



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-5-11>

УДК 621.315.592

## ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

С. К. ЛАЗАРУК<sup>1</sup>, А. А. ЛЕШОК<sup>1</sup>, А. В. ДОЛБИК<sup>1</sup>, Л. П. ТОМАШЕВИЧ<sup>1</sup>,  
А. Ю. КЛЮЦКИЙ<sup>1</sup>, В. В. ДУДИЧ<sup>1</sup>, В. А. ЛАБУНОВ<sup>1</sup>, С. А. ЕФИМЕНКО<sup>2</sup>,  
Н. С. КОВАЛЬЧУК<sup>2</sup>, Е. П. КИЦЮК<sup>3</sup>, Р. М. РЯЗАНОВ<sup>3</sup>, А. С. БАСАЕВ<sup>3</sup>, В. В. СВЕТУХИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Научно-производственный комплекс «Технологический центр» (Москва, Российская Федерация)

**Аннотация.** Для развития кремниевой фотоники необходима разработка эффективного источника светового сигнала. В качестве такого источника могут использоваться лавинные кремниевые светодиоды. В статье рассмотрены лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния. Измерение емкости светодиодных структур показало, что при уменьшении площади светодиодов до 100 мкм<sup>2</sup> суммарная емкость светодиода и металлической разводки уменьшается до сотен фемтофард, что обеспечивает лавинным светодиодам функционирование в СВЧ-диапазоне. Показано, что увеличение быстродействия лавинных светодиодов ограничено резистивно-емкостными задержками, зависящими от барьерной емкости диодных структур. Рассмотрены способы увеличения быстродействия лавинных светодиодов как в сверхвысоком частотном диапазоне, так и в гипервысоком диапазоне частот. В частности, при уменьшении рабочей площади светодиодов до 1 мкм<sup>2</sup> прогнозируется их функционирование во всем гигагерцовом диапазоне частот.

**Ключевые слова:** светодиоды, лавинный эффект, нанокремний, интегральная фотоника.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для СВЧ-диапазона частот / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 2. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-5-11>.

## AVALANCHE LEDS BASED ON NANOSTRUCTURED SILICON FOR MICROWAVE FREQUENCY RANGE

SERGUEI K. LAZAROUK<sup>1</sup>, ANDREI A. LESHOK<sup>1</sup>, ALEXANDER V. DOLBIK<sup>1</sup>,  
LEANID P. TAMASHEVICH<sup>1</sup>, ALEKSEY Y. KLUTSKY<sup>1</sup>, VLADISLAV V. DUDICH<sup>1</sup>,  
VLADIMIR A. LABUNOV<sup>1</sup>, SERGEY A. EFIMENKO<sup>2</sup>, NATALLIA S. KOVALCHUK<sup>2</sup>,  
EVGENY P. KITSYUK<sup>3</sup>, ROMAN M. RYAZANOV<sup>3</sup>, ALEXANDER S. BASAEV<sup>3</sup>,  
VYACHESLAV V. SVETUKHIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>3</sup>Scientific-Manufacturing Complex “Technological Center” (Moscow, Russian Federation)

**Abstract.** Development of an efficient light signal source is a basic necessity for the development of silicon photonics. Avalanche silicon light emitting diodes (LEDs) can serve as such a source. The article discusses avalanche LEDs based on nanostructured silicon. Measurement of the capacitance of LED structures has shown that when the LED area is reduced to 100 μm<sup>2</sup>, the total capacitance of the LED and metal wiring is reduced to hundreds of femtofarads, which ensures the functioning of avalanche LEDs in the microwave range. It is shown that the increase in the speed of avalanche LEDs is limited by resistive-capacitive delays, depending on the barrier capacitance of the diode structures. Methods for increasing the speed of avalanche LEDs in both the ultra-high

frequency range and the hyper-high frequency range are considered. In particular, by reducing the working area of LEDs to  $1 \mu\text{m}^2$ , they are predicted to function over the entire gigahertz frequency range.

**Keywords:** LEDs, avalanche effect, nanosilicon, integrated photonics.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Lazarouk S. K., Leshok A. A., Dolbik A. V., Tamashevich L. P., Klutsky A. Y., Dudich V. V., Labunov V. A., Efimenko S. A., Kovalchuk N. S., Kitsyuk E. P., Ryazanov R. M., Basaev A. S., Svetukhin V. V. (2025) Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon for Microwave Frequency Range. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-5-11> (in Russian).

