

---

---

# ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

---

## SEMICONDUCTOR PHYSICS AND ENGINEERING

---

---

УДК 621.382

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРНЫХ ДИОДОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА

**В. В. БУСЛЮК<sup>1)</sup>, И. Ю. НЕРОДА<sup>1)</sup>, А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ<sup>2)</sup>,  
В. С. ПРОСОЛОВИЧ<sup>3)</sup>, Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ<sup>2)</sup>, Р. А. ЛАНОВСКИЙ<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>Научно-исследовательское унитарное предприятие «СКБ “Запад”»,  
ул. Суворова, 96/1, 224022, г. Брест, Республика Беларусь

<sup>2)</sup>Государственный центр «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы»  
ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>3)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики кремниевых диодов – генераторов шума, изготовленных по планарной технологии формирования цилиндрических  $p-n$ -переходов малого диаметра (менее 10 мкм) на основе подложек монокристаллического кремния ориентации (111) с удельным сопротивлением  $\rho$ ,

#### Образец цитирования:

Буслюк В. В., Нерода И. Ю., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Янковский Ю. Н., Лановский Р. А. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 95–99.

#### For citation:

Busliuk V. V., Neroda I. Y., Pyatlitski A. N., Prasalovich U. S., Yankouski Y. N., Lanouski R. A. Electrophysical parameters of the diodes for broadband noise generation. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 1. P. 95–99 (in Russ.).

#### Авторы:

**Виктор Вячеславович Буслюк** – главный инженер.

**Илона Юрьевна Нерода** – инженер-технолог.

**Александр Николаевич Петлицкий** – кандидат физико-математических наук; директор.

**Владислав Савельевич Просолович** – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.

**Юрий Николаевич Янковский** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.

**Роман Андреевич Лановский** – студент физического факультета.

#### Authors:

**Viktar Busliuk**, chief engineer.

*skbwest@rambler.ru*

**Iлона Neroda**, process engineer.

*i\_neroda@mail.ru*

**Aliaksandr Pyatlitski**, PhD (physics and mathematics); director.

*petan@tut.by*

**Uladzislau Prasalovich**, PhD (physics and mathematics), docent; leading researcher at the research laboratory of spectroscopy of the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

*prosolovich@bsu.by*

**Yuri Yankouski**, PhD (physics and mathematics); head of the research laboratory of spectroscopy of the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.

*yankouski@bsu.by*

**Raman Lanouski**, student at the faculty of physics.

*rommel81227@mail.ru*

равным  $0,03 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  ( $ND102 - ND104$ ), и  $\rho$ , равным  $0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  ( $ND201$ ). Глубина  $p - n$ -перехода, сформированного диффузией фосфора, составляет  $\sim 6 \text{ мкм}$ . При обратном включении напряжение пробоя для всех диодов возрастает с увеличением температуры измерений, что обусловлено уменьшением длины свободного пробега носителей заряда. Вольт-амперные характеристики при обратном смещении имеют активационный характер. Анализ показал, что во всех случаях зависимость более сильная, чем  $I_{\text{обр}} \sim U^n$ ,  $n \approx 1$ . Энергия активации данного процесса составляет  $0,25 - 0,45 \text{ эВ}$ . Это характерно для термической ионизации с глубоких примесных центров технологических (фоновых) примесей, таких как  $\text{Cu}$  и  $\text{Fe}$ . Вольт-фарадные характеристики очень слабо зависят от температуры, это свидетельствует о том, что концентрация данных центров в области объемного заряда  $p - n$ -перехода невелика по сравнению с уровнем легирования. Сделан вывод о том, что лавинный пробой  $p - n$ -перехода сильно локализован, носит микроплазменный характер и обусловлен ионизацией технологических примесей, распределенных неоднородно по объему кристалла и составляющих основу микроплазм.

