

# Деградация характеристик биполярных транзисторов на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в них нанометровых кластеров радиационных дефектов под действием нейтронного облучения

© И.Ю. Забавичев<sup>1</sup>, А.А. Потехин<sup>1</sup>, А.С. Пузанов<sup>1</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,¶</sup>, В.А. Козлов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: obolensk@rf.unn.ru

(Получена 27 апреля 2017 г. Принята к печати 12 мая 2017 г.)

Проведен расчет протекания носителей заряда в структуре биполярного транзистора на основе GaAs с тонкой базой при возникновении в его рабочей области одиночного кластера радиационных дефектов. Показано, что место зарождения кластера радиационных дефектов существенным образом влияет на степень деградации коэффициента усиления биполярного транзистора. Получена вероятностная оценка радиационно-индуцированного прокола базы в зависимости от ее толщины и флюенса нейтронов.

DOI: 10.21883/FTP.2017.11.45103.17

## 1. Введение

При упругом рассеянии быстрых нейтронов на атомах вещества последним передается энергия, значительно превосходящая энергию связи атомов в твердом теле. Энергии первично выбитых атомов обычно достаточно для выбивания из узлов кристаллической решетки следующих атомов, в результате чего образуется разветвленный каскад смещенных атомов. В дальнейшем в процессе диффузии возникшие элементарные точечные дефекты — вакансии и межузельные атомы — либо рекомбинируют, либо образуют устойчивые скопления — кластеры радиационных дефектов. Общепринятая теория образования каскадов смещений под действием проникающих излучений приведена в работе [1], которая в свою очередь основана на большом теоретическом и экспериментальном материале, изложенном в обзорах [2–4].

В работе [5] на примере Si показано, что локальная концентрация дефектов в области кластера может достигать  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , что на несколько порядков превосходит как концентрацию атомов примеси даже в сильно легированных областях полупроводниковых приборов, так и максимальную концентрацию точечных дефектов при облучении полупроводников потоками электронов высоких энергий и  $\gamma$ -квантов. Очевидные отличия в структуре повреждений облученных полупроводников неизбежно отражаются на их электрофизических характеристиках, что подтверждается экспериментально [6] на основе данных измерений методами нестационарной токовой и емкостной спектроскопии глубоких уровней, холловских характеристик и т.д. В частности, захват основных носителей заряда на глубокие уровни кластера радиационных дефектов приводит к образованию потенциального барьера для основных носителей заряда и потенциальной ямы для неосновных носителей заряда, что обуславливает снижение темпа захвата первых и

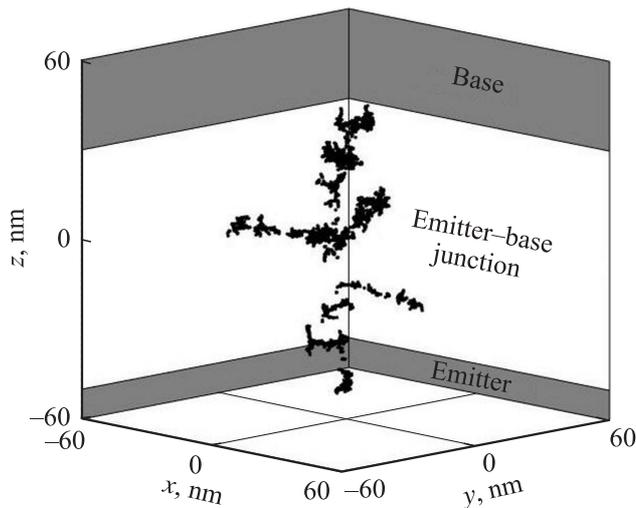
увеличение темпа захвата последних [7]. В итоге структурные повреждения материалов приводят к деградации рабочих характеристик полупроводниковых приборов, например коэффициента усиления транзистора.

В отличие от полевых транзисторов, в которых переносом неосновных носителей заряда обычно можно пренебречь, в биполярных транзисторных структурах электрический ток формируют оба типа носителей заряда. При этом носители заряда, являющиеся основными в эмиттере (например, электроны в  $n-p-n$ -транзисторе), при переходе в базу становятся неосновными и вновь становятся основными в коллекторе.

