

Научная статья
УДК 539.1.043
DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16404>

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ НАРУШЕНИЙ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ РАЗНЫХ МАСС В АЛЬФА-ОКСИД ГАЛЛИЯ ПРИ МАЛЫХ УРОВНЯХ ПОВРЕЖДЕНИЯ

А. И. Клевцов^{1, 2} ✉, П. А. Карасев¹,
К. В. Карабешкин¹, А. И. Титов¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Научно-производственное предприятие «ЭЛАР», Санкт-Петербург, Россия
✉ klevtsov_ai@spbstu.ru

Аннотация. В работе получены распределения структурных нарушений при облучении альфа-фазы оксида галлия ионами фтора, фосфора и ксенона с энергией, измеряемой килоэлектронвольтами (температура комнатная). Установлено заметное влияние усредненной плотности индивидуальных каскадов столкновений на эффективность введения стабильных нарушений для поверхностного пика радиационных дефектов. В отличие от случаев ионной имплантации во многие другие полупроводники, впервые обнаружено, что в альфа-Ga₂O₃ между поверхностным и объемным максимумами структурных нарушений возникает дополнительный пик. Этот промежуточный максимум ясно виден на спектрах резерфордовского обратного рассеяния при малых уровнях повреждения. Изучены характерные особенности впервые обнаруженного максимума.

Ключевые слова: оксид галлия, ионная имплантация, радиационный дефект, каскады столкновений, резерфордовское обратное рассеяние

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00166).

Для цитирования: Клевцов А. И., Карасев П. А., Карабешкин К. В., Титов А. И. Особенности накопления структурных нарушений при имплантации ионов разных масс в альфа-оксид галлия при малых уровнях повреждения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 4. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16404>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16404>

PECULIARITIES OF STRUCTURE DAMAGE ACCUMULATION UNDER THE IMPLANTATION OF IONS OF DIFFERENT MASSES INTO ALPHA-GALLIUM OXIDE AT LOW DAMAGE LEVELS

A. I. Klevtsov^{1, 2} ✉, P. A. Karasev¹,
K. V. Karabeshkin¹, A. I. Titov¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² Joint-Stock Company "Research and Production Enterprise "ELAR", St. Petersburg, Russia

✉ klevtsov_ai@spbstu.ru

Abstract. In the paper, the distributions of structure damage created in alpha-phase of gallium oxide by keV fluorine, phosphorus and xenon ion irradiation, have been obtained at room temperature. A noticeable effect of the average individual collision cascade density on the stable damage production efficiency at the surface was established. In contrast to many other semiconductors, an intermediate damage peak appeared in the alpha-Ga₂O₃ between the surface and bulk maxima. This intermediate peak visible in the RBS/C spectra at low damage levels was discovered for the first time. Characteristic peculiarities of the discovered maximum were investigated.

Keywords: gallium oxide, ion implantation, radiation defect, collision cascades, Rutherford backscattering

Funding: The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 22-19-00166).

For citation: Klevtsov A. I., Karaseov P. A., Karabeshkin K. V., Titov A. I., Peculiarities of structure damage accumulation under the implantation of ions of different masses into alpha-gallium oxide at low damage levels, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (4) (2023) 42–49. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16404>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Ионное облучение является одним из важных методов модификации структуры вещества в ряду современных технологий и инструментов исследования свойств различных материалов. Известно, что имплантация ионов в полупроводники всегда сопровождается образованием устойчивых структурных нарушений. Необходимость анализа ионно-стимулированных процессов, в частности возникновения повреждений структуры в материалах, обусловлена, в основном, двумя прикладными задачами. Во-первых, радиационное повреждение выступает в качестве основного лимитирующего фактора при разработке технологий ионно-лучевой обработки для изготовления электронных приборов. Во-вторых, часто возникает необходимость определять стойкость электронных приборов, работающих в условиях высоких радиационных нагрузок и находить возможности ее повышения. Поэтому соответствующие исследования начаты уже довольно давно. Однако радиационные дефекты в бинарных и более сложных по составу материалах имеют комплексную природу и остаются малоизученными.