**Ключевые слова:** диоды – генераторы шума; электрофизические параметры; микроплазмы.

## ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF THE DIODES FOR BROADBAND NOISE GENERATION

V. V. BUSLIUK<sup>a</sup>, I. Y. NERODA<sup>a</sup>, A. N. PYATLITSKI<sup>b</sup>,  
U. S. PRASALOVICH<sup>c</sup>, Y. N. YANKOUSKI<sup>b</sup>, R. A. LANOUSKI<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Science-Production Enterprise «SKB “West”»,  
Suvorova street, 96/1, 224022, Brest, Republic of Belarus

<sup>b</sup>JSC «Integral», Kazintsa street, 121A, 220108, Minsk, Republic of Belarus

<sup>c</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: yankouski@bsu.by

The volt-ampere and volt-farad characteristics of silicon diodes – noise generators fabricated by the planar technology for the formation of small diameter ( $<10 \text{ }\mu\text{m}$ ) cylindrical  $p - n$ -junctions on the basis of the (111) orientation monocrystal silicon substrates with  $\rho = 0.03 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$  ( $ND102 - ND104$ ) and  $\rho = 0.005 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$  ( $ND201$ ) are analyzed. A depth of the  $p - n$ -junction formed by diffusion of phosphorus is  $\sim 6 \text{ }\mu\text{m}$ . On reverse switching, the breakdown voltage for all diodes is growing with the increased measuring temperature due to a decrease in the mean free path of the charge carriers. With the reverse bias possess, the volt-ampere characteristics are activation in nature. As shown by the analysis performed, in all cases the dependence is stronger than  $I_{\text{rev}} \sim U^n$ ,  $n \approx 1$ . The activation energy of the process under study is within the range  $0.25 - 0.45 \text{ eV}$ . This is peculiar for thermal ionization from deep impurity centers of the technological (background) impurities such as  $\text{Cu}$  and  $\text{Fe}$ . The capacitance-voltage characteristics are insignificantly dependant on temperature pointing to the fact that the concentration of these centers in the vicinity of the  $p - n$ -junction volume charge is minor as compared with the doping level. It may be concluded that avalanche breakdown of the  $p - n$ -junction is strongly localized, microplasmic in its nature, and determined by ionization of the technological impurities which form the base of microplasmas inhomogeneously distributed over the crystal bulk.

**Key words:** diodes – noise generators; electrophysical parameters; microplasmas.

Воздействие шума на линейные диагностические системы генерирует принципиально новые эффекты, которые не могут быть реализованы в его отсутствие [1]. Применение физических источников шума перспективно для создания случайных числовых последовательностей в целях защиты информации, а также диагностики оборудования методами модального анализа [2]. Для конкретного практического применения обязательным условием является наличие шума качественного с точки зрения случайности и оптимального по амплитудным и частотным характеристикам. Однако получение широкополосного шума со спектром, наиболее близким к однородному, определяется прежде всего режимом работы диодов-генераторов.

Основа работы современных полупроводниковых стабилитронов и генераторных диодов – ударная ионизация и лавинный пробой  $p - n$ -перехода [3], который сильно локализован и носит микроплазменный характер. Микроплазмы (МП), как правило, располагаются в местах скопления различного рода структурных дефектов и несовершенств. Надежность лавинных диодов и их способность выдерживать кратковременные перегрузки в обратном направлении целиком определяются совокупностью МП-прибора. Поэтому примесная атмосфера и структурные дефекты микроплазменных каналов являются основополагающими факторами при разработке генераторных диодов в связи с их возможным влиянием на основные параметры вольт-амперных характеристик диодов. Если в микроплазменном

канале имеются глубокие центры (ГЦ), то эмиссия с них носителей заряда существенно влияет на параметры пробоя даже в тех случаях, когда концентрация ГЦ значительно меньше концентрации легирующих примесей. Для существования МП необходимо наличие структурных несовершенств, либо вызывающих локальные искажения электрического поля в области, на которой падение напряжения составляет около 1 В, либо содержащих ловушки с высокой плотностью заряда, создающего внутреннее электрическое поле [4; 5]. В связи с этим для разработки и корректировки топологической структуры и технологических параметров изготовления приборов актуально исследование электрофизических параметров генераторных диодов.

