Научная статья
УДК 539.1.043
DOI: https://doi.org/10.18721/JPM.19209

ОБРАЗОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ АЛЬФА-ОКСИДА ГАЛЛИЯ

А. И. Клевцов [1, 2] ✉, П. А. Карасев [1], А. И. Титов [1]

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

[2] Акционерное общество "Научно-производственное предприятие «ЭЛАР»", Санкт-Петербург, Россия

✉ klevtsovanton@rambler.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования накопления радиационных повреждений в α-Ga_2O_3 при последовательной бомбардировке ионами фтора и фосфора с различной энергией кэВ-диапазона. Установлено заметное влияние последовательности ионного облучения как на количество, так и профиль распределения устойчивых дефектов по глубине. Обсуждается физическая природа подобной некоммутативности.

Ключевые слова: оксид галлия, ионная имплантация, последовательное облучение, радиационный дефект, резерфордовское обратное рассеяние

Для цитирования: Клевцов А. И., Карасев П. А., Титов А. И. Образование устойчивых радиационных повреждений при последовательной ионной бомбардировке альфа-оксида галлия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 2. С. 98–106. DOI: https://doi.org/10.18721/ JPM.19209

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.19209

RADIATION DEFECT FORMATION DURING SEQUENTIAL ION BOMBARDMENT OF ALPHA-GALLIUM OXIDE

A. I. Klevtsov [1, 2] ✉, P. A. Karaseov [1], A. I. Titov [1]

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

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

✉ klevtsovanton@rambler.ru

Abstract. This paper presents the results of a study of radiation damage accumulation in α-Ga_2O_3 under sequential bombardment with fluorine and phosphorus ions with varying energies of the keV range. A significant effect of the ion irradiation sequence on both the number and depth distribution profile of stable defects was established. The physical nature of this noncommutativity is discussed.

Keywords: gallium oxide, ion implantation, sequential irradiation, radiation defects, Rutherford backscattering

For citation: Klevtsov A. I., Karaseov P. A., Titov A. I., Radiation defect formation during sequential ion bombardment of alpha-gallium oxide, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (2) (2026) 98–106. DOI: https://doi.org/10.18721/ JPM.19209

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

© Клевцов А. И., Карасев П. А., Титов А. И., 2026. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Введение

Ионная имплантация является одним из ключевых процессов современной полупроводниковой технологии для селективной модификации свойств материалов. Хорошо известно, что облучение полупроводников ускоренными ионами всегда сопровождается образованием стабильных нарушений кристаллической структуры [1]. Эффективность такого радиационного повреждения зависит от целого ряда параметров, таких как масса и энергия ионов, плотность их потока, температура и состав мишени и т.п. [2, 3].

При создании полупроводниковых приборов широко используется последовательное облучение ионами с различной энергией и/или ионами разных химических элементов. Очевидным примером использования данного подхода может служить формирование необходимого распределения легирующих атомов примеси по глубине [4]. Несмотря на широкое практическое применение, закономерности и физические механизмы, определяющие итоговую степень структурного разупорядочения мишени при последовательном облучении, остаются для ряда полупроводниковых материалов недостаточно понятными, а для таких весьма актуальных полупроводников, как оксид галлия, практически неизученными.

В то же время из литературы известно, что накопление дефектов при последовательном облучении полупроводников ионами, обладающими различной энергией, и/или их типов, может быть как неаддитивным, так и некоммутативным процессом [5 – 7]. Это, в частности, означает, что результирующий профиль распределения структурных повреждений может оказаться не просто суммой профилей глубинных нарушений, сформированных отдельными ионными облучениями с соответствующими энергиями и дозами (неаддитивность). Кроме того, конечное распределение нарушений может драматически зависеть от порядка, в котором применялось облучение (см., например, такие сведения для кремния в работах [5, 6] и для нитрида галлия в [7]) (некоммутативность). Помимо этого, было установлено, что при некоторых комбинациях ионов и последовательностей бомбардировки второе облучение может даже уменьшать уровень радиационных повреждений, который был сформирован после первой имплантации [8 – 14].

Переход к более широкозонным оксидным полупроводникам открывает новые перспективы для силовой электроники и оптоэлектроники, но одновременно ставит вопрос о радиационной стойкости и особенностях дефектообразования в этих материалах, в частности при имплантации ускоренных ионов.

