве с периодом, соизмеримым с длиной волны электромагнитного излучения. Интерес к ним обусловлен как важностью фундаментальных исследований взаимодействия света с веществом, так и перспективами применения фотонных кристаллов в оптических интегральных схемах и компонентах оптоэлектроники нового поколения. В данной работе представлены результаты исследования закономерностей распространения электромагнитного излучения с длиной волны 1,3 мкм в двумерных фотонных

кристаллах на основе арсенида галлия (GaAs). Исследование основано на численной модели в программном пакете Comsol Multiphysics 6.1 и включает анализ распределения напряженности электрического поля в сложных фотонно-кристаллических структурах, состоящих из волновода и связанной с ним гексагональной микрополости (микрорезонатора) с различными геометрическими параметрами. Также проанализировано влияние радиуса дефекта, намеренно внесенного в область волновода, на эффективность передачи излучения в область резонатора. Для численного анализа использовались методы моделирования распространения поперечных электрических волн в двумерных фотонных кристаллах с гексагональной решеткой воздушных отверстий. Геометрические параметры базовой структуры фотонного кристалла оставались постоянными: радиус воздушных отверстий составлял 209 нм, период решетки – 520 нм. Волновод формировался путем удаления одного из рядов воздушных отверстий, а микрорезонатор создавался путем формирования воздушной полости гексагональной формы вблизи волновода. Для повышения эффективности связи между волноводом и резонатором в структуру был внедрен дефект – воздушное отверстие с переменным радиусом. Анализ показал, что максимальная локализация электромагнитного поля в гексагональной полости с диаметром 1,65 мкм достигается при удалении ее от волновода на два ряда воздушных отверстий. При увеличении этого расстояния наблюдается снижение интенсивности поля в пределах резонатора. Введение дефекта позволило значительно повысить эффективность передачи энергии из волновода в резонатор. Наибольшая интегральная напряженность электрического поля в области резонатора наблюдалась при радиусе дефекта в диапазоне от 246 до 290 нм. Полученные данные могут быть использованы при разработке компактных оптических устройств, таких как лазеры, модуляторы и переключатели на основе фотонных кристаллов.

Фотонный кристалл; GaAs; волновод; микрорезонатор.

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

STUDY OF THE PROPAGATION OF LIGHT WITH A WAVELENGTH OF 1.3 MM IN TWO-DIMENSIONAL GaAs-BASED PHOTONIC CRYSTALS WITH A WAVEGUIDE–MICRORESONATOR CONFIGURATION

Photon crystals are semiconductor structures characterized by a periodic variation of dielectric permittivity in space with a period comparable to the wavelength of electromagnetic radiation. Interest in these structures is driven both by the importance of fundamental research into light-matter interactions and by the prospects for applying photonic crystals in optical integrated circuits and next-generation optoelectronic components. This paper presents the results of a study on the propagation patterns of electromagnetic radiation with a wavelength of 1.3 μm in two-dimensional photonic crystals based on gallium arsenide (GaAs). The research is based on a numerical model using the Comsol Multiphysics 6.1 software package and includes an analysis of the electric field intensity distribution in complex photonic crystal structures consisting of a waveguide coupled to a hexagonal microcavity (microresonator) with various geometric parameters. The influence of a deliberately introduced defect radius in the waveguide region on the efficiency of radiation transmission into the resonator area also analyzed. For numerical analysis, methods for simulating the propagation of transverse electric waves in two-dimensional photonic crystals with a hexagonal lattice of air holes employed. The geometric parameters of the basic photonic crystal structure remained constant: the air hole radius was 209 nm, and the lattice period was 520 nm. The waveguide was formed by removing one row of air holes, while the microresonator was created by forming a hexagonal air cavity near the waveguide. To enhance the coupling efficiency between the waveguide and resonator, a defect in the form of an air hole with a variable radius was introduced into the structure. Analysis showed that maximum localization of the electromagnetic field in a hexagonal cavity with a diameter of 1.65 μm was achieved when the cavity was positioned two rows of air holes away from the waveguide. Increasing this distance resulted in a reduction of field intensity within the resonator. Introduction of the defect significantly enhanced energy transfer efficiency from the waveguide to the resonator. The highest integral electric field intensity in the resonator region was observed when the defect radius ranged from 246 to 290 nm. The obtained data can be used in the development of compact optical devices such as lasers, modulators, and switches based on photonic crystals.

