

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-943-948

УДК 621.315.592

Формирование толстого слоя ϵ -Ga₂O₃ на подслое GaN с V-дефектами на границе раздела

Андрей Юрьевич Иванов¹✉, Шукрилло Шамсутдинович Шарофидинов²,
Дмитрий Юрьевич Панов³, Арина Валерьевна Кремлева⁴,
Дмитрий Андреевич Бауман⁵, Алексей Евгеньевич Романов⁶

^{1,3,4,5,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{2,4,6} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

¹ aiivanov@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0737-9079>

² shukrillo71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0354-5981>

³ dmitriipnv@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8715-9505>

⁴ avkremleva@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7045-0918>

⁵ dabauman@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>

⁶ alexey.romanov@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>

Аннотация

Введение. Приведены результаты исследования по получению и характеристике квазиобъемных эпитаксиальных гетероструктур ϵ -Ga₂O₃/GaN различной толщины, содержащих V-дефекты на границе раздела. Актуальность работы обусловлена активным поиском путей создания приборных гетероструктур для устройств оптоэлектроники, работающих в глубоком ультрафиолетовом диапазоне, а также НЕМТ-транзисторов высокочастотной и мощной электроники. Одним из таких решений является эпитаксиальное выращивание толстого слоя ϵ -Ga₂O₃ на темплейтах с эпитаксиальным слоем GaN. ϵ -Ga₂O₃ отличается большой шириной запрещенной зоны и высокой спонтанной поляризацией. **Метод.** Слои оксида галлия (Ga₂O₃) выращивались методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии на заранее подготовленных структурах GaN/AlN/3C-SiC/Si. В процессе охлаждения реактора до комнатной температуры, вследствие баланса коэффициентов термического расширения составляющих слоев, гетероструктура Ga₂O₃/GaN (с буферным слоем AlN) самопроизвольно отделяется от подложки SiC/Si. Морфология поверхности слоя Ga₂O₃ и поперечное сечение границы раздела в гетероструктурах Ga₂O₃/GaN исследовались методом растровой электронной микроскопии на микроскопе TESCAN MIRA 3. Фазовый состав и кристаллическое совершенство гетероструктуры ϵ -Ga₂O₃/GaN определялись методами рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-8 АО «ИЦ «Буревестник». Спектры пропускания гетероструктур получены методом спектрофотометрии с использованием интегрирующей сферы. **Основные результаты.** Показана возможность получения эпитаксиальных гетероструктур Ga₂O₃/GaN методом хлорид-гидридной газофазной эпитаксии с последующим отделением от темплейта. Исследования методом растровой электронной микроскопии показали, что гетероструктуры Ga₂O₃/GaN содержат квазиобъемный слой Ga₂O₃ толщиной 100 мкм. Продemonстрировано, что ростовая поверхность GaN содержит V-дефекты, показан эффект заравнивания V-дефектов эпитаксиальным слоем Ga₂O₃. Исследования методом рентгеновской дифракции позволили установить, что сформированная гетероструктура содержит монокристаллический слой ϵ -Ga₂O₃, а полная ширина на уровне половины максимума интенсивности кривой дифракционного отражения 0, 0, 10 составляет 1,8°, что свидетельствует об удовлетворительном качестве эпитаксиального слоя. Таким образом, в работе представлена возможность отслаивания эпитаксиальных слоев от темплейта для получения квазиобъемных гетероструктур ϵ -Ga₂O₃/GaN достаточно большой толщины. **Обсуждение.** Результаты исследования открывают новые возможности создания темплейтов и подложек для эпитаксии широкозонных полупроводниковых материалов. Перспективой дальнейших работ является оптимизация режимов роста и геометрии подобных гетероструктур с толстым слоем ϵ -Ga₂O₃.

