

Научная статья

УДК 535.015

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17303>

СОЗДАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОЛИРОВАННЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ GaP(NAs) НА КРЕМНИИ

Л. Н. Дворецкая¹ ✉, А. М. Можаров¹, С. Д. Комаров³,
Е. А. Вячеслава¹, Э. И. Моисеев³, В. В. Федоров^{2, 1}, И. С. Мухин²

¹ Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

³ НИУ «Высшая школа экономики» (Санкт-Петербургский филиал),
Санкт-Петербург, Россия;

✉ Liliyabutler@gmail.com

Аннотация. В статье представлена технология формирования оптических микрорезонаторов, основанных на системе полупроводниковых материалов GaP(NAs) на кремниевой подложке. Впервые разработан режим плазмохимического травления, при котором достигается аспектное соотношение 5:1 при травлении слоев, состоящих из элементов III – V групп, и низкая шероховатость боковых стенок. Предложен технологический подход, обеспечивающий оптическое разделение микрорезонатора с кремниевой подложкой, что важно для эффективной локализации света в фотонной структуре. Проведенные оптические исследования и численный расчет показали наличие модуляций в спектрах микрофотолюминесценции микроструктур; модуляции обусловлены возникновением резонансов Фабри – Перо. Выполненное исследование является важным шагом в развитии технологии создания и применения комбинированных структур с оптическими волноводами на кремниевой основе.

Ключевые слова: оптический микрорезонатор GaP(NAs) на кремнии, плазмохимическое травление, спектр микрофотолюминесценции

Финансирование. Автор статьи Л. Н. Дворецкая благодарна за финансовую поддержку Российского научного фонда (грант № 23-72-01133) при фабрикации микроструктур; автор И. С. Мухин благодарен за финансовую поддержку Санкт-Петербургского научного фонда (грант № 23-РБ-02-08) при выполнении моделирования; автор Э. И. Моисеев благодарен за финансовую поддержку НИУ «Высшая школа экономики» (Санкт-Петербургский филиал, Программа фундаментальных исследований вуза) при выполнении оптических измерений.

Для цитирования: Дворецкая Л. Н., Можаров А. М., Комаров С. Д., Вячеслава Е. А., Моисеев Э. И., Федоров В. В., Мухин И. С. Создание оптических изолированных микрорезонаторов GaP(NAs) на кремнии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 3. С. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17303>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17303>

CREATION OF OPTICAL ISOLATED GaP(NAs) MICROCAVITIES ON SILICON

L. N. Dvoretckaia ¹ ✉, A. M. Mozharov ¹, S. D. Komarov ³,
E. A. Vyacheslavova ¹, E. I. Moiseev ³, V. V. Fedorov ^{2, 1}, I. S. Mukhin ²

¹ Alferov University, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

³ National Research University Higher School of Economics,
St. Petersburg branch, St. Petersburg, Russia

✉ Liliyabutler@gmail.com

Abstract. This article presents the technology for the formation of optical microcavities based on the GaP(NAs) semiconductor material system on silicon. For the first time, a plasma etching mode which ensures the achievement of an aspect ratio of 5:1 and low roughness of the side walls has been proposed in etching layers of III–V groups. A technological approach was also put forward to ensure optical separation of the microcavity with the Si substrate, that being important for efficient localization of light in the photonic structure. The optical studies and numerical calculation showed the presence of modulations in the micro-photoluminescence spectra of microstructures caused by the appearance of Fabry – Perot resonances. This research is an important step in the development of the technology of creation and application of combined structures with silicon-based optical waveguides.

Keywords: optical GaP(NAs) microcavity on Si, plasma etching, micro-photoluminescence spectrum

Funding: The author of this article, L. N. Dvoretckaia, is grateful for financial support from the Russian Science Foundation (Grant No. 23-72-01133) in fabrication of microstructures; the author I. S. Mukhin is grateful for financial support from the St. Petersburg Science Foundation (Grant No. 23-RB-02-08) in performing simulation; the author E. I. Moiseev is grateful for financial support from Higher School of Economics (St. Petersburg branch, The Higher School of Economics Fundamental Research Program) in performing optical measurements.