Photonic crystal; GaAs; waveguide; microresonator.

Введение. Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой материалы, обладающие пространственно-периодической модуляцией диэлектрической проницаемости в масштабах, сравнимых с длиной волны электромагнитного излучения. Такая структура обеспечивает формирование фотонной запрещенной зоны – спектрального диапазона, в кото-

ром распространение света определенных частот и направлений подавляется за счет брэгговского рассеяния [1]. Это уникальное свойство позволяет управлять распространением света и открывает широкие возможности для создания интегрально-оптических устройств нового поколения. Полная фотонная запрещенная зона возникает при перекрытии брэгговских запрещенных зон во всех возможных направлениях распространения волн внутри кристалла. Наличие такой зоны позволяет локализовать свет, эффективно отражать падающее излучение и управлять его распространением в заданных направлениях [2]. Эти эффекты используются при разработке высокодобротных микрорезонаторов, компактных волноводов, фильтров, переключателей и других элементов фотонных схем [3–12]. Особый интерес представляет использование ФК в интегральной оптике, лазерах [13] и биосенсорах [14, 15]. Благодаря своей способности локализовать и направлять свет такие структуры позволяют миниатюризировать оптические системы и повышать их функциональную плотность [16]. Кроме того, существует ряд работ, посвященных применению волноводно-резонаторных конфигураций, таких как датчик давления на основе двумерных ФК структур, работающий по принципу регистрации сдвига резонансной длины волны под действием приложенного давления [17]. Интерес представляет также другая работа, в которой представлена новая конструкция микродискового резонатора на основе субволновой решетки. Чувствительность, достигнутая в данной работе, является наивысшей по сравнению с ранее опубликованными в литературе значениями [18]. Несмотря на то, что вышеуказанные работы подтверждают актуальность ФК в современной фотонике, конфигурации волноводно-резонаторных систем на основе ФК все еще требуют дальнейшей оптимизации.

Среди наиболее перспективных материалов для создания таких структур выделяется арсенид галлия (GaAs), который сочетает в себе высокую диэлектрическую проницаемость, развитую технологию микрообработки и совместимость с существующими полупроводниковыми технологиями. Для современных оптических систем связи большой интерес представляет излучение с длиной волны 1,3 мкм, что обусловлено попаданием во второе окно прозрачности оптического волокна, характеризующееся низким уровнем затухания, и нулевой дисперсией [19]. Кроме того, на этой длине волны работают источники излучения на основе квантовых точек InGaAs, которые отличаются высокой стабильностью и технологичностью изготовления [20, 21].

В рамках данной работы было проведено численное моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с двумерными ФК на основе GaAs, содержащими волноводы и гексагональные микрорезонаторы. Особое внимание было уделено анализу распределения напряженности электрического поля (ЭП) в зависимости от геометрических параметров структуры, а также исследованию влияния намеренно внесенного дефекта на эффективность передачи излучения из волновода в область резонатора. Целью исследования является определение оптимальных параметров структуры фотонного кристалла, обеспечивающих максимальную локализацию электромагнитного поля в микрорезонаторе, что особенно важно для применения в устройствах оптоэлектроники, таких как лазеры, оптические модуляторы и переключатели.

