

Литература

1. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing / X. Wang [et al.] // Proc. of SPIE. – 2014. – Vol. 9260. – P. 92604L.
2. Busck, J. High-accuracy 3D laser radar / J. Busck, H. Heiselberg // Proc. of SPIE. – 2004. – Vol. 5412. – P. 257–263.
3. Goehler, B. Range accuracy of a gated-viewing system as a function of the number of averaged images / B. Goehler, P. Lutzmann // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8542. – P. 854205.
4. Wang, X. Impact and application of echo broadening three-dimensional range-gated imaging / X. Wang, Y. Zhou, Y. Liu // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8558. – P. 855823.
5. Закономерности формирования изображения и определение расстояния до объекта при его движении относительно активно-импульсной системы видения / В. А. Горобец [и др.] // Журн. прикл. спектр. – 2015. – Т. 82, № 1. – С. 68–75.
6. Карасик, В. Е. Лазерные системы видения : учеб. пособие / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 352 с.
7. Кунцевич, Б. Ф. Особенности пространственно-энергетического профиля зоны видимости активно-импульсных систем видения на наклонных трассах / Б. Ф. Кунцевич, Д. В. Шабров // Журн. прикл. спектр. – 2022. – Т. 89, № 2. – С. 260–268.
8. Kuntsevich, B. F. A simple method for determining distances by range-gated vision systems with different forms of illuminating pulses / B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov // Proc. of SPIE. – 2019. – Vol. 11159. – P. 1115910.
9. Кунцевич, Б. Ф. Особенности формирования зоны видимости активно-импульсными системами видения на малых дистанциях / Б. Ф. Кунцевич, В. П. Кабашников // Журн. прикл. спектр. – 2020. – Т. 87, № 6. – С. 984–989.
10. Gated viewing for target detection and target recognition / O. Steinvall [et al.] // Proc. of SPIE. – 1999. – Vol. 3707. – P. 432–448.
11. Закономерности формирования изображения и определение расстояния до объекта при его движении относительно активно-импульсной системы видения / В. А. Горобец [и др.] // Журн. прикл. спектр. – 2015. – Т. 82, № 1. – С. 68–75.
12. Кунцевич, Б. Ф. Закономерности формирования зоны видимости активно-импульсными системами видения при фиксированном расстоянии задержки с учетом формы импульсов подсветки / Б. Ф. Кунцевич, Д. В. Шабров // Журн. прикл. спектр. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 478–484.

B. KUNTSEVICH, I. PUCHKOUSKI

SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”,
Minsk, Belarus; e-mail: bkun@ifanbel.bas-net.by

ACCOUNTING FOR THE NOISE THRESHOLD IN ACTIVE-PULSE VISION SYSTEMS

By means of numerical simulation, it has been established that when the energy of the noise threshold E_{NT} is taken into account, the length of the visibility zone ΔS_{VZ} , in particular, decreases with the increase of the delay distance. The fixed value of the visibility zone length ΔS_{VZ}^T used earlier in the literature is valid for cases where the maximum value of the signal contrast achieved within the visibility zone is close to unity. Otherwise, the condition $\Delta S_{VZ} < \Delta S_{VZ}^T$ is realized. A decrease in the length of the visibility zone with an increase in the delay distance has been experimentally confirmed.

Keywords: active-pulse vision system, visibility zone length, signal contrast, noise threshold energy.

Поступила 4 ноября 2022 г.

УДК 621.315.5/6

С. К. ЛАЗАРУК¹, В. В. ДУДИЧ¹, А. Ю. КЛЮЦКИЙ¹,
А. В. ДОЛБИК¹, А. А. ЛЕШОК¹, В. Н. ДУДАРЕНКО¹,
А. А. ЯРМОЛЬЧИК¹, В. А. ЛАБУНОВ¹, Е. П. КИЦЮК²,
Р. М. РЯЗАНОВ², А. С. БАСАЕВ², В. В. СВЕТУХИН²

¹БГУИР, Минск, Беларусь; e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
²НПК «Технологический центр», Москва, Россия;

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЛАВИННЫХ СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Продемонстрирована совместимость технологии изготовления лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния с технологией кремниевых КМОП ИС. Показано, что лавинные светодиоды обладают как светоизлучающими, так и фоточувствительными свойствами в зависимости от напряжения обратного смещения. Проведен анализ электрофизических параметров лавинных светодиодов на кремнии. Рассмотрено использование лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния как для

гальванической развязки ИС, так и для быстродействующих оптических межсоединений ИС.

