

УДК 621.382

**УЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВОГО ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА**  
ЛОВШЕНКО И.Ю., СТЕМПИЦКИЙ В.Р.

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

**Аннотация.** Представлены результаты моделирования воздействия потока протонов на электрические характеристики приборной структуры полевых транзисторов на основе GaAs. Определены зависимости максимального тока стока  $I_C$  и напряжения отсечки от величины флюенса и энергии протонов, а также температуры окружающей среды.

**Ключевые слова:** полевой транзистор, GaAs, флюенс протонов, эффекты смещений, не ионизационные потери энергии, моделирование.

**THE INFLUENCE OF PROTONS IN THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS  
OF ARSENIDE-GALLIUM FIELD EFFECT TRANSISTOR**  
I.YU. LOVSHENKO, V.R. STEMPIITSKY

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

**Abstract.** The results of simulation the influence of the proton flux on the electrical characteristics of the device structure of field-effect transistors based on GaAs are presented. The dependences of the maximum drain current  $I_C$  and cut-off voltage on the fluence value and proton energy, as well as on the ambient temperature are shown.

**Keywords:** MESFET, GaAs, Fluence Proton, Displacement Effects, Nonionizing Energy Loss, Simulation

**Введение**

Элементная база современных объектов космической и ядерной техники подвергается воздействию ионизирующих излучений, основными из которых является гамма-излучение ( $\gamma$ ), нейтронное ( $n$ ), электронное ( $e$ ), протонное ( $p$ ). Альфа-частицы ( $\alpha$ ), осколки деления  $F_p$  и другие частицы, возникающие в ядерном реакторе или в зоне ядерного взрыва, также могут влиять на деградацию эксплуатационных характеристик. Однако их влияние не столь значительно (например, нейтрино, мезоны и др.) [1].

При воздействии потока частиц на приборные структуры микроэлектроники возможны два основных механизма: ионизация и повреждения, вызванные в результате упругого рассеяния первичных частиц, а также фрагментов, образующихся в ядерных реакциях (неупругое рассеяние) падающих протонов или нейтронов на ядрах мишени (эффекты смещений). Ионизация в данной работе не рассматривается. Нейтроны, протоны, альфа-частицы, тяжелые ионы и фотоны очень высоких энергий вызывают эффекты смещений: изменяется расположение атомов в кристаллической решетке и увеличивается количество центров рекомбинации (дефектов), уменьшая концентрацию свободных носителей заряда и ухудшая эксплуатационные характеристики приборных структур. Наиболее чувствительными к эффектам смещений параметрами объемного материала являются время жизни и диффузионная длина неосновных носителей заряда, подвижность и концентрация носителей заряда [2]. Величина проявления эффектов смещений зависит от типа излучения частиц, общей дозы, потока и энергии излучения, температуры окружающей среды, рабочего напряжения, фактического состояния устройства в момент облучения и т.д. Эти проблемы затрудняют тестирование, увеличивают сложность использования теоретических расчетов для прогнозирования радиационного воздействия, повышают время проектирования приборных структур и требуют значительного количества тестовых образцов. В современных системах автоматизированного проектирования в микроэлектронике Silvaco [3] и Synopsys [4] реализованы модули учета эффектов смещений.

Таким образом, в работе представлены результаты оценки процессов деградации электрических характеристик приборных структур полевых транзисторов на основе GaAs под влиянием потока протонов посредством компьютерного моделирования.