Описание модели. Исследование проводилось на основе двумерного ФК, изготовленного из матрицы GaAs с внедренной гексагональной решеткой воздушных отверстий (рис. 1). Известно, что фотонные кристаллы со структурными элементами в форме гексагонов представляют интерес в связи с возможностью формирования полной фотонной запрещенной зоны, обеспечивающей максимальное отражение распространяемого излучения [22]. Материал матрицы GaAs был выбран благодаря высокой диэлектрической проницаемости ($\epsilon \approx 12,9$), технологичности и широкому применению в современной оптоэлектронике. Геометрические параметры фотонного кристалла подбирались таким образом, чтобы обеспечить попадание излучения с длиной волны 1,3 мкм в фотонную запрещенную зону: радиус (r) воздушных отверстий – 209 нм, период структуры – 520 нм. Моделирование проводилось в программном пакете COMSOL Multiphysics 6.1 с использованием модуля Wave Optics. Для моделирования распространения электромагнитных волн в фотонном кристалле использовалось скалярное уравнение для поперечной составляющей ЭП E_z :

$$-\Delta \cdot \Delta E_z - n^2 k_0^2 E_z = 0, \quad (1)$$

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

При моделировании электромагнитных полей в среде с неоднородными материалами программный пакет COMSOL Multiphysics автоматически применяет физически обоснованные граничные условия на всех внутренних границах раздела между различными материалами:

$$l \cdot (\Delta \cdot E) - j k_0 l \cdot (E \cdot l) = 0, \quad (2)$$

где l – единичный вектор нормали к границе двух сред, E – вектор напряженности электрического поля, $\Delta \cdot E$ – ротор электрического поля, j – мнимая единица, $E \cdot l$ – векторное произведение, которое дает компоненту E , перпендикулярную l . В частности, на таких границах обеспечивается непрерывность тангенциальных компонент электрического и магнитного полей, что соответствует классическим граничным условиям, вытекающим из интегральной формы уравнений Максвелла.

Для повышения эффективности передачи излучения из волновода в резонатор в структуру было внедрено воздушное отверстие переменного радиуса, играющее роль дефекта. Радиус дефекта варьировался в диапазоне от 139 до 261 нм с целью определения его оптимального значения, отвечающего наиболее эффективному вводу излучения в микрорезонатор. Исследование включало моделирование распределения напряженности ЭП вдоль волновода и по контуру гексагонального микрорезонатора, а также анализ зависимостей подынтегральной площади кривой напряженности ЭП (интегральной напряженности ЭП) от координаты при различном количестве рядов воздушных отверстий между волноводом и резонатором (L) и различным радиусе дефекта.

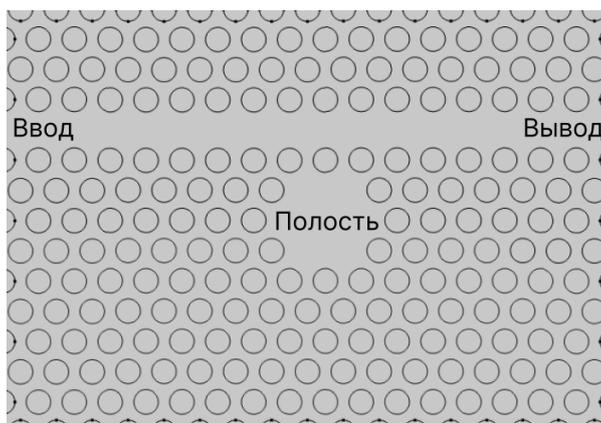


Рис. 1. Топология моделируемого ФК на основе GaAs, включающего волновод и полость из GaAs, выполняющую роль микрорезонатора

Структура состоит из 17 воздушных отверстий в горизонтальном направлении и 13 воздушных отверстий в вертикальном направлении. Для реализации волновода в структуре был удален один ряд воздушных отверстий вдоль направления распространения света. Источник излучения расположен у ввода в волновод и излучает с длиной волны 1.3 мкм, при этом данная модель не предполагает наличие приемника. В качестве микрорезонатора использовалась гексагональная полость, образованная удалением гексагона воздушных отверстий в области вблизи волновода. Такая конфигурация позволяет эффективно локализовать электромагнитное поле в заданной области.