Большинство работ, посвященных анализу деградации характеристик полупроводниковых приборов при нейтронном воздействии, выполнено в приближении равномерного распределения кластеров радиационных дефектов в рабочей области, что справедливо при высоких уровнях радиационного воздействия ( $> 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), когда каскады смещений начинают частично перекрываться. Однако при низких уровнях нейтронного облучения, а также при воздействии атмосферных нейтронов [8] область пространственной локализации кластера радиационных дефектов будет играть решающую роль в степени повреждения полупроводникового прибора. Особую роль это играет в полупроводниковых приборах с субмикрометровыми и нанометровыми технологическими нормами, когда даже один кластер радиационных дефектов может так перекрыть рабочую область транзистора [9,10], что возникает радиационно-индуцированный прокол базы.

## 2. Методика моделирования

Моделирование каскада смещений в рабочей области транзистора проводили при помощи программы SRIM [11]. Установлено, что при воздействии потока



**Рис. 1.** Пространственное распределение дефектов в кластере, сформированном первичным атомом отдачи (Ga) с начальной энергией 150 кэВ, в области пространственного заряда эмиттерного перехода биполярного транзистора на основе GaAs.

мгновенных нейтронов спектра деления размер кластера радиационных дефектов в объемном GaAs составляет несколько десятков нанометров, что сравнимо с толщиной базы, областей пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов. Пример пространственного распределения дефектов в кластере, сформированном на границе перехода эмиттер–база первичным атомом отдачи (Ga) с начальной энергией 150 кэВ, приведен на рис. 1.

В ходе расчетов предполагалось, что в рабочей области транзистора формируется один кластер радиационных дефектов, окруженный областью пространственного заряда [12]. В широкозонных полупроводниках, в частности в GaAs, ядро кластера радиационных дефектов по положению уровня Ферми  $E_F$  аналогично локальной области нелегированного материала:  $E_F = E_V + 0.6$  эВ [13]. Таким образом, как отмечалось выше, кластер радиационных дефектов представляет собой потенциальный барьер для основных и яму для неосновных носителей заряда.

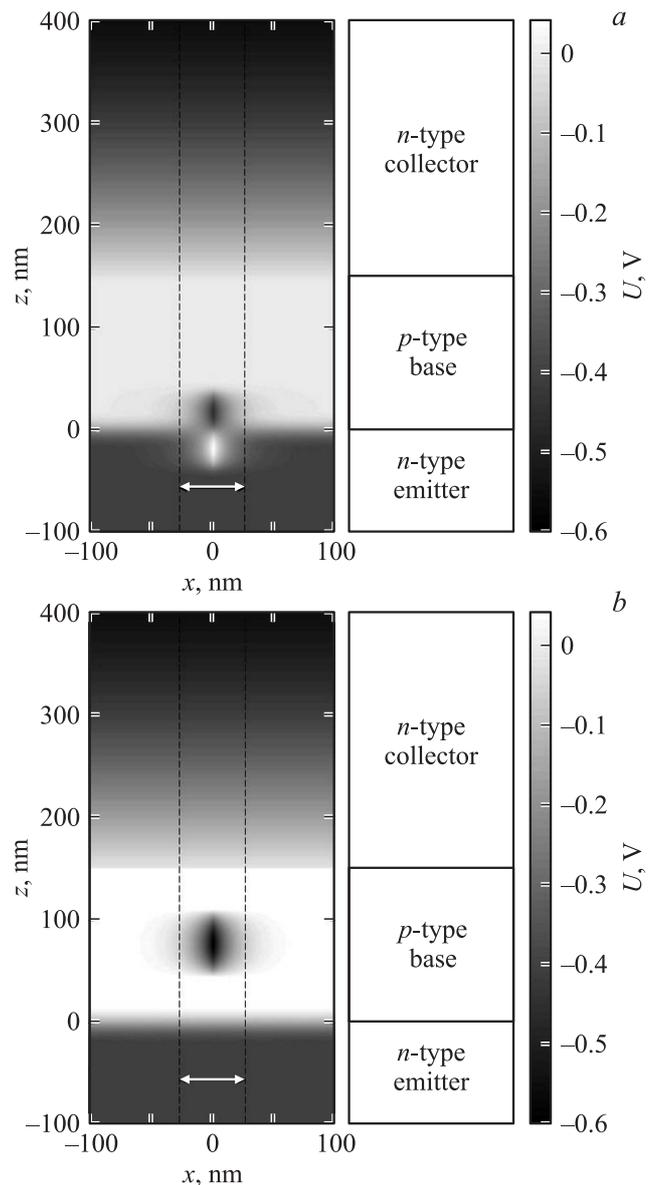
Анализ переноса носителей заряда через тонкую базу GaAs биполярного транзистора при нейтронном воздействии проведен при помощи самосогласованного решения кинетического уравнения Больцмана и уравнения Пуассона. Детали математического алгоритма учета радиационного воздействия при помощи метода Монте-Карло рассмотрены в работе [10].

