



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-165-172>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 621.315.5/.6

## ВЛИЯНИЕ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ДИЭЛЕКТРИКА КРЕМНИЕВЫХ ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДОВ, НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ЛЕ ДИНЬ ВИ, КЛЮЦКИЙ А.Ю., ДОЛБИК А.А., ЛЕШОК А.А., ЛАЗАРУК С.К.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 12 декабря 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

**Аннотация.** Проведено исследование влияния режимов формирования лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния на параметры формируемых приборов, такие как напряжение светоизлучения и стабильность функционирования, что является важным фактором для их практического использования при разработке изделий кремниевой фотоники, с развитием которой связывается будущее интегральной электроники. Впервые представлена технологическая операция локального сквозного электрохимического анодирования алюминия в различных электролитах для формирования разделительного диэлектрика контактов Шоттки. Исследовано влияние встроенного электрического заряда в разделительном диэлектрике кремниевых лавинных светодиодов на их вольт-амперные характеристики. Обнаружено, что встроенный отрицательный электрический заряд увеличивает пробивное напряжение контакта Шоттки, что способствует увеличению эффективности светоизлучения диодных структур. Представлено объяснение данного эффекта на основе того, что встроенный отрицательный электрический заряд внутри анодного оксида создает также область пространственного заряда в кремнии, что способствует уменьшению эффекта концентрации силовых линий на краях диодных структур, выполняя функцию защиты контакта Шоттки от краевых эффектов по аналогии с охранными областями. Установлено, что наибольшее напряжение лавинного пробоя наблюдается в диодных структурах с анодным оксидом, сформированном в электролите на основе водного раствора ортофосфорной кислоты. Анализ характеристик светодиодов при различных температурах кремниевых подложек показал увеличение напряжения пробоя с ростом температуры, что свойственно лавинному пробоя при ударной ионизации. Получена стабильная генерация излучения сформированными светодиодами в широком диапазоне рабочих напряжений (8–16 В). Проведено обсуждение использования кремниевых лавинных светодиодов как при изготовлении дискретных приборов, так и в интегральной электронике в целом.

**Ключевые слова:** лавинные светодиоды, анодный оксид алюминия, кремниевые наночастицы, встроенный электрический заряд.

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

**Для цитирования.** Ле Динь Ви, Ключкий А.Ю., Долбик А.А., Лешок А.А., Лазарук С.К. Влияние анодного оксида алюминия, используемого в качестве разделительного диэлектрика кремниевых лавинных светодиодов, на их характеристики. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 165–172.

## INFLUENCE OF ANODIC ALUMINA USED AS SEPARATING DIELECTRIC OF SILICON AVALANCHE LEDs ON DIODE CHARACTERISTICS

LE DINH VI, ALEKSEY Yu. KLYUTSKY, ALEKSANDR V. DOLBIK,  
ANDREY A. LESHOK, SERGEY K. LAZAROUK

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Submitted 12 December 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

**Abstract.** A study of the influence of the formation regimes of avalanche LEDs based on nanostructured silicon on the parameters of the formed devices, such as the light emission voltage and the stability of operation has been performed. These parameters are an important factor for the practical use of avalanche LEDs in the development of silicon photonics products, the progress of which is associated with the future of integrated electronics. For the first time, the technological operation of local through electrochemical anodizing of aluminum in various electrolytes for the formation of a separating dielectric of Schottky contacts is presented. The influence of the built-in electric charge in the separation dielectric of silicon avalanche LEDs on their current-voltage characteristics is studied. It was found that the built-in negative electric charge increases the breakdown voltage of the Schottky contact, which results in an increase of the light emission efficiency of the diode structures. An explanation of this effect is presented on the basis that the built-in negative electric charge inside the anode oxide also creates a space charge region in silicon, which helps to reduce the effect of the concentration of field lines at the edges of diode structures, performing the function of protecting the Schottky contact from edge effects as well as protective areas do. It has been established that the highest avalanche breakdown voltage is observed in diode structures with anodic oxide formed in an electrolyte based on an aqueous solution of phosphoric acid. An analysis of the characteristics of LEDs at different temperatures of silicon substrates showed an increase of breakdown voltage with increasing temperature, which is typical for avalanche breakdown during impact ionization. Stable light emission of the formed LEDs was demonstrated in a wide range of operating voltages (8–16 V). The use of silicon avalanche LEDs both as discrete devices and in integrated electronics in general has been discussed.