For citation: Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Komarov S. D., Vyacheslavova E. A., Moiseev E. I., Fedorov V. V., Mukhin I. S., Creation of optical isolated GaP(NAs) microcavities on silicon, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (3) (2024) 25–35. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17303>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Дальнейшее планомерное развитие вычислительных систем замедляется ограниченностью пропускной способности традиционных систем передачи информации по металлическим проводникам. В связи с этим особый интерес в области микроэлектроники представляют системы, обеспечивающие альтернативный способ передачи информации, например, в виде оптических сигналов. Интеграция фотоники и микроэлектроники обсуждается уже в течение последних 30 лет; за это время показана возможность соединения технологий создания комплементарных МОП-структур (КМОП) и высокоскоростных оптических источников, что позволит увеличить скорость внутрочиповой обработки и передачи информации, а также повысит долговечность и компактность устройств [1].

Использование соединений IV группы (кремний Si и германий Ge) для создания светоизлучающих структур и фотодиодов на кремнии были в основном мотивированы их



совместимостью с КМОП-платформой [2]. При этом ни одна из этих разработок пока не продемонстрировала реализацию эффективного светоизлучающего устройства, что связано с ограниченной возможностью излучения света такими материалами [3, 4]. В свою очередь, большинство химических элементов III – V групп обладают прямозонной полупроводниковой структурой, что обеспечивает создание тонкопленочных светодиодов, эффективных микроскопических фотоэлементов, лазерных структур и др.

Недостатком приборов на основе элементов III – V групп является высокая стоимость материала подложек на основе арсенида галлия GaAs и фосфида индия InP, и при этом значительная его часть теряется в процессе изготовления устройства. Кроме того, диаметры производимых подложек GaAs и InP не превышают 150 и 100 мм, соответственно; тогда как стандартный диаметр подложек из кремния или из кремния на изоляторе составляет на сегодняшний день (для сравнения) 450 мм.

В свою очередь, для снижения стоимости конечных транзисторных, фотонных или оптоэлектронных элементов необходимо увеличивать диаметр используемых подложек, что пока технологически недоступно для пластин, изготавливаемых из материалов на основе элементов III – V групп.

Один из способов реализации оптоэлектронных устройств на кремнии – это прямое формирование полупроводниковой структуры III – V групп на кремниевой подложке. Такое выращивание в принципе обеспечивает низкую стоимость и надежный способ интеграции оптоэлектронных элементов на кремнии [5]. При этом возникает новая проблема: в эпитаксиальном слое возникают дислокации, вызванные различием кристаллических решеток выращиваемой структуры и кремниевой подложки, а это может приводить к отсутствию работоспособности всего оптического элемента.

Чтобы обойти указанное ограничение, разрабатывают технологии по введению различных буферных слоев [6, 7] или текстурированию кремниевой подложки [8 – 11] для эффективной релаксации упругих напряжений; релаксация обеспечивает синтез качественных эпитаксиальных слоев. Так например, в работе [12] удалось добиться снижения плотности дислокаций в слое GaAs до уровня $2,4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ за счет использования комбинации последовательного синтеза буферных слоев и термического отжига. Это позволило создать эффективную светодиодную структуру, работающую в красной спектральной области. В статье [13] представлены результаты успешного создания микродискового резонатора на нитриде галлия GaN, синтезированного на кремнии, и продемонстрирована лазерная генерация в УФ-области спектра при импульсной лазерной накачке полупроводниковой структуры.

Важным частным случаем прямого формирования слоев структур III – V групп на кремнии является использование системы материалов GaP/GaP(NAs), что позволяет полностью решить проблему рассогласования параметров кристаллических решеток между синтезируемыми слоями и кремнием. Вопреки тому, что GaP является непрямозонным полупроводником, добавление всего 0,5 мол.% азота делает данный материал прямозонным [14], а 2%-й состав уже оказывается согласованным с кристаллической решеткой кремния и имеет ширину запрещенной зоны около 2 эВ.

Одновременное добавление атомов азота и мышьяка позволяет контролируемо снижать ширину запрещенной зоны полупроводникового материала вплоть до значения примерно 1,5 эВ, и при этом сохранять решеточное согласование с кремнием.

На сегодняшний день исследователям удалось значительно повысить качество эпитаксиально-синтезированного соединения GaP(NAs) на подложке Si, что позволило создать на его основе светодиодные и фоточувствительные элементы [15, 16] и даже добиться лазерной генерации в структурах с квантовыми ямами [17, 18]. Одним из существенных преимуществ системы материалов GaP/GaP(NAs) является возможность использования непрямозонного полупроводника GaP, что позволяет изготавливать волноводы или резонаторные структуры на его основе [19].

Общей проблемой создания фотонных структур на кремнии считается низкая локализация света в резонаторе и поглощение оптической моды подложкой. Возможное решение данной проблемы – это формирование пустот между ним и фотонными элементами GaP/GaP(NAs), которые можно создавать, например, путем удаления подложки под участками фотонной схемы (через вытравливание).