Ключевые слова

оксид галлия, широкозонные полупроводники, толстые слои, гетероструктура ϵ -Ga₂O₃/GaN, V-дефекты

Благодарности

А.В. Кремлева и Ш.Ш. Шарофидинов выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работ по эпитаксиальному росту структур Ga₂O₃/GaN (грант № 24-22-00392). А.Ю. Иванов, Д.Ю. Панов, Д.А. Бауман и А.Е. Романов выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследований эпитаксиальных Ga₂O₃ структур (грант № 24-12-00229).

Ссылка для цитирования: Иванов А.Ю., Шарофидинов Ш.Ш., Панов Д.Ю., Кремлева А.В., Бауман Д.А., Романов А.Е. Формирование толстого слоя ϵ -Ga₂O₃ на подслое GaN с V-дефектами на границе раздела // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 6. С. 943–948. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-943-948

Forming a thick layer of ϵ -Ga₂O₃ on the GaN sublayer with V-defects at the interface

Andrey Yu. Ivanov¹✉, Shukrillo Sh. Sharofidinov², Dmitrii I. Panov³, Arina V. Kremleva⁴,
Dmitrii A. Bauman⁵, Alexey E. Romanov⁶

^{1,3,4,5,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{2,4,6} Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

¹ aiiivanov@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0737-9079>

² shukrillo71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0354-5981>

³ dmitriipnv@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8715-9505>

⁴ avkremleva@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7045-0918>

⁵ dabauman@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>

⁶ alexey.romanov@niuitmo.ru, <https://orcid.org/0003-3738-408X>

Abstract

This report presents the results of an experiment to obtain and characterization of quasi-bulk monocrystal epitaxial ϵ -Ga₂O₃/GaN heterostructures which contain V-defects at the interface. The significance of this work is due to an active search for ways to develop device-heterostructures for deep-ultraviolet optoelectronics and for HEMT transistors in high-frequency and high-power electronics. One such solution is epitaxial growth of a thick ϵ -Ga₂O₃ layer on templates with GaN epitaxial layer to form ϵ -Ga₂O₃/GaN heterostructure. The ϵ -Ga₂O₃ is characterized by a wide band gap and high spontaneous polarization. The Ga₂O₃ layer was grown by chloride-hydride vapor-phase epitaxy on pre-prepared GaN/AlN/3C-SiC/Si structures. As the reactor was cooled to room temperature, the Ga₂O₃/GaN heterostructure (with an AlN buffer layer) spontaneously detached from the SiC/Si substrate due to the balance of the layer thermal expansion coefficients. The surface morphology of the gallium oxide layer and the cross-section of the interface in the Ga₂O₃/GaN heterostructures were studied using scanning electron microscopy with TESCAN MIRA 3. The phase composition and crystal quality of the Ga₂O₃/GaN heterostructures were studied by X-ray diffraction on the DRON-8 diffractometer of JSC Bourevestnik. Transmission spectra of the heterostructures were obtained by spectrophotometry using an integrating sphere. This paper demonstrates the epitaxial growth of Ga₂O₃/GaN heterostructures through chloride-hydride vapor phase epitaxy and the possibility of detaching epitaxial layers from the template. Scanning electron microscopy studies of cross-section have shown that the Ga₂O₃/GaN heterostructures contain a quasi-bulk gallium oxide with a thickness of about 100 microns. Additionally, it was also shown that the heterostructures contained V-defects on the GaN growth surface, with the Ga₂O₃ layer grow over V-defects. X-ray diffraction study revealed that the formed heterostructure contains ϵ -Ga₂O₃ monocrystal layer, and the full width at half maximum intensity of the diffraction reflection curve 0,0,10 is 1.8 degrees, which indicates satisfactory quality for thick epitaxial layer. The results of the study open up the possibility to develop templates and substrates for epitaxial growth of wide-bandgap semiconductor materials. Optimization of the growth modes and geometry of such heterostructures with a thick ϵ -Ga₂O₃ layer is a promising area for further research.

