



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-63-71>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.5/.6

ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

ЛЕ ДИНЬ ВИ, ЛЕШОК А.А., ДОЛБИК А.В., ПЕРКО С.Л., ЛАЗАРУК С.К.

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

Поступила в редакцию 17 марта 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В работе проведен анализ параметров кремниевых лавинных светодиодов и их использования для электронно-оптических систем передачи сигналов. Показаны преимущества данных приборов, среди которых следует выделить высокое быстродействие и совместимость с кремниевой технологией. Изготовлены экспериментальные образцы лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния и исследованы их структурные и оптические характеристики. Представлены результаты управления спектром электролюминесценции лавинных светодиодов за счет выбора технологических режимов формирования наноструктурированного кремния. Установлено, что температура подложки в процессе осаждения поверхностной нанокompозитной пленки алюминий + кремний влияет на размеры формирующихся кремниевых наночастиц, определяющих спектральные характеристики лавинных светодиодов. Это позволяет смещать максимум спектра их излучения в более коротковолновую область видимого диапазона за счет формирования кремниевых наночастиц меньших размеров. Разработана система оптических межсоединений, состоящая из лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния и микроканальной кремниевой пластины, используемой для передачи светового сигнала. Проведено исследование различных режимов функционирования разработанной оптоэлектронной системы и достигнуто увеличение эффективности оптопары на основе лавинных светодиодов до 0,2 % за счет импульсного режима функционирования. Показано, что эффективность оптопары увеличивается при увеличении тока светодиода, и именно импульсный режим его работы характеризуется максимальным значением тока, что обусловлено более эффективным отводом джоулевого тепла в промежутках между импульсами, обеспечивающим стабильную работу всей системы. Полученные результаты открывают новые возможности для развития оптических межсоединений между кремниевыми чипами и кремниевой оптоэлектроникой в целом.

Ключевые слова: лавинные светодиоды, наноструктурированный кремний, электролюминесценция, оптопара, оптические межсоединения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ле Динь Ви, Лешок А.А., Долбик А.В., Перко С.Л., Лазарук С.К. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптических межсоединений. Доклады БГУИР. 2020; 18(3): 63-71.

AVALANCHE LEDs BASED ON NANOSTRUCTURED SILICON FOR OPTICAL INTERCONNECTIONS

LE DINH VI, ANDREI A. LESHOK, ALEXANDER V. DOLBIK, SERGEY L. PERKO,
SERGEY K. LAZAROUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 17 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper analyzes the parameters of silicon avalanche LEDs and their use for electron-optical signal transmission systems. The advantages of silicon avalanche LEDs are shown, among which high speed and compatibility with silicon technology should be highlighted. Experimental avalanche LEDs based on nanostructured silicon were fabricated and studied. The results of controlling the electroluminescence spectrum of avalanche LEDs due to the choice of production conditions to form nanostructured silicon are presented. It was found that the temperature of the substrate during the deposition of the surface nanocomposite aluminum + silicon film affected the size of the formed silicon nanoparticles determining the spectral characteristics of avalanche LEDs. This allows shifting the maximum of their emission spectrum to a shorter wavelength region of the visible range due to the forming of smaller silicon nanoparticles. The authors have developed an optical interconnection system consisting of avalanche LEDs based on nanostructured silicon and a microchannel silicon wafer used to transmit a light signal. The study of various operating modes of the developed optoelectronic system was performed and an increase in the efficiency of optocouple based on avalanche LEDs to 0.2% due to the pulsed operating mode was achieved. It is shown that the efficiency of the optocouple increases with LED current and it is the pulsed mode of its operation that is characterized by the maximum current, which is due to more efficient removal of Joule heat in the intervals between pulses, ensuring stable operation of the entire system. The results obtained open up new opportunities for the development of optical interconnections between silicon chips and silicon optoelectronics in general.

Keywords: avalanche LEDs, nanostructured silicon, electroluminescence, optocouple, optical interconnects.

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

For citation. Le Dinh Vi, Leshok A.A., Dolbik A.V., Perko S.L., Lazarouk S.K. Avalanche leds based on nanostructured silicon for optical interconnections. Doklady BGUIR. 2020; 18(3): 63-71.