Результаты и обсуждение. Проведено исследование распределения напряженности ЭП в структуре волновод–микрорезонатор при различных геометрических параметрах его структуры, таких как количество рядов воздушных отверстий между волноводом и гексагональным микрорезонатором и диаметр микрорезонатора. Кроме того, проведено исследование влияния дефектного воздушного отверстия в волноводе на интегральную

напряженность ЭП в волноводе и в гексагональной полости. На рис. 2 демонстрируются результаты моделирования структуры, включающей волновод и гексагональную полость, расстояние между которыми варьируется дискретно. Шаг изменения расстояния соответствует одному ряду воздушных отверстий. Полученные данные представлены для двух значений диаметра гексагональной полости: на рис. 2,а-в диаметр полости (d) составляет 1,65 мкм, а на рис. 2,г-е – 2,69 мкм.

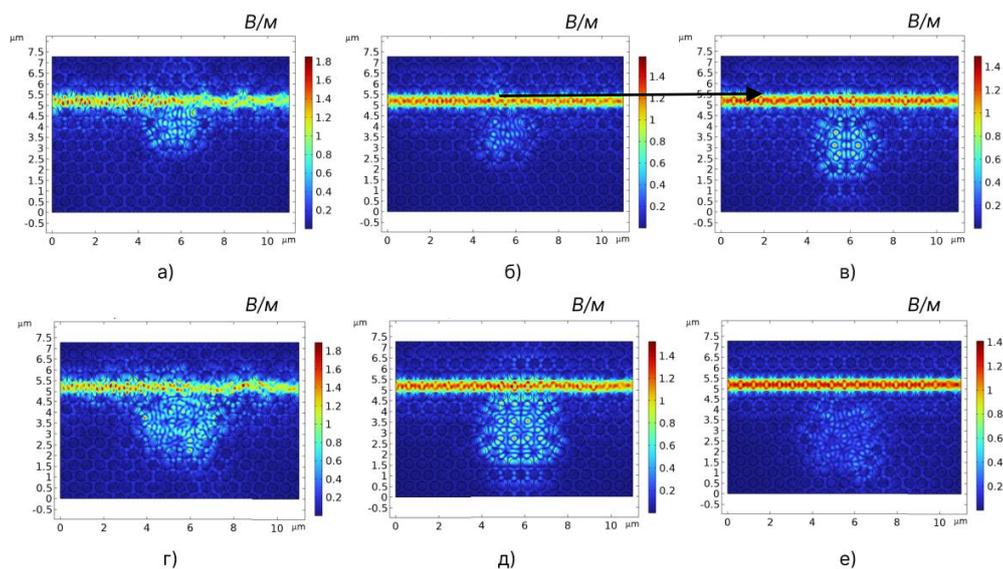


Рис. 2. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности ЭП в структуре волновод–микрорезонатор: $d = 1,65$ мкм, $L = 0$ (а); $d = 1,65$ мкм, $L = 1$ (б); $d = 1,65$ мкм, $L = 2$ (в); $d = 2,69$ мкм, $L = 0$ (г); $d = 2,69$ мкм, $L = 1$ (д); $d = 2,69$ мкм, $L = 2$ (е)

Исходя из рис. 2 видно, что максимальная локализация электромагнитного поля в гексагональной полости для $d = 1,65$ мкм достигается при удалении ее от волновода на $L = 2$. При увеличении расстояния более чем на два ряда наблюдается снижение интенсивности поля в резонаторе, что связано с ослаблением связи между волноводом и резонатором. Для гексагональной полости с $d = 2,69$ мкм максимальная локализация электромагнитного поля в полости достигается при удалении ее от волновода на $L = 1$.

Для количественной оценки параметров распределения ЭП в пределах фотонного кристалла была построена зависимость интегральной напряженности ЭП от количества рядов воздушных отверстий, разделяющих волновод и гексагональную полость. Значения напряженности снимались вдоль волновода как показано стрелкой на рис. 2,б, а также вдоль стенок гексагональной полости, как отмечено ромбической рамкой на рис. 2,в. Полученные результаты отражены на рис. 3.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что оптимальная конфигурация структуры достигается при расстоянии между волноводом и гексагональной полостью, равном двум рядам воздушных отверстий. Наличие провала на графике, отмеченного зеленым кругом, свидетельствует о передаче части излучения из волновода в гексагональную полость. Следует отметить, что структура с микрорезонатором, расположенным на расстоянии $L = 0$ от волновода (рис. 2,а), имеет еще меньшую интегральную напряженность ЭП вдоль волновода, но она не учитывается в связи с тем, что повышенные потери в таком случае могут привести к значительному снижению добротности гексагонального резонатора.

