

# Математическое моделирование физических процессов

Научная статья  
УДК 621.383.522  
DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17104>

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ФОТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ АРСЕНИДА ИНДИЯ НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Л. Н. Дворецкая<sup>1,2</sup>, А. М. Можаров<sup>1,2</sup>, А. С. Голтаев<sup>1</sup> ✉,  
В. В. Фёдоров<sup>1,2</sup>, И. С. Мухин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [goltaev@goltaev.ru](mailto:goltaev@goltaev.ru)

**Аннотация.** В работе представлены результаты численного моделирования работы гетероструктурных диодов на основе массива нитевидных нанокристаллов арсенида индия (InAs) на кремниевых подложках, обладающих разными полярностями, а именно – *n*- и *p*-типов. Установлено, что в этих случаях удается достичь теоретических значений коэффициента идеальности, равных 1,1 и 2,1, соответственно. Для исследованных гетероструктур в температурном диапазоне 150 – 300 К характерны высокие значения квантовой эффективности при разделении фотогенерированных носителей заряда.

**Ключевые слова:** арсенид индия, нитевидный нанокристалл, гетероструктура, кремниевая подложка, численное моделирование

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант Государственного задания FSEG-2023-0016 выделен авторам Л. Н. Дворецкой, И. С. Мухину и В. В. Фёдорову).

**Для цитирования:** Дворецкая Л. Н., Можаров А. М., Голтаев А. С., Фёдоров В. В., Мухин И. С. Численное моделирование режимов работы гетероструктурных фотодиодов на основе нитевидных нанокристаллов арсенида индия на кремниевых подложках // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 1. С 38–46. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17104>

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.17104>

## NUMERICAL SIMULATION OF OPERATING MODES OF HETEROSTRUCTURAL PHOTODIODES BASED ON INDIUM ARSENIDE NANOWIRES ON THE SILICON SUBSTRATES

**L. N. Dvoretckaia**<sup>1, 2</sup>, **A. M. Mozharov**<sup>1, 2</sup>, **A. S. Goltaev**<sup>1</sup> ✉,  
**V. V. Fedorov**<sup>1, 2</sup>, **I. S. Mukhin**<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Alferov University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ [goltaev@goltaev.ru](mailto:goltaev@goltaev.ru)

**Abstract.** The paper presents the results of numerical simulation of the heterostructural diodes operation based on the array of indium arsenide nanowires on the silicon substrates with different polarities, namely n- or p-types. It has been found that it is possible to achieve theoretical values of the ideality factor equal to 1.1 and 2.1 respectively. The high quantum efficiency values are typical for the investigated heterostructures during separation of photogenerated charge carriers in the temperature range of 150–300 K.

**Keywords:** indium arsenide, nanowire, heterostructure, silicon substrate, numerical calculation

**Funding:** The research has been funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, within the framework of the State Assignment FSEG-2023-0016 (Grant awarded to the authors L. N. Dvoretckaia, I. S. Mukhin, V. V. Fedorov).

**For citation:** Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Goltaev A. S., Fedorov V. V., Mukhin I. S., Numerical simulation of operating modes of heterostructural photodiodes based on indium arsenide nanowires on the silicon substrates, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (1) (2024) 38–46. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17104>

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

### Введение

Одним из современных направлений исследований в области физики полупроводников является разработка фотодетекторных приборов на основе нитевидных нанокристаллов (ННК). Указанная проблема обрела особую актуальность в связи с явными преимуществами ННК перед тонкопленочными структурами того же состава.

Во-первых, в процессе синтеза ННК на их боковой поверхности происходит релаксация упругих напряжений, возникающих из-за разницы постоянных решетки полупроводниковых кристаллов подложки и ННК. Данное обстоятельство позволяет проводить эпитаксиальный синтез ряда полупроводниковых материалов, таких как InGaN, GaPAs, InAsP [1, 2], для которых согласованные по параметру решетки подложки малодоступны либо вовсе отсутствуют. В том числе для ННК с диаметрами ниже критического значения (24 – 110 нм) [3] возможно формирование полупроводниковых приборов с аксиальной геометрией ННК, обладающих толщиной слоев, рассогласованных по параметру решетки. Значения указанной толщины превышают критическое (несколько нанометров) для аналогичных структур в планарном исполнении [4].