Введение

Впервые об излучении света кремниевыми структурами во время лавинного пробоя при обратном смещении $p-n$ перехода сообщалось в [1, 2]. Затем похожее явление наблюдалось и при обратном смещении $p-n$ переходов на основе наноструктурированного (пористого) кремния [3]. Однако во всех этих случаях светоизлучение было неравномерно по площади $p-n$ перехода, а в последнем случае и нестабильно во времени, так как после нескольких минут функционирования устройства излучение затухало. Далее было обнаружено, что излучение света видимого диапазона наблюдается при лавинном пробое контакта Шоттки алюминий – наноструктурированный кремний, причем в этом случае удалось достичь увеличения эффективности и стабильности излучения [4], что позволило создать кремниевые лавинные светодиоды, первое сообщение о которых было сделано авторами данной статьи в 1999 году в Республике Беларусь [5], а потом в 2000 году в международном издании [6]. Далее последовали работы, в которых сообщалось об улучшении параметров лавинных светодиодов, прежде всего эффективности и стабильности излучения, а также быстродействия [7]. Важно отметить, что предложенная конструкция светоизлучающих диодов на основе наноструктурированного кремния использовалась и модернизировалась другими исследовательскими группами, в частности из Австралии [8] и Японии [9], что позволило увеличить внешнюю эффективность светоизлучения до 10^{-3} .

Анализируя литературные источники, становится очевидным, что после 2004 года лавинные кремниевые светодиоды активно исследуются учеными Америки, Европы (Израиль, Нидерланды, Франция, Дания, Швейцария, Хорватия, Россия), Азии (Япония, КНР, Иран) и Австралии. В табл. 1 приведены параметры лавинных светодиодов, полученных различными исследовательскими группами, а также отмечены технологические особенности реализации этих приборов.

Таблица 1. Параметры лавинных светодиодов из кремния, полученных различными исследовательскими группами
Table 1. Parameters of silicon avalanche LEDs fabricated by various research groups

Авторы, страны, год	Диапазон и длины волн пиков ЭЛ, нм	Эффективность светодиодов	Другие параметры светодиодов и технология их изготовления
1. Karsenty A., et al.; Israel; 2003 [10]	500 – 850; 537, 602, 686, 762, 825	Рост в 16 раз при наноструктурировании кремния	Светодиоды на основе и объемного, и наноструктурированного кремния $U_{\text{раб}} = 5-10$ В Размер структуры 80×8 мкм
2. Chatterjee A., et al.; USA; 2004 [11]	430 – 800; 650	$\sim 10^{-7}$	Рабочая частота 20 ГГц $P_{\text{опт}} = 3$ нВт при $U = 3,5$ В и $I = 2,5$ мА Техпроцесс 0,18 мкм КМОП Теоретически предсказано достижение длительности импульса 7 пс
3. Snyman L.W., et al; South Africa; 2005 [12]	400 – 900	$1,6 \cdot 10^{-7} - 5,8 \cdot 10^{-6}$	$U_{\text{раб}} = 8$ В, $I_{\text{раб}} = 80$ мкА $P_{\text{опт}} = 10^{-1}$ Вт/см ² Техпроцесс 2 мкм КМОП
4. Snyman L.W., et al; South Africa, Israel; 2007 [13]	450 – 750;	Внешняя $2 \cdot 10^{-6} - 2,5 \cdot 10^{-5}$ Внутренняя $1,5 \cdot 10^{-5} - 5,9 \cdot 10^{-2}$	$U_{\text{раб}} = 9$ В, $I_{\text{раб}} = 0,1 - 3$ мА $P_{\text{опт}} = 10^{-2} - 1$ Вт/см ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
5. Du Plessis M., et al; South Africa, USA; 2013 [14]	350 – 1700	Внутренняя $1,2 \cdot 10^{-2}$	$U_{\text{раб}} = 10,5$ В $I_{\text{тест}} = 350$ мкА/точечный источник Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
6. Kulakci M., et al; Turkey; 2013 [15]	650; 700	$4,3 \cdot 10^{-2}$	МОП-LED
7. Ogudo K.A., et al; South Africa, France; 2014 [16]	450 – 750	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	Рабочая частота до 40 ГГц; $U_{\text{раб}} = 1-3,8$ В, $I_{\text{раб}} = 0,1-1$ мА $P_{\text{опт}} = 1-10$ Вт/см ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП Расчетная частота ~ 300 ГГц
8. Xu K., China; 2014, 2019 [17, 18]	400 – 900; 650	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	Рабочая частота – десятки ГГц (теоретически до 60–90 ГГц) Размеры 175,5/6 мкм (W/L) Техпроцесс 3 мкм КМОП (Si-PMOSFET)
9. Dutta S., et al.; Netherlands; 2017 [19]	400 – 870; 650	$10^{-8} - 10^{-6}$	Активная площадь 510 и 780 мкм ² $L = 1-2$ мкм Техпроцесс 0,14 мкм КНИ КМОП
10. Okhai T.A., et al.; France, South Africa; 2017 [20]	450 – 850	10^{-5}	$U_{\text{раб}} = 8 - 10$ В, $I_{\text{раб}} = 1$ мкА – 2 мА Интенсивность эмиссии 500 нВт/мкм ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
11. Agarwal V., et al.; Netherlands, Switzerland; 2018 [21]	450 – 950	$5 \cdot 10^{-3}$	Площадь 0,008 мм ² , размер 100×100 мкм Скорость передачи сигнала 10 Mbps Техпроцесс 0,14 мкм КНИ КМОП
12. Xu K., et al.; China, South Africa; 2019 [22]	450 – 850	Внешняя 10^{-4} Внутренняя $10^{-3} - 10^{-2}$	Интенсивность эмиссии 200 нВт/мкм ² Техпроцесс 0,35 мкм КМОП
13. Krakkers M., et al.; Netherlands, Croatia, Denmark; 2019 [23]	Видимый диапазон	$10^{-7} - 10^{-6}$	Размер 2×20 мкм (40, 30, 10 и 1 мкм) $U_{\text{раб}} = -7 - -14$ В Оптическая мощность 50 мВт
14. Lazarouk S., et al.; Belarus; 2019 [24]	Видимый диапазон	10^{-3}	Размер от 100 мкм ² до 0,4 мм ² Рабочая частота – десятки ГГц для светодиодов с размерами 0,01 мм ² и менее, расчетная – более 1 ТГц