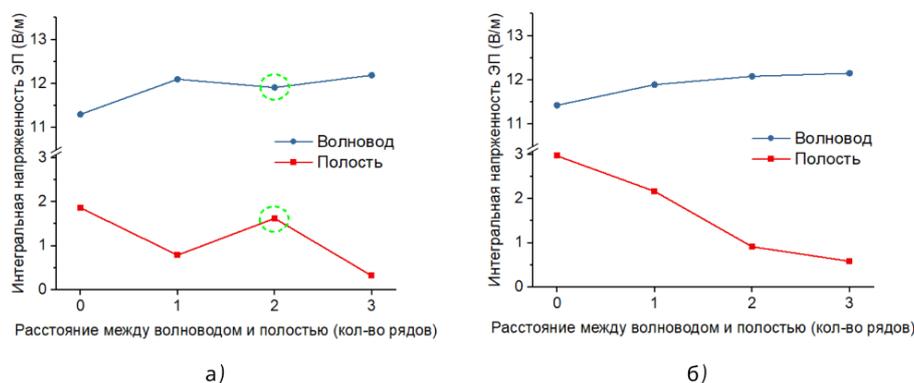


Рис. 3. Зависимость интегральной напряженности ЭП вдоль волновода и стенок полости от количества рядов воздушных отверстий между волноводом и полостью при d полости, равном 1,65 мкм (а) и 2,69 мкм (б)

На следующем этапе было проведено исследование распространения излучения в фотонном кристалле с волноводом, уширенным до 2 рядов воздушных отверстий (рис. 4). Можно сделать вывод, что результат неудовлетворительный, так как изменение геометрических параметров структуры негативно повлияло на попадание излучения в область микрорезонатора, в связи с чем данная конфигурация в дальнейшем в исследовании не использовалась.

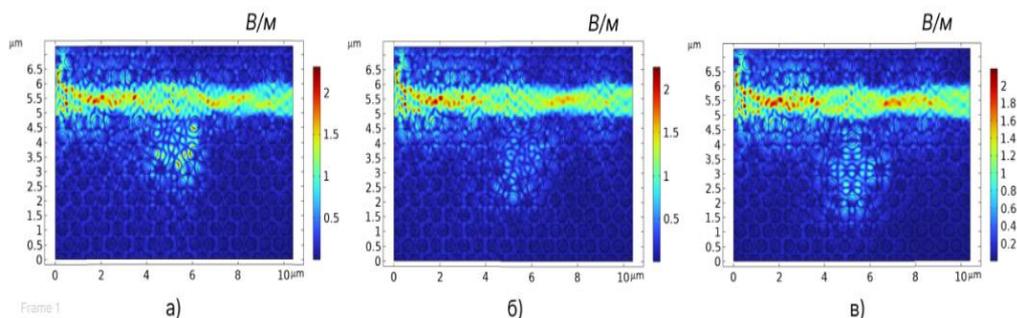


Рис. 4. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности ЭП в структуре волновод–микрорезонатор при широком волноводе: $L = 0$ (а); $L = 1$ (б); $L = 2$ (в)

Особое внимание было уделено исследованию влияния введенного в область волновода дефекта. Дефект представлял собой воздушное отверстие с переменным радиусом, который варьировался в диапазоне от 139 до 261 нм. Было проведено исследования влияния дефекта на величину интегральной напряженности ЭП вдоль волновода и стенок гексагональной полости. Варьирование r от 261 нм до 139 нм привело к соответствующим изменениям в картах распределения напряженности ЭП, представленных на рис. 5 и 6.