Во-вторых, не менее важное преимущество ННК проявляется при создании приборов, в которых используются электронные размерные эффекты или локализация электромагнитного поля на субволновых размерах. На базе таких приборов возможно создание

эффективных фотодиодов, однофотонных источников излучения и др. [5].

В-третьих, важным преимуществом ННК является возможность формирования приборной структуры не только в аксиальном направлении (перпендикулярно подложке), но и на боковой грани ННК (радиальная геометрия, или геометрия «ядро-оболочка»). Данное обстоятельство обеспечивает возможность разграничения физических процессов, таких, например, как поглощение света и разделение носителей заряда, что принципиально невозможно в случае планарной геометрии.

Данная работа посвящена анализу влияния типа легирования кремниевых подложек в системе материалов нитевидных нанокристаллов арсенида индия на подложках (далее используется обозначение InAs/Si) на характеристики фотодетекторной диодной структуры. Исследование проведено в рамках численного моделирования.

### Объекты исследования и расчетный метод

В работе рассматриваются две упрощенные конфигурации аксиальных диодных гетероструктур на основе нитевидных нанокристаллов арсенида индия на кремниевых подложках:

$n\text{-InAs}/i\text{-InAs}/p\text{-Si}$  (конфигурация  $n-i-p$ );

$p\text{-InAs}/i\text{-InAs}/n\text{-Si}$  (конфигурация  $p-i-n$ ).

Выбор размеров ННК был продиктован оптимальной геометрией волновода для построения фотодиодной структуры в коммуникационном диапазоне длин волн для таких ННК [6]: длина – 2,5 мкм, диаметр – 300 нм. Следует отметить, что при данных характеристических размерах ННК в них не возникает размерных эффектов квантования энергетических уровней.

Толщина верхнего эмиттера была выбрана равной 50 нм при уровне легирования  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что обеспечивало достаточное количество носителей для формирования области пространственного заряда (ОПЗ) преимущественно внутри ННК.

Численное моделирование работы диодов проводилось в пакете Comsol Multiphysics. Расчет выполняли в рамках дрейфово-диффузионной модели с учетом статистики Ферми – Дирака для обоих типов носителей заряда. Для учета эффектов рекомбинации носителей заряда использовалась модель Шокли – Рида – Холла с базовыми значениями времени жизни в арсениде индия, равными 30 нс для электронов и 3 мкс для дырок [7, 8]. Параметры полупроводниковых материалов были взяты из работ [8, 9].

Для учета неидеальности структуры ННК, например наличия точечных дефектов или возникновения в ННК различных политипов, в процессе моделирования проводилось варьирование длины диффузии носителей заряда. Рассматриваемые значения длины диффузии носителей варьировались в диапазоне от 500 нм до 20 мкм.

Важно отметить, что в рамках данного исследования не учитывалось влияние поверхностных состояний на работу диода.

### Результаты и их обсуждение

Согласно литературным данным, гетероинтерфейс InAs/Si представляет собой гетеропереход второго типа, при котором положение потолка валентной зоны обоих материалов находится примерно на одном энергетическом уровне, что делает естественным выбор кремниевой подложки с проводимостью  $p$ -типа для построения диодных структур (рис. 1,а). В свою очередь, особенностью данной конфигурации является распространение ОПЗ в область гетероинтерфейса, что в случае рассматриваемой геометрии фотодетекторной структуры может приводить к появлению токов утечки в экспериментальных условиях [10, 11]. Несмотря на большой энергетический разрыв положений дна зоны проводимости у двух материалов, становится возможным формирование обратного полярности диода за счет малой эффективной массы для электронов в арсениде индия. Действительно, при выборе подложки  $n$ -типа электроны из подложки должны перемещаться в ННК, что будет приводить к образованию в кремнии области, обедненной электронами, и области в арсениде индия, ими обогащенной.