Исследованы электрофизические параметры кремниевых диодов – генераторов шума *ND102* – *ND104*, изготовленных по планарной диффузионной технологии формирования цилиндрических *p-n*-переходов малого диаметра (менее 10 мкм) с защитой от поверхностного пробоя [3] на основе подложек монокристаллического кремния марки 3А2яКДБ0,03(111)4<sup>0</sup>-460, и диодов – генераторов шума *ND201*, созданных по аналогичной технологии на основе подложек монокристаллического кремния марки 3А2яКДБ0,005(111)4<sup>0</sup>-460. Глубина *p-n*-перехода, сформированного диффузией фосфора, составляла ~6 мкм. Амплитуда шумов в области лавинного пробоя достигала ~100 мВ при токе 50 мкА, верхняя граница однородных шумов ≤3 МГц. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) диодов в целях определения влияния глубоких центров на электрофизические параметры приборов проводились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A и зондовой станции Cascade Summit11000 в интервале температур от –60 до 125 °С. Структурные дефекты подложки выявлялись путем травления в селективном хромовом травителе.

Исследования прямых ветвей ВАХ показали, что для всех диодов они имеют экспоненциальную зависимость, а напряжение открывания диодов увеличивается с уменьшением температуры. Это обусловлено тем, что ток в прямом направлении определяется его диффузионной составляющей, зависящей как от величины концентрации неосновных носителей заряда, так и от температурного изменения ширины запрещенной зоны.

Из представленных на рис. 1 ВАХ при обратном включении диодов видно, что для всех диодов с увеличением температуры напряжение пробоя возрастает, что обусловлено уменьшением длины свободного пробега носителей заряда вследствие уменьшения энергии, которую носитель может приобрести на длине свободного пробега в электрическом поле.

Обратные ветви ВАХ имеют активационный характер: при увеличении обратного напряжения  $U_{обр}$  ток диода  $I$  не остается постоянным и равным току насыщения  $I_0$ . Одной из причин увеличения обратного тока с ростом обратного напряжения является расширение области пространственного заряда, в результате чего увеличивается количество центров, с которых происходит генерация носителей заряда. Исследования ВФХ показали, что зависимость емкости от приложенного обратного смещения имеет вид  $C \sim U_{обр}^{-1/3}$ , что характерно для плавного *p-n*-перехода. В данном случае зависимость обратного тока от напряжения должна иметь следующий вид [6]:  $I_{обр} \sim U_{обр}^n$ , где показатель степени  $n \approx 1$ . Однако проведенный анализ показал, что во всех случаях имеется более сильная зависимость. Существенную роль поверхностной составляющей тока в данном эффекте следует исключить, поскольку, как сказано ранее, исследуемые диоды были изготовлены по планарной диффузионной технологии формирования цилиндрических *p-n*-переходов малого диаметра (<10 мкм) с защитой от поверхностного пробоя по методике [3]. Это позволяет сделать следующий вывод: в формировании обратного тока диодов существенную роль играет термическая генерация носителей с глубоких примесных уровней в области пространственного заряда *p-n*-перехода, расширяющейся с увеличением обратного напряжения. По измерениям температурных зависимостей обратного тока установлено, что энергия активации проводимости, в соответствии с величиной приложенного к *p-n*-переходу обратного напряжения, имеет значения в диапазоне 0,25–0,45 эВ. Такие глубокие примесные уровни характерны для технологических фоновых примесей железа и меди. При этом, как видно из рис. 1, а, для диодов *ND102* на кривых ВАХ имеет место резкое увеличение  $I_{обр}$  при  $U_{обр} \sim 3$  В. Это обусловлено, вероятно, термической генерацией носителей с глубоких уровней, связанных с ГЦ, при попадании их в область пространственного заряда и смещением уровня Ферми вследствие расширения области пространственного заряда при увеличении напряжения. Данный факт также позволяет говорить о неоднородном распределении технологических примесей с глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне по объему кристалла.