**Keywords:** avalanche LEDs, anodic alumina, silicon nanoparticles, built-in electric charge

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

**For citation.** Le Dinh Vi, Klutsky A.Yu., Dolbik A.A., Leshok A.A., Lazarouk S.K. Influence of anodic alumina used as separating dielectric of silicon avalanche LEDs on diode characteristics. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 165-172.

### Введение

Источники света на основе кремния привлекают внимание исследователей, так как именно эти устройства являются ключевым элементом, определяющим перспективы развития кремниевой фотоники, с которой связывается будущее интегральной электроники [1]. Одним из таких источников света являются кремниевые лавинные светодиоды. Их отличительной особенностью является излучение света при обратном смещении  $p-n$  переходов или контактов Шоттки в режиме лавинного пробоя. Использование данного механизма обуславливает одно из главных преимуществ лавинных светодиодов – высокое быстродействие, позволяющее функционировать в гига- и даже терагерцовом диапазоне частот [2]. Первое сообщение о лавинных светодиодах на кремнии было сделано авторами в 1999 году [3], в последующих работах было показано, что временной отклик светоизлучения может составлять менее 1 нс [2, 4].

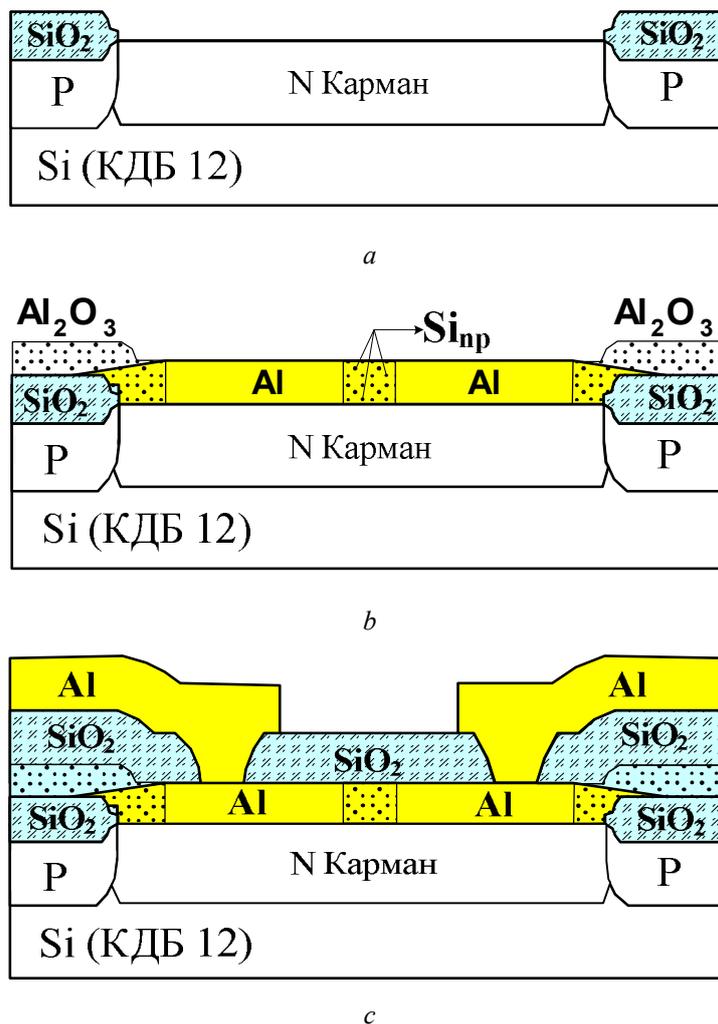
В последние годы появились публикации, посвященные кремниевым лавинным светодиодам, ряда исследовательских групп из США, стран Европы, Китая и Южно-Африканской Республики [5–8]. В этих работах было показано, что за счет уменьшения размеров лавинных светодиодов на кремнии достигаются временной отклик 50 пс и рабочая частота светоизлучения 20 ГГц, что открывает новые перспективы для увеличения быстродействия интегральных

микросхем за счет замены медленных электрических межсоединений быстрыми оптическими аналогами.