Keywords

gallium oxide, wide-band semiconductors, thick layers, ϵ -Ga₂O₃/GaN heterostructure, V-defects

Acknowledgements

A.V. Kremleva and Sh.Sh. Sharofidinov thank the Russian Science Foundation for financial support of work on epitaxial growth of Ga₂O₃/GaN structures (grant No. 24-22-00392). A.Yu. Ivanov, D.I. Panov, D.A. Bauman and A.E. Romanov thank the Russian Science Foundation for financial support of research on epitaxial Ga₂O₃ structures (grant No. 24-12-00229).

For citation: Ivanov A.Yu., Sharofidinov Sh.Sh., Panov D.I., Kremleva A.V., Bauman D.A., Romanov A.E. Forming a thick layer of ϵ -Ga₂O₃ on the GaN sublayer with V-defects at the interface. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 943–948 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-943-948

Введение

Оксид галлия (Ga₂O₃) является полупроводниковым материалом с широкой запрещенной зоной $E_g = 4,9$ эВ, а также высоким критическим полем электрическо-

го пробоя $E_c = 8,0$ МВ/см [1]. Такие свойства делают Ga₂O₃ перспективным материалом для применения в силовой электронике и ультрафиолетовой оптоэлектронике. Наиболее термически стабильной является моноклинная фаза β -Ga₂O₃. Получение этой фазы возможно

как эпитаксиальными методами, так и в процессе роста из расплава объемных кристаллов [2]. Однако все большее внимание привлекают и менее стабильные фазы Ga_2O_3 , получаемые в процессе эпитаксии. Эти фазы являются предметом экспериментальных исследований [3] и теоретического анализа [4].

Наибольший интерес возникает к слою $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$, поскольку эта фаза обладает высокой спонтанной поляризацией, что открывает возможность проектирования высокопроизводительных устройств электроники и фотоники [5]. Для эпитаксиального роста $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в качестве материала подслоя могут быть использованы нитриды металлов третьей группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева (III-нитриды, III-N) благодаря схожему кристаллическому строению. Гетероструктуры $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{AlN}$ представляют значительный интерес для электроники из-за возможности формирования двумерного электронного газа на границе раздела, например, на гетероинтерфейсе $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ [6].

Слои III-нитридов, в частности нитрид галлия (GaN), полученные методами газовой эпитаксии с применением металлоорганических соединений или хлорид-гидридной газовой эпитаксии (ХГЭ), обычно имеют развитую морфологию поверхности [7], при образовании которой важную роль играют так называемые «V-дефекты». V-дефекты формируются в месте пересечения проникающих дислокаций с поверхностью при кинетически ограниченном росте [8]. V-дефекты затрудняют эпитаксиальный рост и приводят к неоднородности толщины гетерослоев и, таким образом, оказывают влияние на характеристики разрабатываемых устройств электроники и оптоэлектроники. Например, они являются предпочтительными путями для протекания электрического тока и могут усиливать инжекцию носителей заряда в активный слой. В работе [9] продемонстрировано их потенциальное воздействие на перенос заряда и формирование двумерного электронного газа на границе раздела гетероструктуры AlGaN/GaN . Известно о негативном влиянии V-дефектов на характеристики оптоэлектронных приборов на основе III-нитридов, когда такие дефекты служат центрами безызлучательной рекомбинации носителей заряда [10].

В настоящей работе приводятся результаты эксперимента по получению и характеристике структур $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ (с буферным слоем нитрида алюминия (AlN)) различной толщины, содержащие V-дефекты на границе раздела. Исследуемые образцы были выращены методом ХГЭ на темплейтах 3C-SiC/Si и самопроизвольно отделились от темплейта в процессе охлаждения реактора.

Значительный интерес вызывает получение толстых слоев $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ для последующего использования в качестве материала подложки. В работе [11] показана возможность ХГЭ роста эпитаксиального слоя $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ толщиной 86 мкм на подложке сапфира с буферным слоем GaN.