На рис. 6 представлены результаты моделирования распределения напряженности ЭП в структурах с радиусом дефекта, варьирующимся от 174 до 139 нм. Анализ рис. 5 и 6 показывает, что введенный в область волновода дефект существенно влияет на распределение напряженности ЭП в структуре ФК. Варьирование радиуса дефекта от 139 нм до 261 нм приводит к изменению интенсивности поля как вдоль волновода, так и внутри гексагональной полости.

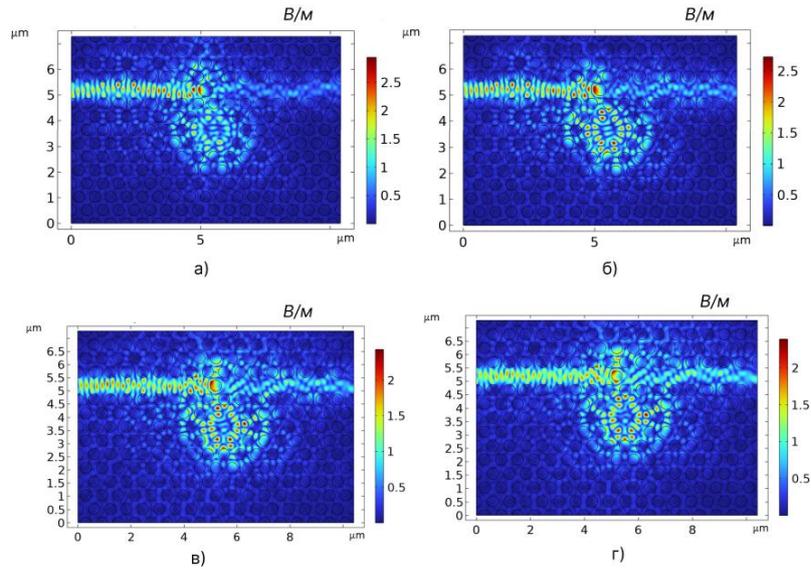


Рис. 5. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности ЭП в структуре волновод–микрорезонатор с дефектом с различным радиусом: 261 нм (а), 232 нм (б), 209 нм (в), 190 нм (г)

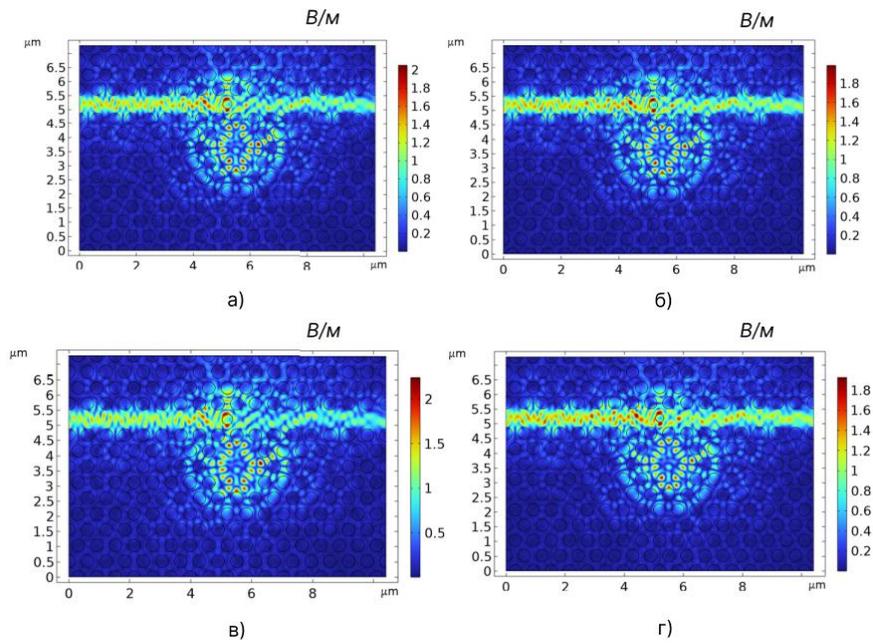


Рис. 6. Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности ЭП в структуре волновод-микрорезонатор с дефектом с радиусом 174,1 нм (а), 160,7 нм (б), 149,2 (в), 139,3 нм (г)

Для количественной оценки результатов проведенного моделирования была построена зависимость интегральной напряженности ЭП вдоль волновода (рис. 7,а) и стенок полости (рис. 7,б) от радиуса дефекта, внедренного в волноводную структуру.

