

УДК 621.315.592

## РАЗРАБОТКА ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ГИГАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

Лазарук С.К.<sup>1</sup>, Лешок А.А.<sup>1</sup>, Долбик А.В.<sup>1</sup>, Томашевич Л.П.<sup>1</sup>, Ключцкий А.Ю.<sup>1</sup>, Дудич В.В.<sup>1</sup>, Лабунов В.А.<sup>1</sup>,  
Шабуня А.С.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Ефименко С.А.<sup>2</sup>, Петлицкая Т.В.<sup>2</sup>, Ковальчук Н.С.<sup>2</sup>, Кицюк Е.П.<sup>3</sup>,  
Рязанов Р.М.<sup>3</sup>, Басаев А.С.<sup>3</sup>, Светухин В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск,  
Республика Беларусь, [serg@nano.bsuir.edu.by](mailto:serg@nano.bsuir.edu.by)

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

<sup>3</sup>НПК «Технологический центр», Москва, Российская Федерация

Аннотация: Разработаны конструкция и технология изготовления лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния. Сформированы матрицы светодиодов с различной рабочей площадью. Измерение емкости светодиодов показало, что уменьшение рабочей площади светодиодов позволяет снизить суммарную емкость устройства до десятых долей пикофарад, что позволяет лавинным светодиодам функционировать в гигагерцовом диапазоне частот. Даны рекомендации по дальнейшему увеличению быстродействия лавинных светодиодов вплоть до терагерцового диапазона частот.

Ключевые слова: наноструктурированный кремний, лавинные светодиоды, кремниевая фотоника, оптические межсоединения.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Быстродействие современных интегральных схем ограничивается резистивно-емкостными задержками их электрических межсоединений, что не позволяет им функционировать на частотах более 10 ГГц. Данная проблема может быть решена за счет замены электрических межсоединений быстродействующими оптическими межсоединениями [1-6]. При этом главные трудности связаны с разработкой источников света на кремнии, который является основным материалом, используемым в интегральной электронике при изготовлении ИС. Ранее нами была разработана технология изготовления лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния [7-13]. Ключевым преимуществом лавинных светодиодов является их высокое быстродействие, так как время лавинного отклика для кремния находится в фемтосекундном диапазоне, что теоретически обеспечивает функционировать приборов во всем гигагерцовом диапазоне частот. Однако, на практике быстродействие ограничивается емкостными задержками, обусловленными барьерной емкостью обратносмещенного перехода. В данной работе представлена конструкция лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния, характеризующаяся низким значением барьерной емкости, что позволяет приборам функционировать в гигагерцовом диапазоне частот.

### II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАТРИЦ ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДОВ И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ

Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния проектировали с различными размерами светоизлучающих элементов, которые варьировались в диапазоне от единиц до сотен микрометров. Светодиоды формировали по технологии, совмещенной с технологией КМОП ИС, а именно, кремниевые пластины проходили все операции типового маршрута изготовления КМОП ИС, включая операцию создания n-карманов в окнах межкомпонентного диэлектрика SiO<sub>2</sub> [14]. Далее следовали ключевые операции изготовления лавинных светодиодов: осаждение алюминиево-кремниевой нанокompозитной пленки, состоящей из 75 ат.% алюминия и 25 ат.% кремния; фотолитография, определяющая геометрию электродов светодиодов и разделительного диэлектрика Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; локальное сквозное электрохимическое анодирование алюминиево-кремниевой пленки, при котором алюминий полностью переходил в оксид алюминия, а кремниевые наноструктуры окислялись частично, в результате чего формировались кремниевые кластеры, встроенные в оксидную матрицу.

Далее сформированные светодиодные матрицы на кремниевых подложках проводили по стандартному маршруту изготовления КМОП ИС с двухуровневой алюминиевой металлизацией и с межуровневым диэлектриком на основе SiO<sub>2</sub>. Более подробно технология изготовления представлена в [14].

Сформированные светодиодные матрицы на кремниевых подложках разделяли на отдельные кристаллы при помощи скрайбирования. Далее проводились операции посадки полученных кристаллов в алюмооксидные корпуса и последующей разварки контактных площадок и выводов корпуса при помощи алюминиевой проволоки.

