

Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs

Е.Н. Вигдорович

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: evgvig@mail.ru

В настоящей работе представлены результаты исследования облучения гетероструктур на основе арсенида галлия нейтронами и гамма-квантами. В качестве источника нейтронов служил горизонтальный канал реактора ИРТ-2000 с энергией 2.65 МэВ. Рассматривали два типа структур: автоэпитаксиальные (АЭС) и гетероэпитаксиальные (ГЭС), полученные МОС-гидридным методом при пониженном давлении с использованием металлоорганических соединений галлия и алюминия и арсина. Полученные результаты показали, что при облучении нейтронами и гамма-квантами концентрация носителей заряда автоэпитаксиальных структур и плотность носителей заряда гетероэпитаксиальных структур изменяется незначительно. Что касается подвижности носителей заряда, то в начальный момент при облучении наблюдается некоторое увеличение подвижности носителей заряда. Далее по мере увеличения плотности потока облучения подвижность или стабилизируется на определенном уровне, или уменьшается. Факт увеличения подвижности после первого облучения гетероструктур свидетельствует об увеличении времени жизни носителей заряда, по-видимому, вследствие уменьшения в структурах концентрации центров рекомбинации, вероятнее всего, плотности структурных дефектов на гетерограницах. При облучении быстрыми нейтронами наблюдается аналогичная картина: первоначально подвижность носителей заряда несколько увеличивается при небольшом изменении концентрации носителей заряда, затем характеристики стабилизируются. Наблюдается повышение однородности свойств по площади структур. Высказано предположение, что это связано с возникновением кластеров дефектов и примесей.

Ключевые слова: арсенид галлия, облучение, автоэпитаксиальные структуры, гетероэпитаксиальные структуры, концентрация и подвижность носителей заряда.

Radiation Resistance of Epitaxial Structures Based on GaAs

E.N. Vigdorovich

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: evgvig@mail.ru

This paper presents the results of a study on the irradiation of heterostructures based on gallium arsenide with neutrons and gamma rays. The horizontal channel of the IRT-2000 reactor with an energy of 2.65 MeV served as a source of neutrons. Two types of structures were considered: autoepitaxial (AES) and heteroepitaxial (HES). They were obtained by the MOC-hydride method under reduced pressure using gallium and aluminum organometallic compounds and arsine. The obtained results show that irradiation with neutrons and gamma-quanta just slightly changes the concentration of the charge carriers of the autoepitaxial structures and the density of the charge carriers of the heteroepitaxial structures. As for the mobility of charge carriers, some increase in their mobility is observed at the initial moment of irradiation. As the irradiation flux density increases, the mobility either stabilizes at a certain level or decreases. The increase in mobility after the first irradiation of the heterostructures indicates an increase in the lifetime of charge carriers, apparently due to a decrease in the concentration of recombination centers in the structures, most likely, the density of structural defects at the heteroboundaries. When irradiating with fast neutrons, a similar picture is observed. Initially, the mobility of charge carriers slightly increases as the concentration of charge carriers slightly changes. Then the characteristics stabilize. An increase in the uniformity of properties over the area of the structures is observed. It is assumed that this is due to the appearance of clusters of defects and impurities.

Keywords: gallium arsenide, irradiation, autoepitaxial structures, heteroepitaxial structures, charge carrier concentration and mobility.

Введение

Одним из наиболее перспективных материалов электроники является арсенид галлия (GaAs) [1–3], который во многих случаях приходит на смену кремнию. Разработка и освоение арсенид-галлиевых приборов и схем специального назначения позволяет повысить эффективность и обеспечить улучшение их характеристик. Появляется возможность повысить частотные характеристики приборов и устойчивость к внешнему воздействию: температура, излучение, электрические поля. Под воздействием проникающей радиации возможны значительные изменения свойств материалов активных и пассивных элементов, а также функциональных характеристик приборов и устройств. Поэтому для разработчиков чрезвычайно важно иметь информацию о процессах, протекающих в материалах, структурах, приборах и устройствах, при воздействии на них проникающего радиационного излучения [4, 5].