В данной работе представлены результаты по развитию технологии изготовления микродисковых резонаторов на основе системы материалов GaP(NAs), синтезированных на подложке кремния Si, и изучены оптические свойства полученных структур.

Экспериментальная часть

Исследуемая гетероструктура GaP/GaP(NAs) с толщинами слоев 500/900/200 нм была синтезирована на кремниевой подложке с использованием метода молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Veeco GEN III.

Состав твердого раствора	
активной области гетероструктуры, %	
P	82,0
As	14,5
N	$2,6 \pm 3,0$

Выбранный состав соответствует ширине запрещенной зоны 1,83 эВ. Детальное описание процесса синтеза и характеристики эпитаксиальных слоев представлено в работе [20].

Изготовление оптических структур. Процесс изготовления состоял из нескольких этапов.

На первом этапе методом контактной оптической литографии проводилось формирование микрорисунка из фоторезиста AZ1518 с использованием установки контактной фотолитографии SUSS MJB4. Диаметр микроструктур варьировался в диапазоне 6 – 40 мкм.

На втором этапе проводилось плазмохимическое криотравление слоев синтезированной гетероструктуры на установке Oxford Instruments Plasmalabsystem 100 ICP, позволяющей осуществлять независимое управление концентрацией активных ионов за счет формирования индуктивно-связанной плазмы и их направленного перемещения. Для достижения оптимальных условий травления проводилась вариация параметров процесса. Параметры травления указаны в таблице.

На всех этапах изготовления гетероструктур GaP/GaP(NAs)/GaP их видоизменение контролировалось с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на оборудовании Zeiss Supra.

Таблица

Исследованные режимы травления гетероструктуры GaP/GaP(NAs)/GaP

Параметр технологии	Значение параметра для структуры			
	I	II	III	IV
Температура, °C	-20		-70	-20
Мощность ICP, Вт	1000			
Вытягивающая мощность, Вт	30	100		
Давление, мТорр	5			
Соотношение потоков BCl_3/Cl_2	40 : 5			
Время процесса, мин	6			

Оптическая характеристика сформированных структур. Эта работа проводилась с использованием метода микрофотолюминесценции (мкФЛ). Измерительная схема включала объектив, используемый как для фокусировки лазерного излучения накачки, так и сбора визуальной и спектральной информации. Для картирования спектров мкФЛ в разных областях образца объектив монтировался на трехкоординатном столе с возможностью перемещения с точностью не хуже 300 нм. В данной схеме образец монтировался неподвижно на медный теплоотвод и размещался в криостате для поддержания постоянной температуры. Для осуществления оптической накачки полупроводниковой структуры был использован непрерывный твердотельный лазер Snioptics с длиной волны 457 нм.

Все измерения мкФЛ проводились при комнатной температуре (300 K).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) микродисковых структур после травления. Анализ СЭМ-изображений позволяет сделать вывод, что используемые технологические режимы обеспечивают травление слоев гетероструктуры, обладая при этом высоким уровнем селективности к кремниевой подложке. Можно отметить, что травление при выбранных базовых параметрах (см. таблицу, структура I) демонстрирует существенную эрозию боковых стенок полупроводникового материала и фоторезиста (см. рис. 1, *a*), что может быть связано с недостаточной направленностью процесса травления. Повышение вытягивающей мощности (структура II) приводило к уменьшению эрозии боковых стенок резиста и улучшению качества боковых стенок структуры при сохранении их вертикальности (см. рис. 1, *b*). При этом все еще отмечалась существенная шероховатость боковой поверхности полупроводниковой структуры после травления, а также уменьшение остаточной толщины фоторезиста по сравнению со структурой I, что указывало на недостаточную устойчивость фоторезиста. Для оптимизации режимов травления структуру дополнительно охлаждали до -70°C при сохранении остальных параметров (структура III). На рис. 1, *c* видно, что данный шаг обеспечил уменьшение как вертикальной, так и боковой эрозии фоторезиста, а также повышение качества боковой поверхности структуры. В свою очередь, при выбранном режиме травления наблюдалось ухудшение вертикальности боковых стенок, что относится к негативным факторам при изготовлении дисковых резонаторов.