В данной работе представлены результаты исследования влияния режимов формирования лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния на их параметры, такие как напряжение светоизлучения и стабильность функционирования, что является важным фактором для их практического использования.

### Методика проведения эксперимента

Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния формировали по технологии, интегрированной с технологией КМОП ИС. В частности, диодные структуры формировали внутри *n*-карманов КМОП ИС. То есть предварительно кремниевые пластины прошли типовой маршрут изготовления КМОП ИС до операции создания *n*-карманов в окнах межкомпонентного диэлектрика SiO<sub>2</sub>, как это показано на рис. 1, *a*.



**Рис. 1.** Этапы формирования лавинных светодиодов по технологии КМОП ИС: исходная структура с *n*-карманом (*a*); проанодированная структура с геометрией электродов светодиодов и разделительного диэлектрика Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со встроенными кремниевыми наночастицами (*b*); конечная структура с двухуровневой металлизацией (*c*)

**Fig. 1.** Stages of formation of avalanche LEDs using CMOS IC technology: the initial structure with an *n*-pocket (*a*); an anodized structure with a pattern (geometry) of LED electrodes and separating dielectric Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with built-in silicon nanoparticles (Si<sub>np</sub>) (*b*); the resulting structure with two-level metallization (*c*)

Ключевыми технологическими операциями, используемыми при формировании лавинных светодиодов, являются следующие:

1) осаждение алюминиево-кремниевой нанокompозитной пленки толщиной 1 мкм магнетронным распылением составной мишени, состоящей из 75 атомных процентов алюминия и 25 атомных процентов кремния (содержание примесных элементов менее 1 ат. %);

2) фотолитография, определяющая геометрию электродов светодиодов и разделительного диэлектрика  $Al_2O_3$ ;

3) локальное сквозное электрохимическое анодирование алюминиево-кремниевой пленки, при котором алюминий полностью переходит в оксид алюминия, а кремниевые наноструктуры частично окисляются, в результате чего формируются кремниевые кластеры, покрытые собственным окислом, встроенные в матрицу оксида алюминия (рис. 1, *b*).

Далее сформированные светодиодные структуры на кремниевых подложках проводили по стандартному маршруту изготовления КМОП ИС с двухуровневой алюминиевой металлизацией и с межуровневым диэлектриком на основе  $SiO_2$  (рис. 1, *c*).

Более подробно следует остановиться на технологической операции локального сквозного электрохимического анодирования алюминия, используемого для формирования разделительного диэлектрика кремниевых светодиодов. Для различных образцов в качестве электролита использовали 0,3 М водные растворы серной, щавелевой и ортофосфорной кислот. Анодирование проводили в гальваностатическом режиме при плотности анодного тока  $10 \text{ mA/cm}^2$ . Процесс заканчивали при увеличении анодного напряжения до уровня, на 50 % превышающего среднее значение этого параметра в течение первых трех минут.

Измерение параметров диодных структур проводили при помощи зондовой установки и прибора для измерения характеристик полупроводниковых приборов Л2-56.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2, *a* представлены микрофотографии сформированных диодных структур, интегрированных в КМОП ИС. После подачи напряжения, превышающего значение, соответствующее лавинному пробое, вдоль периметра диодной структуры наблюдается излучение света (рис. 2, *b*).

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики контакта алюминий-кремний, когда металлические электроды разделены анодным оксидом алюминия со встроенными кремниевыми кластерами, полученным анодированием в различных электролитах (растворы серной, щавелевой и ортофосфорной кислот). Как видно из графиков, наибольшее напряжение лавинного пробоя наблюдается в диодных структурах с анодным оксидом, сформированным в электролите на основе водного раствора ортофосфорной кислоты. В этих же структурах имеют место максимальные эффективность и интенсивность светоизлучения, так как именно при увеличении обратного напряжения наблюдаются максимальные значения этих параметров [9].