Особого внимания заслуживает максимальный уровень отдельных параметров, достигнутый в этих работах. В частности, исследователи из США показали, что лавинные светодиоды способны работать на частоте 20 ГГц с периодом импульса 50 пс [11]. При этом ими теоретически показана возможность достижения длительности импульса 7 пс. В работе [16] ученых из ЮАР и Франции теоретически прогнозируется работа лавинных светодиодов на частоте 300 ГГц.

Специального рассмотрения требует уровень достижения эффективности светоизлучения. В лавинных светодиодах на основе объемного монокристаллического кремния эта величина находится в диапазоне $10^{-8} - 10^{-4}$, в то время как для наноструктурированного кремния этот показатель возрастает до $10^{-4} - 10^{-2}$ [4, 7], что свидетельствует о перспективности использования именно наноразмерных кремниевых структур для создания светодиодов.

Исследователи из Нидерландов предложили конструкцию оптопары на основе кремниевых лавинных светодиодов [19]. Ими достигнута эффективность оптоэлектронной передачи сигнала (коэффициент передачи по току) 10^{-8} . В работе [24] было показано, что эффективность оптоэлектронной передачи сигнала может достигать 10^{-3} , а расчетная рабочая частота лавинных светодиодов находится в терагерцовом диапазоне.

В данной работе показана возможность управления спектром электролюминесценции лавинных светодиодов, а также метод увеличения эффективности оптоэлектронной передачи сигнала за счет импульсного режима работы светодиодов.

Эксперимент

Экспериментальные образцы лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния создавали по технологии, описанной в [7, 25]. Подложки монокристаллического кремния диаметром 100 мм, легированные фосфором, с удельным сопротивлением 0,2–0,4 Ом см использовались в качестве исходного материала. Нанокompозитные пленки (алюминий + кремний) осаждали магнетронным распылением композитных мишеней, содержащих от 27 до 45 ат.% кремния на установке Магна 2М при различных температурах кремниевых подложек. Из примесных атомов состава мишени следует отметить атомы кислорода, концентрация которых составляла от 2 до 4 ат.%. Содержание других примесей не превышала 1 ат.%. Диапазон изменения температуры составлял от 50 до 300 °С. Далее осажденные пленки подвергали локальной анодной обработке в 0,4–4 М водном растворе ортофосфорной кислоты через заранее сформированные на их поверхности маски из фоторезиста. Разные скорости анодирования алюминия и кремния обеспечивали формирование наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу [25]. Защищенные маской, непроанодированные области образовывали металлические электроды светодиодных структур.