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

Введение. Впервые об излучении света кремниевыми структурами во время лавинного пробоя при обратном смещении р-п-перехода сообщалось в работах [1, 2]. Затем похожее явление наблюдалось и при обратном смещении р-п-переходов на основе наноструктурированного (пористого) кремния [3]. Однако во всех этих случаях светоизлучение было неравномерно по площади р-п-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 [4–11], что позволило создать кремниевые лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния [12, 13]. Далее последовали работы, в которых сообщалось об улучшении параметров лавинных светодиодов, прежде всего эффективности и стабильности излучения, а также быстродействия [14–16]. Важно отметить, что предложенная конструкция светоизлучающих диодов на основе наноструктурированного кремния использовалась и модернизировалась другими исследовательскими группами, в частности из Австралии [17] и Японии [18], что позволило увеличить внешнюю эффективность светоизлучения до 10^{-3} . При проведении анализа литературных источников, становится очевидным, что после 2004 г. лавинные кремниевые светодиоды активно исследуют ученые из Америки, Европы (Нидерланды, Франция, Дания, Швейцария, Хорватия, Россия), Азии (Израиль, Япония, КНР, Иран) и Австралии [19–29].

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 [20],

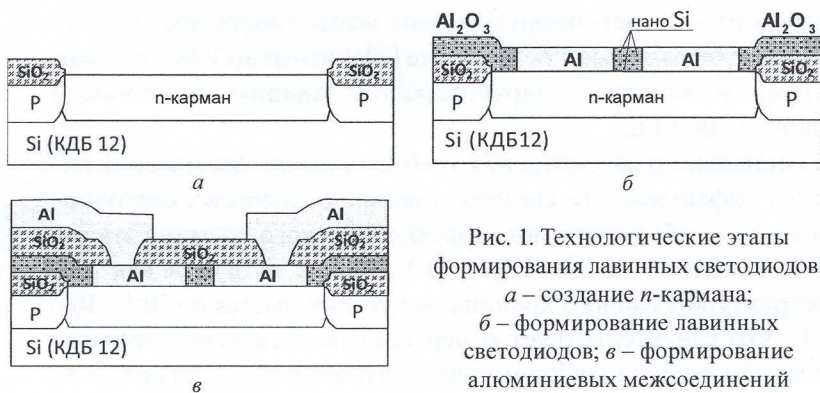
при этом ими теоретически показана возможность достижения длительности импульса 7 пс. В работе [22] ученых из ЮАР и Франции теоретически прогнозируется работа лавинных светодиодов на частоте 300 ГГц.

Специального рассмотрения требует уровень достижения параметра эффективности светоизлучения. В лавинных светодиодах на основе объемного монокристаллического кремния эта величина находится в диапазоне $10^{-8} \dots 10^{-4}$, в то время как для наноструктурированного кремния она увеличивается до $10^{-4} \dots 10^{-2}$ [4, 14], что свидетельствует о перспективности использования именно наноразмерных кремниевых структур для создания светодиодов.

В настоящей работе показано, что лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния могут быть изготовлены по технологии, совместимой с технологией КМОП ИС. Также в исследовании представлены как светоизлучающие, так и фоточувствительные свойства этих диодов, что позволяет использовать их для создания быстродействующих оптических межсоединений в интегральной электронике.

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. Значит, до формирования диодов кремниевые пластины прошли типовой маршрут изготовления КМОП ИС до операции создания *n*-карманов в окнах разделительного диэлектрика, как это показано на рис. 1, а. *N*-Карманы формировали ионным легированием (доза и энергия ионов – 0,8 мкКл и 75 кэВ соответственно) с последующим отжигом при температуре 1200 °С в течение 9 ч.

Ключевыми используемыми технологическими операциями при формировании лавинных светодиодов являются: 1) осаждение алюминиево-кремниевой нанокompозитной пленки магнетронным распылением составной мишени, состоящей из алюминия (75 ат.%) и кремния (25 ат.%) (содержание примесных элементов – менее 1 %) (толщина пленки – 1,0 мкм); 2) фотоли-



тография с рисунком электродов светодиодов; 3) локальное сквозное электрохимическое анодирование алюминиево-кремниевой пленки, при котором алюминий превращается в оксид алюминия, а кремниевые наноструктуры частично оксидируются, формируя кремниевые кластеры, покрытые оксидом кремния и встроенные в матрицу оксида алюминия (рис. 1, б).