В ходе расчетов деградации коэффициента усиления по постоянному току  $h_{FB}/h_{BF0}$  центр модельного кластера радиационных дефектов перемещался от эмиттера к коллектору, вдоль оси транзистора, который предполагался осесимметричным с периодическими граничными условиями на стенках цилиндра. Сверху цилиндра размещались контакты эмиттера и базы, снизу — контакт

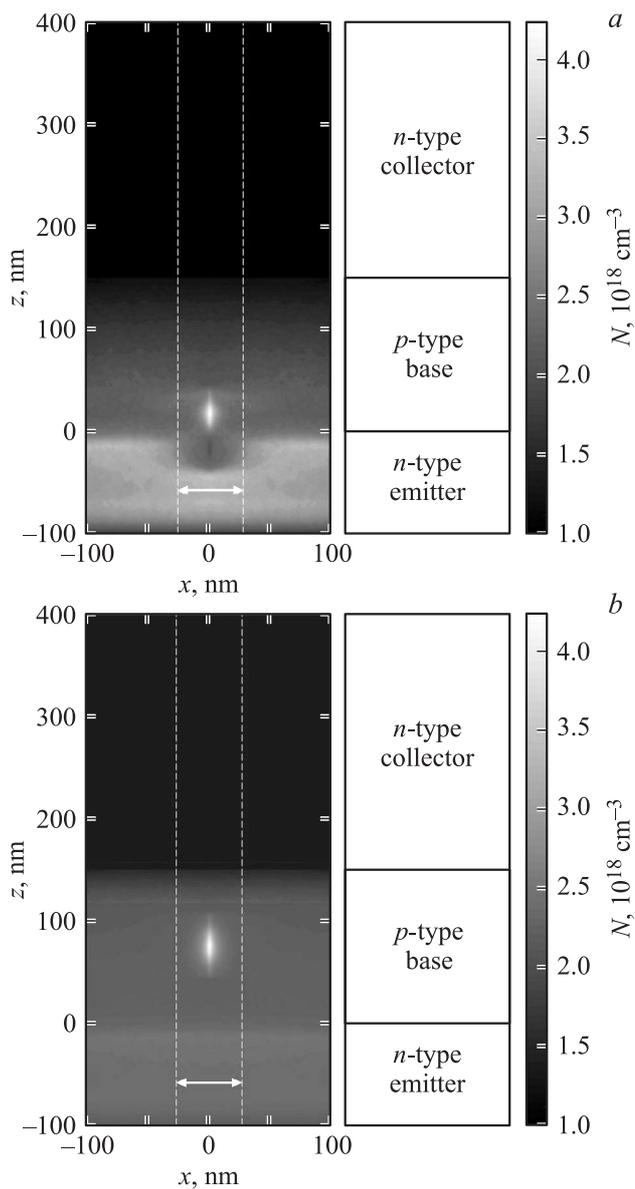
коллектора. За начало координат ( $z = 0$ ) принималась металлургическая граница эмиттерного перехода.

### 3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 приведены пространственный профиль потенциала электрического поля ( $U$ ) и концентрации электронов ( $N$ ) в рабочей области биполярного  $n-p-n$ -транзистора на GaAs с толщиной базы 115 нм для



**Рис. 2.** Пространственный профиль потенциала электрического поля  $U$  в рабочей области биполярного транзистора  $n-p-n$ -GaAs (активный режим) с учетом кластера радиационных дефектов, сформированного: в области пространственного заряда эмиттерного перехода (a), в квазинейтральной области базы (b). Штриховыми линиями показаны границы области влияния кластера радиационных дефектов на протекание носителей заряда.



**Рис. 3.** Пространственное распределение концентрации электронов  $N$  в рабочей области биполярного транзистора  $n-p-n$ -GaAs (активный режим) с учетом кластера радиационных дефектов, сформированного: в области пространственного заряда эмиттерного перехода (*a*), в квазинейтральной области базы (*b*). Штриховыми линиями показаны границы области влияния кластера радиационных дефектов на протекание носителей заряда.