## Введение

Главные проблемы развития кремниевой фотоники связаны с интеграцией фотонных компонентов с элементной базой современных интегральных микросхем (ИМС). Поэтому особое внимание уделяется такому направлению развития кремниевой фотоники, где фотонные компоненты могут быть изготовлены одновременно с электронными компонентами в едином технологическом процессе существующей технологии комплементарных МОП-транзисторов (КМОП) ИМС. В этом случае появляется возможность замены медленных электрических межсоединений быстрыми оптическими межсоединениями [1–7].

При разработке устройств кремниевой фотоники особое внимание уделяется источникам светового сигнала, так как сам кремний, будучи непрямозонным материалом, не способен эффективно излучать свет. Решением данной проблемы может быть использование в качестве источника светового сигнала наноструктурированного кремния, в котором за счет эффекта квантового ограничения происходит трансформация зонной структуры и увеличивается эффективность светоизлучения, по сравнению с обычным кремнием, до нескольких десятков процентов [8].

Лавинные светодиоды на базе наноструктурированного кремния позволили увеличить эффективность и быстродействие светоизлучения по сравнению с аналогами на основе объемно-гомогенного кремния [9–18]. Однако быстродействие лавинных светодиодов ограничивается емкостными задержками, определяемыми барьерной емкостью области пространственного заряда обратносмещенного перехода. В статье показаны конструкции лавинных светодиодов со сниженными значениями барьерной емкости, что обеспечивает функционирование светодиодов в гигагерцовом (СВЧ) диапазоне частот.

## Проведение эксперимента

Исследуемые структуры лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния разрабатывались с размерами светоизлучающих пикселей в диапазоне от единиц до сотен микрометров. Матрицы светоизлучающих диодов формировались по ранее разработанной технологии, совмещенной с кремниевой технологией КМОП ИМС. В частности, исходные кремниевые подложки проводили по маршруту изготовления КМОП ИМС до операции создания *n*-карманов в подложках *p*-типа [19]. Внутри *n*-карманов формировали диоды Шоттки между кремниевой подложкой и алюминиево-кремниевыми электродами (75 ат.% алюминия и 25 ат.% кремния). Рисунок электродов создавали при помощи операций фотолитографии и локального сквозного анодирования алюминиево-кремниевой нанокompозитной пленки. При этом алюминий прокислялся полностью, а кремниевые нанокристаллы окислялись частично, образуя кремниевую наноструктуру, встроенную в оксидную матрицу. После этого на кремниевых пластинах формировали двухуровневую алюминиевую металлизацию с межуровневым диэлектриком из оксида кремния [19]. Сформированные кремниевые чипы помещали в керамические корпуса с разваркой контактных площадок к корпусным выводам при помощи алюминиевой проволоки.

Характеристики светодиодов измерялись на установке LCR-метр (SCX-4725A, НР, США). Интенсивность светового сигнала регистрировалась арсенид-галлиевым фотодетектором с временной задержкой менее 0,1 пс. В процессе регистрации светового сигнала определялась частота, при которой интенсивность сигнала уменьшалась в два раза относительно аналогичной величины, характерной для низких частот. Это свидетельствовало о задержках, препятствующих внешней модуляции светового отклика.

## Результаты исследований и их обсуждение

Фотографии кремниевых чипов с матрицами лавинных светоизлучающих диодов, сформированных с использованием наноструктурированного кремния, представлены рис. 1. Как видно из рисунка, минимальные размеры светоизлучающих пикселей составляют единицы микрон (квадраты с размерами сторон 9 мкм). Матрицы светодиодов состояли из рядов пикселей  $5 \times 7$ , расположенных в форме прямоугольника. Диапазон рабочих площадей светоизлучающих пикселей – от  $100$  до  $3 \cdot 10^5$  мкм<sup>2</sup>.