Следует отметить, что величины обратных токов для диодов *ND201* (см. рис. 1, в) во всех случаях меньше, чем для диодов *ND102* (см. рис. 1, а) и *ND104* (см. рис. 1, б). Это обусловлено различием в уровнях основного легирования и длинах экранирования Дебая, определяющих размеры области пространственного заряда, в которых происходит генерация носителей заряда, определяющих обратный ток диодов.

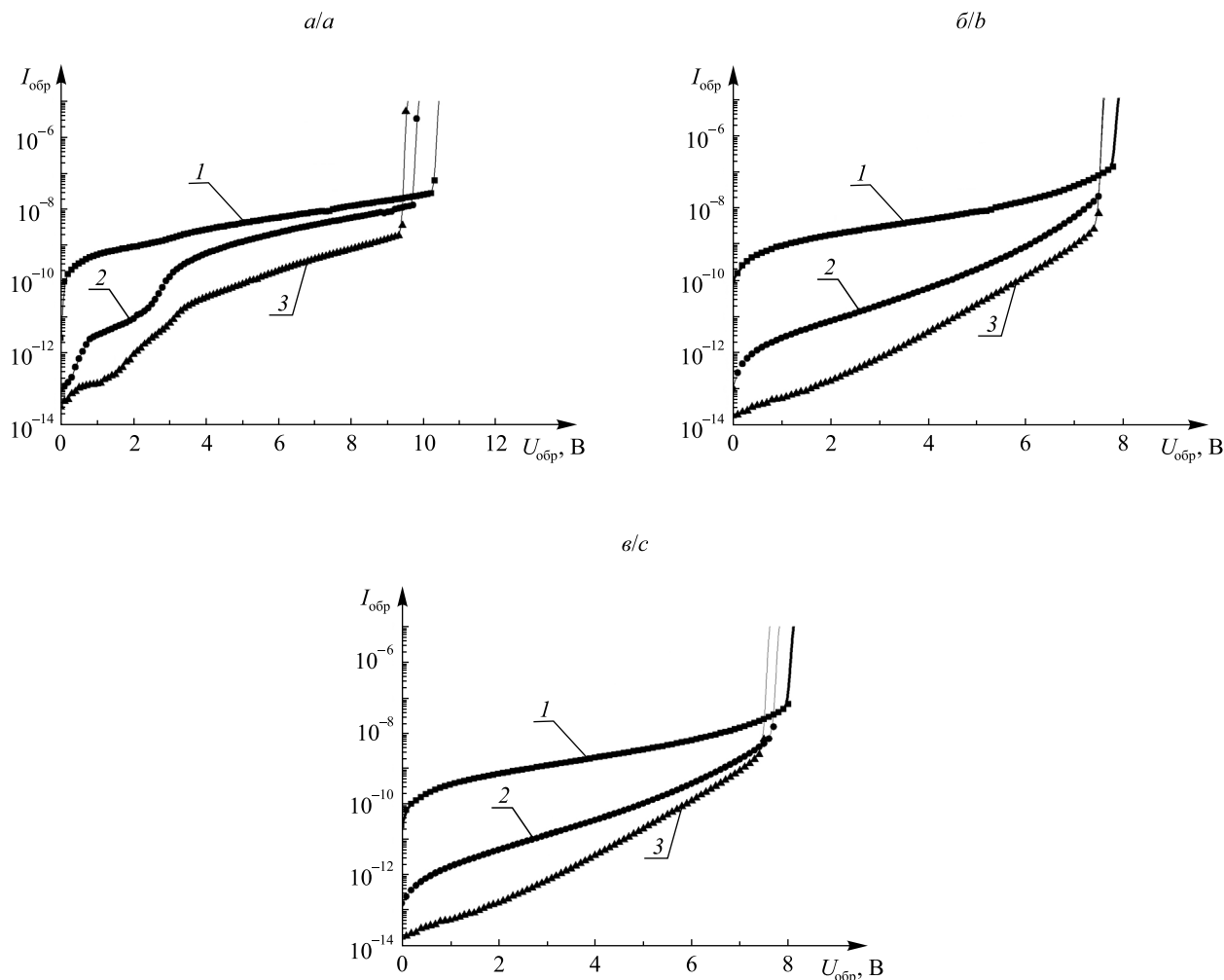


Рис. 1. Обратные ВАХ диодов: а – ND102; б – ND104; в – ND201.  
Температура измерений: 125 °С (1); 20 °С (2); –40 °С (3)  
Fig. 1. Reverse  $I$ - $V$  characteristics of diodes: а – ND102; б – ND104; в – ND201.  
Temperature of measuring: 125 °С (1); 20 °С (2); –40 °С (3)