случаев возникновения кластера радиационных дефектов в области пространственного заряда эмиттерного перехода и в квазинейтральной области базы. Потенциальный барьер в эмиттере эффективно защищает электроны от попадания в потенциальную яму в базе. При этом малая толщина рабочей области транзистора препятствует попаданию электронов в потенциальную яму со стороны базы, так как многократное рассеяние и „разворот“ электронов в квазинейтральной области

представляются маловероятными. Напротив, кластер радиационных дефектов в базе эффективно притягивает неосновные носители заряда, что увеличивает темп рекомбинации в ней.

Возникновение кластера радиационных дефектов в объеме эмиттера или коллектора приводит к увеличению сопротивления за счет дополнительного рассеяния носителей заряда, что обуславливает снижение разности потенциалов на переходах транзистора. Это ведет к уменьшению тока, протекающего через транзистор в активном режиме его работы, и увеличению тока утечки в закрытом состоянии.

Ранее обсуждалось [9,10], что при нейтронном воздействии уменьшение толщины базы приводит к снижению темпа деградации характеристик биполярных транзисторов. Это объясняется сохранением квазибаллистического характера движения электронов в тонкой базе при облучении. Однако при уменьшении толщины базы до размеров кластера радиационных дефектов при попадании его в базу происходит ее прокол, и транзистор выходит из строя. Этот процесс носит вероятностный характер и может быть оценен по формуле [14–16]

$$P = 1 - \exp(-\sigma F_n S d N_a),$$

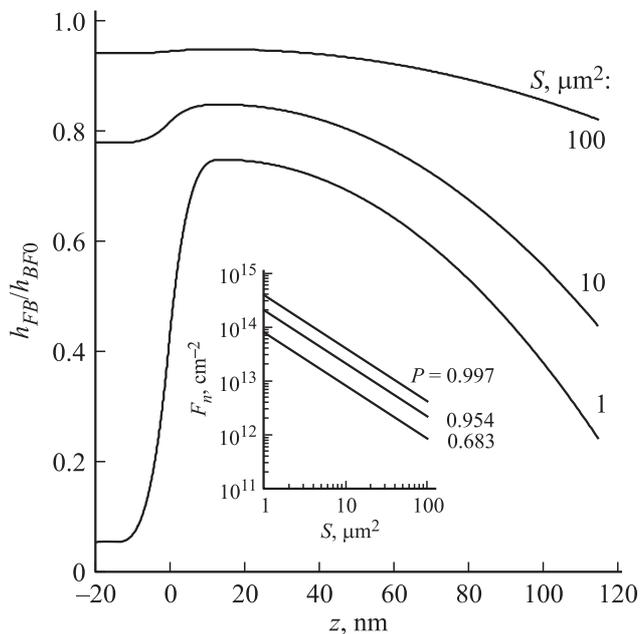
где  $P$  — вероятность прокола базы,  $\sigma$  — усредненное по энергетическому спектру сечение рассеяния нейтронов, которое для большинства полупроводников лежит в пределах нескольких барн [17],  $F_n$  — интегральный поток нейтронов,  $S$  — площадь рабочей области транзистора,  $d$  — диаметр кластера радиационных дефектов, окруженного областью пространственного заряда,  $N_a$  — концентрация атомов полупроводника. Результаты расчета вероятности радиационно-индуцированного прокола базы GaAs биполярного транзистора приведены в таблице. Уменьшение вероятности прокола базы с ростом концентрации легирующей примеси в ней объясняется уменьшением размеров области пространственного заряда кластера радиационных дефектов.

Результаты расчетов деградации коэффициента усиления биполярного GaAs-транзистора по постоянному току в зависимости от положения кластера радиационных дефектов в рабочей области приведены на рис. 4. Видно, что наибольшая степень деградации характеристик имеет место в двух случаях: при образовании кластера радиационных дефектов в области эмиттера (малые значения  $z$ ) или в квазинейтральной области базы, вдали от эмиттерного перехода (большие значения  $z$ ). В первом случае уменьшение тока, протекающего через транзистор, объясняется уменьшением прямого смещения перехода эмиттер–база при заданных потенциалах на контактах транзистора из-за увеличения сопротивления объемного слоя эмиттера в результате возникновения кластера радиационных дефектов. Во втором случае снижение коэффициента усиления транзистора вызвано увеличением темпа рекомбинации носителей в базе.