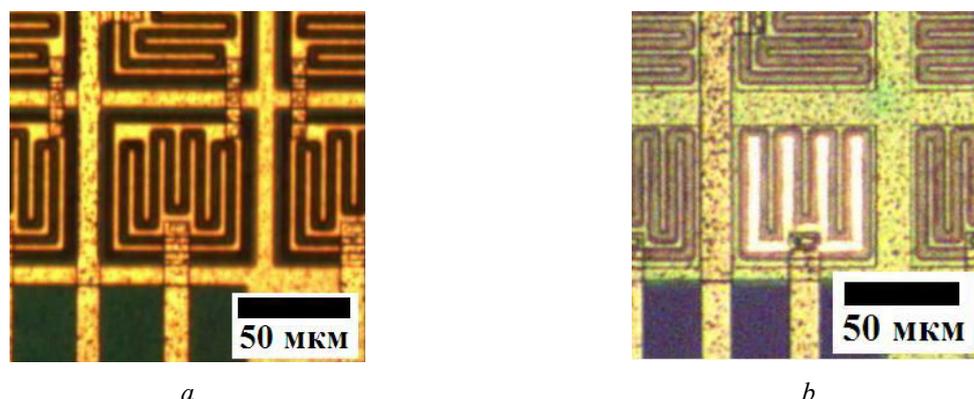
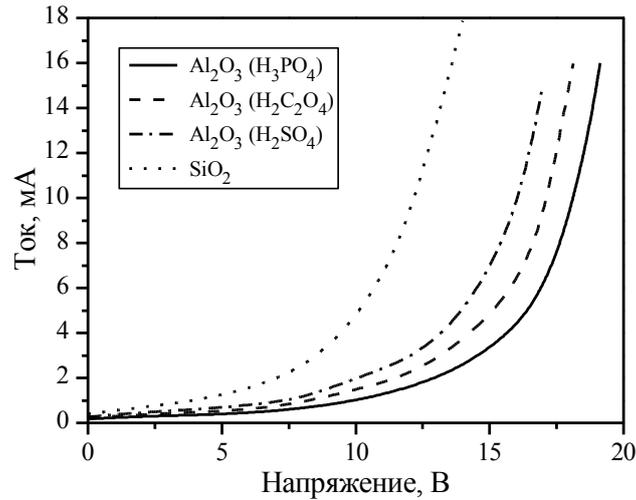


Рис. 2. Микрофотографии сформированных диодных структур, интегрированных в КМОП ИС до подачи напряжения (*a*); после подачи напряжения (*b*)

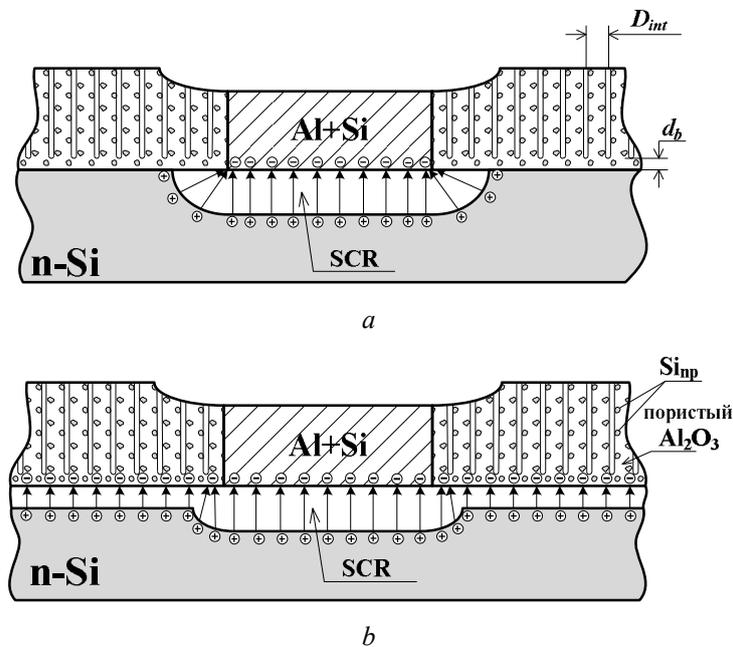
Fig. 2. Microphotographs of fabricated LED structures by CMOS IC technology before applying voltage (*a*); after applying voltage (*b*)