Радиационные процессы в GaAs

Упругое рассеяние на ядрах, приводящее их к смещению из узлов кристаллической решетки, является основным процессом взаимодействия *нейтронов* с твердыми телами. Этот процесс отражает основную особенность: линейную зависимость пороговой энергии образования электронно-дырочных пар от ширины запрещенной зоны. Для элементарных полупроводников и соединений $A^{III}B^V$ расчет дает следующие значения, эВ: Ge – 2.8; Si – 3.6; GaAs – 4.8; GaP – 7.8; GaN – 10.1. В общем случае *при необратимых процессах* во время облучения высокоэнергетическими частицами полупроводников происходит изменения концентрации (N), подвижности (μ) и времени жизни (τ) свободных носителей заряда:

$$N = N_0(1 - K_N \Phi);$$

$$\frac{1}{\mu} = \left(\frac{1}{\mu_0}\right)(1 + K_\mu \Phi);$$

$$\frac{1}{\tau} = \left(\frac{1}{\tau_0}\right)(1 + K_\tau \Phi)$$

где Φ – флюенс (доза радиации),

K_i – коэффициент деградации.

С учетом эффективности введения радиационных дефектов ($\frac{dN}{d\Phi}$) можно написать:

$$K_i = \frac{dN}{d\Phi} \sigma v$$

где v – тепловая скорость носителей;

σ – сечение захвата неосновных носителей.

Значение константы K_i в основном *определяется энергией смещения атома* из узла кристаллической решетки. В рассматриваемом случае основной вклад дают связанные друг с другом энергия атомизации и ширина запрещенной зоны. Согласно расчету, энергия атомизации составляет, эВ: Ge – 11; Si – 13; GaAs – 10; GaP – 17; GaN – 28. По этому параметру радиационная устойчивость арсенида галлия несколько хуже кремния, но для твердых растворов, например, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ и $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$, минимальная энергия смещения атома будет больше за счет увеличения вклада энергии искажения кристаллической решетки, и, соответственно, выше их радиационная стойкость.

Экспериментальное исследование радиационной устойчивости эпитаксиальных структур на основе арсенида галлия

Исследованы два типа структур – автоэпитаксиальные (АЭС) и гетероэпитаксиальные (ГЭС), полученные МОС-гидридным методом при пониженном давлении с использованием металлоорганических соединений галлия и алюминия и арсина [6]. Основные исходные характеристики изучаемых структур приведены в табл. 1 и 2. В качестве источника нейтронов использовали горизонтальный канал реактора ИРТ-2000 с энергией 2.65 МэВ. Концентрацию носителей заряда определяли емкостным методом, а подвижность носителей заряда – методом Ван дер Пау. Подвижность носителей заряда двумерного электронного газа ($\mu_{\text{дэг}}$) контролировали при температуре 300 К. Плотность носителей заряда двумерного электронного газа ($N_{\text{дэг}}$) определяли расчетным путем по формуле:

$$N_{\text{дэг}} = 1.38 \times 10^{18} \times I / (\mu \times U_{\text{cp}}),$$

где: μ – подвижность носителей заряда при 300 К, $\text{см}^2 / \text{В} \times \text{с}$;

U_{cp} – величина среднего падения напряжения на образце (В), измеряемая при токе I А, одновременно с измерением подвижности носителей заряда.

Концентрацию носителей заряда в $\text{GaAs}(n)$ -слое (N_n) определяли из графика профиля легирования, измеренного в центральной области структуры при напряжении смещения 0.2 В на измерительном контакте.

Таблица 1. Спецификация на автоэпитаксиальные структуры арсенида галлия типа $n - n_{\phi} - i$

Наименование параметра	Спецификация (метод контроля)
1. Общие характеристики:	
– метод получения	МОС-гидридный
– легирующий элемент (для получения легированных слоев)	Кремний
2. Электрические характеристики	
2.1 n – активный слой:	
– концентрация носителей заряда, см^{-3} ;	$3 \times 10^{17} \pm 30\%$
– подвижность носителей заряда, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$;	>3300
2.2 n_{ϕ} – буферный слой:	
– концентрация носителей заряда, см^{-3}	$<1 \times 10^{14}$
2.3. Подложка монокристаллического арсенида галлия:	
– удельное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{см}$	$>1 \times 10^7$
– тип проводимости;	n
– подвижность носителей заряда, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	>5000

Таблица 2. Спецификация на гетероэпитаксиальные структуры на основе арсенида галлия типа $\text{GaAs}(n_{\kappa}^{+}) - \text{GaAlAs}(n^{+}) - \text{GaAlAs}(n^{-}) - \text{InGaAs}(n^{-}) - \text{GaAs}(n_{\phi}^{-}) - \text{GaAs}(\text{подложка})$