Одним из наиболее перспективных представителей данного семейства считается оксид галлия [15 – 19], существующий в нескольких политипных модификациях [15]. Моноклинная β-фаза оксида галлия (β-Ga_2O_3), ширина запрещенной зоны которого составляет около 4,8 эВ, уже активно исследуется и внедряется в производство диодов Шоттки [20] и полевых транзисторов [21]. В то же время метастабильной ромбоэдрической α-фазе оксида галлия (α-Ga_2O_3) со структурой корунда присущ ряд уникальных свойств:

большая ширина запрещенной зоны (до ~5,3 эВ),

высокое критическое поле пробоя (до ~8 МВ),

возможность эпитаксиального роста на сравнительно недорогих сапфировых подложках [22, 23].

Практическая реализация приборных структур на основе α-Ga_2O_3 неизбежно требует надежных методов локального легирования и изоляции, основным из которых остается ионная имплантация. Таким образом, для формирования основ ионно-лучевой модификации α-Ga_2O_3 необходимо понимать закономерности накопления и отжига радиационных дефектов в этом материале, в том числе при последовательном облучении. Однако, если формирование структурных нарушений и радиационная стойкость β-Ga_2O_3 в последние годы изучается довольно активно [15 – 22, 24], то данные о повреждениях в α-Ga_2O_3 пока остаются ограниченными [25 – 27], а работы по последовательной бомбардировке ионами разного типа и энергии до недавнего времени практически отсутствовали [28].

В настоящей работе впервые исследовано накопление радиационных повреждений в полупроводниковом соединении α-Ga_2O_3 в условиях последовательного облучения легкими ионами фтора F^+ и фосфора P^+ с энергиями кэВ-диапазона, используемого в промышленности.

© Klevtsov A. I., Karaseov P. A., Titov A. I., 2026. Published by Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

Методика эксперимента

В работе исследованы эпитаксиальные слои α-Ga_2O_3 со структурой корунда толщиной около 2 мкм с ориентацией (0001), выращенные на *c*-плоскости сапфировой подложки методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии (*англ.* Hydride Vapour-Phase Epitaxy (HVPE)) в ООО «Совершенные кристаллы» (Санкт-Петербург) [29]. Образцы облучали ионами фтора и фосфора при комнатной температуре, с использованием ионного имплантера на 500 кВ (HVEE-500) в АО "Научно-производственное предприятие «ЭЛАР»" (Санкт-Петербург). Облучение проводили под углом 7° по отношению к кристаллографическому направлению [0001] для минимизации эффектов каналирования в кристалле.

Для проведения корректного анализа экспериментальных данных сравнение радиационного повреждения проводилось для одинакового количества смещений на атом (*англ.* Displacements per Atom (DPA)), генерируемых в мишени. Значения дозы ионов Φ_{DPA} были определены в приближении парных столкновений как отношение концентрации вакансий в максимуме профиля упругих потерь энергии (n_v) при заданном флюенсе ионов, рассчитанной с использованием кода TRIM [30], к атомной концентрации α-Ga_2O_3 (n_{at} = 1,03·10^{23} ат/см^3), так что $\Phi_{DPA} = (n_v \cdot \Phi) / n_{at}$, где Φ, см$^{-2}$, – флюенс.

Также плотность ионного потока, определяемая как $F_{DPA} = d\Phi_{DPA}/dt$, поддерживалась постоянной в единицах DPA/с. Все параметры использованных облучений приведены в таблице.

Таблица

Значения параметров использованного ионного облучения

Ион	Энергия		R_p	R_{pd}	1 DPA	Плотность ионного тока		
	кэВ	кэВ/аем	нм	нм	10^{14} см$^{-2}$	мкА/см^2	10^{11} см$^{-2}$·с$^{-1}$	10^{-3} DPA/с
F^+	25	1,3	30	17	10,61	0,41	25,4	2,4
	50	2,6	55	36	12,15	0,47	29,2	
	60	3,0	74	48	12,72	0,49	30,6	
P^+	40	1,3	30	17	6,28	0,24	15,1	
	80	2,6	55	36	6,48	0,25	15,6	

Обозначения: R_p – проективный пробег ионов примеси – положение максимума концентрации внедренной примеси; R_{pd} – максимум функции генерации первичных дефектов; DPA – количество смещений на атом.