Далее сформированные светодиодные структуры на кремниевых подложках проводили по стандартному маршруту изготовления КМОП ИС с двухуровневой алюминиевой разводкой и пассивацией алюминиевых межсоединений (рис. 1, в).

Более подробно следует описать технологическую операцию локального сквозного электрохимического анодирования алюминия. В качестве электролита использовали 0,3 М водные растворы серной, щавелевой и ортофосфорной кислот соответственно. Анодирование проводили в гальваностатическом режиме при плотности анодного тока 10 мА/см². Окончание процесса осуществляли при увеличении анодного напряжения до уровня, на 50 % превышающего среднее значение этого параметра в течение трех первых минут анодного процесса.

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

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлена микрофотография сформированных диодных структур, интегри-

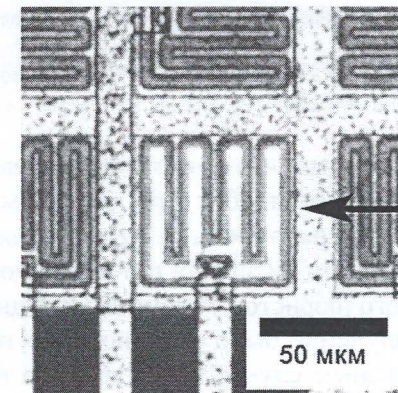


Рис. 2. Микрофотография сформированных диодных структур, интегрированных в КМОП ИС после подачи напряжения

рованных в КМОП ИС. После подачи напряжения, превышающего значение, соответствующее лавинному пробоему вдоль периметра диодной структуры, наблюдается излучение света (показано стрелкой).

На рис. 3 приведены вольтамперные характеристики светодиодных структур, измеренные при различных температурах кремниевой подложки. Как видно из этого рисунка, характеристики подтверждают наличие лавинного пробоя при обратном смещении, проявляющегося в увеличении напряжения пробоя с ростом температуры. Кроме этого, на рис. 3 на вставках представлены микрофотографии светодиодных структур при различных напряжениях смещения. Как видно из микрофотографий, светоизлучение в виде горячих точек появляется в местах с максимальной напряженностью электрического поля (угловые точки алюминиевых электродов). Далее при увеличении напряжения смещения отдельные излучающие точки сливаются в линии вдоль периметра алюминиевых контактов. Дальнейшее увеличение смещения обеспечивает расширение этих линий и следовательно, увеличение общей интенсивности светоизлучения. Вышеотмеченные режимы светоизлучения представляют интерес для различных применений. В частности, точечное светоизлу-

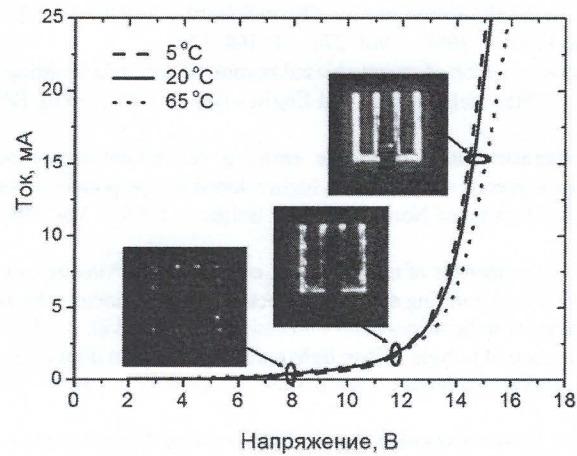
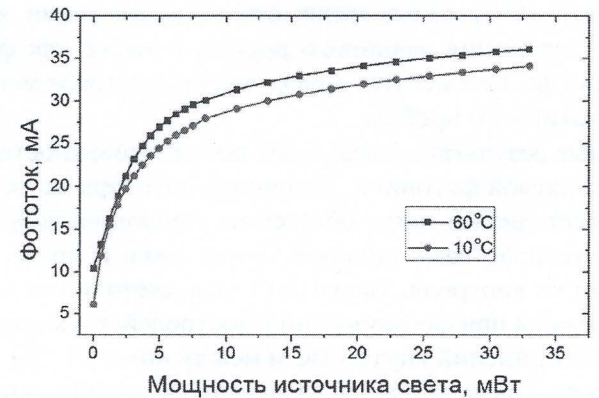