Материалы и методы

Слои Ga_2O_3 были выращены методом ХГЭ при температуре 482 °C на заранее подготовленных темплейтах $\text{GaN}/\text{AlN}/3\text{C-SiC}/\text{Si}$. Толщина буферных слоев AlN и карбида кремния (SiC) составляла порядка 50 и 100 нм соответственно. В процессе охлаждения реактора до комнатной температуры гетероструктура $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ (с буферным слоем AlN) самопроизвольно, благодаря балансу коэффициентов термического расширения составляющих слоев, отделялась от гетероструктуры SiC/Si. Слой SiC в структурах 3C-SiC/Si был получен методом замещения атомов [12]. Подобная методика эпитаксиального роста описана в работах [13, 14]. Толщины слоев для двух изготовленных образцов гетероструктур даны в таблице, а на рис. 1, а показана общая схема гетероструктуры $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$.

Исследована морфология поверхности слоя Ga_2O_3 и поперечное сечение границы раздела в гетероструктурах $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе TESCAN MIRA 3 (Чехия). Методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-8 (АО «ИЦ «Буревестник», Россия, Санкт-Петербург) проводились исследования фазового состава и кристаллического совершенства материалов гетероструктур. Спектры пропускания были получены методом ультрафиолетовой-видимой-инфракрасной спектроскопии с использованием интегрирующей сферы.

Обсуждение результатов

РЭМ-изображения поперечного сечения полученных гетероструктур (рис. 1, б) показали неоднородность распределения толщин слоя $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и подслоя GaN. При этом толщина слоя Ga_2O_3 достигала рекордного значения 101,1 мкм. На границе раздела наблюдались частично зарощенные Ga_2O_3 V-дефекты, что свидетельствует о возможности эпитаксиального роста слоев $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ на темплейте со сложной морфологией поверхности слоя GaN.

РЭМ-изображения, полученные в планарном режиме, свидетельствуют о развитой морфологии поверхности выращенных слоев $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Для образца А с толщиной слоя Ga_2O_3 101,1 мкм наблюдались разориентированные шестиугольные островки, формирующие

Таблица. Толщина слоев в образцах гетероструктур $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$

Table. Layer thickness in samples of $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ heterostructures

Образец	Время роста слоя Ga_2O_3 , мин	Толщина слоя GaN, мкм	Толщина слоя $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$, мкм
А	45	10,0–12,8	94,9–101,1
В	15	30,0–50,3	27,3–30,3

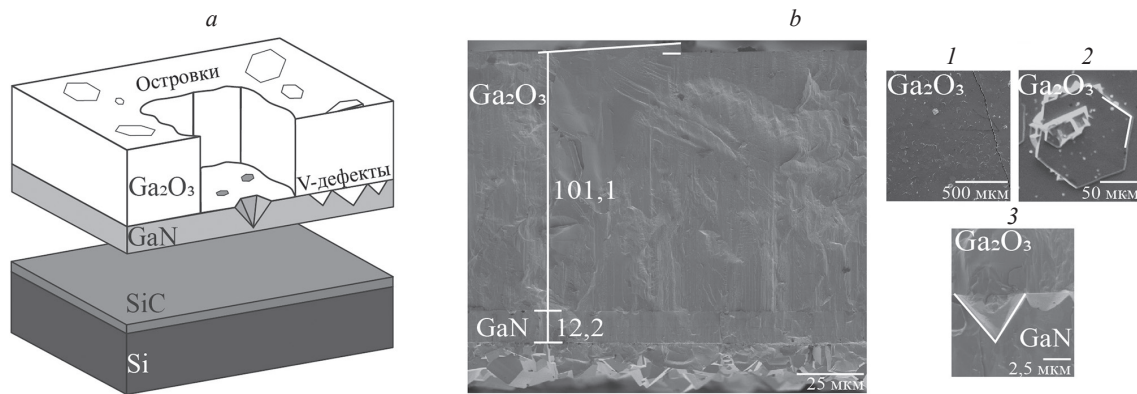


Рис. 1. Схематичное изображения исследуемых образцов (a); РЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры Ga₂O₃/GaN (b).