Положение уровня Ферми  $E_F$  относительно дна зоны проводимости для вырожденных полупроводников может быть выражено следующей формулой [12]:

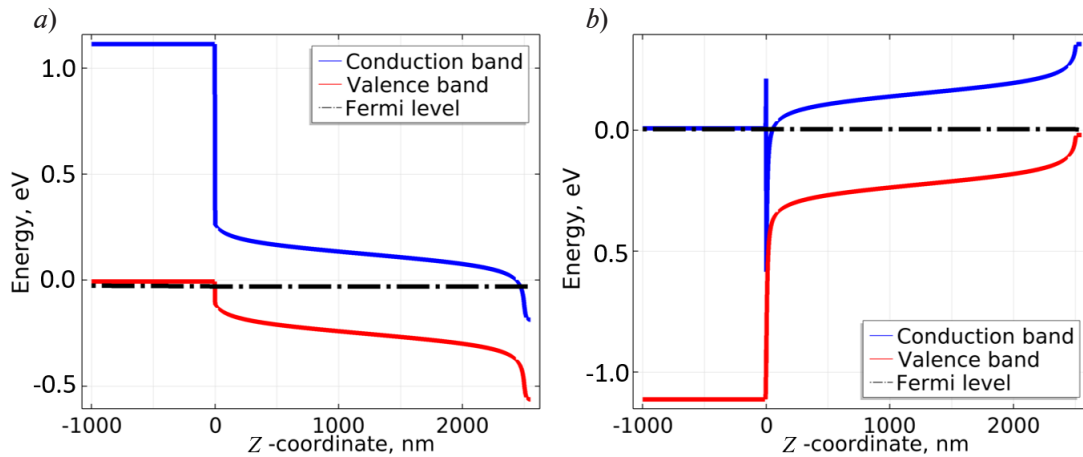


Рис. 1. Зонные структуры диода при температуре 200 К для случаев выбора подложки  $p$ - (a) или  $n$ -типов (b)

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m^*} \cdot (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}, \quad (1)$$

где  $m^*$  – эффективная масса электрона,  $n$  – концентрация носителей,  $\hbar$  – приведенная постоянная Планка.

Подставив в данную формулу эффективную массу InAs, равную  $0,023m_0$  ( $m_0$  – масса электрона), получим, что для компенсации разрыва зон между  $n$ -Si и InAs достаточным будет уровень легирования подложки около  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Отметим, что такие подложки коммерчески доступны. В действительности требуемое значение может оказаться даже ниже, благодаря появлению размерного квантования в InAs вдоль оси ННК за счет резкого изгиба зон и, таким образом, уменьшению плотности заполнения электронами (рис. 1,b). На рис. 1 представлены зонные диаграммы рассматриваемых диодов обоих типов полярности для температуры 200 К, при превышении которой, как будет показано далее, термогенерированные носители заряда начинают эффективно экранировать разность потенциалов между эмиттерами структуры.

Как можно видеть, в случае выбора подложки  $n$ -типа, уровня легирования  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  оказывается достаточно для обеспечения требуемого изгиба зон. При этом высота потенциального барьера для электронов в кремнии оказывается сравнительно небольшой и обеспечивает высокую проводимость гетероинтерфейса.

С целью определения оптимальных условий работы рассматриваемых фотодетекторных структур проводилось моделирование для различных температур системы. Было выявлено, что для обеих конфигураций при комнатной температуре наблюдается экранирование электрического поля в объеме ННК за счет собственной концентрации носителей заряда (рис. 2,a). С уменьшением температуры собственная концентрация падает, что обеспечивает увеличение ОПЗ в ННК, которое наиболее заметно при температурах ниже 200 К. Таким образом, можно ожидать, что для эффективной работы массива ННК в качестве фотодиода может потребоваться дополнительное охлаждение структуры.