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики контакта алюминий-кремний с разделительным диэлектриком – оксидом алюминия, полученным анодированием в разных электролитах. Разделительный диэлектрик – оксид кремния приведен для сравнения

**Fig. 3.** Current-voltage characteristics of an aluminum-silicon contact with a separation dielectric – alumina obtained by anodizing in different electrolytes. A separation dielectric – silicon oxide given for comparison

Наблюдаемая зависимость объясняется влиянием встроенного электрического заряда в анодном оксиде алюминия на область пространственного заряда в кремнии. В планарных структурах при контакте металл-полупроводник по периметру контакта наблюдается эффект концентрации силовых линий электрического поля из-за пространственного заряда в кремнии (рис. 4, *a*). Увеличение напряженности поля на краях планарного контакта приводит к тому, что пробойные эффекты начинаются на границе анодный оксид алюминия/алюминий. При этом встроенный отрицательный электрический заряд внутри анодного оксида создает также область пространственного заряда в кремнии, как это показано рис. 4, *b*.



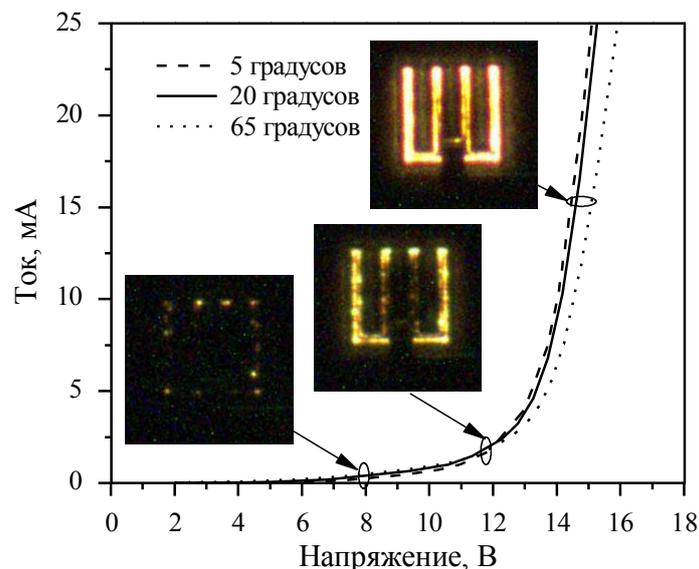
**Рис. 4.** Эффект концентрации силовых линий электрического поля из-за области пространственного заряда (SCR) в кремнии: встроенный заряд разделительного диэлектрика отсутствует (*a*); встроенный заряд разделительного диэлектрика отрицательный (*b*)

**Fig. 4.** The effect of the concentration of electric field lines due to the space charge region (SCR) in silicon: the built-in charge of separating dielectric is absent (*a*); the built-in charge of separating dielectric is negative (*b*)

Наличие этого встроенного электрического заряда способствует уменьшению эффекта концентрации силовых линий на краях диодных структур (схематически показано на рис. 4, b). Следует отметить, что ранее авторами было установлено, что анодный оксид алюминия, сформированный в электролите на основе водного раствора ортофосфорной кислоты, имеет максимальную плотность встроенного отрицательного заряда по сравнению с оксидами, сформированными в электролитах на основе водных растворов щавелевой и серной кислот [10]. Именно этим объясняется различие вольт-амперных характеристик, приведенных на рис. 3. На этом же рисунке приведены вольт-амперные характеристики диодов с разделительным диэлектриком на основе оксида кремния, имеющего положительный встроенный электрический заряд. Различие характеристик диодов еще раз подтверждает отмеченные выше закономерности влияния встроенного заряда на пробивное напряжение.

Таким образом, встроенный электрический заряд на границе анодного оксида алюминия выполняет функцию защиты контакта Шоттки от краевых эффектов (по аналогии с охранными областями), что улучшает качество вольт-амперных характеристик контактов за счет увеличения напряжения лавинного пробоя и перехода от «мягких» пробойных характеристик к более «резким» (рис. 3). Подобное поведение свойственно лавинным светодиодам, функционирующим при обратном смещении [4–8].