Другим подходом к повышению стойкости фоторезиста является его термическое за-дубливание, при котором происходит сшивка химических связей в резисте и его полимеризация. Для обеспечения сшивки была проведена термическая обработка проявленного резиста при температуре 150°C в течение 2 мин, после чего травление структуры было выполнено по режиму, аналогичному режиму для структуры II. СЭМ-изображение структуры после травления представлено на рис. 1, *d*. Если сравнивать полученный результат с таковым для структуры II, то можно отметить повышение качества боковой поверхности полупроводниковой структуры при сохранении высокой вертикальности стенок. При этом важно отметить уменьшение латеральных размеров структуры, что связано с изменением формы фоторезистивной маски после процедуры отжига.

С учетом возможности коррекции размеров на этапе литографии, а также достижения высокого качества структуры боковой поверхности, образец IV был использован в дальнейшем технологическом процессе.

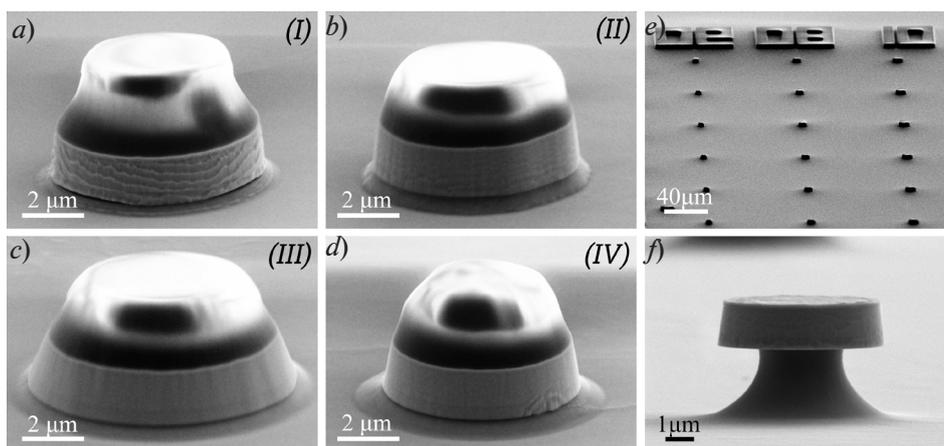


Рис. 1. СЭМ-изображения микродисковых структур I – IV (*a*, *b*, *c*, *d*, соответственно) после травления с фоторезистом на верхней поверхности, а также после травления кремниевой подложки (*e*, *f*). Представлены панорамный вид (*e*) и сформированный микродиск диаметром 6 мкм (*f*)

Для оптической развязки микрорезонаторных структур от кремния, на следующем технологическом этапе проводилось плазмохимическое травление кремниевой подложки с лицевой стороны в газовой смеси SF_6/O_2 с потоками 36 и 4 $см^3/мин$, соответственно, с мощностью ICP 2500 Вт и вытягивающей мощностью 150 Вт. Выбранный режим обеспечивал полную селективность травления кремния, не затрагивал сформированные слои микроструктур на основе элементов III – V групп. На рис. 1, *e, f* представлены СЭМ-изображения микроструктур IV образца после травления кремниевой подложки. Глубина травления кремния составила 2,5 $мкм$ при латеральном травлении под структурой на расстоянии 1,5 $мкм$, что достаточно для поддержания оптических мод на периферии микрорезонаторов.

На рис. 2 представлены результаты измерений мкФЛ при температуре 300 К при непрерывной накачке с использованием высокоапертурного 100-кратного объектива, обеспечивающего фокусировку лазерного луча в пятно диаметром порядка 0,5 $мкм$. На рис. 2, *a* приведено оптическое изображение микродисковой структуры диаметром 40 $мкм$, а также карта интегральной интенсивности сигнала фотolumинесценции, полученная путем растрового сканирования (картирования). Видно, что в области всего диска присутствует сигнал мкФЛ; при этом он усиливается в 1,4 – 1,5 раза на периферии диска, по сравнению с центральной частью, что указывает на более эффективную оптическую накачку полупроводниковой структуры. В спектре излучения (см. рис. 2, *b*) обнаруживается пик мкФЛ с максимумом на длине волны 670 – 680 нм. В отличие от традиционных прямозонных материалов на основе элементов III – V групп, для зарегистрированного сигнала мкФЛ характерна широкая асимметричная полоса излучения, растянутая в длинноволновую область спектра. Такой спектр типичен для полупроводниковых твердых растворов разбавленных нитридов. Полученный вид спектра указывает на неоднородность состава полупроводникового материала, связанную с особенностями встраивания азота в процессе эпитаксиального синтеза, в частности, образования димеризованного азота, а также азотных излучающих уровней в запрещенной зоне. В связи с этим существенная часть сигнала мкФЛ обусловлена излучением через азотные примесные центры, с энергией переходов ниже эффективной ширины запрещенной зоны. Данный эффект наиболее нагляден, если проводить измерения в динамике мкФЛ при существенном понижении общего уровня накачки (см. рис. 2, *c*). Исследование зависимости интенсивности сигнала мкФЛ от длины волны при картировании демонстрирует усиление общей интенсивности сигнала на периферии диска, а также появление явно выраженной модуляции сигнала, обусловленной возникновением стоячих оптических волн (моды Фабри – Перо) вдоль оси роста структуры, в области травления кремния под микродисками. Важно отметить, что резонансов, связанных с появлением мод шепчущей галереи, экспериментально не наблюдалось.