Дальнейшим этапом моделирования был анализ вольтамперных характеристик (ВАХ) рассматриваемых диодных гетероструктур (рис. 2,b) для определенной ранее характерной температуры 200 К. Установлено, что величины обратного тока практически совпадают для обеих конфигураций и соответствуют величине тока, образованного разделением носителей заряда, возникающих в объеме ННК за счет процесса термогенерации. При этом прямой участок ВАХ демонстрирует существенное различие между двумя конфигурациями, а именно – более раннее открытие диода, сформированного на подложке кремния  $n$ -типа.

Аппроксимация прямого участка ВАХ с помощью формулы Шокли [13] для нагруженного диода показывает, что данное обстоятельство связано с различием коэффициента идеальности для двух конфигураций: система  $p$ - $i$ - $n$  демонстрирует коэффициент идеальности, равный 1,1, в то время как в случае системы  $n$ - $i$ - $p$  данное значение составляет 2,1,

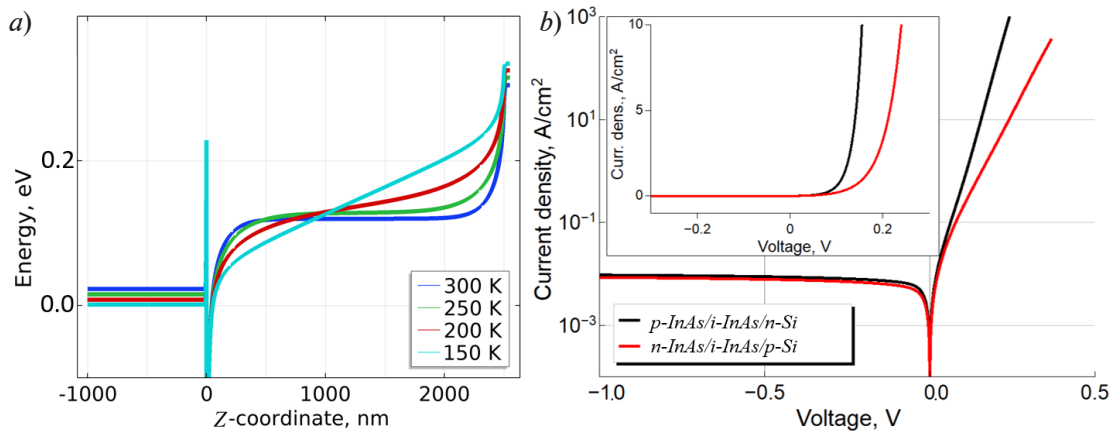


Рис. 2. Результаты моделирования работы фотодиодов: *a* – положения дна зоны проводимости для гетероструктуры *p*-InAs/*i*-InAs/*n*-Si при разных температурах; *b* – вольтамперные характеристики диодов двух типов при температуре 200 К в логарифмическом (модуль) и линейном масштабах

что приводит к росту напряжения открытия диода. Анализ такого результата позволяет заключить, что система *p-i-n* более пригодна там, где важно малое напряжение открытия, например для использования в высокочастотных смесителях в качестве детекторных диодов.

Следующим этапом исследований было изучение работы гетероструктур в качестве фотодиодов. Для этого проводилось численное моделирование зависимости процессов разделения фотогенерированных носителей заряда в ННК от температуры и длины диффузии для двух конфигураций при нулевом напряжении смещения.

Рождение электронно-дырочных пар при оптическом облучении фотоактивной структуры было реализовано путем задания фиксированного однородного темпа генерации, равного  $1,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}/\text{с}$ , что соответствует поглощению полупроводниковым материалом оптического излучения с длиной волны 1,55 мкм и интенсивностью  $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

В качестве сравнительной характеристики была использована величина квантовой эффективности  $\eta$ , вычисляемая как отношение потока носителей, который сформировался в структуре, к общему темпу генерации по объему ННК. На рис. 3 представлены карты зависимости квантовой эффективности  $\eta$  от температуры структуры и длины диффузии носителей заряда, отнесенной к длине активной области ННК.