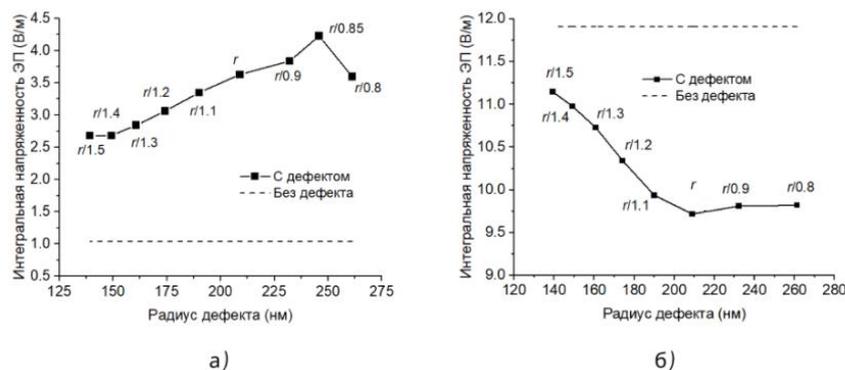


Рис. 7. Зависимость интегральной напряженности ЭП вдоль волновода (а) и стенок полости (б) от радиуса дефекта в волноводе

На рис. 7,а видно, что наибольшая интегральная площадь в гексагональной области наблюдается в диапазоне радиусов дефекта от 209 до 246 нм. Это позволяет сделать вывод об оптимальности применения данного диапазона радиусов дефектов в рассматриваемой конфигурации. Введение дефекта в область волновода позволило значительно повысить эффективность передачи излучения в микрорезонатор. Из рис. 7,б следует, что с увеличением радиуса дефекта наблюдается уменьшение интегральной напряженности ЭП до тех пор, пока радиус не достигает значения 209 нм. Данный эффект свидетельствует о том, что при указанном радиусе дефекта максимальная доля излучения из волновода переходит в гексагональную область, что подтверждается характерным снижением интенсивности вдоль волновода. Анализ зависимости интегральной напряженности ЭП от радиуса дефекта показал, что максимальная локализация поля в гексагональной полости происходит при радиусах дефекта в диапазоне от 246 до 209 нм.

Заключение. Таким образом, в представленной работе проведено исследование результатов численного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с длиной волны 1,3 мкм с фотонными кристаллами на основе GaAs с гексагональными микрорезонаторами, а также различными вариантами их сопряжения с волноводом. Установлено, что оптимальной конфигурацией, обеспечивающей эффективный ввод излучения в гексагональный резонатор, является структура с дефектом, радиус которого лежит в диапазоне от 209 нм до 246 нм. Продемонстрировано, что увеличение ширины волновода до двух рядов воздушных отверстий в данной конфигурации негативно влияет на попадание излучения в область микрорезонатора. В конфигурации с дефектом в волноводе наблюдается значительная локализация электромагнитного поля в резонаторе, что подтверждается как картами распределения напряженности ЭП, так и анализом зависимости интегральной напряженности ЭП от координаты. Полученные результаты могут быть применены при разработке компактных оптических устройств, таких как лазеры, оптические модуляторы и переключатели.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10313, <https://rscf.ru/project/23-79-10313/>, в Южном федеральном университете и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; государственное задание в сфере научной деятельности № FENW- 2025-0004.