Примечание. Во всех случаях использовались положительные, однократно заряженные ионы. Доза во всех случаях составляла 1,5 DPA.

Степень разупорядочения кристаллической структуры образцов 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 кристаллографическом направлении [0001]. Детектор рассеянных частиц располагался под углом 170° относительно направления падающего пучка.

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены функции генерации первичных точечных дефектов – упругих потерь энергии (сплошные линии), рассчитанные по TRIM [30]. Значения максимума профиля концентрации внедренной примеси R_p и максимума функции генерации первичных дефектов R_{pd} также сведены в таблицу. Энергии ионов подбирались так, чтобы распределения первичных точечных дефектов для ионов F^+ (25 кэВ) и P^+ (40 кэВ), а также F^+ (50 кэВ) и P^+ (80 кэВ) были подобны друг другу (см. рис. 1). Для проведения второго облучения (с высокой энергией) энергия ионов выбиралась таким образом, чтобы максимум функции генерации дефектов располагался на глубине, соответствующей положению дефектов, образовавшихся в объеме при первом облучении (с низкой энергией).

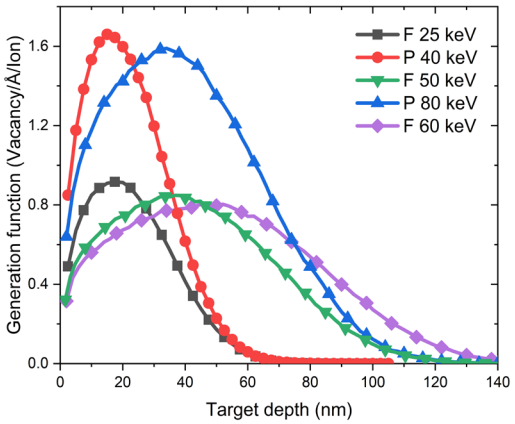


Рис. 1. Зависимости функции генерации первичных точечных дефектов в α-Ga_2O_3 от глубины образца, рассчитанной по TRIM для ионов фтора с энергиями 25 – 60 кэВ и ионов фосфора с энергиями 40 и 80 кэВ

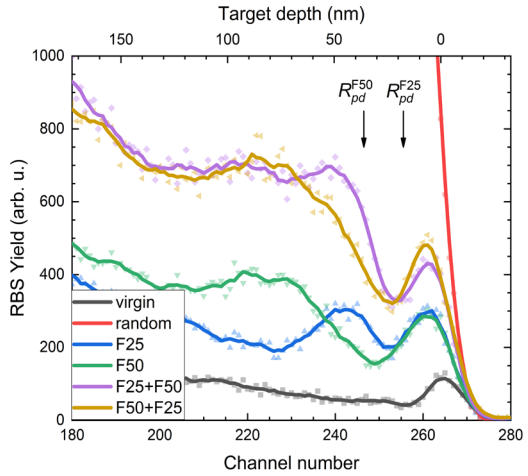


Рис. 2. Экспериментальные спектры резерфордовского обратного рассеяния при облучении образцов α-Ga_2O_3 ионами фтора с энергиями 25 и 50 кэВ разными способами: однократные и двукратные облучения в разной последовательности (см. легенду). Даны также кривые для необлученных образцов в ориентированном (virgin) и неориентированном (случайном (random)) направлениях зондирующего пучка.

Доза составляла 1,5 DPA для каждого отдельного облучения. Стрелками показаны положения максимумов функций генерации первичных точечных дефектов, соответствующих воздействию ионами фтора используемых энергий

На рис. 2 представлены экспериментальные RBS/C-спектры для случаев одиночного облучения ионами фтора 25 и 50 кэВ дозой 1,5 DPA. Спектры представляют собой зависимость числа зарегистрированных обратно-отраженных ионов гелия от номера канала мультиканального анализатора. На спектрах в обоих случаях наблюдаются два максимума: один в объеме образца – объемный пик дефектов (BDP); второй в области поверхности – поверхностный пик дефектов (SDP), связанный с образованием поверхностного аморфного слоя за счет диффузии первичных точечных дефектов из объема к поверхности, благодаря их подвижности [25]. Для ионов фтора с энергией 25 кэВ BDP располагается на спектре в области 246-го канала, что соответствует глубине примерно 35 нм и максимуму функции генерации для ионов фтора с энергией 50 кэВ, для которых, в свою очередь, BDP расположен в области 229-го канала, эквивалентного глубине около 62 нм.