Экспериментальная структура системы оптических межсоединений представлена на рис. 1. Конструктивно она состоит из двух контактов Шоттки, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Слой анодного оксида алюминия содержит кремниевые наночастицы, излучающие свет в режиме лавинного пробоя контакта Шоттки (LED) [25]. Эти же контакты Шоттки при обратном смещении до напряжения пробоя, соответствующего 12 В, чувствительны к наружному световому сигналу, поэтому способны функционировать как фотодиоды (PD).

Кроме кремниевых кристаллов с диодными структурами, способными излучать и регистрировать оптический сигнал, для реализации системы оптических межсоединений изготавливались кремниевые кристаллы со сквозными отверстиями диаметром 5–10 мкм. Такие кристаллы пропускают оптический сигнал через сквозные отверстия с коэффициентом пропускания 20–25 % (рис. 1).

Разработанная экспериментальная структура работает следующим образом. Электрический сигнал обратного смещения на светодиодах величиной более 12 В вызывает излучение света вдоль алюминиевых электродов. Излучаемый свет проходит через сквозные отверстия в кремниевых кристаллах (optical interposer) и далее регистрируется при помощи диодных структур, расположенных на противоположном кремниевом кристалле и функционирующих в режиме фотодиодов, как схематично показано на рис. 1.

Просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия использовались для определения размеров кремниевых наночастиц, встроенных в алюмооксидную матрицу. Спектры электролюминесценции светодиодных структур измеряли при комнатной температуре с использованием GaAs-фотоумножителя.

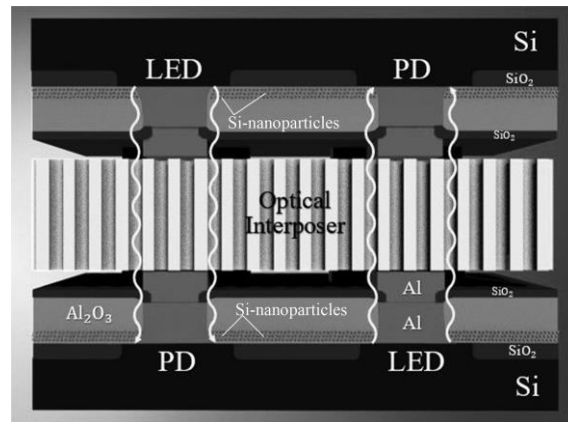


Рис. 1. Схема функционирования междучиповых оптических межсоединений
Fig. 1. Schematic view of interchip optical interconnects

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены фотографии кремниевых наночастиц, полученных при помощи просвечивающей электронной микроскопии. Изображение 2, *a* соответствует нанокompозитным пленкам, осажденным на кремниевые подложки, нагретые до 100 °С, в то время как изображение 2, *b* соответствует нанокompозитным пленкам, осажденным на подложки, нагретые до 300 °С. Из рисунка видно, что кремниевые наночастицы имеют кристаллическую структуру и их размеры в случае нагрева подложки до 100 °С составляют порядка 4 нм, в то время как в пленках, осаждаемых на подложки, нагретые до 300 °С, размеры кремниевых наночастиц составляют порядка 5–6 нм.