Как было указано выше, усиление интенсивности интегрального сигнала мкФЛ вблизи края микродиска может быть обусловлено как увеличением поглощения лазерного излучения, так и улучшением вывода сигнала мкФЛ. Для разделения вкладов от этих явлений был проведен численный расчет распространения электромагнитного излучения, падающего на микродиск (использована программа Comsol Multiphysics). В расчете были использованы экспериментальные данные о спектральной зависимости коэффициентов преломления и поглощения фосфида галлия и кремниевой подложки [21]. Аналогичные параметры для соединения GaP(NAs) были взяты для близкого по составу твердого раствора, синтезированного на подложке из фосфида галлия [16]. Проведенные расчеты показали, что при оптической накачке полупроводниковой структуры на длине волны 457 нм все излучение, которое не отразилось от границы верхнего слоя фосфида галлия, поглощается в слое GaP(NAs), т. е. наличие кремния под микродиском практически не влияет на уровень накачки полупроводниковой структуры.

Процесс мкФЛ характеризуется генерацией излучения с энергией квантов вблизи края запрещенной зоны полупроводникового материала. Вследствие данного обстоятельства существенно снижается коэффициент поглощения GaP(NAs) на длинах волн мкФЛ. По аналогии с данными работы [16], наша оценка показала, что коэффициент поглощения α принимает значения не более $1,5 мкм^{-1}$, обеспечивая возникновение резонансных оптических эффектов в рассматриваемой геометрии.

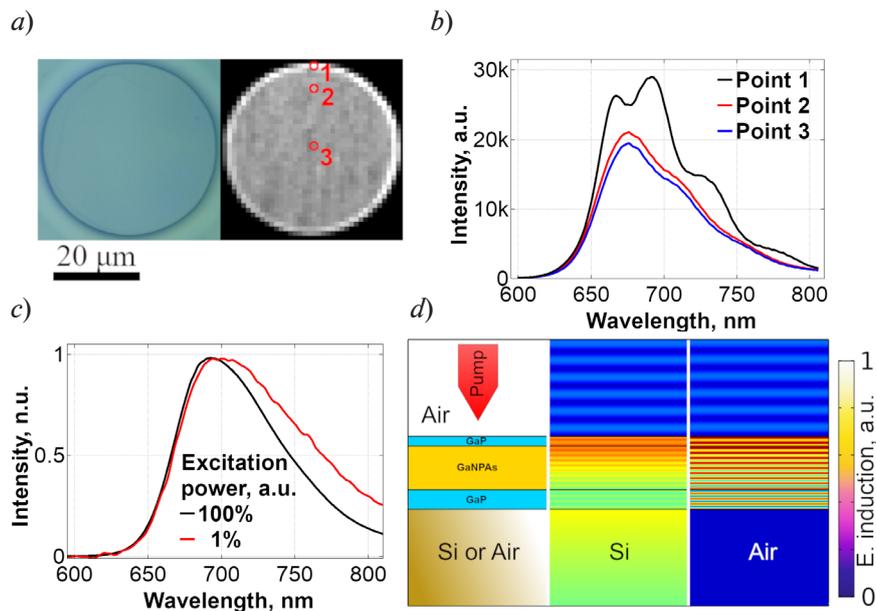


Рис. 2. Основные результаты оптических исследований структуры GaP(NAs):
a – оптическое (слева) и интегральное по спектральному диапазону (справа) изображения микродиска;
b – спектры мкФЛ в трех точках диска (см. рис. 2,*a*); *c* – спектры мкФЛ при двух значениях уровня накачки; *d* – расчетное распределение амплитуды электрической индукции в слоях структуры с Si-подложкой и без нее

Проведенный численный расчет подтвердил возникновение резонансов Фабри – Перо, связанных с появлением стоячих волн вдоль оси роста структуры в отсутствие кремния под слоями резонансной структуры (см. рис. 2,*d*). Амплитуда сигнала на длинах волн резонансов увеличилась в 1,6 раз (максимальное значение), что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В свою очередь средняя дистанция распространения света α^{-1} в полупроводниковой структуре остается существенно меньше периметра рассматриваемых микродисковых резонаторов, что делает невозможным появление резонансных пиков, связанных с модами шепчущей галереи без уменьшения коэффициента поглощения.