Наименование параметра	Спецификация (метод контроля)
1. Общие характеристики:	
– метод получения	МОС-гидридный
– легирующий элемент	Кремний
2. Электрические характеристики	
2.1 Структура в целом:	
– плотность носителей заряда двумерного электронного газа, см^{-2}	не менее 1.5×10^{12}
– подвижность носителей заряда двумерного электронного газа при 77К, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	не менее 1×10^4
2.2 $\text{GaAs}(n_{\kappa}^{+})$ – контактный слой:	
– концентрация носителей заряда, см^{-3}	$1 \times 10^{18} \pm 20\%$
2.3 $\text{GaAlAs}(n^{+})$ -слой:	
– концентрация носителей заряда, см^{-3}	$(1-2) \times 10^{18}$
2.4 $\text{GaAs}(n_{\phi}^{-})$ – буферный слой:	
– концентрация носителей заряда, см^{-3}	$<1 \times 10^{14}$
2.5 Подложка монокристаллического GaAs:	
– удельное сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{см}$	$>1 \times 10^7$
– тип проводимости	n
– подвижность носителей заряда, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	>5000
3. Толщина слоя	
3.1 $\text{GaAs}(n_{\kappa}^{+})$, мкм	$0.01 \pm 15\%$
3.2 $\text{GaAlAs}(n^{+})$, мкм	0.04–0.08
3.3 $\text{GaAlAs}(n^{-})$, Å	30–50
3.4 $\text{InGaAs}(n^{-})$, Å	90–120
3.5 $\text{GaAs}(n_{\phi}^{-})$, Å	0.5–0.8
3.6 Подложка монокристаллического GaAs	
– диаметр, мм	50 ± 0.5

Таблица 2. Окончание

Наименование параметра	Спецификация (метод контроля)
– толщина пластины, мкм	500±20
– ориентация поверхности	(100) 3°→(0 $\bar{1}\bar{1}$)
4. Химические характеристики	
4.1 GaAlAs – содержание алюминия, % ат.	27–33
4.2 InGaAs(<i>n</i>) – содержание индия, % ат.	16–20

Результаты измерения обрабатывали по формулам дисперсионного анализа в доверительном интервале 95% с использованием распределения Стьюдента ($n < 30$). Обрабатывали по 3 партии образцов при количестве эпитаксиальных структур в партии 5 шт.

Результаты и их обсуждение

Полученные в ходе исследования данные представлены на рис. 1–4.

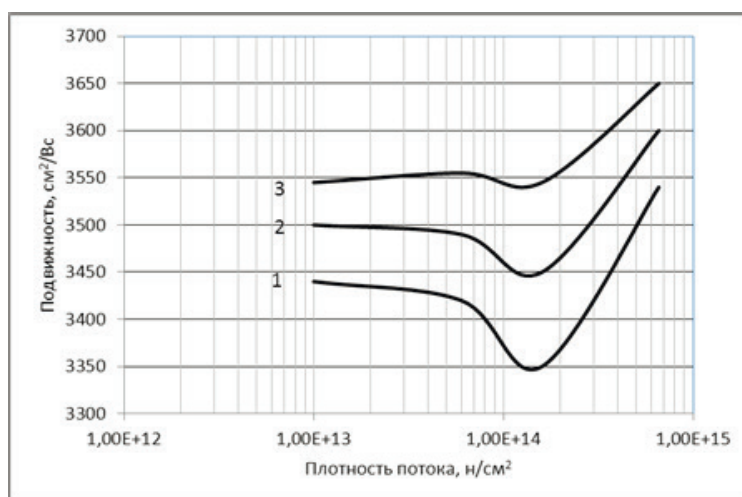


Рис. 1. Изменение подвижности носителей заряда в автоэпитаксиальных структурах при нейтронной обработке: 1, 2, 3 – номер партии.

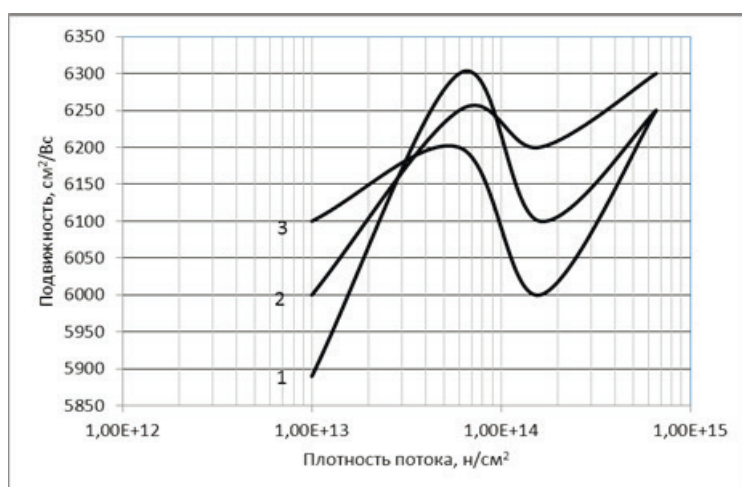


Рис. 2. Изменение подвижности носителей заряда в гетероэпитаксиальных структурах при нейтронной обработке: 1, 2, 3 – номер партии.