Также на рис. 2 представлены результаты последовательного облучения ионами фтора для двух случаев: в первом сначала низкой энергией 25 кэВ, затем высокой 50 кэВ; во втором случае наоборот: сначала высокой энергией, затем низкой. Каждый этап облучения проводился одной и той же дозой: 1,5 DPA. Из данных рис. 2 следует, что конечный вид спектра, а следовательно, и распределение дефектов, сильно зависит от способа облучения, несмотря на одинаковые значения DPA и DPA/c. Действительно, когда первое облучение проводится ионами фтора низкой энергии, т.е. оказывается суммарное энергетическое воздействие 25 + 50 кэВ, после второго облучения наблюдается повышение BDP. И наоборот, величина BDP оказывается ниже при обратном порядке облучения.

Таким образом, облучение ионами фтора с энергиями 25 и 50 кэВ представляет собой некоммутативный процесс [28].

Далее были проведены эксперименты по проверке коммутативности ионной бомбардировки образцов α-Ga_2O_3 ионами фосфора. Как было указано выше, энергии облучения и ионами фосфора подбирались так, чтобы функции генерации первичных точечных дефектов были подобны соответствующим функциям для ионов F^+. Облучение проводилось той же дозой: 1,5 DPA. На рис. 3 показаны спектры резерфордовского обратного рассеяния для однократных облучений ионами фосфора по 40 и 80 кэВ; при этом положения BDP для них также находятся в области 246-го (глубина ~35 нм) и 229-го (~ 62 нм) каналов соответственно

[25, 26]. Результаты облучения ионами фосфора в разной последовательности, а именно 40 + 80 кэВ и 80 + 40 кэВ также представлены на рис. 3. Наблюдается значительное возрастание сигнала для последовательности низкая энергия – высокая энергия, а следовательно, и более интенсивное накопление устойчивых радиационных повреждений. Как и в случае облучения ионами фтора, бомбардировка ионами фосфора с энергиями 40 и 80 кэВ также является некоммутативным процессом.

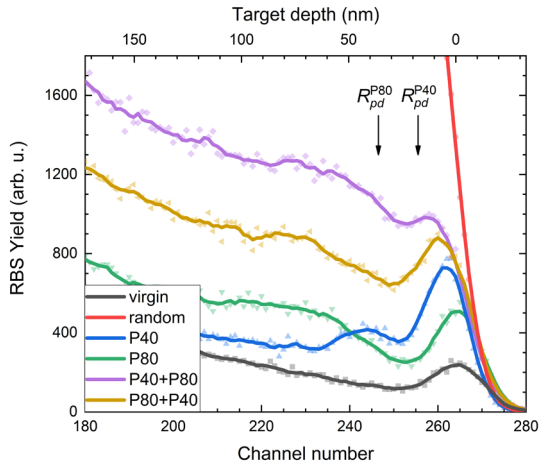


Рис. 3. Спектры резерфордовского обратного рассеяния, аналогичные приведенным на рис. 2, но для облучения ионами фосфора с энергиями 40 и 80 кэВ (см. легенду)

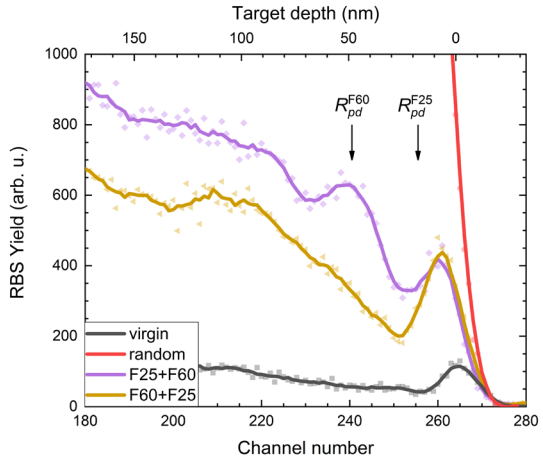


Рис. 4. Спектры, аналогичные приведенным на рис. 2, но соответствуют лишь двукратному облучению ионами фтора с энергиями 25 и 60 кэВ в разной последовательности