На вставках: 1 — изображения поверхности слоя оксида галлия; 2 — островок на поверхности; 3 — увеличенное изображение поперечного сечения V-дефектов

Fig. 1. A schematic representation of the samples under study (a); a scanning electron microscope (SEM) image of the cross-section of the Ga₂O₃/GaN heterostructure (b).

In the insert: 1 – images of the gallium oxide layer surface, 2 – an island on the surface, and 3 – an enlarged image of the V-defects cross-section

в поперечном сечении треугольные поверхностные ступеньки с углом к поверхности образца. Медианная длина граней островков составляла 86,9 мкм, угол между их гранями 120°. Гексагональная форма островков косвенно свидетельствует о кристаллографии и фазовом составе растущего слоя, которые были определены рентгеновскими методами.

Фаза ϵ -Ga₂O₃ характеризуется кристаллической решеткой, в которой орторомбические субъединицы повернуты на 120° относительно друг друга в c -плоскости (0001), формируя псевдогексагональную кристаллическую структуру [15]. Дифрактограммы образцов,

приведенные на рис. 2, a, содержат высокоинтенсивные отражения, соответствующие плоскости (0001) ϵ -фазы Ga₂O₃. Сравнение дифракционных картин показало, что интенсивность отражения от образца толстого слоя ниже, чем у образца с тонким слоем, что является следствием более развитой поверхности. На рис. 2, b представлены кривые дифракционного отражения для рефлекса 0, 0, 10 ϵ -Ga₂O₃. Данные кривые для исследуемых образцов имеют асимметричный вид, что указывает на блочность структуры и наличие разориентированных блоков, приводящих к увеличению полной ширины на половине максимума интенсивности.

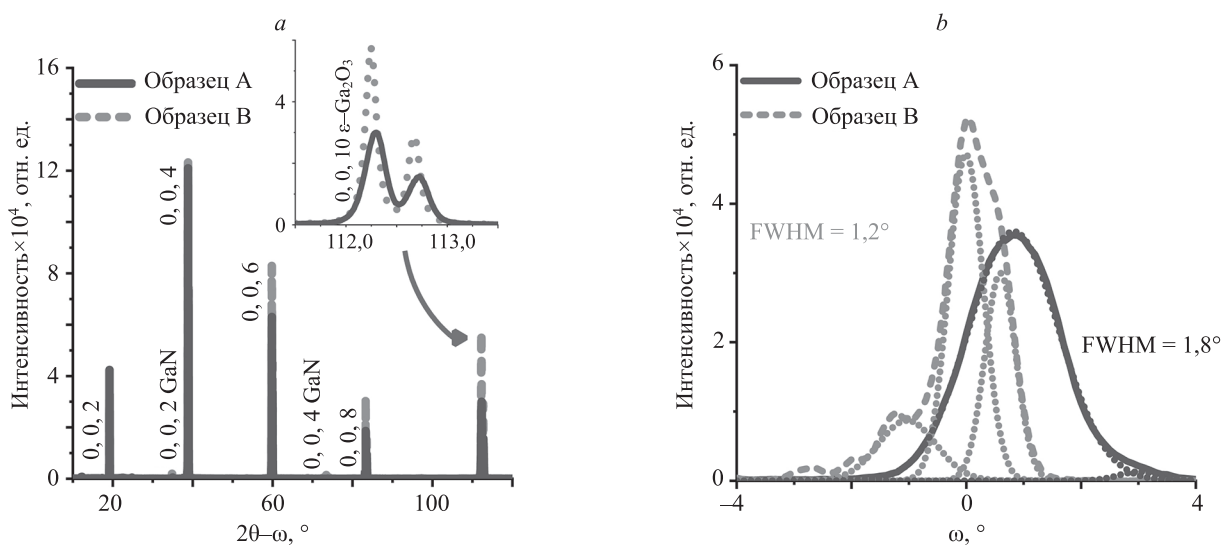


Рис. 2. Картины рентгеновской дифракции образцов А и В в широком диапазоне углов: в режиме 2θ-ω, на вставке показан дальний порядок дифракции (a); кривые дифракционного отражения для плоскости (0001) ϵ -Ga₂O₃ исследуемых образцов (b)