Рис. 3. Вольтамперные характеристики светодиодных структур, измеренные при различных температурах кремниевой подложки

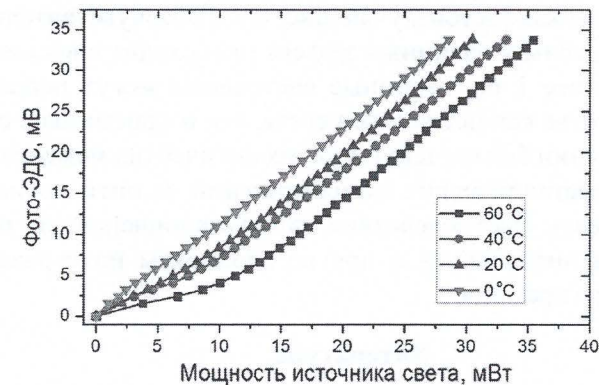
чение может быть использовано в качестве генератора случайных чисел (единичных фотонов) при регистрации света в режиме единичных фотонов. Также точечное светоизлучение может быть использовано для светоизлучения в терагерцовом диапазоне для быстродействующих оптоэлектронных устройств. Именно при уменьшении площади лавинных светодиодов до 1 мкм^2 ожидается уменьшение временных задержек до величин менее 1 псек, что позволит светодиодам работать в терагерцовом диапазоне, так как временной отклик лавинного пробоя составляет 0,1 псек [30]. Отмеченные выше результаты открывают новые возможности для развития кремниевой оптоэлектроники, способной значительно увеличить быстродействие современных интегральных микросхем.

Исследуемые диоды при напряжениях, превышающих напряжение лавинного пробоя ($U_{op} = 6-7 \text{ В}$), излучают свет. Эти же диоды при $U_{op} < 6 \text{ В}$ демонстрируют фоточувствительные свойства.

Фототок и фото-ЭДС регистрировали в исследуемых диодах при освещении их соседним светодиодом. На рис. 4, а показана зависимость фототока диодов от мощности светового потока. Фототок измеряли при смещении диода 1 В и при различных



а



б

Рис. 4. Фототок (а) и фото-ЭДС (б) в исследуемых диодах в зависимости от мощности светового потока

температурах. При увеличении светового потока до 5 мВт наблюдается значительное увеличение фототока до 25–27 мкА. Далее с ростом мощности светового потока происходит переход этой зависимости в стадию насыщения со стабилизацией фототока на уровне 35 мкА. На рис. 4, б показана зависимость фото-ЭДС от мощности света соседнего светодиода при различных температурах. Низкие температуры более привлекательны для работы диодов. Таким образом, разработанные лавинные диоды

могут работать в качестве источника света при смещении, которое больше напряжения лавинного пробоя, а также как фотоприемники или фотоэлементы – при смещении, которое меньше напряжения лавинного пробоя.

Полученные результаты открывают новые возможности для развития кремниевой фотоники. Например, оптопары на основе кремниевых светодиодов могут обеспечить гальваническую развязку между устройствами силовой электроники и интегральными схемами их контроля. Также лавинные светодиоды могут быть использованы при формировании быстродействующих оптических межсоединений внутри ИС и между ними [31–35].

Заключение. Проведенные исследования показали, что лавинные диоды в зависимости от напряжения обратного смещения демонстрируют как светоизлучающие, так и фоточувствительные свойства. Поскольку лавинный эффект происходит с временной задержкой менее 1 пс, лавинные светодиоды могут использоваться в качестве как источников света, так и приемников света при изготовлении быстродействующих оптических межсоединений. Замена металлических межсоединений на оптические позволит повысить быстродействие, помехозащищенность, плотность записи информации и другие параметры интегральных схем на основе кремния.