Для исследования накопления нарушений кристаллической структуры при ионной бомбардировке часто используется метод резерфордского обратного рассеяния быстрых ионов гелия в сочетании с каналированием (*англ.* Rutherford Backscattering/Channeling (RBS/C)) [1]. С помощью этого метода установлено, что при облучении многих полупроводников, по крайней мере легкими ионами, распределения формируемых нарушений по глубине имеют бимодальный характер [2 – 5]. При этом формируется объемный максимум дефектов (ОМД), который обычно располагается на глубине максимума упругих потерь энергии тормозящихся ионов [3, 4], т. е. там, где генерируется основная масса первичных точечных дефектов. Кроме того, происходит разупорядочение кристаллической структуры непосредственно у поверхности бомбардируемой мишени. Этот поверхностный максимум дефектов (ПМД) возникает вследствие диффузии первичных дефектов к поверхности полупроводника и их последующей коагуляции на этой поверхности (см., например, статью [6]). Помимо этого, иногда на распределении дефектов по глубине обнаруживается еще один максимум, локализованный между ПМД и ОМД; примером может служить результат облучения оксида цинка тяжелыми ионами. Такой максимум дефектов получил название промежуточного (ПрМД) [7 – 9]. В случае облучения оксида цинка ионами ксенона с энергией 500 кэВ причиной возникновения ПрМД является образование сильно дефектного слоя, обогащенного цинком [9].

Одним из наиболее перспективных полупроводниковых материалов для создания электронных приборов высокой мощности и оптоэлектроники нового поколения является оксид галлия Ga_2O_3 , обладающий такими преимуществами, как большая ширина запрещенной зоны (4,5 – 5,3 эВ для разных фаз), высокое значение напряжения пробоя (около 8 МВ/см) и др. [10]. Ранее были получены одни из первых данных по накоплению структурных нарушений в $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [11, 12] и $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [11, 13] при их бомбардировке ускоренными атомарными ионами. Обнаруженное распределение стабильных нарушений структуры как для стабильной β -фазы, так и для метастабильного α -политипа, имеет бимодальный характер. Доза ионов, необходимая для достижения приблизительно одинакового уровня разупорядочения для $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, примерно в 10 раз выше, чем для стабильной β -фазы [11]. Дальнейшее развитие этих исследований показало, что при ионном облучении альфа-фазы оксида галлия могут возникать условия, при которых будет наблюдаться ПрМД.

Цель настоящего исследования – описать обнаружение ПрМД в полупроводниковом материале $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ при ионном облучении и выяснить условия его появления.

Методика эксперимента

В работе исследовались эпитаксиальные слои альфа-фазы оксида галлия ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) со структурой корунда толщиной примерно 2 мкм с ориентацией (0001), выращенные на c -плоскости сапфировой подложки методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии (*англ.* Hydride Vapour-Phase Epitaxy (HVPE)).

Образцы облучали ионами фтора, фосфора и ксенона при комнатной температуре на (500 кВ)-имплантере производства NVEE (Нидерланды). Облучение проводилось под углом 7° от направления [0001] для минимизации эффектов каналирования. Параметры облучения были подобраны таким образом, чтобы генерация первичных дефектов, создаваемых тормозящимися ионами, была приблизительно одинаковой по глубине мишени во всех случаях. Для этого значения энергий и токов ионов выбирали такими, чтобы при облучении ионами разной природы профили распределения концентраций смещенных атомов по глубине были подобными и различались только высотой максимума.

Профили генерации смещений рассчитывались в приближении парных столкновений [14]. Дозы ионов выражались в среднем количестве первичных смещений атомов мишени (*англ.* displacements per atom (dpa)), рассчитываемом на глубине максимума функции генерации. Расчет величины dpa производился кодом TRIM (версия SRIM-2013, <http://www.srim.org>) [14]. Плотность ионного потока при облучении различными ионами поддерживалась одинаковой в единицах dpa/c. Для удобства сравнения профилей распределения структурных нарушений при облучении различными типами ионов, дозы подбирались так, чтобы уровни повреждения в области ПМД были не слишком высокими и близкими друг к другу. Кроме того, для более глубокого изучения обнаруженного эффекта путем сравнения, было проведено облучение ионами иной природы (фосфора) и с более высокой энергией (65 кэВ) при тех же значениях дозы и плотности тока и в единицах dpa, и dpa/c, что были использованы ранее.