На рис. 5 приведены вольт-амперные характеристики светодиодных структур, измеренные при различных температурах кремниевой подложки. Представленные характеристики подтверждают лавинный характер пробоя при обратном смещении, проявляющийся в увеличении напряжения пробоя с ростом температуры. Кроме этого, на рис. 5 на вставках представлены микрофотографии светодиодных структур при различных напряжениях смещения. Как видно из микрофотографий, светоизлучение в виде горячих точек появляется в местах максимальной напряженности электрического поля (угловые точки алюминиевых электродов). Далее, при увеличении напряжения смещения отдельные светящиеся точки сливаются в линии вдоль периметра алюминиевых контактов. Дальнейшее увеличение смещения обеспечивает расширение этих линий и, следовательно, увеличение общей интенсивности светоизлучения. Следует отметить высокую стабильность светоизлучения лавинных светодиодов. Испытание при непрерывном светоизлучении более 1000 ч не показали заметных изменений светового сигнала. Также не было замечено изменений характеристик светодиодов в зависимости от времени хранения без электрического смещения.



**Рис. 5.** Вольт-амперные характеристики светодиодных структур, измеренные при различных температурах кремниевой подложки. На вставках представлены микрофотографии светоизлучающих структур при различных напряжениях смещения

**Fig. 5.** Current-voltage characteristics of LED structures measured at various temperatures of the silicon substrate. The insets show microphotographs of light emitting structures at different bias voltages

Вышеотмеченные режимы светоизлучения представляют интерес для различных применений. В частности, точечное светоизлучение может быть использовано для генерации случайных чисел (единичных фотонов) при регистрации света в режиме счета отдельных фотонов. Также точечное светоизлучение может быть использовано в качестве источников света терагерцового диапазона для быстродействующих оптоэлектронных устройств. Именно при уменьшении площади лавинных светодиодов до  $1 \text{ мкм}^2$  ожидается уменьшение временных задержек до величин менее 1 пс, что позволит светодиодам работать в терагерцовом диапазоне, так как временной отклик лавинного пробоя составляет 0,1 пс [4, 11]. Полученные результаты открывают новые возможности для развития кремниевой оптоэлектроники, способной значительно увеличить быстродействие современных интегральных микросхем.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что разделительный диэлектрик, сформированный анодным окислением алюминия, выполняет функции охраны лавинных светодиодов от краевых эффектов, что позволяет увеличить напряжение пробоя диодных структур и, соответственно, интенсивность светоизлучения. Проведено обсуждение применения кремниевых лавинных светодиодов как для конкретных изделий, так и для интегральной электроники в целом.

### Список литературы

1. Pavese L., Lockwood D.J. *Silicon photonics III. Topics in Applied Physics*. Berlin: Springer; 2016.
2. Lazarouk S., Jaguiro P., Leshok A., Borisenko V. Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2003;16(03&04):495-498. DOI: 10.1016/S1386-9477(02)00655-0.
3. Лазарук С., Батуревич А. Перспективы лавинных светодиодов на основе пористого кремния для оптических межсоединений. *Известия Белорусской инженерной академии*. 1999;07(01&02):147-149.
4. Lazarouk S., Leshok A., Kozlova T., Dolbik A., Le Dinh Vi, Ilkov V., Labunov V. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 2019;18(03&04):1940091(1-5). DOI: 10.1142/S0219581X1940091X.
5. Chatterjee A., Bhuvu B., Schrimpf R. High-speed light modulation in avalanche breakdown mode for Si diodes. *IEEE Electron Device Letters*. 2004;25(09):628-630. DOI: 10.1109/LED.2004.834247.
6. Dutta S., Steeneken P.G., Agarwal V., Schmitz J., Annema A.-J., Huetting R.J. The avalanche-mode superjunction LED. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2017;64(04):1612-1618. DOI: 10.1109/TED.2017.2669645.
7. Du Plessis M., Joubert T.-H. Silicon nanowire hot electron electroluminescence. *International Society for Optics and Photonics*. 2017;10036:1003605(1-7). DOI: 10.1117/12.2243336.
8. Xu K. Silicon MOS optoelectronic micro-nano structure based on reverse-biased PN junction. *Physica Status Solidi A*. 2019;216(07):1800868(1-9). DOI: 10.1002/pssa.201800868.
9. Lazarouk S.K., Leshok A.A., Labunov V.A., Borisenko V.E. Efficiency of avalanche light-emitting diodes based on porous silicon. *Semiconductors*. 2005;39(1):136-138. DOI: 10.1134/1.1852663.
10. Ле Динь Ви, Купреева О.В., Дудич В.В., Филипеня В.А., Лазарук С.К. Влияние поверхностного потенциала анодных алюмооксидных пленок на их зарядовые свойства. *Доклады БГУИР*. 2019;5(123):72-78. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-123-5-72-78.
11. Sze S.M. *Physics of Semiconductor Devices*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons; 1981.