Как известно, уменьшение коэффициента поглощения в полупроводниковой структуре возможно путем инжекции носителей заряда и увеличения оптической ширины запрещенной зоны материала [22].

Заключение

В работе представлены результаты исследований по формированию микродисковых резонаторов на основе системы полупроводниковых материалов GaP/GaP(NAs)/GaP, синтезированных на кремниевой подложке, с использованием методов оптической литографии и сухого травления.

Подобран режим травления, обеспечивающий низкий уровень шероховатости боковой стенки при сохранении вертикальности этой стенки. Комбинация режимов травления для системы GaP/GaP(NAs) и Si, обладающих высокой селективностью к выбранной группе материалов, позволила создать микродисковые резонаторы с подвешенной областью вблизи периферии структур.

В результате проведения оптических исследований микрофотолюминесценции объекта установлено, что на периферии микрорезонаторов наблюдается формирование оптических мод Фабри – Перо вдоль оси роста полупроводниковой структуры.

Предложенную в статье технологию можно применять для изготовления не только резонаторов, но и других оптических элементов, таких, например, как волноводы, фильтры, лазерные структуры и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cornet C., Léger Y., Robert C.** Integrated lasers on silicon. Amsterdam: ISTE Press –Elsevier, 2016. 166 p.
2. **Zinovyev V. A., Smagina Zh. V., Zinovyeva A. F., Bloshkin A. A., Dvurechenskii A. V., Rodyakina E. E., Stepikhova M. V., Peretokin A. V., Novikov A. V.** Emission enhancement of Ge/Si quantum dots in hybrid structures with subwavelength lattice of Al nanodisks // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. No. 17. P. 2422.
3. **Iyer S. S., Xie Y.-H.** Light emission from silicon // *Science*. 1993. Vol. 260. No. 5104. Pp. 40–46.
4. **Pavesi L., Gaponenko S., Negro L.** (Eds.). Towards the first silicon laser (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Vol. 93). Dordrecht, the Netherlands: Springer Science + Business Media, 2003. 482 p.
5. **Lee A., Liu H., Seeds A.** Semiconductor III–V lasers monolithically grown on Si substrates // *Semiconductor Science and Technology*. 2012. Vol. 28. No. 1. P. 015027.
6. **Болховитянов Ю. Б., Пчелков О. П.** Эпитаксия GaAs на кремниевых подложках: современное состояние исследований и разработок // *Успехи физических наук*. 2008. Т. 178. № 5. С. 459–480.
7. **Mansor M., Norhaniza R., Shuhaimi A., Hisyam M. I., Omar Al-Z., Williams A., Hussin M. R. M.** Enhancement of gallium nitride on silicon (111) using pulse atomic-layer epitaxy (PALE) AlN with composition-graded AlGaN buffer // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. 31 May. P. 8793.
8. **Ballabio A., Bietti S., Scaccabarozzi A., et al.** GaAs epilayers grown on patterned (001) silicon substrates via suspended Ge layers // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. 26 November. P. 17529.
9. **Park J.-S., Tang M., Chen S., Liu H.** Heteroepitaxial growth of III–V semiconductors on silicon // *Crystals*. 2020. Vol. 10. No. 12. Pp. 1163.
10. **Dvoretckaia L., Gridchin V., Mozharov A., Maksimova A., Dragunova A., Melnichenko I., Mitin D., Vinogradov A., Mukhin I., Cirilin G.** Light-emitting diodes based on InGaN/GaN nanowires on microsphere-lithography-patterned Si substrates // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. No. 12. P. 1993.
11. **Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Berdnikov Y., Mukhin I. S.** Optimization of microsphere optical lithography for nano-patterning // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022. Vol. 55. No. 9. P. 09LT01.
12. **Tsai Y. L., Yang H.-H., Fang J.-H., Chang C.-L., Chen M.-H., Wu C.-H., Hong H.-F.** GaAs-based optoelectronics grown on GaAs/Si virtual substrates with multiple spaced thermal-cycle annealing // *Thin Solid Films*. 2021. Vol. 733. 1 September. P. 138817.
13. **Zhu G., Li J., Zhang N., Li X., Dai J., Cui Q., Song Q., Xu Ch., Wang Y.** Whispering-gallery mode lasing in a floating GaN microdisk with a vertical slit // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 14 January. P. 253.
14. **Henini M., Razeghi M.** Optoelectronic devices: III nitrides. Amsterdam: Elsevier, 2004. 575 p.
15. **Dvoretckaia L. N., Bolshakov A. D., Mozharov A. M., et al.** GaNP-based photovoltaic device integrated on Si substrate // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020. Vol. 206. March. P. 110282.
16. **Geisz J. F., Friedman D. J., Kurtz S.** GaNPAs solar cells lattice-matched to GaP // *Proceedings of the 29-th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002. New Orleans, USA. IEEE, 2002. Pp. 864–867.
17. **Hossain N., Sweeney S. J., Rogowsky S., Ostendorf R., Wagner J., Liebich S., Zimprich M., Volz K., Kunert B., Stolz W.** Reduced threshold current dilute nitride Ga(NAsP)/GaP quantum well lasers grown by MOVPE // *Electronics Letters*. 2011. Vol. 47. No. 16. Pp. 931–933.
18. **Liebich S., Zimprich M., Beyer A., et al.** Laser operation of Ga (NAsP) lattice-matched to (001) silicon substrate // *Applied Physics Letters*. 2011. Vol. 99. No. 7. P. 071109.
19. **Mitchell M., Hryciw A. C., Barclay P. E.** Cavity optomechanics in gallium phosphide microdisks // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. No. 14. P. 141104.
20. **Fedorov V. V., Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Fedina S. V., Kirilenko D. A., Berezovskaya T. N., Faleev N. N., Yunin P. A., Drozdov M. N., Mukhin I. S.** Dual-functional light-emitting and photo-detecting GaAsPN heterostructures on silicon // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2023. Vol. 168. December. P. 107867.