Наконец, в заключительном эксперименте энергия второго облучения ионами фтора была выбрана равной 60 кэВ. Подбор был сделан так, чтобы максимум генерации лежал несколько глубже положения BDP для ионов 25 кэВ. Дозы каждого этапа облучения также были равны 1,5 DPA. Итоговые RBS/C-спектры для случаев F^+ 25 + 60 кэВ и 60 + 25 кэВ представлены на рис. 4. Видно, что максимум генерации смещен вглубь образца относительно положения BPD F^+ 25 кэВ примерно на 13 нм, а для F^+ 60 кэВ BDP расположен в области 220-го канала (~90 нм). Как и в остальных случаях, обнаружена интенсификация дефектообразования для последовательности облучения низкая энергия – высокая энергия. Несмотря на увеличение энергии второго иона, облучение ионами фтора 25 + 60 кэВ также оказалось некоммутативным.

К настоящему времени были предложены два механизма ионной имплантации полупроводников (и продемонстрированы их возможности), приводящих к некоммутативности накопления структурных нарушений.

Механизм первый [25]: это нелинейность дозовых зависимостей структурных нарушений на разных глубинах для каждого типа бомбардирующего иона.

Механизм второй [7, 31]: это формирование на глубине более высокой концентрации стабильных повреждений при облучении ионами меньшей энергии, что приводит к более эффективному образованию устойчивых дефектов с участием подвижных точечных дефектов при последующем высокоэнергетичном облучении.

Именно второй механизм наблюдался нами экспериментально. В случае же, когда высокоэнергетичное облучение применялось первым, концентрация стабильных нарушений в объеме оказывалась ниже (по сравнению с низкоэнергетическим облучением) и подвижные точечные дефекты менее эффективно закреплялись на глубине и диффундировали к границе поверхностный аморфный слой/кристаллический слой. Для выяснения физической природы некоммутативности при последовательной имплантации ионов в образцы α-Ga_2O_3, очевидно, необходимы дополнительные исследования.

Заключение

В работе исследовано накопление радиационных повреждений в образцах альфа-оксида галлия при последовательном облучении ионами фтора, и отдельно ионами

фосфора (также последовательно) с разной энергией как ионов фтора так и ионов фосфора. Обнаружена некоммутативность этого процесса в облучаемом объекте при последовательном воздействии указанными ионами. Предложены возможные механизмы, объясняющие данный эффект. Понимание закономерностей и физической природы сильной зависимости интенсивности накопления устойчивых дефектов при имплантации ионов в разной последовательности позволит учитывать этот эффект при создании электронных приборов на основе полупроводникового соединения α-Ga_2O_3. Очевидно, что в дальнейшем необходимо продолжать как экспериментальные, так и теоретические исследования рассматриваемого явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фелдман Л., Майер Д.** Основы анализа поверхности и тонких пленок. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 342 с.

2. **Davies J. A.** High energy density collision cascades and spike effects (Chapter 4) // J. S. Williams, J. M. Poate (Eds.). Ion implantation and beam processing. Sydney, Australia: Academic Press, 1984. Pp. 81–97.

3. **Thompson D. A.** High density cascade effects // Radiation Effects. 1981. Vol. 56. No. 3–4. Pp. 105–150.

4. **Taube A., Kaminska E., Kozubal M., et al.** Ion implantation for isolation of AlGaN/GaN HEMTs using C or Al // Physica Status Solidi A. 2015. Vol. 212. No. 5. Pp. 1162–1169.

5. **Аброян И. А., Титов А. И., Хлебалкин А. В.** Образование дефектов в кремнии при комбинированном облучении ионами // Физика и техника полупроводников. 1979. Т. 13. № 2. С. 227–233.

6. **Аброян А. И., Конышев В. В., Титов А. И., Хлебалкин А. В.** Влияние состояния кристаллической структуры кремния на накопление дефектов при ионном облучении // Физика и техника полупроводников. 1981. Т. 15. № 1. С. 166–168.

7. **Titov A. I., Karaseov P. A., Karabeshkin K. V., Struchkov A. I.** The formation of radiation damage in GaN during successive bombardment by light ions of various energies // Vacuum. 2020. Vol. 173. March. P. 109149.