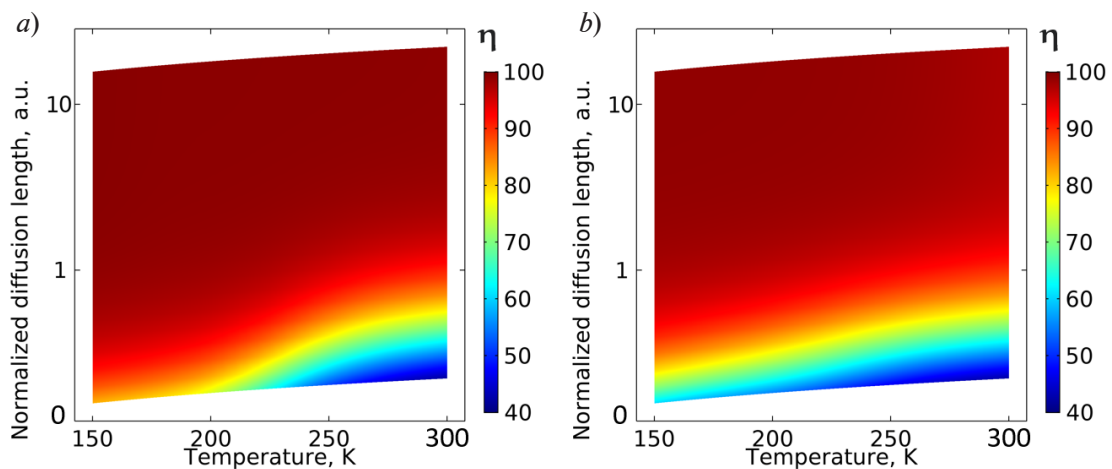


Рис. 3. Карты зависимости квантовой эффективности процесса разделения фотогенерированных носителей заряда от температуры и длины диффузии носителей заряда, отнесенной к длине активной области ННК, для конфигураций *n-i-p* (*a*) и *p-i-n* (*b*)



Как можно видеть, при высоких значениях длины диффузии носителей заряда достигается практически полное разделение фотогенерируемых носителей заряда для обеих конфигураций. Дальнейшее снижение длины диффузии носителей выявляет различие между конфигурациями. Уменьшение длины диффузии вплоть до значений ниже длины ННК приводит к появлению температурной зависимости квантовой эффективности. Так, для системы  $n-i-p$  отмечается рост квантовой эффективности от 0,4 до 0,8 при понижении температуры от 300 до 150 К. В свою очередь, система  $p-i-n$  оказывается более чувствительной к уменьшению диффузионной длины: квантовая эффективность при 300 К также соответствует значению 0,4, но с уменьшением температуры она растет только до значения 0,6. Помимо этого, даже для высоких значений длины диффузии,  $p-i-n$ -система демонстрирует меньшую величину квантовой эффективности. Данное явление связано скорее с различием между конфигурациями: наличием обогащенной электронами области вблизи гетероинтерфейса, что приводит к усиленному темпу рекомбинации дырок вблизи интерфейса и, как следствие, исключению их из общего объема фототока.