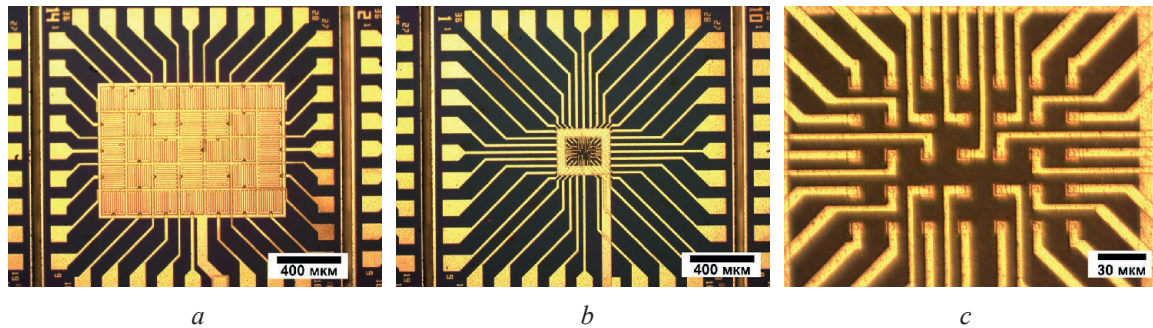


Рис. 1. Фотографии матриц светодиодов на основе наноструктурированного кремния:

*a, c* – светодиоды площадью  $10^4$  и  $100$  мкм<sup>2</sup> соответственно;

*b* – светодиоды площадью  $100$  мкм<sup>2</sup> при увеличении 500 крат

Fig. 1. Photographs of LED matrices based on nanostructured silicon:

*a, c* – LEDs with an area of  $10^4$  and  $100$  μm<sup>2</sup>, respectively;

*b* – LEDs with an area of  $100$  μm<sup>2</sup> at 500× magnification

На рис. 2 представлены зависимости суммарной емкости светодиодов  $C$  от напряжения отрицательного смещения  $U$  (до  $-10$  В) для светодиодных структур различной площади. Как видно из рисунка, емкость светодиодов снижается при уменьшении их рабочей площади и увеличении напряжения смещения. Это свидетельствует о том, что основной вклад в емкостные характеристики светодиодов вносит барьерная емкость обедненного слоя контакта Шоттки. Именно при увеличении смещающего напряжения происходит увеличение глубины области пространственного заряда и, следовательно, емкость светодиодов уменьшается.