21. **Aspnes D. E., Studna A. A.** Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV // *Physical Review B*. 1983. Vol. 27. No. 2. P. 985.

22. **Ансельм А. И.** Введение в теорию полупроводников. М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. лит.-ры, 1978. 619 с.

REFERENCES

1. **Cornet C., Léger Y., Robert C.**, Integrated lasers on silicon, ISTE Press –Elsevier, Amsterdam, 2016.

2. **Zinovyev V. A., Smagina Zh. V., Zinovyeva A. F., et al.**, Emission enhancement of Ge/Si quantum dots in hybrid structures with subwavelength lattice of Al nanodisks, *Nanomater.* 13 (17) (2023) 2422.

3. **Iyer S. S., Xie Y.-H.**, Light emission from silicon, *Science*. 260 (5104) (1993) 40–46.

4. **Pavesi L., Gaponenko S., Negro L.** (Eds.), Towards the first silicon laser (NATO Sci. Ser. II: Mathematics, Physics and Chemistry, Vol. 93), Springer Science + Business Media, Dordrecht, 2003.

5. **Lee A., Liu H., Seeds A.**, Semiconductor III–V lasers monolithically grown on Si substrates, *Semicond. Sci. Technol.* 28 (1) (2012) 015027.

6. **Bolkhovityanov Y. B., Pchelyakov O. P.**, GaAs epitaxy on Si substrates: modern status of research and engineering, *Phys.-Usp.* 51 (5) (2008) 437–456.

7. **Mansor M., Norhaniza R., Shuhaimi A., et al.**, Enhancement of gallium nitride on silicon (111) using pulse atomic-layer epitaxy (PALE) AlN with composition-graded AlGaIn buffer, *Sci. Rep.* 13 (31 May) (2023) 8793.

8. **Ballabio A., Bietti S., Scaccabarozzi A., et al.**, GaAs epilayers grown on patterned (001) silicon substrates via suspended Ge layers, *Sci. Rep.* 9 (26 Nov) (2019) 17529.

9. **Park J.-S., Tang M., Chen S., Liu H.**, Heteroepitaxial growth of III–V semiconductors on silicon, *Crystals*. 10 (12) (2020) 1163.

10. **Dvoretckaia L., Gridchin V., Mozharov A., et al.**, Light-emitting diodes based on InGaN/GaN nanowires on microsphere-lithography-patterned Si substrates, *Nanomater.* 12 (12) (2022) 1993.

11. **Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Berdnikov Y., Mukhin I. S.**, Optimization of microsphere optical lithography for nano-patterning, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 55 (9) (2022) 09LT01.

12. **Tsai Y. L., Yang H.-H., Fang J.-H., et al.**, GaAs-based optoelectronics grown on GaAs/Si virtual substrates with multiple spaced thermal-cycle annealing, *Thin Solid Films*. 733 (1 Sept) (2021) 138817.