### Структура

Типовая приборная структура  $n$ -канального полевого транзистора на основе GaAs ( $n$ -GaAs MESFET) представлена на рис. 1. В качестве подложки выступает арсенид галлия, легированный бериллием до концентрации  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , с кристаллографической ориентацией (100). Области канала, стока и истока сформированы с использованием ионной имплантации кремния через маску. Максимальная концентрация примеси в областях стока и истока составляет  $1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Глубина залегания сток-истоковых областей равна  $0,342 \text{ мкм}$ , области канала –  $0,3 \text{ мкм}$ . В качестве материала затвора используется титан. Контакты к областям стока и истока выполнены алюминием. Таким образом, при моделировании технологического маршрута формирования приборной структуры  $n$ -GaAs MESFET выделено 9 операций: задания исходных данных (область моделирования, расчетная сетка, параметры подложки) и последовательных операций имплантации бериллия (энергия  $E = 100 \text{ кэВ}$ , доза  $D = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) и кремния (энергия  $E = 100 \text{ кэВ}$ , доза  $D = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), диффузии (длительность  $t = 10$  минут, температура  $T = 850 \text{ С}$ ), формирования титанового затвора (толщина  $0,3 \text{ мкм}$ ) и областей спейсеров (оксид кремния, максимальная толщина  $0,4 \text{ мкм}$ ), имплантация кремния (энергия  $E = 50 \text{ кэВ}$ , доза  $D = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) и диффузия (длительность  $t = 10$  минут, температура  $T = 850 \text{ С}$ ) для формирования сток-истоковых областей, формирование алюминиевых омических контактов (толщина  $0,2 \text{ мкм}$ ).

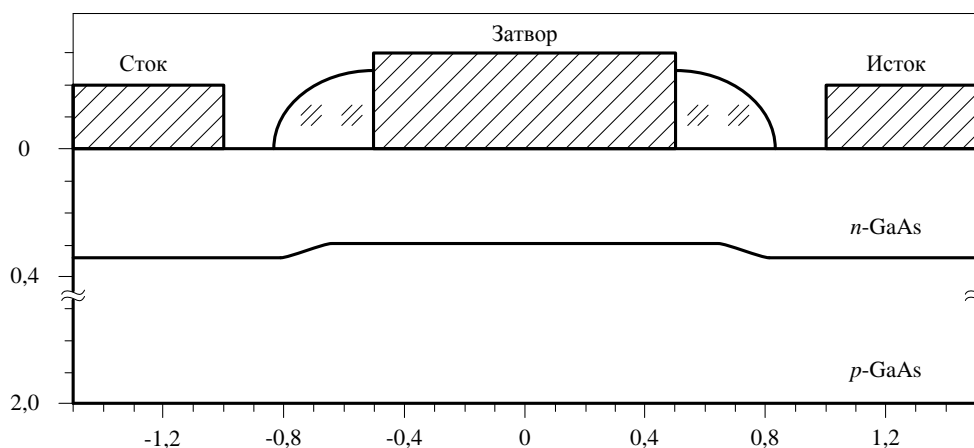


Рис. 1. Приборная структура арсенид-галлиевого полевого транзистора

Напряжение отсечки и максимальный ток стока для полученной структуры при температуре окружающей среды  $T = 303 \text{ К}$  равны  $V_{\text{отс}} = -0,4 \text{ В}$  и  $I_{\text{Сmax}} = 1,02 \text{ мкА}$  (при напряжениях на стоке  $V_{\text{С}} = 1 \text{ В}$  и затворе  $V_{\text{з}} = 0 \text{ В}$ ) соответственно.

### Результаты

Для прогнозирования деградации параметров, вызванного проникающим излучением, часто достаточно рассмотреть только первый этап процесса образования дефектов. Образование объемных дефектов в структуре полупроводникового прибора пропорционально неионизирующей потере энергии (англ. *Non-ionizing Energy Loss, NIEL*) – общей кинетической энергии, передаваемой атомам решетки. При моделировании и расчетах кроме параметра NIEL, также используют термин кинетическая энергия, высвобождаемая в материи (англ. *Kinetic Energy Released in Material, KERMA*). Отношения между KERMA и NIEL можно записать как

$$KERMA = NIEL \cdot F \cdot m, \quad (1)$$

где  $NIEL$  – потеря неионизирующей энергии;  $F$  – интегральный поток излучения (флюенс).

Параметр  $NIEL$  может быть использован при экстраполяции деградации параметров устройства, измеренной для частицы с данной энергией, на другие энергии («масштабирование  $NIEL$ »).