Литература

1. Newman, R. Visible light from a silicon p-n junction / R. Newman // *Physical Review*. – 1955. – Vol. 100, № 2. – P. 700–703.
2. Chynoweth A., McKay K. Photon emission from avalanche breakdown in silicon / A. Chynoweth, K. McKay // *Physical Review*. – 1956. – Vol. 102, № 2. – P. 369–376.
3. Current-induced light emission from a porous silicon device / A. Richter [et al.] // *IEEE Electron Device Letters*. – 1991. – Vol. 12, № 12. – P. 691–692.
4. Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon-aluminum Schottky junction device / S. Lazarouk [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 1996. – Vol. 68, № 15. – P. 2108–2110.
5. Pecularity porous silicon formed in transition regime / S. Lazarouk [et al.] // *MRS Proc.* – 1995. – Vol. 358. – P. 357–362.
6. Electroluminescence from aluminum-porous silicon reverse bias Schottky diodes formed on the base of highly doped n-type polysilicon / S. Lazarouk [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1996. – Vol. 276. – P. 296–298.

7. Visible light from aluminum-porous silicon Schottky Junctions / S. Lazarouk [et al.] // *Thin Solid Films*. – 1996. – Vol. 276. – P. 168–170.
8. Optical characterization of reverse biased porous silicon light emitting diode / S. Lazarouk [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 2000. – Vol. B69-70. – P. 114–117.
9. Electrical characterization of visible emitting electroluminescent Schottky diodes based on n-type porous silicon and on highly doped n-type porous polysilicon / S. Lazarouk [et al.] // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 1996. – Vol. 198–200. – P. 973–976.
10. Photophysical properties of nano Si/SiOX composites in Al/composite mono Si structures for green light emitting and photodetector-Schottky diodes / Buzaneva E. [et al.] // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2000. – Vol. 3. – P. 529–537.
11. Characterization of porous silicon light emitting diodes in high current density conditions / S. LaMonica [et al.] // *Solid State Phenomena*. – 1997. – Vol. 54. – P. 21–26.
12. Lazarouk, S. Perspectives of avalanche light emitting diodes based on porous silicon for optical interconnects / S. Lazarouk, A. Baturevich // *Izvestija Belorusskoj inzhenernoj akademii – Belarus Engineering Academy Letters*. – 1999. – Vol. 7, № 1, 2. – P. 147–149.
13. Avalanche porous silicon light emitting diodes for optical intra-chip interconnects / S. Lazarouk [et al.] // *Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology*. World Scientific. – 2001. – P. 41–44.
14. Efficiency of avalanche light-emitting diodes based on porous silicon / S. Lazarouk [et al.] // *Semiconductors*. – 2005. – Vol. 39, № 1. – P. 136–138.
15. Electroluminescence from Nanostructured Silicon Embedded in Anodic Alumina / S. Lazarouk [et al.] // *Semiconductors*. – 2007. – Vol. 41, № 9. – P. 1109–1112.
16. Stable electroluminescence of nanostructured silicon embedded into anodic alumina / P. Katsuba [et al.] // *Physica E : Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2009. – Vol. 41. – P. 931–934.
17. Kuznetsov, V. High efficiency blue-green electroluminescence and scanning tunneling microscopy studies of porous silicon / V. Kuznetsov, I. Andrienko, D. Haneman // *Applied Physics Letters*. – 1998. – Vol. 72, № 25. – P. 3323–3325.
18. Gelloz, B. Enhancement of the quantum efficiency and stability of electroluminescence from porous silicon by anodic passivation / B. Gelloz, T. Nakagawa, N. Koshida // *Applied Physics Letters*. – 1998. – Vol. 73, № 14. – P. 2021–2023.
19. Enhanced electroluminescence in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor transistors with thin silicon layer / A. Karsenty [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol. 82, № 26. – P. 4830–4832.
20. Chatterjee, A. High-speed light modulation in avalanche breakdown mode for Si diodes / A. Chatterjee, B. Bhuvu, R. Schrimpf // *IEEE Electron Device Letters*. – 2004. – Vol. 25, № 9. – P. 628–630.
21. Kulacki, M. Improvement of light emission from Tb-doped Si-based MOS-LED using excess Si in the oxide layer / M. Kulacki, R. Turan // *Journal of Luminescence*. – 2013. – Vol. 137. – P. 37–42.

22. 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. 899108(1-16).

23. Xu, K. Silicon MOS optoelectronic micro-nano structure based on reverse-biased PN junction / K. Xu // Physica Status Solidi A. – 2019. – Vol. 216, № 7. – P. 1800868(1-9).