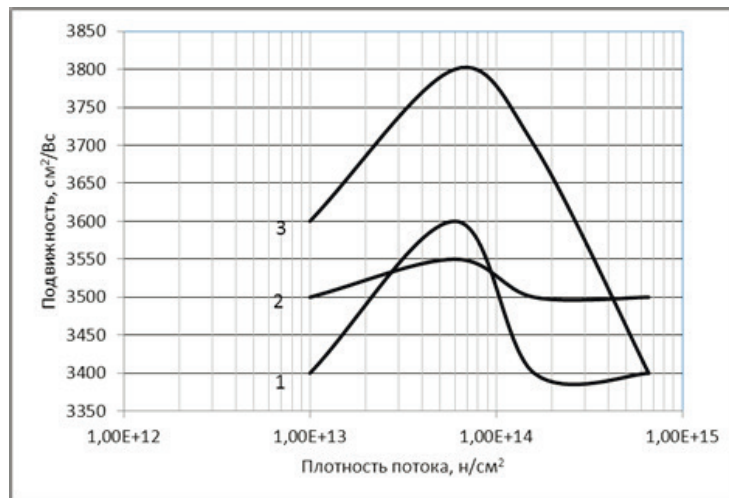


Рис. 3. Изменение подвижности носителей заряда в автоэпитаксиальных структурах при воздействии гамма-излучения: 1, 2, 3 – номер партии.

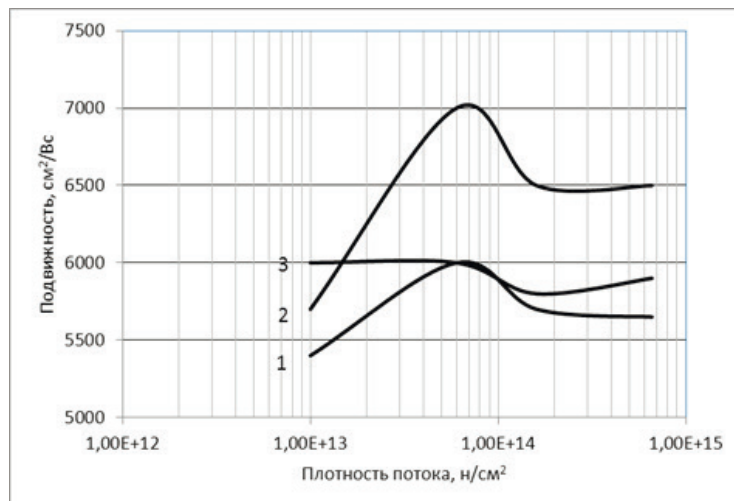


Рис. 4. Изменение подвижности носителей заряда в гетероэпитаксиальных структурах при воздействии гамма-излучения: 1, 2, 3 – номер партии.

Результаты показывают, что при облучении нейтронами и гамма-квантами концентрация носителей заряда автоэпитаксиальных структур и плотность носителей заряда гетероэпитаксиальных структур изменяется незначительно. Этого нельзя сказать о подвижности носителей заряда: при облучении в начальный момент времени наблюдается некоторое увеличение подвижности носителей заряда. В дальнейшем при увеличении плотности потока облучения подвижность или стабилизируется на определенном уровне, или уменьшается. В некоторых случаях при дальнейшем увеличении плотности потока вновь наблюдается повышение подвижности носителей заряда. Очевидно, эпитаксиальные структуры после выращивания не находятся в состоянии термодинамического равновесия. При воздействии облучения метастабильные состояния примесей и дефектов в эпитаксиальных слоях переходят в новое, по сравнению с исходным, более устойчивое термодинамическое состояние [7– 9]. В результате облучения за счет генерации электронно-дырочных пар возникают диффузионные фототоки. Возникшие вследствие

генерации электроны и дырки, являясь подвижными носителями, при перемещении в материале будут рассеиваться и рекомбинировать. В случае достаточно высокой инжекции носителей заряда изменение концентрации носителей пропорционально скорости генерации носителей заряда.