В специализированных программных комплексах приборно-технологического моделирования в микроэлектронике для описания воздействия потока частиц на

характеристики материала применяют модель радиационного флюенса (*Radiation Fluence Model*), которая позволяет прогнозировать скорость генерации дефектов. В соответствии с моделью общая плотность дефектных состояний  $NT$  из-за флюенса излучения с определенной энергией и типами излучения определяется как

$$NT = \alpha_D \cdot \rho \cdot NIEL \cdot F, \quad (2)$$

где  $\alpha_D$  – коэффициент повреждения;  $\rho$  – плотность материала.

Неионизирующие потери энергии для GaAs определены с использованием проекта SR-NIEL [5] для значений пороговой энергии смещения  $E_{d1} = 9,5$  эВ [6],  $E_{d2} = 10$  эВ [7],  $E_{d3} = 21$  эВ [8] и  $E_{d4} = 25$  эВ [9]. Для полученных величин определены средние значения, которые описываются аппроксимирующей зависимостью (рис. 2). Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными, представленными в работе [10].

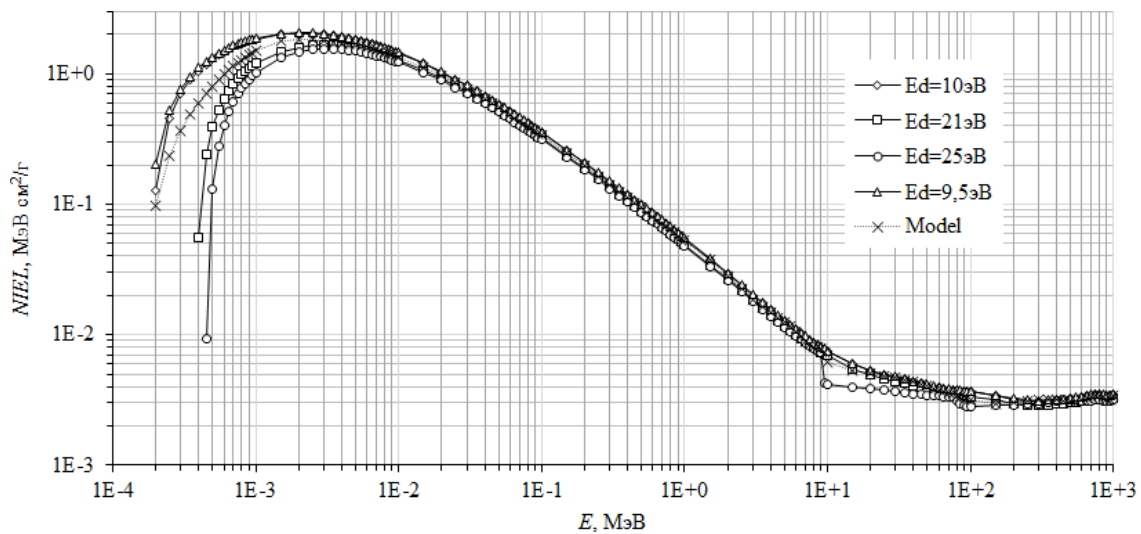


Рис. 2. Зависимость неионизирующие потери энергии от энергии протонов

Проведено моделирование воздействия потока протонов на эксплуатационные характеристики приборной структуры  $n$ -канального арсенид-галлиевого полевого транзистора. Результаты влияния потока протонов с энергией  $E_E = 2$  кэВ при температуре  $T = 303$  К представлены на рис. 3.