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of samples A and B over a wide range of angles: the 2θ-ω mode shows the long-range diffraction order in the insert (a); the diffraction reflection curves for the (0001) plane of ϵ -Ga₂O₃ in the studied samples (b)

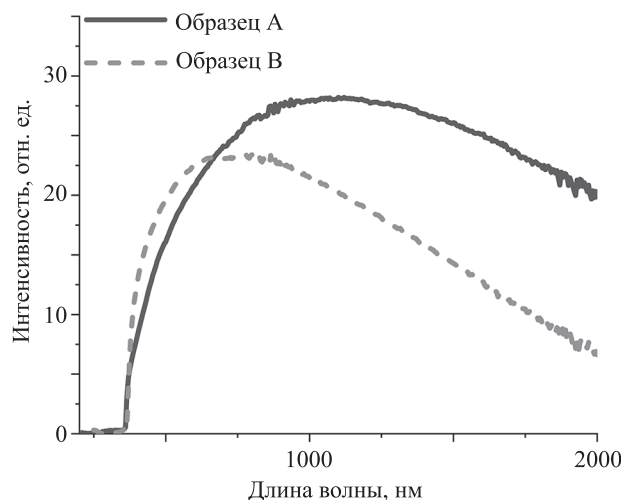


Рис. 3. Спектр пропускания исследуемых образцов А и В

Fig. 3. Transmission spectra of the studied samples A and B

Результаты исследования спектров пропускания гетероструктур $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$, представленные на рис. 3, показали, что рассмотренные образцы обладают низкой прозрачностью. Это может быть связано с развитой морфологией поверхности, дефектами кристаллической решетки и дефектами на границе раздела слоя $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и GaN.

Заключение

В работе показана возможность получения гетероструктур $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ с различной толщиной слоев методом хлорид-гидридной газовой эпитаксией с последующим отделением от темплейта. Исследования методом растровой электронной микроскопии позволили установить, что гетероструктуры $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ включают квазиобъемный слой оксида галлия толщиной 100 мкм, а гетерограница содержит зарождающиеся V-дефекты. Полная ширина на половине максимума интенсивности кривой дифракционного отражения слоя $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ для дальнего порядка дифракции составила $1,8^\circ$, что свидетельствует об удовлетворительном качестве для подобного толстого эпитаксиального слоя. Полученные в ходе исследований данные подтвердили развитую морфологию поверхности и разориентированную блочную структуру слоев оксида галлия. Показано отслаивание квазиобъемных гетероструктур $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$, которое открывает новые возможности в создании темплейтов и подложек для эпитаксии широкозонных полупроводниковых материалов. Выполнены эксперименты по отслаиванию исследованных гетероструктур $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ от темплейта. В дальнейшем планируется оптимизация режимов роста и геометрии подобных гетероструктур с толстым слоем $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ для использования в качестве темплейта (подложки) при разработке электронных и оптоэлектронных приборов на основе оксида или нитрида галлия.