Представленным на рис. 2 ВФХ диодов свойственна слабая зависимость емкости  $C$  от температуры, свидетельствующая о том, что концентрация глубоких центров невелика по сравнению с уровнем легирования и определяется структурными дефектами и технологическими (фоновыми) примесями в области объемного заряда  $p$  –  $n$ -перехода.

Полученные экспериментальные значения ВАХ и ВФХ свидетельствуют о том, что лавинный пробой  $p$  –  $n$ -перехода генераторных диодов не может быть обусловлен его «проколом» вследствие «шнурования» тока по пронизывающим его дислокациям. Действительно, как показали структурные исследования, плотность дислокаций в подложке невелика и не превышает значения  $100 \text{ см}^{-2}$ . После селективного травления поверхность подложки имеет «развитый» характер (рис. 3), обусловленный локальными микроскопическими неоднородностями распределения концентрации основной легирующей примеси бора, что характерно для сильнолегированных полупроводников.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что лавинный пробой  $p$  –  $n$ -перехода обусловлен включением МП. Это происходит в результате локального увеличения напряженности электрического поля на неоднородностях легирования кристалла и ионизации глубоких примесных центров в области пространственного заряда. Как основные легирующие, так и технологические примеси могут осаждаться на структурных несовершенствах кристаллической решетки в виде примесных атмосфер либо включений второй фазы. Присутствие примесных атмосфер легирующих примесей может приводить к локальному сужению области пространственного заряда и увеличению в этих местах напряженности электрического поля. Глубокие уровни, которые остаются заполненными в пределах области пространственного заряда, могут обуславливать также пробой  $p$  –  $n$ -перехода при их ионизации вследствие локального увеличения напряженности электрического поля.



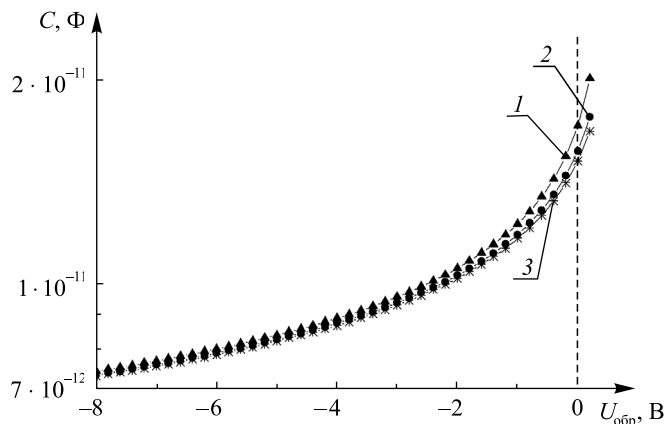


Рис. 2. Типичные ВФХ  $p-n$ -переходов диодов ND102 – ND104, ND201.

Температура измерений: 125 °C (1); 20 °C (2); –60 °C (3)

Fig. 2. Typical  $C-V$  characteristics of  $p-n$  junctions diodes: ND102 – ND104, ND201.