8. **Bai Q., Li L., Cheng F. F., Bin R., Fa T., Fu E., Yao S. D.** Study on microstructure and mechanical properties of He and H ion irradiated 6H-SiC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2015. Vol. 365. Part A, 15 December. Pp. 347–351.

9. **Bogh E., Hogild P., Stensgaard I.** Spatial distribution of defects in ion bombarded silicon and germanium // Radiation Effects. 1971. Vol. 7. No. 1–2. Pp. 115–121.

10. **Kool W. H., Roosendaal H. E., Wiggers L. W., Saris F. W.** Production and beam annealing of damage in carbon implanted silicon. II // Radiation Effects. 1978. Vol. 36. No. 1–2. Pp. 41–48.

11. **Аброян И. А., Никулина Л. М., Титов А. И.** Ионно-стимулированное упорядочение структуры предварительно облученного кремния // Физика и техника полупроводников. 1985. Т. 19. № 6. С. 1030–1034.

12. **Аброян И. А., Никулина Л. М.** Молекулярный эффект при имплантации легких ионов в полупроводники // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31. № 10. С. 1164–1167.

13. **Jiang W., Weber W. J., Zhang Y., Thevuthasan S., Shutthanandan V.** Ion beam analysis of irradiation effects in 6H–SiC // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2003. Vol. 207. No. 1. Pp. 92–99.

14. **Pelaz L., Marqués L. A., Barbolla J.** Ion-beam-induced amorphization and recrystallization in silicon // Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 96. No. 11. Pp. 5947–5976.

15. **Stepanov S. I., Nikolaev V. I., Bougrov V. E., Romanov A. E.** Gallium oxide: properties and application – A review // Reviews on Advanced Materials Science. 2016. Vol. 44. No. 1. Pp. 63–86.

16. **Pearton S. J., Ren F., Mastro M.** (Eds.). Gallium oxide. Technology, devices and applications. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc., 2019. 479 p.

17. **Pearton S. J., Ren F., Tadjer M., Kim J.** Perspective: Ga_2O_3 for ultra-high power rectifiers and MOSFETS // Journal of Applied Physics. 2018. Vol. 124. No. 22. P. 220901.

18. **Wellmann P. J.** Power electronic semiconductor materials for automotive and energy saving applications – SiC, GaN, Ga_2O_3, and diamond // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 2017. Vol. 643. No. 21. Pp. 1312–1322.

19. **Nikolskaya A., Okulich E., Korolev D., et al.** Ion implantation in β-Ga_2O_3: Physics and technology // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2021. Vol. 39. No. 3. P. 030802.

20. **Cai Y., Feng Z., Wang Z., et al.** Demonstration of the normally off β-Ga_2O_3 MOSFET with high threshold voltage and high current density // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 123. No. 19. P. 193501.

21. **Farzana E., Roy S., Hendricks N. S., Krishnamoorthy S., Speck J. S.** Vertical PtO_x/Pt/β-Ga_2O_3 Schottky diodes with high permittivity dielectric field plate for low leakage and high breakdown voltage // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 123. No. 19. P. 192102.

22. **Ahmadi E., Oshima Y.** Materials issues and devices of α- and β-Ga_2O_3 // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. No. 16. P. 160901.

23. **Polyakov A. Y., Nikolaev V. I., Yakimov E. B., Ren F., Pearton S. J., Kim J.** Deep level defect states in β-, α-, and ε-Ga_2O_3 crystals and films: Impact on device performance // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2022. Vol. 40. No. 2. P. 020804.

24. **Azarov A., Galeckas A., Mikhaylov A., Nikolskaya A., Tetelbaum D., Korolev D., Monakhov E., Kuznetsov A.** Defect evolution and nitrogen incorporation in ion-implanted β-Ga_2O_3 // Applied Physics Letters. 2024. Vol. 125. No. 19. P. 192107.

25. **Klevtsov A., Karaseov P., Azarov A., Karabeshkin K., Fedorenko E., Titov A., Kuznetsov A.** Non-linear effects in α-Ga_2O_3 radiation phenomena // APL Materials. 2024. Vol. 12. No. 11. P. 111121.

26. **Клевцов А. И., Карасев П. А., Карабешкин К. В., Титов А. И.** Особенности накопления структурных нарушений при имплантации ионов разных масс в альфа-оксиде галлия при малых уровнях повреждения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 4. С. 42–49.