Степень разупорядочения структуры кристалла после облучения измерялась методом резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием (RBS/C). Для измерения использовался зондирующий пучок ионов гелия He^{++} с энергией 0,7 МэВ в направлении [0001]. Детектор рассеянных частиц располагался под углом 103° относительно направления падающего пучка. Для построения распределений относительного разупорядочения по глубине, полученные спектры RBS/C обрабатывались по стандартному алгоритму [15].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1,а приведены распределения структурных нарушений по глубине мишени $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, полученные после имплантации ионов с разной массой. Как уже отмечалось, дозы облучения были выбраны таким образом, чтобы результирующие уровни повреждения в области поверхностного максимума были не слишком высокими и достаточно близкими друг к другу. Нетрудно видеть, что значения доз, отвечающие этим требованиям, тем ниже, чем больше масса иона. Действительно, для достижения в ПМД

разупорядочения порядка 0,15 облучением ионами ксенона Xe требуется доза 0,30 дпа, ионами фосфора P – 0,44 дпа, а ионами фтора F – уже 1,50 дпа. Напомним, что условия ионной бомбардировки были выбраны такими, чтобы скорости генерации первичных дефектов в бинарном приближении [14] и распределения дефектов по глубине совпадали для ионов разного типа.

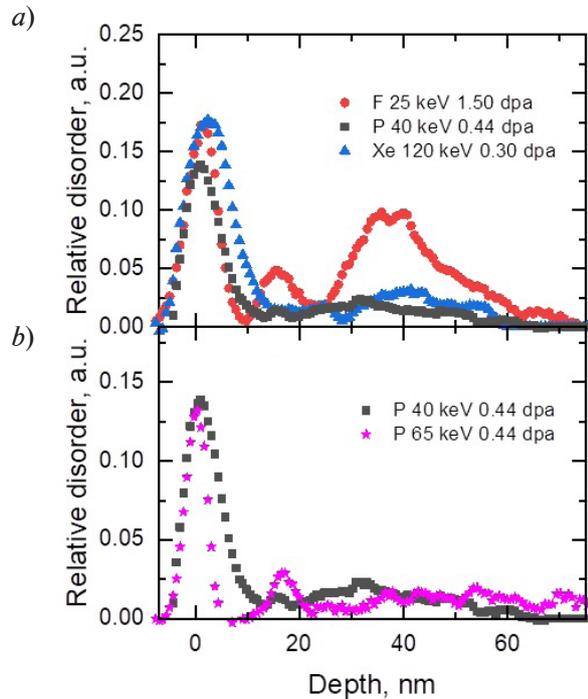


Рис. 1. Распределения концентрации относительного разупорядочения по глубине мишени $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ после облучения ионами разных масс с разными энергиями и дозами (указаны на рисунке):

a – ионами фтора, фосфора и ксенона; *b* – только ионами фосфора с двумя разными энергиями и одинаковой дозой. Плотности ионного потока составляли (10^{-3} дпа/с): 2,41 (для ионов фтора) и 0,08 (для остальных ионов)

Из этих результатов следует, что на уровень повреждения кристаллической структуры $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ существенное влияние может оказывать еще один параметр, который изменяется от иона к иону при такой постановке эксперимента; этот параметр – усредненная плотность индивидуальных каскадов смещений. Препятствие экспериментальные исследования показали, что облучение молекулярными ионами приводит к более эффективному формированию ПМД; на это указывали результаты, полученные при облучении оксида галлия более высокими дозами ионов [12]. Ранее, в работе [16] мы предложили рассчитывать значение указанного параметра на основе приближения парных столкновений.

На рис. 2 представлены зависимости плотности каскадов, создаваемых ионами в мишени из альфа-оксида галлия, от ее глубины, которые были получены расчетным путем на такой основе. Видно, что плотность каскадов, создаваемых ионами фтора, меньше, чем таковая, создаваемая ионами фосфора и ксенона. Таким образом, и в этом случае, при довольно малых дозах и токах ионов, увеличение плотности каскадов смещений приводит к повышению эффективности формирования поверхностного максимума дефектов.