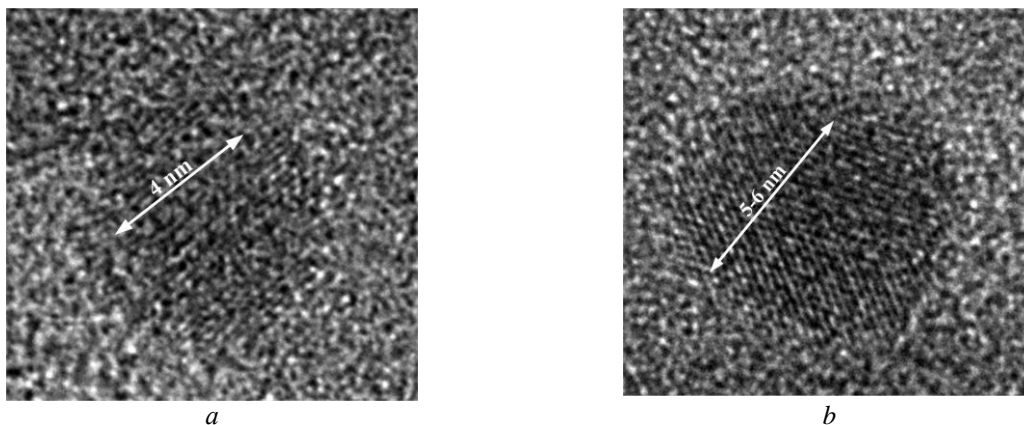


Рис. 2. Кремниевые наночастицы, полученные при осаждении на подложки, нагретые до 100 °С (*a*), нагретые до 300 °С (*b*)

Fig. 2. Silicon nanoparticles obtained by deposition on substrates heated to 100 °С (*a*), to 300 °С (*b*)

Различие размеров кремниевых наночастиц в исследуемых пленках находит подтверждение и при регистрации спектров электролюминесценции экспериментальных светодиодных структур (рис. 3). Так, максимум спектра электролюминесценции для структур с кремниевыми наночастицами меньшего размера соответствует 630 нм, в то время как аналогичный параметр для больших кремниевых наночастиц составляет 670 нм. Таким образом, для кремниевых наночастиц меньшего размера наблюдается так называемый голубой сдвиг спектра электролюминесценции.

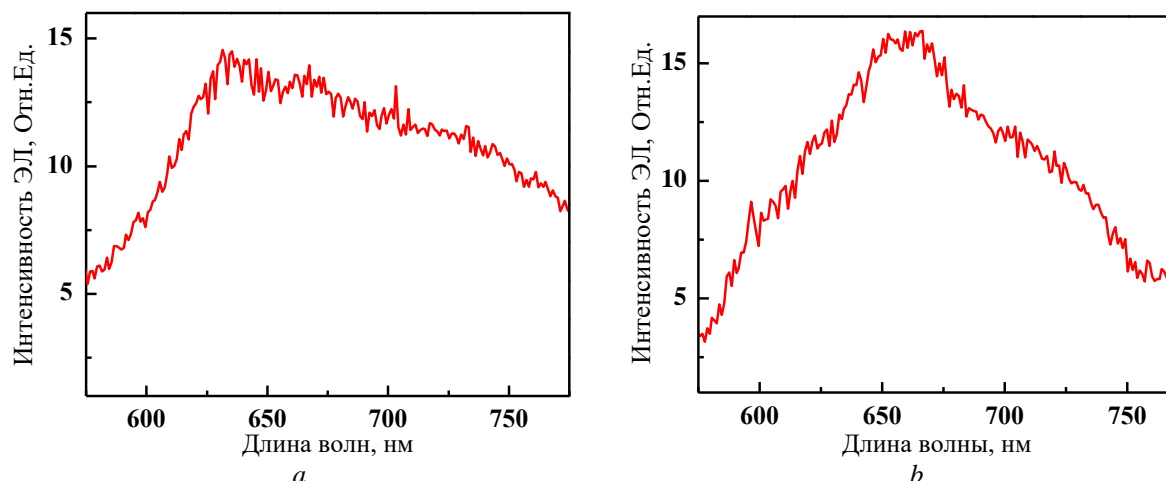


Рис. 3. Спектры электролюминесценции структур с кремниевыми наночастицами 4 нм (а) и 5–6 нм (b)
Fig. 3. Electroluminescence spectra of the samples with silicon nanoparticles of 4 nm (a) and 5–6 nm (b)

Полученный результат объясняется тем, что атомы кремния, осаждаемые в процессе магнетронного распыления на более холодную подложку, менее подвижны по сравнению с атомами на нагретой подложке. То есть пониженная температура подложек ограничивает миграционную активность кремниевых атомов, что, в конечном счете, приводит к образованию кремниевых наночастиц меньшего размера. Совместное магнетронное осаждение алюминия и кремния на подложки, нагретые до 50 °С, обеспечивает формирование кремниевых наночастиц размером до 3 нм и люминесценцию с пиком около 560 нм, однако такие пленки обладают недостаточной механической прочностью из-за низкой адгезии к подложке, что приводит к отслаиванию формируемых пленок при их толщинах более 1 мкм. Тем не менее при дальнейшей оптимизации технологии вполне возможно использование и этого температурного диапазона. Уменьшение длины волны электролюминесценции в исследуемых структурах является следствием квантового ограничения носителей заряда (электронов) в формируемых кристаллитах.