27. **Titov A., Klevtsov A., Fedorenko E., Azarov A., Kuznetsov A., Karaseov P.** Density and fractality of collision cascades in α-Ga_2O_3 // Applied Physics Letters. 2025. Vol. 127. No. 15. P. 152107.

28. **Klevtsov A. I., Kleimanov R. V., Azarov A., Karaseov P. A., Karabeshkin K. V., Titov A. I.** Damage accumulation in alpha gallium oxide during sequential keV light ion implantations // Proceedings of the 2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). October 17–18, St. Petersburg, Russia. IEEE: 2024. Pp. 339–342.

29. **Печников А. И., Степанов С. И., Чикиряка А. В., Щеглов М. П., Одноблюдов М. А., Николаев В. И.** Толстые слои alpha-Ga_2O_3 на сапфировых подложках, полученные методом хлоридной эпитаксии // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 6. С. 789–792.

30. **Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U.** The stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon Press, 1985. 321 p.

31. **Titov A. I., Karaseov P. A., Kataev A. Yu, Azarov A. Yu, Kucheyev S. O.** Model for radiation damage buildup in GaN // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2012. Vol. 277. 15 April. Pp. 80–83.

REFERENCES

1. **Feldman L. C., Mayer J. W.,** Fundamentals of surface and thin film analysis, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, 1986.

2. **Davies J. A.,** High energy density collision cascades and spike effects (Ch. 4), In book: J. S. Williams, J. M. Poate (Eds.). Ion implantation and beam processing, Academic Press, Sydney, Australia (1984) 81–97.

3. **Thompson D. A.,** High density cascade effects, Radiat. Eff. 56 (3–4) (1981) 105–150.

4. **Taube A., Kaminska E., Kozubal M., et al.,** Ion implantation for isolation of AlGaN/GaN HEMTs using C or Al, Phys. Status Solidi A. 212 (5) (2015) 1162–1169.

5. **Abroyan I. A., Titov A. I., Khlebalkin A. V.,** Obrazovaniye defektov v kremnii pri kombinirovannom obluchenii ionami [The formation of defects in silicon under combined ion irradiation], Fiz. Tekh. Poluprovodn. (USSR). 13 (2) (1979) 227–233 (in Russian).

6. **Abroyan A. I., Konyshev V. V., Titov A. I., Khlebalkin A. V.,** Vliyaniye sostoyaniya kristallicheskoy struktury kremniya na nakopleniye defektov pri ionnom obluchenii [The influence of the state of the Si crystalline structure on the accumulation of defects during ion irradiation], Fiz. Tekh. Poluprovodn. (USSR). 15 (1) (1981)166–168 (in Russian).

7. **Titov A. I., Karaseov P. A., Karabeshkin K. V., Struchkov A. I.,** The formation of radiation damage in GaN during successive bombardment by light ions of various energies, Vacuum. 2020. 173 (March) (2020) 109149.

8. **Bai Q., Li L., Cheng F. F., et al.,** Study on microstructure and mechanical properties of He and H ion irradiated 6H-SiC, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 365 (Part A, 15 Dec) (2015) 347–351.

9. **Bogh E., Hogild P., Stensgaard I.,** Spatial distribution of defects in ion bombarded silicon and germanium, Rad. Eff. 7 (1–2) (1971) 115–121.

10. **Kool W. H., Roosendaal H. E., Wiggers L.W., Saris F. W.,** Production and beam annealing of damage in carbon implanted silicon. II, Rad. Eff. 36 (1–2) (1978) 41–48.

11. **Abroyan I. A., Nikulina L. M., Titov A. I.,** Ionically stimulated ordering of previously irradiated silicon, Fiz. Tekh. Poluprovodn. (USSR). 19 (6) (1985) 1030–1034 (in Russian).

12. **Abroyan I. A., Nikulina L. M.,** Molecular effect during light ion implantation in semiconductors, Fiz. Tekh. Poluprovodn. (USSR). 31 (10) (1997) 1164 –1167 (in Russian).

13. **Jiang W., Weber W. J., Zhang Y., et al.,** Ion beam analysis of irradiation effects in 6H–SiC, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 207 (1) (2003) 92–99.