Обращает на себя внимание и появление еще одного хорошо различимого пика между ПМД и ОМД на кривой,

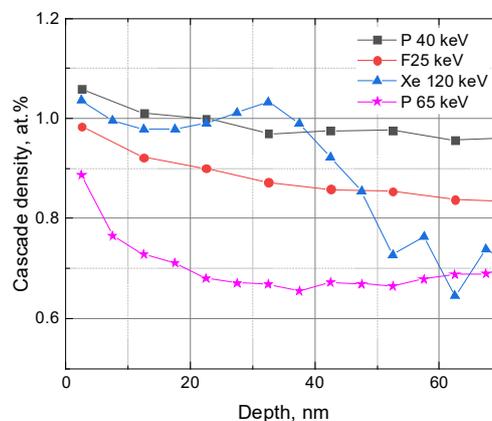


Рис. 2. Распределения плотности индивидуальных каскадов смещений по глубине мишени $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ после облучения ионами разных масс с разными энергиями (указаны на рисунке). Расчеты выполнены на основе приближения парных столкновений [14] по методу, предложенному в работе [16]

представленной на рис. 1, *a* (распределение концентрации дефектов при бомбардировке ионами фтора с энергией 25 кэВ). Этот промежуточный максимум дефектов (ПрМД) расположен на глубине мишени $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ около 17 нм. По нашему мнению, аналогичный пик присутствует и на распределении, полученном при облучении ионами фосфора с энергией 40 кэВ. В случае же бомбардировки альфа-оксида галлия более тяжелыми ионами ксенона этот максимум не наблюдается. Отметим, что появление ПрМД – это новый феномен, который мы не наблюдали при имплантации ионов до более высоких доз.

Для дальнейшего исследования этого феномена было проведено облучение ионами фосфора с более высокой энергией (65 кэВ) и той же дозой (0,44 dpa). Полученное распределение структурных нарушений показано на рис. 1, *b*. Видно, что ширина поверхностного максимума с повышением энергии ионов фосфора становится несколько меньше. Кроме того, в этом случае в альфа-оксиде галлия наблюдается формирование довольно заметного промежуточного максимума, приблизительно на той же глубине, что наблюдался ранее для ионов фтора (см. рис. 1, *a* и *b*). Таким образом, ПрМД формируется не только при облучении ионами фтора, но и ионами фосфора. С повышением энергии ионов фосфора ПрМД становится более выраженным.

Как уже отмечалось выше, ПрМД ранее был обнаружен при имплантации ионов в оксид цинка. Однако природа его возникновения для данного случая ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) и для ZnO, по-видимому, различна. Действительно, в оксиде цинка формирование ПрМД происходит только при облучении тяжелыми ионами и он заметен в широком диапазоне доз. Величина ПрМД в оксиде цинка не зависела от природы иона. В случае оксида $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ мы наблюдаем ПрМД только при облучении легкими ионами и при малых дозах. Величина ПрМД в оксиде галлия при одинаковых условиях ионной бомбардировки – разная для ионов фосфора и фтора, и для ионов фосфора она возрастает с увеличением энергии.

Стоит обратить внимание на различия в поведении кривых распределения плотности индивидуальных каскадов смещений для всех экспериментально рассмотренных случаев (см. рис. 2). Видно, что вблизи поверхности наиболее высокое значение параметра обнаруживается при торможении тяжелых ионов ксенона. Ионы фосфора с энергией 40 кэВ формируют каскады с меньшей плотностью, а для ионов фтора значения плотности еще ниже. С увеличением энергии ионов фосфора от 40 до 65 кэВ плотность каскадов смещений снижается. Таким образом, в мишени $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, в отличие от ZnO, ПрМД возникает при малой плотности каскадов, а не при большой.

В то же время причины появления ПрМД на спектре пока не ясны. Для выявления деталей поведения и механизма образования ПрМД в $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ необходимы дальнейшие многосторонние и более глубокие исследования.

Заключение

В работе экспериментально получены распределения структурных нарушений по глубине при имплантации в полупроводниковый материал $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ малых доз ионов фтора, фосфора и ксенона в диапазоне энергий, измеряемых килоэлектронвольтами. Рассчитана усредненная плотность индивидуальных каскадов смещений; результаты расчета, наряду с экспериментальными данными, указывают на рост эффективности радиационного повреждения оксида галлия при увеличении такой плотности.