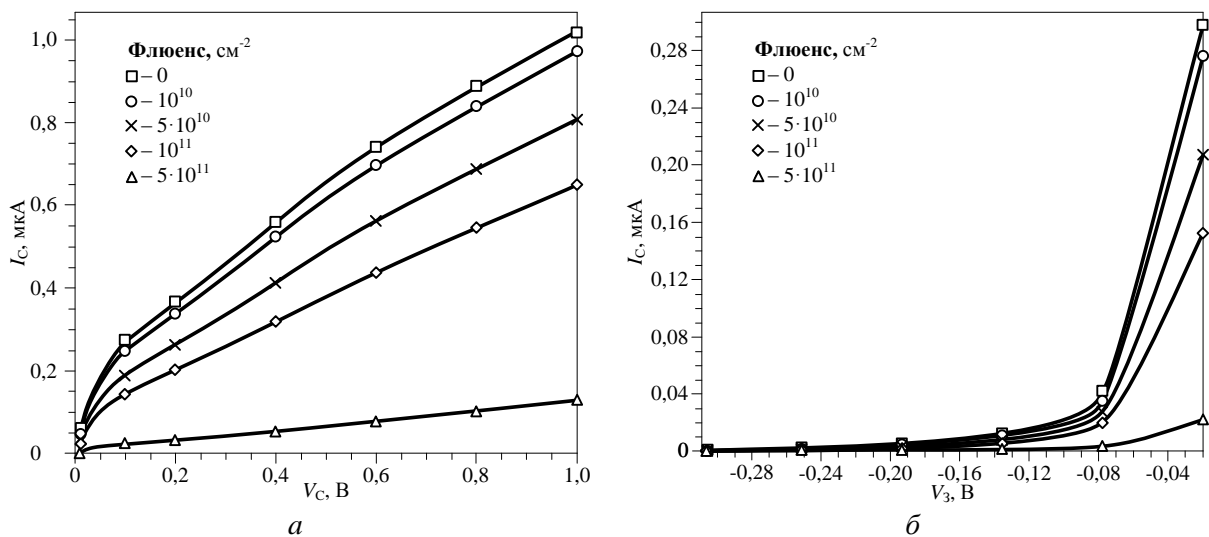
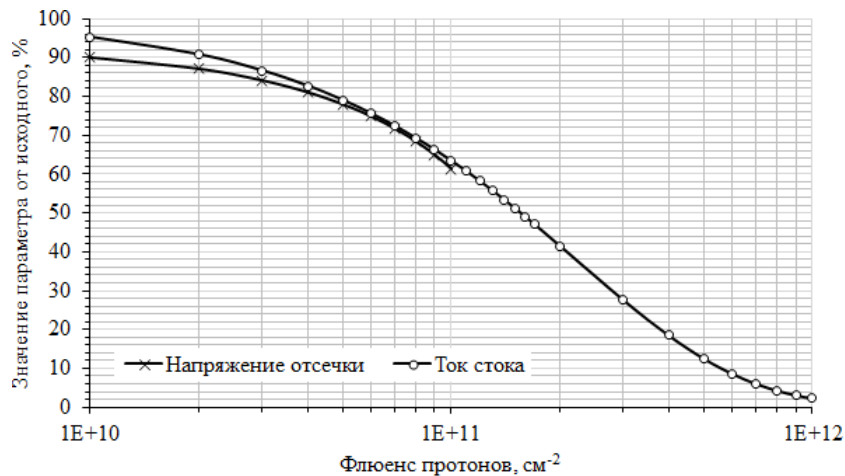


Рис. 3. ВАХ при изменении флюенса протонов с энергией  $E_p = 20$  кэВ:  $a$  – сток-затворная;  $b$  – сток-стоковая

На рис. 4 представлены графики зависимости максимального тока стока и напряжения отсечки от величины флюенса протонов  $F_p$  с энергией  $E_p = 2$  кэВ. Параметры выражены в относительных единицах (за 100% приняты значения без воздействия проникающего излучения).