Следует отметить, что при помощи просвечивающей электронной микроскопии выявлялись кремниевые наночастицы с минимальными размерами. Кремниевые частицы больших размеров определялись при помощи сканирующей электронной микроскопии. В частности, для нанокompозитных пленок, осажденных при температуре кремниевых подложек 50 °С, размеры кремниевых наночастиц достигали величины 10 нм, при этом средний размер кремниевых наночастиц составлял 6 нм. Аналогичные размеры для нанокompозитных пленок, осажденных при температуре кремниевых подложек 300 °С, составляли 15 и 10 нм соответственно.

Исследование фотолюминесценции в формируемых пленках показало, что максимум спектров излучения находится в тех же диапазонах длин волн, что и при электролюминесценции. Разница положений пиков не превышала 10–20 нм. Такое несоответствие пиков может быть объяснено тем, что при регистрации фотолюминесценции исследуется приповерхностная область пленок, а в случае электролюминесценции сигнал регистрируется из более глубоких областей исследуемых пленок.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики лавинных диодов, работающих в режиме фотодиодов. Как видно из характеристик, световой сигнал регистрируется в диапазоне обратного смещения от 0 до 12 В. После превышения величины обратного смещения 12 В вольт-амперные характеристики со световым экспонированием и без него практически не различаются, что может быть объяснено внутренним светоизлучением вследствие лавинного пробоя. Здесь же для сравнения представлена характеристика исследуемых структур при экспонировании от внешнего оптического источника – вольфрамовой лампы накаливания, обеспечивающей поверхностную плотность мощности излучения 100 Вт/см². Отклик исследуемых структур на свет вольфрамовой лампы практически не отличается от отклика на излучение лавинного светодиода при напряжении смещения 15 В и токе 30 мА, что позволяет говорить о соизмеримости оптического сигнала обоих источников света.

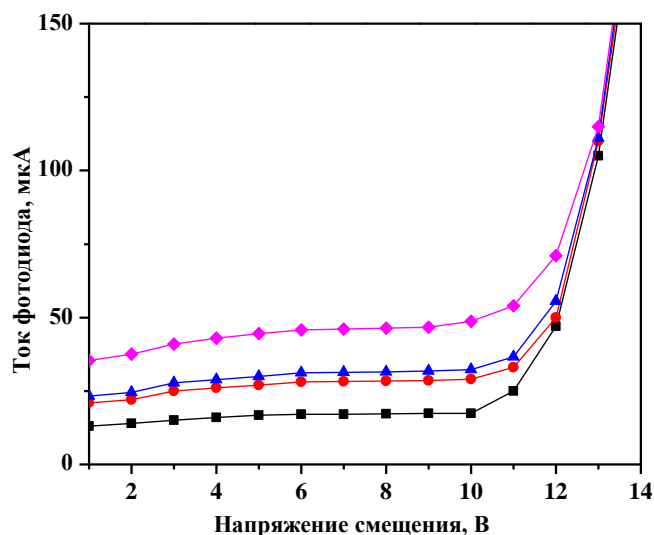


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики лавинных диодов при различных методах оптического экспонирования: квадраты – темновая характеристика, круги – оптическое экспонирование лавинным светодиодом при токе 30 мА; треугольники – оптическое экспонирование вольфрамовой лампой; ромбы – оптическое экспонирование лавинным светодиодом с импульсным режимом питания (скважность импульса – 3, усредненное значение тока – 30 мА)

Fig. 4. Current-voltage characteristics of avalanche diodes for various methods of light exposure: squares – dark characteristic, circles – light exposure by avalanche LED at a current at 30 mA; triangles – light exposure with a tungsten lamp; rhombs – light exposure by avalanche LED with a pulsed power mode (duty cycle –3, average current value – 30 mA)

Как видно из рис. 4, при импульсном режиме работы лавинного светодиода отклик фотодиода увеличивается более чем в 2 раза для одинаковых усредненных значений токов через светодиод. То есть эффективность оптопары увеличивается при увеличении амплитудного значения тока светодиода. При этом в интервалах между импульсами имеет место рассеивание джоулевого тепла, что обеспечивает надежную работу всей системы.