### References

1. Pavese L., Lockwood D.J. *Silicon photonics III. Topics in Applied Physics*. Berlin: Springer; 2016.
2. Lazarouk S., Jaguiro P., Leshok A., Borisenko V. Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2003;16(03&04):495-498. DOI: 10.1016/S1386-9477(02)00655-0.
3. Lazarouk S., Baturevich A. [Perspectives of avalanche light emitting diodes based on porous silicon for optical interconnects]. *Izvestija Belorusskoj inzhenernoj akademii=Belarus Engineering Academy Letters*. 1999;07(01&02):147-149. (In Russ.)

- Lazarouk S., Leshok A., Kozlova T., Dolbik A., Le Dinh Vi, Ilkov V., Labunov V. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 2019;18(03&04):1940091(1-5). DOI: 10.1142/S0219581X1940091X.
- Chatterjee A., Bhuva B., Schrimpf R. High-speed light modulation in avalanche breakdown mode for Si diodes. *IEEE Electron Device Letters*. 2004;25(09):628-630. DOI: 10.1109/LED.2004.834247.
- Dutta S., Steeneken P.G., Agarwal V., Schmitz J., Annema A.-J., Hueting R.J. The avalanche-mode superjunction LED. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2017;64(04):1612-1618. DOI: 10.1109/TED.2017.2669645.
- Du Plessis M., Joubert T.-H. Silicon nanowire hot electron electroluminescence. *International Society for Optics and Photonics*. 2017;10036:1003605(1-7). DOI: 10.1117/12.2243336.
- Xu K. Silicon MOS optoelectronic micro-nano structure based on reverse-biased PN junction. *Physica Status Solidi A*. 2019;216(07):1800868(1-9). DOI: 10.1002/pssa.201800868.
- Lazarouk S.K., Leshok A.A., Labunov V.A., Borisenko V.E. Efficiency of avalanche light-emitting diodes based on porous silicon. *Semiconductors*. 2005;39(1):136-138. DOI: 10.1134/1.1852663.
- Le Dinh Vi, Kupreeva O.V., Dudich V.V., Filipenya V.A., Lazarouk S.K. [Effect of surface potential of anodic alumina film on their charge properties]. *Doklady BGUIR =Doklady BGUIR*. 2019;5(123):72-78. DOI: 10.35596/1729-7648-2019-123-5-72-78. (In Russ.)
- Sze S.M. *Physics of Semiconductor Devices*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons; 1981.

### Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

### Authors contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

### Сведения об авторах

Лазарук С.К., д.ф.-м.н., заведующий НИЛ 4.12 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лешок А.А., к.ф.-м.н., начальник Центра 4.11 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ле Динь Ви, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Клюцкий А.Ю., аспирант кафедры ИРТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Долбик А.В., научный сотрудник НИЛ 4.12 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Lazarouk S.K., D.Sci., head of laboratory 4.12 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Leshok A.A., Ph.D., head of Center 4.11 of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Le Dinh Vi, PG student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Klutsky A.Yu, a PhD. student of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dolbik A.V., research worker of Lab. 4.12 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

20013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
e-mail:levi.ntv@gmail.com  
Ле Динь Ви

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
e-mail:levi.ntv@gmail.com  
Le Dinh Vi