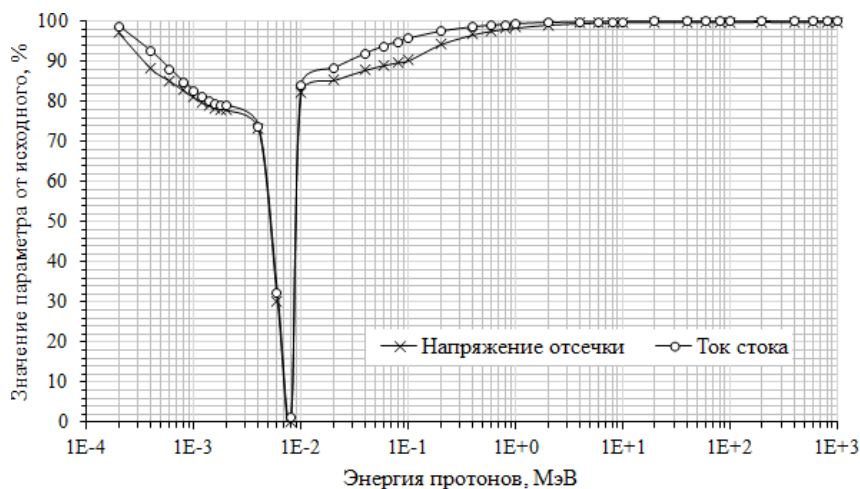
Показано, что флюенс протонов оказывает разное влияние на величины максимального тока стока и напряжения отсечки кроме узкой полосы значений от  $5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Так при  $F_p = 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> разница между отклонением параметров составляет 1%, а при  $F_p = 1,2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> – 4,2%. Зависимость отклонения напряжения отсечки подчиняется линейному закону (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,99$ ), а зависимость максимального тока стока носит более сложный характер.

На рис. 5 представлены графики зависимости максимального тока стока и напряжения отсечки от величины энергии протонов  $E_p$  для флюенса  $F_p = 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>.



**Рис. 4.** Зависимость параметров арсенид-галлиевого полевого транзистора от величины флюенса протонов  $F_p$  (энергия  $E_p = 2$  кэВ, температура  $T = 303$  К)

По результатам моделирования установлено, что энергия протонов оказывает наибольшее влияние на электрические характеристики арсенид-галлиевого полевого транзистора в области от сотен эВ до 100 кэВ, что коррелирует с данными, представленными на рис. 2., за исключением диапазона энергий от 4 кэВ до 10 кэВ (т.е. при значениях  $E_p$  на 6 кэВ выше ожидаемых), при которых наблюдается сильная деградация электрических свойств приборной структуры вплоть до отказа транзистора. При значениях энергии  $E_p$  больше 1 МэВ величина отклонения параметров не превышает 1 % для максимального тока стока и 1,5 % для напряжения отсечки.

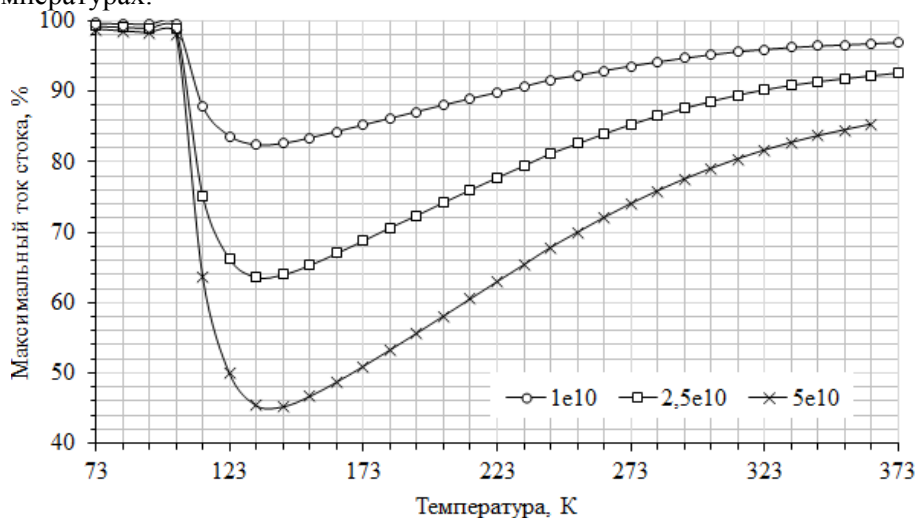


**Рис. 5.** Зависимость параметров арсенид-галлиевого полевого транзистора от энергии протонов  $E_p$  (флюенс  $F_p = 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>, температура  $T = 303$  К)

На рис. 6 представлены графики зависимости максимального тока стока от температуры при воздействии потока протонов разных флюенсов с энергией  $E_p = 2$  кэВ для стандартных моделей переноса носителей заряда.