Temperature of measuring: 125 °C (1); 20 °C (2); –60 °C (3)



Рис. 3. Структура поверхности кремниевой подложки марки

3A2яКДБ0.03(111)4<sup>0</sup>-460 после обработки в селективном хромовом травителе  
Fig. 3. The structure of the surface of a silicon substrate brand 3A2яКДБ0.03(111)4<sup>0</sup>-460 after treatment with selective chrome etchant

Таким образом, экспериментально установлено, что лавинный пробой  $p-n$ -перехода генераторных диодов обусловлен, вероятно, включением МП, связанных с локальными неоднородностями легирования материала подложки, а также электрической ионизацией глубоких примесных центров технологических (фоновых) примесей (медь, железо), попадающих в монокристалл как при выращивании слитков по методу Чохральского, так и при технологическом процессе формирования диодной структуры. Величина обратного тока и, соответственно, пробой в генераторных диодах обусловлены ионизацией легирующих примесей, распределенных неоднородно по объему кристалла, составляющих основу МП. Форма обратной ветви ВАХ в области напряжений, предшествующих пробивному, существенно влияет на режим (вероятность) микроплазменного пробоя [7]. Точка наибольшей кривизны ВАХ, вероятно, определяет нижнюю границу диапазона напряжений эффективного образования и развития МП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / В. С. Анищенко [и др.] // УФН. 1999. Т. 169, № 1. С. 7–38.
2. Кремниевые диоды – генераторы шумовых импульсных последовательностей / О. К. Барановский [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : материалы II Междунар. конф. (Минск, 5–6 окт. 2006 г.). Минск, 2006. С. 58–61.
3. Булярский С. В., Грушко Н. С. Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. М., 1995.
4. Грехов И. В., Серезжкин Ю. Н. Лавинный пробой  $p-n$ -перехода в полупроводниках. Л., 1980.
5. Шокли У. Проблемы, связанные с  $p-n$ -переходами в кремнии // УФН. 1962. Т. 77, № 1. С. 161–196.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 т. М., 1984. Т. 1.
7. Флуктуации лавинного тока на нерегулярностях структур диодного типа / С. С. Дереченик [и др.] // Международная конференция, посвященная 50-летию МРТИ – БГУИР : материалы конф. (Минск, 18–19 марта 2014 г.). Минск, 2014. С. 109–112.

#### REFERENCES

1. Anishchenko V. S., Neiman A. B., Moss F., et al. Stochastic resonance: noise-enhanced order. *Usp. fiz. nauk.* 1999. Vol. 169, No. 1. P. 7–38 (in Russ.). DOI: 10.3367/UFNr.0169.199901c.0007.
2. Baranovskii O. K., Kuchinskii P. V., Buslyuk V. V., et al. Kremnievye diody – generatory shumovykh impul'snykh posledovatel'nostei. *Materialy i struktury sovremennoi elektroniki* : materialy II Mezhdunar. konf. (Minsk, 5–6 Oct. 2006). Minsk, 2006. P. 58–61 (in Russ.).
3. Bulyarskii S. V., Grushko N. S. Generatsionno-rekombinatsionnye protsessy v aktivnykh elementakh [Generation-recombination processes in the active elements]. Mosc., 1995 (in Russ.).
4. Grekhov I. V., Serezjkin Yu. N. Lavinni proboi  $p-n$ -perekhoda v poluprovodnikakh [Avalanche breakdown  $p-n$ -junction in semiconductors]. Leningr., 1980 (in Russ.).
5. Shokli U. Problemy, svyazannye s  $p-n$ -perekhodami v kremnii [Problems related to  $p-n$ -junction in silicon]. *Usp. fiz. nauk.* 1962. Vol. 77, No. 1. P. 161–196 (in Russ.). DOI: 10.3367/UFNr.0077.196205d.0161.
6. Zi S. Fizika poluprovodnikovykh priborov [Physics of semiconductor devices] : in 2 vol. Mosc., 1984. Vol. 1 (in Russ.).
7. Derechenik S. S., Buslyuk V. V., Yankovskii Yu. N., et al. Fluktuatsii lavinnogo toka na neregulyarnostyakh struktur diodnogo tipa [Fluctuations in the avalanche current on the irregularities of the structures of the diode type]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya, posvyashchennaya 50-letiyu MRTI – BGUIR* : materialy konf. (Minsk, 18–19 March 2014). Minsk, 2014. P. 109–112 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.10.2016.  
Received by editorial board 03.10.2016.