13. **Zhu G., Li J., Zhang N., et al.**, Whispering-gallery mode lasing in a floating GaN microdisk with a vertical slit, *Sci. Rep.* 10 (14 Jan) (2020) 253.

14. **Henini M., Razeghi M.**, Optoelectronic devices: III nitrides. Elsevier, Amsterdam, 2004.

15. **Dvoretckaia L. N., Bolshakov A. D., Mozharov A. M., et al.**, GaNP-based photovoltaic device integrated on Si substrate, *Sol. Energy Mater.* 206 (March) (2020) 110282.

16. **Geisz J. F., Friedman D. J., Kurtz S.**, GaNPAs solar cells lattice-matched to GaP, *Proc. 29-th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2002. New Orleans, USA. IEEE (2002) 864–867.

17. **Hossain N., Sweeney S. J., Rogowsky S., et al.**, Reduced threshold current dilute nitride Ga(NAsP)/GaP quantum well lasers grown by MOVPE, *Electron. Lett.* 47 (16) (2011) 931–933.

18. **Liebich S., Zimprich M., Beyer A., et al.**, Laser operation of Ga (NAsP) lattice-matched to (001) silicon substrate, *Appl. Phys. Lett.* 99 (7) (2011) 071109.

19. **Mitchell M., Hryciw A. C., Barclay P. E.**, Cavity optomechanics in gallium phosphide microdisks, *Appl. Phys. Lett.* 104 (14) (2014) 141104.

20. **Fedorov V. V., Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., et al.**, Dual-functional light-emitting and photo-detecting GaAsPN heterostructures on silicon, *Mater. Sci. Semicond. Proc.* 168 (Dec) (2023) 107867.

21. **Aspnes D. E., Studna A. A.**, Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV, *Phys. Rev. B*. 27 (2) (1983) 985.

22. **Anselm A.**, Introduction to semiconductor theory, English translation, Mir Publishers, Moscow, 1981.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДВОРЕЦКАЯ Лилия Николаевна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

Liliyabutler@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4172-940X

МОЖАРОВ Алексей Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

mozharov@spbau.ru

ORCID: 0000-0002-8661-4083

КОМАРОВ Сергей Дмитриевич – аспирант Санкт-Петербургской школы физико-математических и компьютерных наук, а также стажер-исследователь международной лаборатории квантовой оптоэлектроники Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Санкт-Петербургский филиал), Санкт-Петербург, Россия.

190008, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, 16

serega.komarow@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7025-3527

ВЯЧЕСЛАВОВА Екатерина Александровна – аспирантка лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

cate.viacheslavova@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-6869-1213

МОИСЕЕВ Эдуард Ильмович – научный сотрудник международной лаборатории квантовой оптоэлектроники и старший преподаватель Санкт-Петербургской школы физико-математических и компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Санкт-Петербургский филиал), Санкт-Петербург, Россия.

190008, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, 16

emoiseev@hse.ru

ORCID: 0000-0003-3686-935X

ФЕДОРОВ Владимир Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

fedorov_vv@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-5547-9387

МУХИН Иван Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, директор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

muhin_is@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-9792-045X

THE AUTHORS**DVORETCKAIA Liliia N.***Alferov University*

8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

Liliyabutler@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4172-940X

MOZHAROV Alexey M.*Alferov University*

8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

mozharov@spbau.ru

ORCID: 0000-0002-8661-4083

KOMAROV Sergey D.*National Research University "Higher School of Economics" (St. Petersburg branch)*

16 Soyuz Pechatnikov St., St. Petersburg, 190121, Russia

serega.komarow@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7025-3527

VYACHESLAVOVA Ekaterina A.*Alferov University*

8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

cate.viacheslavova@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-6869-1213

MOISEEV Eduard I.*National Research University "Higher School of Economics" (St. Petersburg branch)*

16 Soyuz Pechatnikov St., St. Petersburg, 190121, Russia

emoiseev@hse.ru

ORCID: 0000-0003-3686-935X

FEDOROV Vladimir V.*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;**Alferov University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

fedorov_vv@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-5547-9387

MUKHIN Ivan S.*Alferov University**Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia

muhin_is@spbstu.ru

ORCID: 0000-0001-9792-045X

*Статья поступила в редакцию 23.04.2024. Одобрена после рецензирования 21.05.2024.
Принята 21.05.2024.*

Received 23.04.2024. Approved after reviewing 21.05.2024. Accepted 21.05.2024.