Вероятность радиационно-индуцированного прокола базы в зависимости от интегрального потока нейтронов и конструктивных параметров биполярного транзистора на GaAs

| Интегральный поток нейтронов, $\text{см}^{-2}$ | Концентрация легирующей примеси, $\text{см}^{-3}$ | Толщина базы при ее проколе, нм | Вероятность           |                        |                         |
|--|---|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
|  |   |                                 | $S = 1 \text{ мкм}^2$ | $S = 10 \text{ мкм}^2$ | $S = 100 \text{ мкм}^2$ |
| $10^{12}$                                      | $2.4 \cdot 10^{15}$                               | 342                             | 0.042                 | 0.348                  | 0.986                   |
|  | $6.8 \cdot 10^{15}$                               | 238                             | 0.029                 | 0.257                  | 0.949                   |
|  | $1.3 \cdot 10^{15}$                               | 188                             | 0.023                 | 0.209                  | 0.905                   |
|  | $3.0 \cdot 10^{16}$                               | 142                             | 0.018                 | 0.163                  | 0.831                   |
|  | $1.0 \cdot 10^{17}$                               | 92                              | 0.011                 | 0.109                  | 0.683                   |
|  | $5.0 \cdot 10^{17}$                               | 54                              | 0.007                 | 0.065                  | 0.491                   |
| $10^{13}$                                      | $2.4 \cdot 10^{15}$                               | 342                             | 0.348                 | 0.986                  | 1.000                   |
|  | $6.8 \cdot 10^{15}$                               | 238                             | 0.257                 | 0.949                  | 1.000                   |
|  | $1.3 \cdot 10^{15}$                               | 188                             | 0.209                 | 0.905                  | 1.000                   |
|  | $3.0 \cdot 10^{16}$                               | 142                             | 0.163                 | 0.831                  | 1.000                   |
|  | $1.0 \cdot 10^{17}$                               | 92                              | 0.109                 | 0.683                  | 1.000                   |
|  | $5.0 \cdot 10^{17}$                               | 54                              | 0.065                 | 0.491                  | 0.999                   |
| $10^{14}$                                      | $2.4 \cdot 10^{15}$                               | 342                             | 0.986                 | 1.000                  | 1.000                   |
|  | $6.8 \cdot 10^{15}$                               | 238                             | 0.949                 | 1.000                  | 1.000                   |
|  | $1.3 \cdot 10^{15}$                               | 188                             | 0.905                 | 1.000                  | 1.000                   |
|  | $3.0 \cdot 10^{16}$                               | 142                             | 0.831                 | 1.000                  | 1.000                   |
|  | $1.0 \cdot 10^{17}$                               | 92                              | 0.683                 | 1.000                  | 1.000                   |
|  | $5.0 \cdot 10^{17}$                               | 54                              | 0.491                 | 0.999                  | 1.000                   |

Примечание.  $S$  — площадь рабочей области транзистора.



**Рис. 4.** Относительная деградация коэффициента усиления биполярного транзистора на основе GaAs по постоянному току в зависимости от положения одиночного кластера радиационных дефектов в рабочей области. За начало координат ( $z = 0$ ) принималась металлургическая граница эмиттерного перехода. На вставке — зависимость флюенса нейтронов  $F_n$ , достаточная для образования одного и более кластеров радиационных дефектов в рабочем объеме транзистора, от его площади при трех различных вероятностях данного события:  $P = 0.997$ ,  $0.954$ ,  $0.683$ .

С одной стороны, очевидно, что влияние одиночного кластера радиационных дефектов на деградацию характеристик транзистора уменьшается с ростом площади его переходов, так как протекание носителей заряда в большей части структуры в этом случае остается невозмущенным. С другой стороны (см. вставку на рис. 4), увеличение площади  $S$  транзистора приводит к тому, что деградация его характеристик начинается при меньших флюенсах нейтронного воздействия. Это происходит из-за того, что при заданном флюенсе нейтронов увеличение площади транзистора приводит к возникновению в рабочей области большего числа кластеров радиационных дефектов.

Следует также отметить, что влияние положения кластера радиационных дефектов в объеме квазинейтральной области базы уменьшается с ростом ее толщины. Это объясняется возможностью попадания неосновных носителей заряда в потенциальную яму кластера радиационных дефектов за счет диффузии из базы и со стороны коллекторной области транзистора. В этом случае с увеличением толщины базы характер движения электронов в ней изменяется от квазибаллистического к диффузионному.