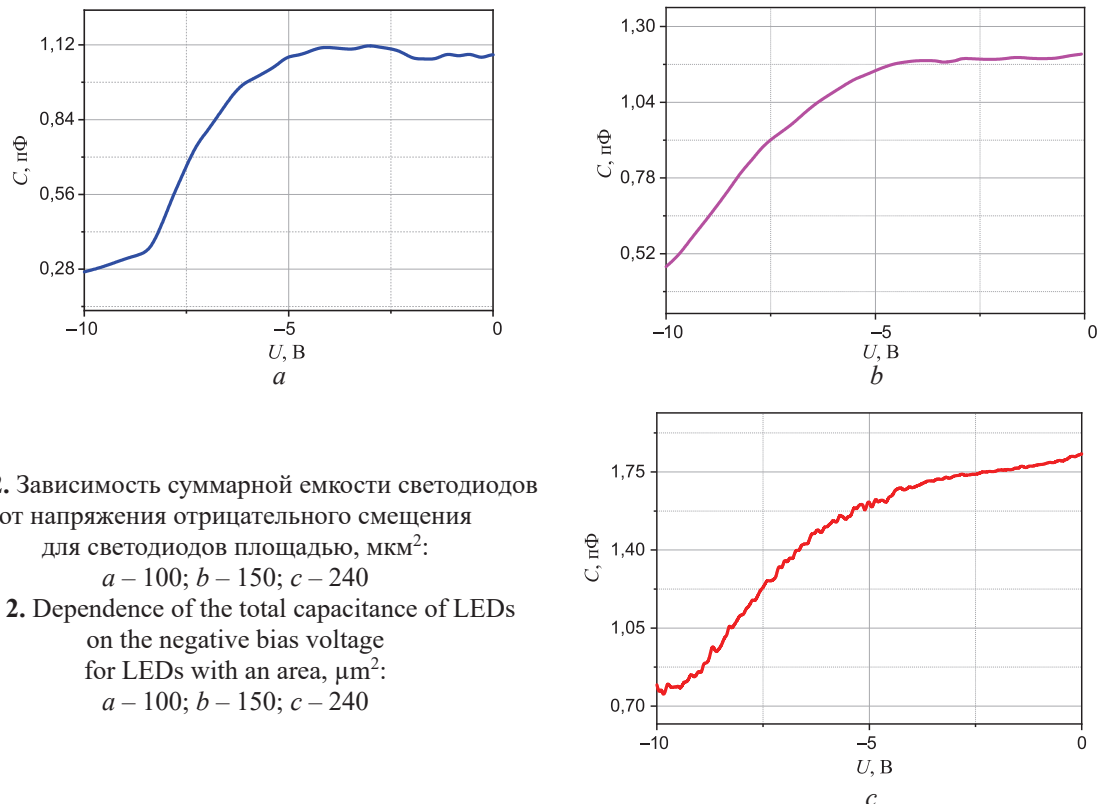


Рис. 2. Зависимость суммарной емкости светодиодов от напряжения отрицательного смещения

для светодиодов площадью, мкм<sup>2</sup>:

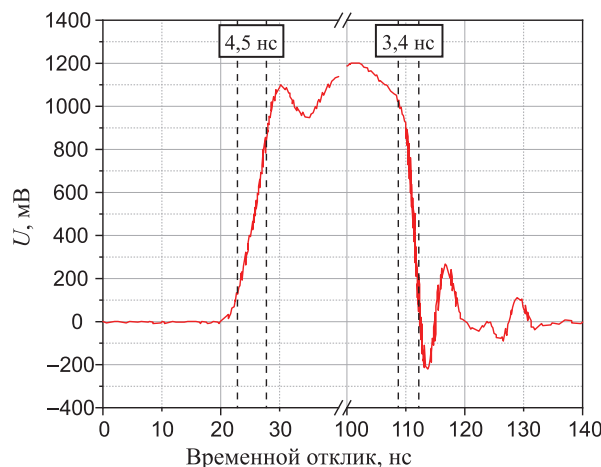
*a* –  $100$ ; *b* –  $150$ ; *c* –  $240$

Fig. 2. Dependence of the total capacitance of LEDs

on the negative bias voltage for LEDs with an area, μm<sup>2</sup>:

*a* –  $100$ ; *b* –  $150$ ; *c* –  $240$

На рис. 3 представлен временной отклик фотодетектора на сигнал светодиода, который запитан импульсным электрическим сигналом прямоугольной формы. Следует отметить, что для светодиодов площадью более  $10^5$  мкм<sup>2</sup> функционирование наблюдается только в мегагерцовом диапазоне частот, так как временные задержки при генерации световых сигналов превышают 1 нс [5]. Из рис. 3 видно, что время нарастания светового сигнала составляет 4,5 нс, тогда как спад светового сигнала происходит за 3,4 нс. Более быстрое функционирование светодиодов при выключении объясняется тем, что определяющим быстродействием параметром является барьерная емкость области пространственного заряда диодов Шоттки, которая уменьшается при увеличении смещающего напряжения, что уже отмечалось выше.



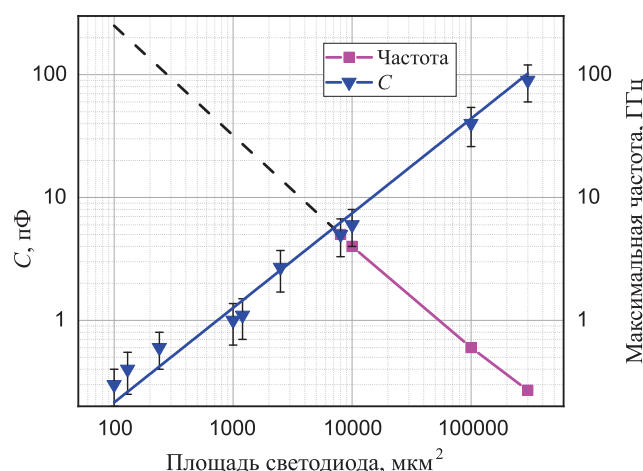
**Рис. 3.** Временной отклик фотодетектора на сигнал светодиода рабочей площадью  $3 \cdot 10^5$  мкм<sup>2</sup> при пропускании импульсного электрического сигнала прямоугольной формы

**Fig. 3.** Time response of a photodetector to a signal from a light-emitting diode with a working area of  $3 \cdot 10^5$  μm<sup>2</sup> when passing a pulsed electrical signal of rectangular shape