Литература

- Wang C., Zhang J., Xu S., Zhang C., Feng Q., Zhang Y., Ning J., Zhao S., Zhou H., Hao Y. Progress in state-of-the-art technologies of Ga_2O_3 devices // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021. V. 54. N 24. P. 243001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abe158>
- Bauman D.A., Panov D.I., Spiridonov V.A., Kremleva A.V., Asach A.V., Tambulatova E.V., Sakharov A.V., Romanov A.E. High quality $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ bulk crystals, grown by edge-defined film-fed growth method: Growth features, structural, and thermal properties // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2023. V. 41. N 5. P. 053203. <https://doi.org/10.1116/6.0002644>
- Hou X., Zou Y., Ding M., Qin Y., Zhang Z., Ma X., Tan P., Yu S., Zhou X., Zhao X., Xu G., Sun H., Long S. Review of polymorphous Ga_2O_3 materials and their solar-blind photodetector applications // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021. V. 54. N 4. P. 043001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abbb45>
- Smirnov A.M., Ivanov A.Yu., Kremleva A.V., Sharofidinov Sh.Sh., Romanov A.E. Stress Relaxation due to dislocation formation in orthorhombic Ga_2O_3 films grown on Al_2O_3 substrates // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2022. V. 4. N 3. P. 1–6. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2022-4-3-1-6>
- Smirnov A.M., Kremleva A.V., Ivanov A.Yu., Myasoedov A.V., Sokura L.A., Kirilenko D.A., Sharofidinov Sh.Sh., Romanov A.E. Stress-strain state and piezoelectric polarization in orthorhombic Ga_2O_3 thin films depending on growth orientation // *Materials & Design*. 2023. V. 226. P. 111616. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111616>
- Leone S., Fornari R., Bosi M., Montedoro V., Kirste L., Doering P., Benkheilifa F., Prescher M., Manz C., Polyakov V., Ambacher O. Epitaxial growth of $\text{GaN}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ and $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ heterostructures for novel high electron mobility transistors // *Journal of Crystal Growth*. 2020. V. 534. P. 125511. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125511>
- Narang K., Bag R.K., Singh V.K., Pandey A., Saini S.K., Khan R., Arora A., Padmavati M.V.G., Tyagi R., Singh R. Improvement in surface morphology and 2DEG properties of AlGaN/GaN HEMT //

References

- Wang C., Zhang J., Xu S., Zhang C., Feng Q., Zhang Y., Ning J., Zhao S., Zhou H., Hao Y. Progress in state-of-the-art technologies of Ga_2O_3 devices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, vol. 54, no. 24, pp. 243001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abe158>
- Bauman D.A., Panov D.I., Spiridonov V.A., Kremleva A.V., Asach A.V., Tambulatova E.V., Sakharov A.V., Romanov A.E. High quality $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ bulk crystals, grown by edge-defined film-fed growth method: Growth features, structural, and thermal properties. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2023, vol. 41, no. 5, pp. 053203. <https://doi.org/10.1116/6.0002644>
- Hou X., Zou Y., Ding M., Qin Y., Zhang Z., Ma X., Tan P., Yu S., Zhou X., Zhao X., Xu G., Sun H., Long S. Review of polymorphous Ga_2O_3 materials and their solar-blind photodetector applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, vol. 54, no. 4, pp. 043001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abbb45>
- Smirnov A.M., Ivanov A.Yu., Kremleva A.V., Sharofidinov Sh.Sh., Romanov A.E. Stress Relaxation due to dislocation formation in orthorhombic Ga_2O_3 films grown on Al_2O_3 substrates. *Reviews on Advanced Materials and Technologies*, 2022, vol. 4, no. 3, pp. 1–6. <https://doi.org/10.17586/2687-0568-2022-4-3-1-6>
- Smirnov A.M., Kremleva A.V., Ivanov A.Yu., Myasoedov A.V., Sokura L.A., Kirilenko D.A., Sharofidinov Sh.Sh., Romanov A.E. Stress-strain state and piezoelectric polarization in orthorhombic Ga_2O_3 thin films depending on growth orientation. *Materials & Design*, 2023, vol. 226, pp. 111616. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111616>
- Leone S., Fornari R., Bosi M., Montedoro V., Kirste L., Doering P., Benkheilifa F., Prescher M., Manz C., Polyakov V., Ambacher O. Epitaxial growth of $\text{GaN}/\text{Ga}_2\text{O}_3$ and $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ heterostructures for novel high electron mobility transistors. *Journal of Crystal Growth*, 2020, vol. 534, pp. 125511. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125511>
- Narang K., Bag R.K., Singh V.K., Pandey A., Saini S.K., Khan R., Arora A., Padmavati M.V.G., Tyagi R., Singh R. Improvement in surface morphology and 2DEG properties of AlGaN/GaN HEMT //