#### 4. Заключение

Проведенные расчеты показали, что место зарождения кластера радиационных дефектов существенным образом влияет на степень деградации характеристик суб-

микрометровых полупроводниковых приборов, в частности биполярных транзисторов. С ростом объема рабочей области (увеличением толщин слоев и площадей переходов) влияние места образования кластера радиационных дефектов в структуре транзистора на деградацию его характеристик снижается и доминирующим фактором здесь становится общее количество кластеров радиационных дефектов, определяемое флюенсом нейтронов. Таким образом, для заданного флюенса нейтронов степень деградации характеристик биполярных транзисторов снижается с уменьшением толщины базы и площади переходов. Это происходит потому, что максимальный прицельный параметр для облучающего нейтрона ограничен малыми размерами рабочей области транзистора, так как в транзистор надо еще и попасть. Однако это же обстоятельство приводит к резкому ухудшению характеристик транзистора при случайном возникновении кластера радиационных дефектов в его рабочей области, так как размеры кластера радиационных дефектов становятся сопоставимыми с размерами рабочей области транзистора, что приведет к гарантированному выходу его из строя. Поэтому минимальное расстояние между соседними транзисторами должно быть большим, чем размеры кластера радиационных дефектов. В этом случае при использовании радиационноустойчивых межсоединений возможно создание системы парирования одиночных отказов транзисторов за счет ввода в строй резервных элементов. Оптимальное расстояние между соседними транзисторами в такой сборке определяется средним расстоянием между кластерами радиационных дефектов, которое, в свою очередь, определяется заданной величиной флюенса нейтронов.

Работа выполнена при поддержке программ РАН, программы повышения конкурентоспособности ННГУ им. Н.И. Лобачевского среди ведущих мировых научно-образовательных центров, грантов РФФИ № 14-02-0058, 15-02-07935, МОН РФ (соглашение от 27.09.2013 г. № 02.В.49.21.003) и Государственным заданием МОН РФ (код проекта 2183).

## Список литературы

- [1] Г.Н. Кинчин, Р.С. Пиз. УФН, **60**, 590 (1956).
- [2] Дж. Слэтер. УФН, **47** (1), 51 (1952).
- [3] К. Ларк-Горовиц. УФН, **50** (1), 51 (1953).
- [4] Дж.В. Глен. УФН, **60** (3), 445 (1956).
- [5] L.J. Cheng, J. Lori. Phys. Rev., **171**, 856 (1968).
- [6] В.С. Вавилов. *Действие излучений на полупроводники* (М., Физматгиз, 1963).
- [7] O.L. Curtis. J. Appl. Phys., **39** (7), 3109 (1968).
- [8] Г.В. Горшков, В.А. Зябкин, Н.М. Лятковская, О.С. Цветков. *Естественный нейтронный фон атмосферы и земной коры* (М., Атомиздат, 1966).
- [9] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. ФТП, **49** (1), 71 (2015).
- [10] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. ФТП, **50** (12), 1706 (2016).
- [11] Электронный ресурс: <http://www.srim.org/>
- [12] B.R. Gossick. J. Appl. Phys., **30** (8), 1214 (1959).
- [13] V.N. Brudnyi, S.N. Grinyaev, V.E. Stepanov. Physica B: Condens. Matter, **212** (4), 429 (1995).
- [14] И.Ю. Забавичев, А.А. Потехин. Вестн. ННГУ: Физика твердого тела, **1** (2), 64 (2014).
- [15] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. *Тез. докл. 19-й Всеросс. науч.-техн. конф. „Радиационная стойкость электронных систем“* (М., НИЯУ МИФИ, 2016) с. 71.
- [16] А.С. Пузанов, С.В. Оболенский. *Тез. докл. 6-й Всеросс. конф. „Физические и физико-химические основы ионной имплантации“* (Нижний Новгород, ННГУ, 2016) с. 89.
- [17] Е.А. Ладыгин и др. *Действие проникающей радиации на изделия электронной техники* (М., Сов. радио, 1980).

Редактор Л.В. Шаронова

## Degradation characteristics of GaAs bipolar transistors with a thin base at formation of nanometer radiation defect clusters under neutron irradiation

I.Yu. Zabavichev<sup>1</sup>, A.A. Potekhin<sup>1</sup>, A.S. Puzanov<sup>1</sup>, S.V. Obolenskiy<sup>1</sup>, V.A. Kozlov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Lobachevskii University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Institute for Physics of Microstructure, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The calculation of the charge carriers flow in GaAs bipolar transistor structure with a thin base is performed when event of radiation defect single cluster occurs. It is shown that the birthplace of the radiation defect cluster significantly affect on the degree of the gain degradation of the bipolar transistor. We obtain a probabilistic assessment of radiation-induced punctures the base, depending on its thickness and neutron fluence.