На рис. 4 представлены результаты измерения суммарной емкости  $C$  сформированных светодиодов всех исследуемых образцов при обратном напряжении 10 В. Выбор данного значения обусловлен тем, что при смещении 10 В и более исследуемые светодиоды излучали свет видимого диапазона, причем световой сигнал регистрировался также невооруженным глазом. Как видно из рис. 4, емкость исследуемых светодиодов практически линейно зависит от их площади для всего диапазона исследуемых размеров экспериментальных образцов. Незначительное отклонение от линейной зависимости при уменьшении рабочих площадей можно объяснить влиянием дополнительной емкости разделительного диэлектрика анодного оксида алюминия, расположенного между алюминиевой разводкой. Но и в этих структурах барьерная емкость контакта Шоттки является доминирующей в измеряемой суммарной емкости. На рис. 4 также приведены значения максимальной частоты функционирования светодиодов.

Экспериментальные измерения проводились для светодиодов с уменьшением рабочей площади от  $3 \cdot 10^5$  до  $10^4$  мкм<sup>2</sup>. Значение предельной частоты при этом увеличивалось от 300 МГц до 6 ГГц. При этом технические возможности применяемого оборудования не позволили проводить измерения при более высоких частотах модуляции. Используя в качестве основы экспериментально установленную линейную зависимость предельной частоты модуляции от рабочей площади светодиодов, на рис. 4 представлены экстраполированные данные для предельных частот модуляции светодиодов площадью менее  $10^4$  мкм<sup>2</sup> (рис. 4, прерывистая линия).

На основе анализа приведенных экстраполированных данных можно сделать вывод о том, что в результате уменьшения рабочей емкости светодиодов до значений менее 1 пФ предельная частота модуляции лавинных светодиодов будет соответствовать величинам 100 ГГц и более. Такой вывод подтверждается результатами исследований других авторов [20–24], наблюдавших работу лавинных светодиодов в частотном диапазоне 10–100 ГГц. В развитие представленного вывода можно предположить, что уменьшение размера рабочей площади лавинных светодиодов до 1 мкм<sup>2</sup> позволит им функционировать во всем СВЧ-диапазоне частот. Это согласуется с известным свойством лавинного пробоя в кремнии, для которого характерна временная задержка менее 0,1 пс [25], что позволит осуществлять модуляцию светового сигнала на частотах вплоть до терагерцового диапазона.



**Рис. 4.** Зависимость суммарной емкости лавинных светодиодов и их частоты модуляции от площади светодиодов

**Fig. 4.** Dependence of the total capacitance of avalanche LEDs and their modulation frequency on the area of the LEDs

### Заключение

1. Анализируя результаты исследований, можно отметить, что прогресс в создании лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния открывает новые перспективы для развития кремниевой фотоники [1, 26–31]. Представляется возможным создание быстродействующих оптических межсоединений интегральных схем, способных функционировать не только в СВЧ-диапазоне частот, но и при последовательном уменьшении размеров лавинных светодиодов – в терагерцовом диапазоне, соответствующем гипервысокому диапазону частот.

2. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты № T23МЭ-018 и № T24В-009.

### Список литературы / References

1. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Kozlova T. A., Dolbik A. V., Vi L. D., Ilkov V. K. (2019) 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections Through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 18 (3–4).
2. Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Moore S., Smirnov A. (2009) Si-Based Optoelectronic Couple. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 41 (6), 1094–1096.
3. Lazarouk S., Leshok A., Borisenko V., Mazzoleni C., Pavesi L. (2000) On the Route Towards Si-Based Optical Interconnects. *Microelectronic Engineering*. 50 (1–4), 81–86.
4. Lazarouk S., Jaguiro P., Borisenko V. (1998) Integrated Optoelectronic Unit Based on Porous Silicon. *Physica of Status Solidi (a)*. 165 (1), 87–90.
5. Lazarouk S. K., Jaguiro P. V., Leshok A. A., Borisenko V. E. (2003) Reverse Biased Porous Silicon Light-Emitting Diodes for Optical Intra-Chip Interconnects. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 16 (3–4), 495–498.
6. La Monica S., Maiello G., Ferrari A., Masini G., Lazarouk S., Jaguiro P., et al. (1997) Progress in the Field of Integrated Optoelectronics Based on Porous Silicon. *Thin Solid Films*. 297 (1–2), 265–267.
7. Balucani M., La Monica S., Lazarouk S., Maiello G., Masini G., Ferrari A. (1997) Silicon Emitting Device Will Knock Down Communication Bottleneck? *Solid State Phenomena*. 54, 8–12.
8. Yizhou H., Qianxi H., Xue Y., Jiamin Y., Chi Z., Ruoyu L., et al. (2025) Triethoxysilane-Derived Silicon Quantum Dots: A Novel Pathway to Small Size and High Crystallinity. *Journal of Materials Science & Technology*. 219, 59–74.
9. Katsuba P., Jaguiro P., Lazarouk S., Smirnov A. (2009) Stable Electroluminescence of Nanostructured Silicon Embedded into Anodic Alumina. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*. 41, 931–934.
10. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2005) Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon. *Semiconductors*. 39 (1), 136–138.
11. Lazarouk S., Bondarenko V., La Monica S., Maello G., Masini G., Pershukevich P., et al. (1996) Electroluminescence from Aluminum-Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped *n*-Type Polysilicon. *Thin Solid Films*. 276, 296–298.