При исследовании характеристик сформированных светодиодных структур измерялась зависимость их емкости от напряжения смещения в диапазоне от 0 до 10 В. Также световой сигнал измерялся при подаче напряжения смещения синусоидальной формы различной частоты. При этом регистрировалась частота, на которой интенсивность светового сигнала уменьшалась в два раза относительно величины, характерной для низких частот. Уменьшение интенсивности светового сигнала свидетельствовало о временных задержках резистивно-емкостного характера, препятствующих внешней модуляции [1].

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены фотографии кристаллов со светодиодными матрицами сформированными согласно разработанной технологии. Светодиодная матрица с минимальными размерами светодиодов представлена дважды (рис. 1б – фотография всего чипа, рис. 1в – фотография светодиодной матрицы при увеличении 250 крат). Фотография с оптического микроскопа высокого разрешения показывает минимальные размеры светоизлучающих структур – квадраты со стороной 10 мкм. Для всех исследуемых образцов структура светодиодных матриц состояла из набора светодиодов  $5 \times 7$ , расположенных в форме прямоугольника, как это видно на рисунке 1а. Диапазон исследуемой рабочей площади светодиодов составляет от  $10 \text{ мкм}^2$  до  $4 \cdot 10^5 \text{ мкм}^2$ .

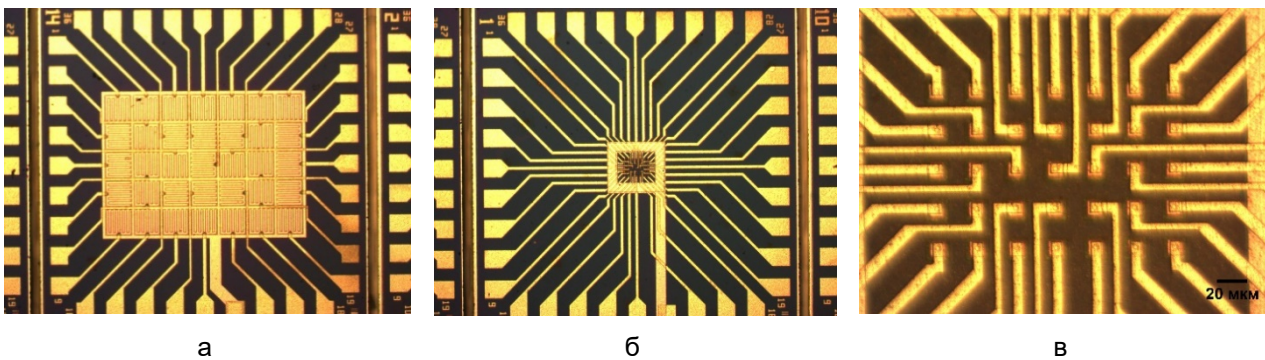


Рисунок 1. Фотографии матриц лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния; а – светодиоды с рабочей площадью  $10^4 \text{ мкм}^2$ , б – светодиоды с рабочей площадью  $100 \text{ мкм}^2$ , в – светодиоды с рабочей площадью  $100 \text{ мкм}^2$  (увеличение 250 крат)

Емкость светодиодов для всех исследуемых образцов, измеренная при напряжении смещения 10 В, представлена на рисунке 2. Величина обратного смещения 10 В была выбрана в связи с тем, что при данном смещении на всех исследуемых образцах наблюдалось излучение светового сигнала, различимого невооруженным глазом.

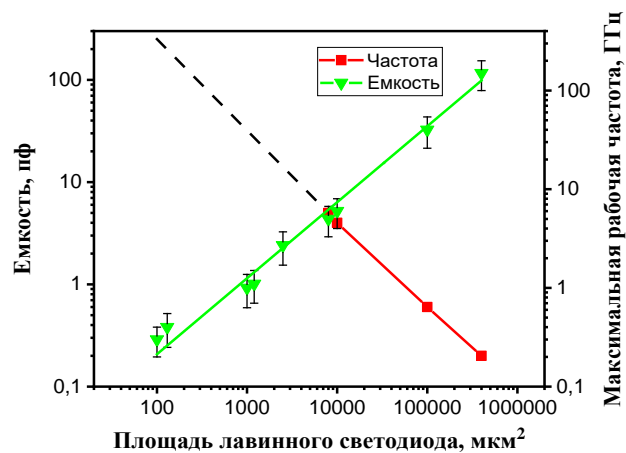


Рисунок 2. Зависимости емкости лавинных светодиодов и их максимальной частоты модуляции от рабочей площади различных конструкций светодиодов