Установлено, что в диапазоне температур  $T$  от 133 К до 143 К поток протонов оказывает наибольшее влияние для всех рассматриваемых флюенсов с  $E_p = 2$  кэВ. Увеличение флюенса приводит к сдвигу такой температуры в область более высоких значений: для флюенса  $F_p = 10^{10}$  см<sup>-2</sup> температура  $T = 136$  К ( $I_{Cmax} = 2,2$  нА, что составляет 17,65% от значения без воздействия потока протонов), для флюенса  $F_p = 2,5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> –  $T = 136$  К ( $I_{Cmax} = 1,56$  нА, 36,5%), для флюенса  $F_p = 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> –  $T = 139$  К ( $I_{Cmax} = 1,54$  нА, 54,06%).

При значениях температуры выше 273 К крутизна зависимости уменьшается. Увеличение флюенса приводит к более резкому изменению. Так для флюенсов  $F_p$  равных  $10^{10}$  см<sup>-2</sup> и  $2,5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> увеличение температуры на каждые 10 К приводит к уменьшению отклонения максимального тока стока в среднем на  $3,8 \cdot 10^{-30}\%$  и  $9,0 \cdot 10^{-30}\%$  соответственно. Для флюенса  $F_p = 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> крутизна равняется  $1,32 \cdot 10^{-30}\%$ , т.е. «насыщение» происходит при более высоких температурах.



**Рис. 6.** Зависимость максимального тока стока арсенид-галлиевого полевого транзистора от температуры  $T$  (флюенс  $F_p = 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>, энергия протонов  $E_p = 2$  кэВ)

### Заключение

Разработана модель зависимости NIEL от энергии протонов, учитывающая различные значения пороговой энергии образования дефекта для GaAs, встречающиеся в литературе, и согласующаяся с последними теоретическими и экспериментальными данными. Из анализа результатов моделирования воздействия потока протонов на приборную структуру  $n$ -канального арсенид-галлиевого полевого транзистора можно сделать следующие выводы: флюенс протонов оказывает разное влияние на величины максимального тока стока и напряжения отсечки кроме узкой полосы значений от  $5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> до  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>; энергия протонов оказывает наибольшее влияние в области от сотен эВ до 100 кэВ (вплоть до отказа транзистора); в диапазоне температур  $T$  от 133 К до 143 К поток протонов оказывает наибольшее влияние для всех рассматриваемых флюенсов с  $E_p = 2$  кэВ (увеличение флюенса приводит к сдвигу температуры  $T_{кр}$  в область более высоких значений).

### Благодарность

Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (задание 3.04).

### Список литературы

1. Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. – М. : Сов. Радио, 1980. – 224 с.

2. Allam E.E., Inguibert C., Meulenberg A., Jorio A., Zorkani I. Gamma non-ionizing energy loss: Comparison with the damage factor in silicon devices. *Journal of Applied Physics, American Institute of Physics*. 2018;123 (095703):1-5.
3. Сайт компании Silvaco [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.silvaco.com>.
4. Сайт компании Synopsys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.synopsys.com>.
5. Сайт проект SR-NIEL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sr-niel.org/index.php>.
6. Mansouri E. *Studies on Radiation-induced Defects in InP/InAsP Nanowire-based Quantum Disc-in-wire Photodetectors*. Halmstad : Halmstad University; 2018. – P. 48.
7. Pons D., Mooney P.M., Bourgoin J.C. Energy Dependence of Deep Level Introduction in Electron Irradiated GaAs. *J. Appl. Phys.* 1980;51:2038-2042.
8. Allam E.E. [et al.] Gamma and Electron NIEL Dependence of Irradiated GaAs. NSREC. 2016: P. 7.
9. Claeys C., Simoen E. *Radiation effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices*. Berlin : Springer. 2002. P. 404.
10. Chen N. J. [et al.] Computational simulation of threshold displacement energies of GaAs. *Journal of Materials Research: Vol. 32, Issue 8:1555–1562*.