Отметим, что работа светодиода при увеличении тока в непрерывном (постоянном) режиме приводит к неконтролируемому разогреву и перегоранию металлических электродов. Таким образом, проведенные исследования показали, что коэффициент преобразования по току исследуемой оптоэлектронной системы может быть увеличен в несколько раз за счет использования импульсного режима работы лавинного светодиода.

Особое внимание следует уделить стабильности функционирования лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу. Измерения интенсивности светоизлучения при напряжении 14 В и токе 40 мА (рабочая площадь диода 0,01 мм²) в течение 1000 ч непрерывного функционирования показали отсутствие заметных деградационных эффектов. При этом отклонение интенсивности светоизлучения от среднего значения не превышало 10 %, что лучше аналогичного параметра для светодиодов на основе пористого кремния [4]. Далее следует отметить стабильность параметров и характеристик лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния при их хранении без электрического смещения. В частности, измерение электрических и оптических параметров светодиодов после двух лет хранения не выявили их заметного изменения, что еще раз демонстрирует преимущество данных светодиодов по сравнению со светодиодами на основе пористого кремния.

Заключение

Разработаны конструкция и технология изготовления межчиповых оптических межсоединений на лавинных светодиодах на основе наноструктурированного кремния. При этом спектр излучения светодиодов зависит от размеров кремниевых наночастиц, встроенных в матрицу анодного оксида алюминия, и определяется технологическими режимами их формирования. Среди основных характеристик разработанной системы

необходимо отметить коэффициент преобразования по току (эффективность оптопры), который достигает 0,2% при импульсном режиме работы лавинных светодиодов, что открывает новые перспективы для развития кремниевой оптоэлектроники.