12. Lazarouk S., Bondarenko V., Pershukovich P., La Monica S., Maiello G. (1994) Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate *n*-Type Silicon. *MRS Online Proceedings Library Archive*. 358, 659–664.
13. Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Smirnov A. (2007) Porous Silicon Avalanche LEDs and Their Applications in Optoelectronics and Information Displays. *Acta Physica Polonica A*. 112 (5), 1031–1036.
14. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Katsuba P. S., Labunov V. A., Leshok A. A., Borisenko V. E. (2007) Electroluminescence from Nanostructured Silicon Embedded in Anodic Alumina. *Semiconductors*. 41 (9), 1109–1112.
15. Lazarouk S., Katsouba S., Tomlinson A., Benedetti S. (2000) Optical Characterization of Reverse Biased Porous Silicon Light Emitting Diode. *Materials Science and Engineering*. 69–70, 114–117.
16. Buzaneva E., Gorchinsky A., Popova G., Veblaya T., Zankovych S., Boiko Yu., et al. (2000) Photophysical Properties of Nano Si/SiO<sub>x</sub> Composites in Al/Composite Mono Si Structures for Green Light Emitting and Photodetector-Schottky Diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 3, 529–537.
17. Lazarouk S., Bondarenko V., Jaguiro P., Lacquaniti N., La Monica S., Maiello G., et al. (1996) Electrical Characterization of Visible Emitting Electroluminescent Schottky Diodes Based on *n*-Type Porous Silicon and on Highly Doped *n*-Type Porous Polysilicon. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 198–200, 973–976.
18. La Monica S., Balucani M., Lazarouk S., Maiello G., Masini G., Jaguiro P., et al. (1997) Characterization of Porous Silicon Light Emitting Diodes in High Current Density Conditions. *Solid State Phenomena*. 54, 21–26.
19. Le Dinh Vi, Klutsky A. Yu., Dolbik A. A., Leshok A. A., Lazarouk S. K. (2019) Influence of Anodic Alumina Used as Separating Dielectric of Silicon Avalanche LEDs on Diode Characteristics. *Doklady BGUIR*. (7–8), 165–172 (in Russian).
20. Chatterjee A., Bhuvu B., Schrimpf R. (2024) High-Speed Light Modulation in Avalanche Breakdown Mode for Si Diodes. *IEEE Electron Device Letters*. 25 (9), 628–630. DOI: 10.1109/LED.2004.834247.
21. Xu K. (2014) Electro-Optical Modulation Processes in Si-PMOSFET LEDs Operating in the Avalanche Light Emission Mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 61 (6): 2085–2092. DOI: 10.1109/TED.2014.2318277.
22. Xu K. (2019) Silicon MOS Optoelectronic Micro-Nano Structure Based on Reverse-Biased PN Junction. *Physica Status Solidi*. 216 (7).
23. Ogudo K. A., Snyman L. W., Polleux J.-L., Viana C., Tegegne Z., Schmieder D. (2014) Towards 10–40 GHz on-Chip Micro-Optical Links with all Integrated Si Av LED Optical Sources, Si N Based Waveguides and Si-Ge Detector Technology. *Proc. SPIE 8991, Optical Interconnects XIV*. 8991, 1–16.
24. Le Dinh Vi, Leshok A. A., Dolbik A. V., Perko S. L., Lazarouk S. K. (2020) Avalanche Leds Based on Nanostructured Silicon for Optical Interconnections. *Doklady BGUIR*. 18 (3), 63–71.
25. Sze S. M., Pub K. K. Ng. (2006) *Physics of Semiconductor Devices*. Print ISBN: 9780471143239.
26. Lazarouk S., Xie Z., Chigrinov V., Kwok H. S. (2007) Anodic Nanoporous Titania for Electro-Optical Devices. *Japanese Journal of Applied Physics*. 46 (7R).
27. Lazarouk S., Leshok A., Dolbik A., Tomashevich L., Klyutsky A., Dudich V., et al. (2024) Development of Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon for the Gigahertz Frequency Range. *Electronic Design Automation Conference 2024 Proceedings*. 79–82.
28. Lazarouk S., Dudzich U., Klyutsky A., Dolbik A., Labunov V. (2021) Photosensitive Properties of Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon. *XIX International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations – NDTCS-2021*. 79–80.
29. Belous A. I., Kazak N. S. (2022) Strategy for the Development of Belarusian Microelectronics for the Period 2022–2025. *Russian Electronics*. 16–20.
30. Borisenko V. E. (2014) Nanodimensional Semiconductors and Dielectrics: Achievements of Nanoelectronics and Novel Materials Center of BSUIR. *Doklady BGUIR*. (2), 5–13 (in Russian).
31. Lazarouk S., Bondarenko V., Borisenko V., Gaponenko N., Gorokh G., Leshok A., et al. (2024) Perspective Optical and Electronic Interconnects of Integrated Circuit Elements. *Doklady BGUIR*. (2), 7–19.