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. Tamer A. Moniem. All-optical XNOR gate based on 2D photonic-crystal ring resonators // *Quantum Electron.* – 2017. – Vol. 47, No. 2. – P. 169-172.
4. Liu W. et al. 3-D Printed Directional Couplers in Circular Waveguide // *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.* – 2021. – Vol. 31, No. 6. – P. 561-564.
5. Xiong Y. et al. Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser // *Photonics.* – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 54.
6. Zheltikov A.M. Nonlinear optics of microstructure fibers // *Uspekhi Fiz. Nauk.* – 2004. – Vol. 174, No. 1. – P. 73.
7. 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, No. 1. – P. 82-86.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Pan G. et al. Harnessing the capabilities of VCSELs: unlocking the potential for advanced integrated photonic devices and systems // *Light Sci. Appl.* – 2024. – Vol. 13, No. 1. – P. 229.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Tuchin V.V., Skibina J.S., Malinin A.V. Photonic crystal fibers in biophotonics / ed. Popp J. – 2011. – P. 83110N.
16. 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.
17. Dinodiya S., Bhargava A. A Comparative Analysis of Pressure Sensing Parameters for Two Dimensional Photonic Crystal Sensors Based on Si and GaAs // *Silicon.* – 2022. – Vol. 14, No. 9. – P. 4611-4618.
18. Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L. A highly sensitive design of subwavelength grating double-slot waveguide microring resonator // *Laser Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 17, No. 7. – P. 076201.
19. Brès C.-S. et al. Supercontinuum in integrated photonics: generation, applications, challenges, and perspectives // *Nanophotonics.* – 2023. – Vol. 12, No. 7. – P. 1199-1244.
20. García de Arquer F.P. et al. Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges // *Science (80-.).* – 2021. – Vol. 373, No. 6555. – P. 640.
21. 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.
22. 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.

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. Tamer A. Moniem. All-optical XNOR gate based on 2D photonic-crystal ring resonators, *Quantum Electron*, 2017, Vol. 47, No. 2, pp. 169-172.
4. Liu W. et al. 3-D Printed Directional Couplers in Circular Waveguide, *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, 2021, Vol. 31, No. 6, pp. 561-564.
5. Xiong Y. et al. Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser, *Photonics*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 54.
6. Zheltikov A.M. Nonlinear optics of microstructure fibers, *Uspekhi Fiz. Nauk*, 2004, Vol. 174, No. 1, pp. 73.
7. 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, No. 1, pp. 82-86.

8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *Pan G. et al.* Harnessing the capabilities of VCSELs: unlocking the potential for advanced integrated photonic devices and systems, *Light Sci. Appl.*, 2024, Vol. 13, No. 1, pp. 229.
12. *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.
13. *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.
14. *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.
15. *Tuchin V.V., Skibina J.S., Malinin A.V.* Photonic crystal fibers in biophotonics, ed. Popp J., 2011, pp. 83110N.
16. *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.
17. *Dinodiya S., Bhargava A.* A Comparative Analysis of Pressure Sensing Parameters for Two Dimensional Photonic Crystal Sensors Based on Si and GaAs, *Silicon*, 2022, Vol. 14, No. 9, pp. 4611-4618.
18. *Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L.* A highly sensitive design of subwavelength grating double-slot waveguide microring resonator, *Laser Phys. Lett.*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 076201.
19. *Brès C.-S. et al.* Supercontinuum in integrated photonics: generation, applications, challenges, and perspectives, *Nanophotonics*, 2023, Vol. 12, No. 7, pp. 1199-1244.
20. *García de Arquer F.P. et al.* Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges, *Science (80-.)*, 2021, Vol. 373, No. 6555, pp. 640.
21. *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.
22. *Gorbatsevich A.A., Friman A.V., Gorelik B.C.* Dvumernyy geksagonal'nyy fotonnyy kristall s novoy geometriy elementa [Two-dimensional hexagonal photonic crystal with new element geometry], *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Brief communications on physics of the Lebedev Physical Institute], 2014, Vol. 6, pp. 37-38.

Пленингер Максимилиан – Южный федеральный университет; e-mail: pleninger@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79897471548.

Балакирев Сергей Вячеславович – Южный федеральный университет; e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371611; к.т.н.; ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий.

Солодовник Максим Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; 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.

Balakirev Sergey Vyacheslavovich – Southern Federal University; e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371611; cand. of eng. sc.; leading researcher of Laboratory of Epitaxial Technologies.

Solodovnik Maxim Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371611; cand. of eng. sc.; leading researcher of Laboratory of Epitaxial Technologies.