References

1. Newman R. Visible light from a silicon p-n junction. *Physical Review*. 1955;100(2):700-703. DOI: 10.1103/PhysRev.100.700.
2. Chynoweth A., McKay K. Photon emission from avalanche breakdown in silicon. *Physical Review*. 1956;102(2):369-376. DOI: 10.1103/PhysRev.102.369.
3. Richter A., Steiner P., Kozlowski F., Lang W. Current-induced light emission from a porous silicon device. *IEEE Electron Device Letters*. 1991;12(12):691-692. DOI: 10.1109/55.116957.
4. Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S., Masini G., La Monica S., Maiello G., Ferrari A. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon-aluminum Schottky junction device. *Applied Physics Letters*. 1996; 68(15): 2108-2110. DOI: 10.1063/1.115892.
5. Lazarouk S., Baturevich A. [Perspectives of avalanche light emitting diodes based on porous silicon for optical interconnects]. *Izvestija Beloruskoj inzhenernoj akademii = Belarus Engineering Academy Letters*. 1999;7(01&02):147-149. (In Russ.)
6. Lazarouk S., Jaguiro P., Leshok A., Borisenko V. Avalanche porous silicon light emitting diodes for optical intra-chip interconnects. *Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology*. World Scientific. 2001;MMN2000:41-44. DOI: 10.1142/9789812810861_0009.
7. Lazarouk S., Leshok A., Labunov V., Borisenko V. Efficiency of avalanche light-emitting diodes based on porous silicon. *Semiconductors*. 2005;39(1):136-138. DOI: 10.1134/1.1852663.
8. Kuznetsov V., Andrienko I., Haneman D. High efficiency blue-green electroluminescence and scanning tunneling microscopy studies of porous silicon. *Applied Physics Letters*. 1998;72(25):3323-3325. DOI: 10.1063/1.121592.
9. Gelloz B., Nakagawa T., Koshida N. Enhancement of the quantum efficiency and stability of electroluminescence from porous silicon by anodic passivation. *Applied Physics Letters*. 1998;73(14):2021-2023. DOI: 10.1063/1.122355.
10. Karsenty A., Sa'ar A., Ben-Yosef N., Shappir J. Enhanced electroluminescence in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor transistors with thin silicon layer. *Applied Physics Letters*. 2003;82(26):4830-4832. DOI: 10.1063/1.1587877.
11. Chatterjee A., Bhuya B., Schrimpf R. High-speed light modulation in avalanche breakdown mode for Si diodes. *IEEE Electron Device Letters*. 2004;25(9):628-630. DOI: 10.1109/LED.2004.834247.
12. Snyman L.W., Aharoni H., Du Plessis M. A dependency of quantum efficiency of silicon CMOS n/sup+/pp/sup+/LEDs on current density. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2005;17(10):2041-2043. DOI: 10.1109/LPT.2005.856448.
13. Snyman L.W., Du Plessis M., Aharoni H. Injection-avalanche-based n+ pn silicon complementary metal-oxide-semiconductor light-emitting device (450-750 nm) with 2-order-of-magnitude increase in light emission intensity. *Japanese journal of Applied physics*. 2007;46(4B):2474-2480. DOI: 10.1143/JJAP.46.2474.
14. Du Plessis M., Venter P.J., Bellotti E. Spectral characteristics of hot electron electroluminescence in silicon avalanching junctions. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2013;49(7):570-577. DOI: 10.1109/JQE.2013.2260724.
15. Kulakci M., Turan R. Improvement of light emission from Tb-doped Si-based MOS-LED using excess Si in the oxide layer. *Journal of Luminescence*. 2013;137:37-42. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.11.005.
16. Ogudo K.A., Snyman L.W., Polleux J.-L., Viana C., Tegegne Z., Schmieder D. 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*. 2014;8991:899108(1-16). DOI: 10.1117/12.2038079.
17. Xu K. Electro-optical modulation processes in Si-PMOSFET LEDs operating in the avalanche light emission mode. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014;61(6):2085-2092. DOI: 10.1109/TED.2014.2318277.
18. Xu K. Silicon MOS optoelectronic micro-nano structure based on reverse-biased PN junction. *Physica Status Solidi (a)*. 2019;216(7):1800868(1-9). DOI: 10.1002/pssa.201800868.
19. 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(4):1612-1618. DOI: 10.1109/TED.2017.2669645.
20. Okhai T.A., Snyman L.W., Polleux J.-L. Wavelength dispersion characteristics of integrated silicon avalanche LEDs: potential applications in futuristic on-chip micro-and nano-biosensors. *Proc. SPIE 10036, Fourth Conference on Sensors, MEMS, and Electro-Optic Systems*. 2017;10036:1003604(1-22). DOI: 10.1117/12.2264200.
21. Agarwal V., Dutta S., Annema A., Hueting R., Schmitz J., Lee M., Charbon E., Nauta B. Optocoupling

- in CMOS. *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*.2018(IEMD18):739-742. DOI: 10.1109/IEDM.2018.8614523.
22. Xu K., Chen Y., Okhai T.A., Snyman L.W. Micro optical sensors based on avalanching silicon light-emitting devices monolithically integrated on chips. *Optical Materials Express*. 2019;9(10):3985-3997. DOI: 10.1364/OME.9.003985.
23. Krakars M., Kneevic T., Nanver L. Reverse breakdown and light-emission patterns studied in Si PureB SPADs. *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. 2019;MIPRO2019:30-35. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757007.
24. Lazarouk S., Leshok A., Kozlova T., Dolbik A., Le Dinh V., Ilkov V., Labunov V. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 2019;18(3&4):1940091(1-5). DOI: 10.1142/S0219581X1940091X.
25. Lazarouk S., Sasinovich D., Katsuba P., Labunov V., Leshok A., Borisenko V. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina. *Semiconductors*. 2007;41(9):1109-1112. DOI: 10.1134/S1063782607090163.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

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

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

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

Перко С.Л., аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Information about the authors

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

Leshok A.A., PhD, Head of Center 4.11 of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dolbik A.V., Research Worker of laboratory 4.12 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Perko S.L., PG student of Micro- and nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lazarouk S.K., DSci., Head of laboratory 4.12 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

20013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 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 str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
e-mail:levi.ntv@gmail.com
Le Dinh Vi