Обнаружено, что для использованных ионов со средними массами и выбранных технологических доз ионная бомбардировка мишени из оксида галлия, в отличие от других материалов мишени, приводит к появлению дополнительного максимума структурных нарушений, который расположен между поверхностным и объемными максимумами на соответствующих кривых распределений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. М.: Мир, 1989. 344 с.
2. Gerasimov A. I., Zorin E. I., Pavlov P. V., Tetelbaum D. I. On the peculiarities of silicon amorphization at ion bombardment // Physica Status Solidi. 1972. Vol. 12. No. 2. Pp. 679–685.

3. **Kucheyev S. O., Williams J. S., Pearton S. J.** Ion implantation into GaN // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2001. Vol. 33. No. 2–3. Pp. 51–107.
4. **Azarov A. Yu., Titov A. I., Karaseov P. A., Hallén A.** Effect of collision cascade density on radiation damage in SiC // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2009. Vol. 267. No. 8–9. Pp. 1247–1250.
5. **Kucheyev S. O., Williams J. S., Jagadish C., Zou J., Evans C., Nelson A. J., Hamza A. V.** Ion-beam-produced structural defects in ZnO // *Physical Review B*. 2003. Vol. 67. No. 9. P. 094115.
6. **Titov A. I., Belyakov V. S., Azarov A. Yu.** Formation of surface amorphous layers in semiconductors under low-energy light-ion irradiation: Experiment and theory // *Nuclear Instruments and Methods B*. 2003. Vol. 212. December. Pp. 169–178.
7. **Azarov A. Yu., Kucheyev S. O., Titov A. I., Karaseov P. A.** Effect of density of collision cascades on ion implantation damage in ZnO // *Journal of Applied Physics*. 2007. Vol. 102. No. 8. P. 083547.
8. **Azarov A. Yu., Titov A. I., Karaseov P. A., Kucheyev S. O., Hallén A., Kuznetsov A. Yu., Svensson B. G., Pathak A. P.** Structural damage in ZnO bombarded by heavy ions // *Vacuum*. 2010. Vol. 84. No. 8. Pp. 1058–1061.
9. **Myers M. T., Charnvanichborikarn S., Wei C. C., Luo Z. P., Aitkaliyeva A., Shao L., Kucheyev S. O.** Defect microstructure in heavy-ion-bombarded (0001) ZnO // *Acta Materialia*. 2012. Vol. 60. No. 17. Pp. 6086–6090.
10. **Pearton S. J., Ren F., Mastro M.** (Eds.). Gallium oxide. Technology, devices and applications. Amsterdam: Elsevier Inc., 2019. 479 p.
11. **Titov A. I., Karabeshkin K. V., Struchkov A. I., Nikolaev V. I., Azarov A. Yu., Gogova D. S., Karaseov P. A.** Comparative study of radiation tolerance of GaN and Ga₂O₃ polymorphs // *Vacuum*. 2022. Vol. 200. June. P. 111005.
12. **Карасев П. А., Карабешкин К. В., Стручков А. И., Печников А. И., Николаев В. И., Андреева В. Д., Титов А. И.** Накопление структурных нарушений при облучении α -Ga₂O₃ ионами Р и PF₄ // *Физика и техника полупроводников*. 2022. Т. 56. № 9. С. 882–887.
13. **Azarov A., Venkatachalapathy V., Karaseov P., Titov A., Karabeshkin K., Struchkov A., Kuznetsov A.** Interplay of the disorder and strain in gallium oxide // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. No. 1. 13 September. P. 15366.
14. **Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U.** The stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon Press, 1985. 321 p.
15. **Schmid K.** Some new aspects for the evaluation of disorder profiles in silicon by backscattering // *Radiation Effects*. 1973. Vol. 17. No. 3–4. Pp. 201–207.
16. **Kucheyev S. O., Azarov A. Yu., Titov A. I., Karaseov P. A., Kuchumova T. M.** Energy spike effects in ion-bombarded GaN // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Vol. 42. No. 8. P. 085309.