### Заключение

В работе методами численного моделирования рассмотрены режимы работы двух конфигураций гетероструктурного фотодетекторного диода на основе нитевидных нанокристаллов арсенида индия InAs на кремниевых подложках. В результате проведенного моделирования установлено, что диодная структура на кремниевой подложке  $n$ -типа демонстрирует меньшее значение коэффициента идеальности и ее использование более обосновано для задач, где требуются малые напряжения открытия диода. Исследования работы структур в режиме фотодиодов демонстрируют практически идентичные показатели для обеих систем, однако система с использованием подложки  $p$ -типа дает большие значения квантовой эффективности. Несмотря на это, обе конфигурации могут быть использованы для построения фотодиодов на их основе, и выбор конкретной конфигурации должен определяться технологическими требованиями к процессу синтеза структуры либо требованием к полярности системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dubrovskii V. G., Consonni V., Trampert A., Geelhaar L., Riechert H. Scaling thermodynamic model for the self-induced nucleation of GaN nanowires // *Physical Review B*. 2012. Vol. 85. No.16. P. 165317.
2. Dubrovskii V. G. Understanding the vapor–liquid–solid growth and composition of ternary III–V nanowires and nanowire heterostructures // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. Vol. 50. No. 45. P. 453001.
3. Cirlin G. E., Dubrovskii V. G., Samsonenko Y. B., et al. Self-catalyzed, pure zincblende GaAs nanowires grown on Si(111) by molecular beam epitaxy // *Physical Review B*. 2010. Vol. 82. No. 3. P. 035302.
4. De La Mata M., Magén C., Caroff P., Arbiol J. Atomic scale strain relaxation in axial semiconductor III–V nanowire heterostructures // *Nano Letters*. 2014. Vol. 14. No.11. Pp. 6614–6620.
5. Leandro L., Gunnarsson C. P., Reznik R., Jöns K. D., Shtrom I., Khrebtov A., Kasama T., Zwiller V., Cirlin G., Akopian N. Nanowire quantum dots tuned to atomic resonances // *Nano Letters*. 2018. Vol. 18. No. 11. Pp. 7217–7221.
6. Dvoretckaia L., Mozharov A., Pavlov A., Polozkov R., Mukhin I. Numerical study of detectivity for near-IR photodetectors based on InAsP NWs // *Scripta Materialia*. 2023. Vol. 226. 15 March. P. 115246.
7. Dalal V. L., Hicinbothem W. A., Kressel H. Carrier lifetimes in epitaxial InAs // *Applied Physics Letters*. 1974. Vol. 24. No. 4. Pp.184–185.
8. Adachi S. Physical properties of III-V semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP. New York, Chichester: John Wiley & Sons, 1992.
9. Adachi S. Properties of semiconductor alloys: group-IV, III-V and II-VI semiconductors. New York, Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2009. 400 p.
10. Shugurov K. Y., Mozharov A. M., Bolshakov A. D., et al. Hydrogen passivation of the  $n$ -GaN nanowire/ $p$ -Si heterointerface // *Nanotechnology*. 2020. Vol. 31. No. 24. P. 244003.

11. **Mozharov A. M., Fedorov V. V., Shugurov K. Y., Vorobyev A. A., Kudryashov D. A.** Study of the electrical properties of InAs nanowires/Si substrate for IR photodetector // Proceedings of The 20th International Conference Laser Optics (ICLO-2022). 20.06.2022–24.06.2022. Saint Petersburg, Russia. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2022. P. 18.
12. **Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г.** Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 671 с.
13. **Shockley W.** The theory of  $p-n$  junctions in semiconductors and  $p-n$  junction transistors // Bell System Technical Journal. 1949. Vol. 28. No. 3. Pp. 435–489.