24. The avalanche-mode superjunction LED / S. Dutta [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Vol. 64, № 4. – P. 1612–1618.

25. Okhai, T. A. Wavelength dispersion characteristics of integrated silicon avalanche LEDs: potential applications in futuristic on-chip micro-and nano-biosensors / T. A. Okhai, L. W. Snyman, J.-L. Polleux // Proc. SPIE 10036, Fourth Conference on Sensors, MEMS, and Electro-Optic Systems. – 2017. – Vol. 10036. – P. 1003604(1-22).

26. Optocoupling in CMOS / V. Agarwal [et al.] // IEEE International Electron Devices Meeting. – 2018. – P. 739–742.

27. Electrical TCAD study of the low-voltage avalanche-mode superjunction LED / R. J. E. Hueting [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2021. – Vol. 42, № 8. – P. 1188–1191.

28. Dutta, S. Avalanche-mode Si light-emitting transistor for narrow-band emission near 760 nm / S. Dutta, R. J. E. Hueting, G. J. Verbiest // IEEE Electron Device Letters. – 2022. – Vol. 43, № 10. – P. 1701–1704.

29. Krakrs, M. Reverse breakdown and light-emission patterns studied in Si pure B SPADs / M. Krakrs, T. Kneevic, L. Nanver // 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). – 2019. – P. 30–35.

30. 3D silicon photonic structures based on avalanche LED with interconnections through optical interposer / S. Lazarouk [et al.] // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, № 3, 4. – P. 1940091(1-5).

31. Lazarouk, S. Integrated optoelectronic unit based on porous silicon / S. Lazarouk, P. Jaguiro, V. Borisenko // Physica of Status Solidi A. – 1998. – Vol. 165. – P. 87–90.

32. On the Route Towards Si-based Optical Interconnects / S. K. Lazarouk [et al.] // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 50, № 1–4. – P. 81–86.

33. Progress in the field of integrated optoelectronics based on porous silicon / S. LaMonica [et al.] // Thin Solid Films. – 1997. – Vol. 297. – P. 261–264.

34. 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, № 3–4. – P. 495–498.

35. Si-based optoelectronic couple / Jaguiro, P. [et al.] // Physica E : Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2009. – Vol. 41. – P. 1094–1096.

S. LAZARUK¹, U. DUDZICH¹, A. KLIUTSKI¹,
A. DOLBIK¹, A. LESHOK¹, V. DUDARENKO¹,
A. YARMOLCHIK¹, V. LABUNOV¹, E. KITSYUK²,
R. RYAZANOV², A. BASAYEV², V. SVETUKHIN²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus; e-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
²SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia

PHOTOSENSITIVITY OF NANOSTRUCTURED SILICON AVALANCHE LEDS

The compatibility of nanostructured silicon-based avalanche LED manufacturing technology with silicon CMOS IC technology has been demonstrated. It is shown that avalanche LEDs have both light emitting and photosensitive properties depending on the reverse bias voltage. The analysis of electrical-physical parameters of avalanche light-emitting diodes on silicon is carried out. The use of avalanche LEDs based on nanostructured silicon is considered both for galvanic decoupling of ICs and for high-speed optical interconnects of ICs.

Keywords: avalanche LED, photodiodes, nanostructured silicon, electroluminescence, optical interconnects.

Поступила 8 ноября 2022 г.

УДК 53.06; 53.05

A. В. НЕСТЕРЁНОК, А. И. КОНОЙКО,
В. В. МАЛЮТИНА-БРОНСКАЯ, Д. В. СЕНЬКЕВИЧ

ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
Минск, Беларусь; e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИНФРАКРАСНЫХ КАМЕР

Представлена бесконтактная методика использования тепловизионной инфракрасной камеры для тестирования солнечных элементов (СЭ) и модулей. Данная методика позволяет оценивать деградацию параметров СЭ по анализу областей локального перегрева в местах дефектов, распределенных по площади. К таким дефектам, трудно определяемым визуальными и электрическими методами контроля, относятся: расслоение; трещины; деградация пассивации; светоиндуцированная деградация; коррозия припоя; выход из строя контактных площадок, или влажностная коррозия.

Ключевые слова: солнечный элемент, солнечный модуль, тепловизионная камера, термография.