Поступила 29.01.2025

Received: 29 January 2025

Принята в печать 17.02.2025

Accepted: 17 February 2025

#### Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

### Сведения об авторах

**Лазарук С. К.**, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, зав. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы» (НИЛ 4.6), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Лешок А. А.**, канд. физ.-мат. наук, доц., нач. науч.-исслед. Центра нанoeлектроники и новых материалов, БГУИР

**Долбик А. В.**, науч. сотр. НИЛ 4.6, БГУИР

**Томашевич Л. П.**, инж.-электрон. НИЛ 4.6, БГУИР

**Клюцкий А. Ю.**, ст. преп. каф. электроники, БГУИР

**Дудич В. В.**, науч. сотр. НИЛ 4.6, БГУИР

**Лабунов В. А.**, акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., науч. рук. НИЛ 4.6, БГУИР

**Ефименко С. А.**, канд. техн. наук, гл. констр., зав. лаб., ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»)

**Ковальчук Н. С.**, канд. техн. наук, доц., зам. ген. дир. – гл. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ»

**Кицюк Е. П.**, канд. техн. наук, нач. науч.-исслед. лаб. перспективных процессов, НПК «Технологический центр» (НПК «ТЦ»)

**Рязанов Р. М.**, инж., НПК «ТЦ»

**Басаев А. С.**, зам. дир., НПК «ТЦ»

**Светухин В. В.**, д-р физ.-мат. наук, проф., дир., НПК «ТЦ»

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-69  
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by  
Лазарук Сергей Константинович

### Information about the authors

**Lazarouk S. K.**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Head of the R&D Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems” (Lab 4.6), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Leshok A. A.**, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Scientific Research Center of Nanoelectronics and Novel Materials, BSUIR

**Dolbik A. V.**, Researcher at the Lab 4.6, BSUIR

**Tamashevich L. P.**, Electronics Engineer at the Lab. 4.6, BSUIR

**Klutsky A. Y.**, Senior Lecturer at the Electronics Department, BSUIR

**Dudich V. V.**, Researcher at the Lab 4.6, BSUIR

**Labunov V. A.**, Academician at the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Scientific Director of the Lab 4.6, BSUIR

**Efimenko S. A.**, Cand. Sci. (Tech.), Chief Designer, Head of the Laboratory, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”)

**Kovalchuk N. S.**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy General Director – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL”

**Kitsyuk E. P.**, Cand. Sci. (Tech.), Head of the R&D Laboratory of Advanced Processes, SMC “Technological Center” (SMC “TC”)

**Ryazanov R. M.**, Engineer, SMC “TC”

**Basaev A. S.**, Deputy Director, SMC “TC”

**Svetukhin V. V.**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Director, SMC “TC”

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-69  
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by  
Lazarouk Serguei Konstantinovich