

# ИОННО-ЛУЧЕВАЯ МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

П.А. Карасев, А.И. Титов, А.И.Клевцов, Е.Д.Федоренко, К.В.Карабешкин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия*

Показано, что стойкость альфа-политипа оксида галлия к облучению ионами с энергиями в диапазоне 10-500 кэВ до доз несколько смещений на атом существенно превышает таковую для бета-политипа и приближается к стойкости нитрида галлия. В усиленном формировании устойчивых повреждений кристаллической структуры  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> играют роль нелинейные явления, возникающие, как в каскадах смещений, так и в ходе вторичного дефектообразования.

Оксид галлия (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – широкозонный полупроводник, образующий, в частности, следующие кристаллографические политипы: ромбоэдрический  $\alpha$ -, моноклинный  $\beta$ -политипы.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> стабилен при нормальных условиях и разработаны технологии роста высококачественных объемных монокристаллов этого политипа, потому его свойства наиболее изучены. В то же время,  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> стабилен при атмосферном давлении до 450-500 °С, обладает более широкой запрещенной зоной 5.3 эВ при теоретическом значении поля пробоя ~8 МВ/см, что позволяет надеяться на создание УФ фотодетекторов и приборов силовой электроники на его основе. Поэтому, эффекты, вызываемые в нем облучением ускоренными ионами, представляют большой интерес.

Проведенные нами эксперименты по облучению  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ионами различных масс с энергиями десятки-сотни кэВ показали, что распределение стабильных нарушений имеют бимодальный характер, дефекты накапливаются вблизи поверхности и в объеме, причем глубже максимума энерговыделения в упругих потерях. Величина пиков доходит до уровня полной аморфизации мишени с ростом дозы облучения а затем они сливаются при дозах ~30 СНА и формируется сплошной аморфный слой. При этом изменение толщины облучаемого слоя вплоть до дозы 45 дра не превышает 5 нм, а среднеквадратичная шероховатость поверхности  $\alpha$ - Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сохраняется примерно на одном уровне от (0.7 до 0.5 нм). Для достижения сходных уровней повреждения в  $\beta$ -политипе необходимы дозы на порядок ниже, то есть, радиационная стойкость кристаллической структуры  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при облучении ускоренными ионами превышает стойкость бета-политипа. Для описания наблюдаемого в эксперименте поведения необходимо учитывать нелинейное повышение эффективности формирования стабильных нарушений возникающее (1) в каскадах смещений высокой плотности, и (2) в ходе процессов вторичного дефектообразования, происходящих после термализации каскада.

При последовательной имплантации ионов с разными энергиями результирующее распределение дефектов зависит от последовательности, в которой производится облучение (некоммутативность при накоплении стабильных нарушений). Это важно учитывать при формировании глубоких равномерных профилей имплантируемой примеси (box-like profiles) методом ионной имплантации.

### **Публикации.**

1. Karabeshkin, K.V., Struchkov, A.I., Titov, A.I., Azarov, A., Gogova, D.S., Karaseov, P.A. (2022). “Molecular Effect in Damage Formation in  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”. // In: Velichko, E., Kapralova, V., Karaseov, P., Zavjalov, S., Angueira, P., Andreev, S. (eds) International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. Springer Proceedings in Physics, (2022). vol 268. pp 255–262 Springer, Cham. (DOI:10.1007/978-3-030-81119-8\_27)
2. Karabeshkin, K.V., Karaseov, P.A., Struchkov, A.I., Titov, A.I., Azarov, A., Gogova, D.S. “Comparative Study of Ion-Induced Damage Formation in GaN and *beta*-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”. // In: Velichko, E., Kapralova, V., Karaseov, P., Zavjalov, S., Angueira, P., Andreev, S. (eds) International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. Springer Proceedings in Physics, (2022). Vol. 268. p. 255. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81119-8\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81119-8_26)
3. Titov, A.I., Karabeshkin, K.V., Struchkov, A.I., Nikolaev V.I., Azarov A., Gogova, D.S., Karaseov, P.A. “Comparative study of radiation tolerance of GaN and Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polymorphs”, // Vacuum, (2022), Vol.200, p. 111005 (DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.111005)
4. A. Azarov, V. Venkatachalapathy, P. Karaseov, A. Titov, K. Karabeshkin, A.Struchkov, and A Kuznetsov “Interplay of the disorder and strain in gallium oxide” // Scientific Reports (2022) Vol. 12, pp. 15366(1-6) (DOI:10.1038/s41598-022-19191-8).
5. П.А. Карасев, К.В. Карабешкин, А.И. Стручков, А.И. Печников, В.И. Николаев, В.Д. Андреева, А.И. Титов, “Накопление структурных нарушений при облучении  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ионами Р и PF<sub>4</sub>” // Физика и техника полупроводников, 2022, Т. 56, №9, С. 882-887. (DOI: 10.21883/FTP.2022.09.53409.9928)
6. 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 Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 4. С. 42-49. (DOI: 10.18721/JPM.16404)
7. Стручков А.И., Карабешкин К.В., Карасев П.А., Титов А.И. Анализ параметров индивидуальных каскадов столкновений при облучении Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> атомарными и молекулярными ионами // Физика и техника полупроводников. 2023. Т. 57. № 9. С. 738-742. (DOI: 10.61011/FTP.2023.09.56988.5560).

8. 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 // IEEE Xplore 2024 International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech) (2024) vol. 268. pp. 339-342. (DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024).
9. A. Klevtsov, P. Karaseov, A. Azarov, K. Karabeshkin, E. Fedorenko, A Titov, A Kuznetsov, Non-linear effects in  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> radiation phenomena // APL Materials (2024) vol.12, pp. 111121(1-8). (DOI: 10.1063/5.0235497)
10. Е.Д. Федоренко, А.И.Клевцов, А.И.Титов, В.Д.Андреева, А.Л.Шахмин, П.А. Карасев. Модификация приповерхностных слоёв альфа оксида галлия при облучении сверхбольшими дозами ионов // Физика и техника полупроводников, (2024) Т.58, №9, С. 513-523. (DOI: 10.61011/FTP.2024.09.59313.7126).