14. **Pelaz L., Marqués L. A., Barbolla J.,** Ion-beam-induced amorphization and recrystallization in silicon, J. Appl. Phys. 96 (11) (2004) 5947–5976.

15. **Stepanov S. I., Nikolaev V. I., Bougrov V. E., Romanov A. E.,** Gallium oxide: properties and application – A review, Rev. Adv. Mater. Sci. 44 (1) (2016) 63–86.

16. **Pearton S. J., Ren F., Mastro M.** (Eds.), Gallium oxide. Technology, devices and applications, Elsevier Inc., Amsterdam (Netherlands), 2019.

17. **Pearton S. J., Ren F., Tadjer M., Kim J.,** Perspective: Ga_2O_3 for ultra-high power rectifiers and MOSFETS, J. Appl. Phys. 124 (22) (2018) 220901.

18. **Wellmann P. J.,** Power electronic semiconductor materials for automotive and energy saving applications – SiC, GaN, Ga_2O_3, and diamond, Z. Anorg. Allg. Chem. 643 (21) (2017) 1312–1322.

19. **Nikolskaya A., Okulich E., Korolev D., et al.,** Ion implantation in β-Ga_2O_3: Physics and technology, J. Vac. Sci. Technol. A. 39 (3) (2021) 030802.

20. **Cai Y., Feng Z., Wang Z., et al.,** Demonstration of the normally off β-Ga_2O_3 MOSFET with high threshold voltage and high current density, Appl. Phys. Lett. 123 (19) (2023) 193501.

21. **Farzana E., Roy S., Hendricks N. S., et al.,** Vertical PtO_x/Pt/β-Ga_2O_3 Schottky diodes with high permittivity dielectric field plate for low leakage and high breakdown voltage, Appl. Phys. Lett. 123 (19) (2023) 192102

22. **Ahmadi E., Oshima Y.,** Materials issues and devices of α- and β-Ga_2O_3, J. Appl. Phys. 126 (16) (2019) 160901.

23. **Polyakov S. J., Nikolaev S. J., Yakimov S. J., et al.,** Deep level defect states in β-, α-, and ε-Ga_2O_3 crystals and films: Impact on device performance, J. Vac. Sci. Technol. A. 40 (2) (2022) 020804.

24. **Azarov A., Galeckas A., Mikhaylov A. et al.,** Defect evolution and nitrogen incorporation in ion-implanted β-Ga_2O_3, Appl. Phys. Lett. 125 (19) (2024) 192107.

25. **Klevtsov A., Karaseov P., Azarov A., et al.,** Non-linear effects in α-Ga_2O_3 radiation phenomena, APL Mater. 12 (11) (2024) 111121.

26. **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 (in Russian).

27. **Titov A., Klevtsov A., Fedorenko E., et al.,** Density and fractality of collision cascades in α-Ga_2O_3, Appl. Phys. Lett. 127 (15) (2025) 152107.

28. **Klevtsov A. I., Kleimanov R. V., Azarov A., et al.,** Damage accumulation in alpha gallium oxide during sequential keV light ion implantations, Proc. 2024 Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), Oct. 17–18, St. Petersburg, Russia, IEEE (2024) 339–342.

29. **Pechnikov A. I., Stepanov S. I., Chikiryaka A.V., et al.,** Thick α-Ga_2O_3 layers on sapphire substrates grown by halide epitaxy, Semicond. 53 (6) (2019) 780–783.

30. **Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U.,** The stopping and range of ions in solids, Pergamon Press, New York, 1985.

31. **Titov A. I., Karaseov P. A., Kataev A. Yu., et al.,** Model for radiation damage buildup in GaN, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 277 (15 Apr) (2012) 80–83.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛЕВЦОВ Антон Игоревич – *ассистент кафедры физики Института физики и математики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, инженер-технолог 1 категории Акционерного общества "Научно-производственное предприятие «ЭЛАР»", Санкт-Петербург, Россия.*
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
klevtsovanton@rambler.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

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
ATitov@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
klevtsovanton@rambler.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

TITOV Andrei I.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
ATitov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-4933-9534

Статья поступила в редакцию 20.05.2026. Одобрена после рецензирования 03.06.2026. Принята 03.06.2026.
Received 20.05.2026. Approved after reviewing 03.06.2026. Accepted 03.06.2026.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2026