REFERENCES

1. **Feldman L. C., Mayer J. W.**, Fundamentals of surface and thin films analysis, Pearson College Div., London, 1986.
2. **Gerasimov A. I., Zorin E. I., Pavlov P. V., Tetelbaum D. I.**, On the peculiarities of silicon amorphization at ion bombardment, *Phys. Status Solidi*. 12 (2) (1972) 679–685.
3. **Kucheyev S. O., Williams J. S., Pearton S. J.**, Ion implantation into GaN, *Mat. Sci. Eng. R Rep.* 33 (2–3) (2001) 51–107.
4. **Azarov A. Yu., Titov A. I., Karaseov P. A., Hallén A.**, Effect of collision cascade density on radiation damage in SiC, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. 267 (8–9) (2009) 1247–1250.
5. **Kucheyev S. O., Williams J. S., Jagadish C., et al.**, Ion-beam-produced structural defects in ZnO, *Phys. Rev. B*. 67 (9) (2003) 094115.
6. **Titov A. I., Belyakov V. S., Azarov A. Yu.**, Formation of surface amorphous layers in semiconductors under low-energy light-ion irradiation: Experiment and theory, *Nucl. Instrum. Meth. B*. 212 (Dec) (2003) 169–178.
7. **Azarov A. Yu., Kucheyev S. O., Titov A. I., Karaseov P. A.**, Effect of density of collision cascades on ion implantation damage in ZnO, *J. Appl. Phys.* 102 (8) (2007) 083547.
8. **Azarov A. Yu., Titov A. I., Karaseov P. A., et al.**, Structural damage in ZnO bombarded by heavy ions, *Vacuum*. 84 (8) (2010) 1058–1061.

9. Myers M. T., Charnvanichborikarn S., Wei C. C., et al., Defect microstructure in heavy-ion-bombarded (0001) ZnO, *Acta Mater.* 60 (17) (2012) 6086–6090.
10. Pearton S. J., Ren F., Mastro M. (Eds.), Gallium oxide. Technology, devices and applications, Elsevier Inc., Amsterdam, 2019.
11. Titov A. I., Karabeshkin K. V., Struchkov A. I., et al., Comparative study of radiation tolerance of GaN and Ga₂O₃ polymorphs, *Vacuum.* 200 (June) (2022) 111005.
12. Karaseov P. A., Karabeshkin K. V., Struchkov A. I., et al., Radiation damage accumulation in α-Ga₂O₃ under P and PF₄ ion bombardment, *Semiconductors.* 56 (9) (2022) 664–669.
13. Azarov A., Venkatachalapathy V., Karaseov P., et al., Interplay of the disorder and strain in gallium oxide, *Sci. Rep.* 12 (1; 13 Sept) (2022) 15366.
14. Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U., The stopping and range of ions in solids, Pergamon Press, NY, 1985.
15. Schmid K., Some new aspects for the evaluation of disorder profiles in silicon by backscattering, *Radiat. Eff.* 17 (3–4) (1973) 201–207.
16. Kucheyev S. O., Azarov A. Yu., Titov A. I., et al., Energy spike effects in ion-bombarded GaN, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 (8) (2009) 085309.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛЕВЦОВ Антон Игоревич — аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, инженер Акционерного общества “Научно-производственное предприятие «ЭЛАР»”, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

klevtsov_ai@spbstu.ru

ORCID: 0009-0004-6988-9685

КАРАСЕВ Платон Александрович — доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

platon.karaseov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0003-2511-0188

КАРАБЕШКИН Константин Валерьевич — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

yanikolaus@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1770-1877

ТИТОВ Андрей Иванович — доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

andrei.titov@rphf.spbstu.ru

ORCID: 0000-0003-4933-9534

THE AUTHORS**KLEVTSOV Anton I.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Joint-Stock Company "Research and Production Enterprise «ELAR»"*
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
klevtsov_ai@spbstu.ru
ORCID: 0009-0004-6988-9685

KARASEOV Platon A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
platon.karaseov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-2511-0188

KARABESHKIN Konstantin V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
yanikolaus@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-1770-1877

TITOV Andrei I.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
andrei.titov@rphf.spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-4933-9534

*Статья поступила в редакцию 27.10.2023. Одобрена после рецензирования 12.11.2023.
Принята 12.11.2023.
Received 27.10.2023. Approved after reviewing 12.11.2023. Accepted 12.11.2023.*