В наших исследованиях после первого облучения гамма-лучами плотность концентрации носителей заряда для гетероструктур уменьшилась незначительно – с $2.2 \cdot 10^{12}$ до $1.5 \cdot 10^{12}$ см⁻², а подвижность увеличилась с 5900 до 6800 см²/В·с. Последующие операции облучения не привели к изменению электрофизических характеристик. Снижение плотности концентрации носителей заряда после первого облучения может свидетельствовать о том, что скорость генерации носителей меньше скорости рекомбинации. Это происходит в том случае, если в исходных структурах имеется большое количество центров рекомбинации. Вероятнее всего, это структурные дефекты на гетерограницах структуры. Наблюдаемое при облучении автоэпитаксиальных структур незначительное уменьшение концентрации носителей заряда и увеличение их подвижности указывает на то, что, кроме рекомбинации носителей заряда в объеме (объемная рекомбинация) материала, для обоих типов структур не исключена рекомбинация на оборванных связях поверхности (поверхностная рекомбинация) [10–12]. Установлено, что после первого облучения электропроводность если и уменьшилась, то незначительно. Скорее всего, это связано только с уменьшением в структурах концентрации центров рекомбинации, то есть плотности структурных дефектов на гетерограницах. Указанное явление позволяет утверждать, что в процессе первой обработки гетероструктур происходит некоторое «залечивание» неравновесной системы, состоящей из слоев с различными свойствами. Необходимо отметить, что при облучении автоэпитаксиальных структур данное явление проявляется в значительно меньшей степени, что и подтверждает нашу гипотезу.

При облучении быстрыми нейтронами наблюдается аналогичная картина. Сначала несколько увеличивается подвижность носителей заряда с одновременным небольшим изменением концентрации носителей заряда, затем характеристики стабилизируются. Состояние материала сдвигается в сторону термодинамического равновесия. Наблюдается повышение однородности свойств по площади структур. Вероятнее всего, это связано с возникновением кластеров дефектов и примесей.

Заключение

Приведенные в работе результаты относятся к простейшим структурам (без *p-n*-переходов, барьеров Шоттки, подзатворных каналов, квантовых ям, сверхрешеток и пр.). При усложнении типа эпитаксиальных структур необходимо проводить для каждого типа специальные исследования. Следует заметить также, что данные исследования не позволили определить критические значения устойчивости изучаемых эпитаксиальных структур: для этого необходимо проводить исследования при больших дозах облучения. Кроме того, для более глубокого понимания процессов, происходящих при облучении и термообработке, необходимо выявлять температурные зависимости электрофизических характеристик (от +200 °С до гелиевых температур) совместно с глубокими структурными исследованиями.

Литература:

1. Ячменев А.Э., Рыжый В.И., Мальцев П.П., Повышение быстродействия прибора PHEMT на основе GaAs с помощью профилированного дельта-легирования оловом // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 2. С. 40–46.
2. Глинский И.А., Зенчиков Н.В., Мальцев П.П. Тепловое моделирование терагерцового квантово-каскадного лазера на основе наногетероструктуры GaAs/AlGaAs // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4 № 3. С. 27–36.
3. Уваров Е.Ф. Радиационные эффекты в широкозонных полупроводниках A^{III}B^V. М.: Изд-во ЦНИИ Электроника, 1978. 77 с. – Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. Вып. 13.
4. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Елесин В.В. [и др.] Радиационные эффекты в GaAs-полупроводниковых приборах и интегральных схемах // Зарубежная электронная техника. 1988. № 1. С. 48–85.
5. Оболенский С.В. Определение электрофизических констант GaAs при радиационном воздействии // Труды 2-го совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductor. Нижний Новгород, 2002. С. 146–154.
6. Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А. МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники. М.: Техносфера, 2018. 488 с.
7. Вигдорович Е.Н., Рыжиков И.В. Влияние облучения на свойства гетероструктур AlInGaN // Тезисы докладов 11-й Всерос. конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». Москва, 1-3 февраля 2017. С. 102–103.
8. Кондратенко В.С., Абдулаев О.Р., Рыжиков И.В., Виноградов В.С., Фирсов А.С. Сравнительные исследования воздействия проникающей радиации на светодиоды нового поколения на основе AlGaInP и AlInGaN гетероструктур // Приборы. 2009. № 3(105). С. 41–49.
9. Градобоев А.В., Орлова К.Н., Асанов И.А. Деградация параметров гетероструктур AlGaInP при облучении быстрыми нейтронами и гамма-квантами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2013. № 2. С. 64–66.
10. Градобоев А.В., Рубанов П.В. Деградация светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs при облучении электронами // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 1/2. С. 195–197.
11. Градобоев А.В., Рубанов П.В., Скакова И.М. Деградация светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN при облучении гамма-квантами // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 1/2. С. 190–194.
12. Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленин В.В., Свешников Ю.Н., Шеремет В.Н. Радиационные повреждения контактных структур с диффузионными барьерами, подвергнутых γ -облучению ^{60}Co // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. № 4. С. 467–475.