## REFERENCES

1. **Dubrovskii V. G., Consonni V., Trampert A., et al.**, Scaling thermodynamic model for the self-induced nucleation of GaN nanowires, Phys. Rev. B. 85 (16) (2012) 165317.
2. **Dubrovskii V. G.**, Understanding the vapor–liquid–solid growth and composition of ternary III–V nanowires and nanowire heterostructures, J. Phys. D: Appl. Phys. 50 (45) (2017) 453001.
3. **Cirlin G. E., Dubrovskii V. G., Samsonenko Y. B., et al.**, Self-catalyzed, pure zincblende GaAs nanowires grown on Si(111) by molecular beam epitaxy, Phys. Rev. B. 82 (3) (2010) 035302.
4. **De La Mata M., Magén C., Caroff P., Arbiol J.**, Atomic scale strain relaxation in axial semiconductor III-V nanowire heterostructures, Nano Lett. 14 (11) (2014) 6614–6620.
5. **Leandro L., Gunnarsson C. P., Reznik R., et al.**, Nanowire quantum dots tuned to atomic resonances, Nano Lett. 18 (11) (2018) 7217–7221.
6. **Dvoretckaia L., Mozharov A., Pavlov A., et al.**, Numerical study of detectivity for near-IR photodetectors based on InAsP NWs, Scr. Mater. 226 (15 March) (2023) 115246.
7. **Dalal V. L., Hicinbothem W. A., Kressel H.**, Carrier lifetimes in epitaxial InAs, Appl. Phys. Lett. 24 (4) (1974) 184–185.
8. **Adachi S.**, Physical properties of III-V semiconductor compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP, John Wiley & Sons, New York, Chichester, 1992.
9. **Adachi S.**, Properties of semiconductor alloys: group-IV, III-V and II-VI semiconductors, John Wiley and Sons Ltd., New York, Chichester, 2009.
10. **Shugurov K. Y., Mozharov A. M., Bolshakov A. D., et al.**, Hydrogen passivation of the  $n$ -GaN nanowire/ $p$ -Si heterointerface, Nanotechnol. 31 (24) (2020) 244003.
11. **Mozharov A. M., Fedorov V. V., Shugurov K. Y., et al.**, Study of the electrical properties of InAs nanowires/Si substrate for IR photodetector, Proc. 20th Int.Conf. Laser Optics (ICLO-2022). 20.06.2022–24.06.2022. Saint Petersburg, Russia. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2022) 18.
12. **Bonch-Bruyevich V. L., Kalashnikov S. G.**, Physics of semiconductors, VEB Verlag Technik, Berlin, 1982.
13. **Shockley W.**, The theory of  $p-n$  junctions in semiconductors and  $p-n$  junction transistors, Bell Syst. Tech. J. 28 (3) (1949) 435–489.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДВОРЕЦКАЯ Лилия Николаевна** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, младший научный сотрудник Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

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

[liliyabutler@gmail.com](mailto:liliyabutler@gmail.com)

ORCID:0000-0002-4172-940X

**МОЖАРОВ Алексей Михайлович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, старший научный сотрудник Национального центра качества и экспертизы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

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

[alex000090@gmail.com](mailto:alex000090@gmail.com)

ORCID:0000-0002-8661-4083



**ГОЛТАЕВ Александр Сергеевич** – лаборант Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

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

goltaev@goltaev.ru

ORCID:0000-0001-8179-3169

**ФЁДОРОВ Владимир Викторович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, старший научный сотрудник Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

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

burunduk.uk@gmail.com

ORCID:0000-0001-5547-9387

**МУХИН Иван Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Академического университета имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

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

imukhin@yandex.ru

ORCID:0000-0001-9792-045X

## THE AUTHORS

**DVORETCKAIA Liliya N.**

*Alferov University,*

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

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

liliyabutler@gmail.com

ORCID:0000-0002-4172-940X

**MOZHAROV Alexey M.**

*Alferov University,*

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

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

alex000090@gmail.com

ORCID:0000-0002-8661-4083

**GOLTAEV Aleksandr S.**

*Alferov University,*

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

goltaev@goltaev.ru

ORCID:0000-0001-8179-3169



**FEDOROV Vladimir V.**

*Alferov University,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
8-3 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia  
burunduk.uk@gmail.com  
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  
imukhin@yandex.ru  
ORCID:0000-0001-9792-045X*

*Статья поступила в редакцию 30.10.2023. Одобрена после рецензирования 27.11.2023.  
Принята 27.11.2023.  
Received 30.10.2023. Approved after reviewing 27.11.2023. Accepted 27.11.2023.*