Результаты, представленные на рисунке 2, свидетельствуют о том, что зависимость емкости светодиодов от их площади имеет практически линейный характер. Небольшое отклонение от линейности в области малых рабочих площадей светодиодов объясняется суммарным вкладом двух составляющих: барьерной емкостью обратно смещенного контакта Шоттки и емкостью разделительного диэлектрика  $Al_2O_3$ , расположенного между алюминиевыми электродами межсоединений. При этом барьерная емкость обратносмещенного контакта Шоттки вносит основной вклад в измеряемую суммарную емкость. На рисунке 2 также представлена зависимость предельной частоты модуляции светодиодов от их рабочей площади. Частотные данные были получены для светодиодов с рабочей площадью от  $4 \cdot 10^5$  до  $10^4$  мкм<sup>2</sup>.

Предельная частота при этом увеличивалась от 200 МГц до 6 ГГц. Измерения для более высоких частот модуляции были ограничены техническими возможностями используемого оборудования. Принимая во внимание линейную зависимость предельной частоты модуляции от рабочей площади светодиодов на графике представлены результаты экстраполяции предельной частоты модуляции светодиодов с площадью менее  $10^4$  мкм<sup>2</sup>. На рисунке 2 результаты экстраполяции представлены прерывистой линией.

Результаты экстраполяции экспериментальных данных свидетельствуют о том, что при уменьшении рабочей емкости светодиодов до долей пикофарад предельная частота функционирования лавинных светодиодов будет составлять более 100 ГГц. Эти результаты подтверждаются исследованиями других авторов по работе лавинных светодиодов в диапазоне частот от 10 до 100 ГГц [15-19]. Также можно предположить, что, уменьшая размер рабочей площади лавинного светодиода до 1 мкм<sup>2</sup>, будет достигнуто функционирование лавинных светодиодов во всем гигагерцовом диапазоне частот, что согласуется с известным свойством лавинного пробоя в кремнии, имеющим временную задержку менее 0,1 пс [20], что позволяет модулировать световой сигнал на частотах вплоть до терагерцового диапазона.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение исследования показали, что лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния открывают новые возможности для развития кремниевой фотоники [1, 21], в частности, для создания быстродействующих оптических межсоединений, способных функционировать в гигагерцовом диапазоне частот, а при дальнейшем уменьшении размеров лавинных светодиодов возможно их функционирование и в терагерцовом диапазоне частот.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T23MЭ-018, № проект № T24B-009).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] 3D silicon photonic structures based on avalanche LED with interconnections through optical interposer / S.K. Lazarouk [et al.] // International Journal of Nanoscience. 2019. Vol. 18 (03n04). P. 1940091.
- [2] Si-based optoelectronic couple / P. Jaguiro [et al.] // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2009. Vol. 41, No. 6. P. 1094-1096.
- [3] On the Route Towards Si-based Optical Interconnects / S. Lazarouk [et al.] // Microelectronic Engineering, 2000. Vol. 50., No 1-4, P. 81-86.
- [4] Integrated Optoelectronic Unit Based on Porous Silicon / S. Lazarouk, P. Jaguiro, V. Borisenko // Physica of Status Solidi (a). 1998. Vol. 165. P. 87-90.
- [5] Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects / S.K. Lazarouk [et al.] // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2003. Vol. 16. P. 495-498.
- [6] Progress in the field of integrated optoelectronics based on porous silicon / S. La Monica [et al.] // Thin Solid Films. 1997. Vol. 297. P. 261-264.
- [7] Stable electroluminescence of nanostructured silicon embedded into anodic alumina / P. Katsuba [et al.] // Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2009. Vol. 41, No. 6. P. 931-934.
- [8] Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon / S.K. Lazarouk [et al.] // Semiconductors. 2005. Vol. 39, No. 1, P. 136-138.
- [9] Electroluminescence from aluminum-porous silicon reverse-biased Schottky diodes formed on the base of highly doped n-type polysilicon / S. Lazarouk [et al.] // Thin Solid Films. 1996. Vol. 276, No. 1, P. 296-298.