References:

1. Yachmenev A.E., Ryzhii V.I., Maltsev P. P. GaAs PHEMT performance increase using Delta-doping in the form of nanowires of tin. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal* (Russian Technological Journal). 2017; 5(2):40-46. (in Russ.)
2. Glinsky I., Zenchikov N.V., Maltsev P.P., Thermal modelling of terahertz quantum-

cascade laser based on nanoheterostructures GaAs/AlGaAs. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(3):27-36. (in Russ.)

3. Uvarov E.F. Radiation effects in wide-bandgap semiconductors A^{III}B^V. M.: Publishing House of Central Research Institute of Electronics, 1978. 77 p. (in Russ.)

4. Astvatsaturian R.E., Gromov D.V., Elesin V.V. [et al.] Radiation effects in GaAs semiconductor devices and integrated circuits. *Zarubezhnaya elektronnyaya tekhnika* (Foreign Electronics). 1988; 1:48-85. (in Russ.)

5. Obolensky S.V. Electrophysical characteristics determination of GaAs subject to radiation influence. Proceed. of the 2nd Meeting of the NATO project SfP-973799. Semiconductor. Nizhny Novgorod, 2002. P. 143-154. (in Russ.)

6. Akchurin R.Kh., Marmalyuk A.A. MOS-hydride epitaxy in the technology of materials of photonics and electronics. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2018. 488 p. (in Russ.)

7. Vigdorovich E.N., Ryzhikov I.V. Effect of irradiation on the properties of AlInGaN heterostructures. Abstracts of the 11th All-Russian Conference «Nitrides of gallium, indium and aluminum - structures and devices». Moscow, 1-3 February, 2017. P. 102-103. (in Russ.)

8. Kondratenko V.S., Abdulaev O.R., Ryzhikov I.V., Vinogradov V.S., Firsov A.S. Comparative studies of the effect of penetrating radiation on new generation of LEDs based on AlGaInP and AlInGaN heterostructures. *Pribory* (Instruments). 2009; 3(105):41-49. (in Russ.)

9. Gradoboev A.V., Orlova K.N., Asanov I.A. Parameter degradation of heterostructures AlGaInP at radiation by fast neutrons and gamma quanta. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: fizika radiozhionnogo vozdeystviya na radioelektronnyye apparatury*. (Questions of atomic science and technics. Series: Physics of radiation effect on radio-electronic equipment). 2013; 2:64-66. (in Russ.)

10. Gradoboev A.V., Rubanov P.V. Degradation of LEDs based on heterostructures AlGaAs by irradiation with electrons. *Izvestiya VUZov. Fizika* (Russian Physics Journal). 2011; 54(1/2):195-197. (in Russ.)

11. Gradoboev A.V., Rubanov P.V., Skakova I.M. LED degradation based on InGaN/GaN heterostructures under gamma-ray irradiation. *Izvestiya VUZov. Fizika* (Russian Physics Journal). 2011; 54(1/2):190-194. (in Russ.)

12. Belyaev A.E., Boltovets N.S., Konakova R.V., Milenin V.V., Sveshnikov Yu.N., Sheremet V.N. Radiation damage of contact structures with diffusion barriers exposed to irradiation ⁶⁰Co γ -ray photons. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov (Semiconductors / Physics of the Solid State)*. 2010; 44(4):448-456.

Об авторе:

Вигдорович Евгений Наумович, доктор технических наук, профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 107996, Москва, ул. Стромьинка, д. 20).

About the author:

Evgeny N. Vigdorovich, D.Sc. (Engineering), Professor of the Chair of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (20, Stromynka st., Moscow 107996, Russia).

Для цитирования: Вигдорович Е.Н. Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 41–49. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-49

For citation: Vigdorovich E.N. Radiation resistance of epitaxial structures based on GaAs. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):41-49. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-49