- [10] Visible electroluminescence from Al-porous silicon reverse bias diodes formed on the base of degenerate n-type silicon AF / S. Lazarouk [et al.] // MRS Online Proceedings Library Archive. 1996. Vol. 358, P. 659-664.
- [11] Porous silicon avalanche LEDs and their applications in optoelectronics and information displays / P. Jaguero, [et al.] // Acta Physica Polonica A. 2007. Vol. 112, No. 5. P. 1031-1036.
- [12] Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina / S. Lazarouk [et al.] // Semiconductors. 2007. Vol. 41, No 9. P. 1109-1112.
- [13] Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk [et al.] // Materials Science and Engineering. 2000. Vol. 69-70, P. 114-117.
- [14] Influence of anodic alumina used as separating dielectric of silicon avalanche LEDs on diode characteristics / Le Dinh Vi [et al.] // Doklady BGUIR. 2019. Vol. 7-8, No 126. P. 165-172.
- [15] High-speed light modulation in avalanche breakdown mode for Si diodes / A. Chatterjee, B. Bhuvra, R. Schrimpf // IEEE Electron Device Letters. 2004. Vol. 25, No 9. P. 628-630.
- [16] Xu K. Electro-optical modulation processes in Si-PMOSFET LEDs operating in the avalanche light emission mode. IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61, No 6. P. 2085-2092.
- [17] Xu K. Silicon MOS optoelectronic micro-nano structure based on reverse-biased PN junction *Physica Status Solidi*. 2019. Vol. 216, No 7. P. 1800868.
- [18] 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 / K.A. Ogudo [et al.] // Proc. SPIE 8991, Optical Interconnects XIV. 2014. Vol. 8991. P. 1-16.
- [19] Avalanche leds based on nanostructured silicon for optical interconnections / Le Dinh Vi [et al.] // Doklady BGUIR. 2020. Vol. 18, No 3. P. 63-71.
- [20] Physics of Semiconductor Devices: Print ISBN:9780471143239 / S. M. Sze, K. K. Ng. Pub. 10.04.2006.
- [21] Anodic nanoporous titania for electro-optical devices / S. Lazarouk [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 46, No. 7R. P. 4390.

#### DEVELOPMENT OF AVALANCHE LEDS BASED ON NANOSTRUCTURED SILICON FOR THE GIGAHERTZ FREQUENCY RANGE

S. Lazarouk<sup>1</sup>, A. Leshok<sup>1</sup>, A. Dolbik<sup>1</sup>, L. Tomashevich<sup>1</sup>, A. Klyutsky<sup>1</sup>, V. Dudich<sup>1</sup>, V. Labunov<sup>1</sup>, A. Shabunya<sup>2</sup>, A. Petlitsky<sup>2</sup>, S. Efimenko<sup>2</sup>, T. Petlitskaya<sup>2</sup>, N. Kovalchuk<sup>2</sup>, E. Kitsyuk<sup>3</sup>, R. Ryazanov<sup>3</sup>, A. Basaev<sup>3</sup>, V. Svetukhin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,  
[serg@nano.bsuir.edu.by](mailto:serg@nano.bsuir.edu.by)

<sup>2</sup>JSC "INTEGRAL" – managing company of the holding "INTEGRAL", Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>NPC "Technological Center", Moscow, Russian Federation

Abstract: The design and manufacturing technology of avalanche LEDs based on nanostructured silicon have been developed. LED matrices with different working areas have been formed. The investigation of the LEDs capacity has shown that decreasing their working area allows to reduce the total capacity of the structure to tenths of picofarads, which allows avalanche LEDs to operate in the gigahertz frequency range. Recommendations for further increasing the speed of avalanche LEDs up to their operation in the terahertz frequency range are given.

Keywords: avalanche LEDs, nanostructured silicon, silicon photonics, optical interconnects.