- Journal of Alloys and Compounds. 2020. V. 815. P. 152283. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152283>
8. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Rozhavskaia M.M., Myasoedov A.V., Troshkov S.I., Lundin V.V., Sorokin L.M., Tsatsul'nikov A.F. Growth and structure of GaN layers on silicon carbide synthesized on a Si substrate by the substitution of atoms: A model of the formation of V-defects during the growth of GaN // *Physics of the Solid State*. 2015. V. 57. N 9. P. 1899–1907. <https://doi.org/10.1134/s1063783415090218>
 9. Hospodková A., Hájek F., Hubáček T., Gedeonová Z., Hubík P., Hývl M., Pangráč J., Dominec F., Košutová T. Electron transport properties in high electron mobility transistor structures improved by V-Pit formation on the AlGaIn/GaN interface // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023. V. 15. N 15. P. 19646–19652. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c00799>
 10. Wu F., Ewing J., Lynsky C., Iza M., Nakamura S., DenBaars S.P., Speck J.S. Structure of V-defects in long wavelength GaN-based light emitting diodes // *Journal of Applied Physics*. 2023. V. 133. N 3. P. 035703. <https://doi.org/10.1063/5.0135278>
 11. Nikolaev V.I., Polyakov A.Ya., Stepanov S.I., Pechnikov A.I., Nikolaev V.V., Yakimov E.B., Scheglov M.P., Chikiryaka A.V., Guzilova L.I., Timashov R.B., Shapenkov S.V., Butenko P.N. Record thick $\kappa(\varepsilon)$ -Ga₂O₃ epitaxial layers grown on GaN/c-sapphire // *Technical Physics*. 2023. V. 68. N 12. P. 689–694. <https://doi.org/10.1134/s1063784223080236>
 12. Kukushkin S.A., Osipov A.V. New method for growing silicon carbide on silicon by solid-phase epitaxy: Model and experiment // *Physics of the Solid State*. 2008. V. 50. N 7. P. 1238–1245. <https://doi.org/10.1134/s1063783408070081>
 13. Osipov A.V., Sharofidinov S.S., Osipova E.V., Kandakov A.V., Ivanov A.Y., Kukushkin S.A. Growth and optical properties of Ga₂O₃ layers of different crystalline modifications // *Coatings*. 2022. V. 12. N 12. P. 1802. <https://doi.org/10.3390/coatings12121802>
 14. Kremleva A.V., Sharofidinov Sh.Sh., Smirnov A.M., Podlesnov E., Dorogov M.V., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. Growth of thick gallium oxide on the various substrates by halide vapor phase epitaxy // *Materials Physics and Mechanics*. 2020. V. 44. N 2. P. 164–171. https://doi.org/10.18720/MPM.4422020_2
 15. Yakimov E.B., Polyakov A.Y., Nikolaev V.I., Pechnikov A.I., Scheglov M.P., Yakimov E.E., Pearton S.J. Electrical and recombination properties of polar orthorhombic κ -Ga₂O₃ films prepared by halide vapor phase epitaxy // *Nanomaterials*. 2023. V. 13. N 7. P. 1214. <https://doi.org/10.3390/nano13071214>
 8. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Rozhavskaia M.M., Myasoedov A.V., Troshkov S.I., Lundin V.V., Sorokin L.M., Tsatsul'nikov A.F. Growth and structure of GaN layers on silicon carbide synthesized on a Si substrate by the substitution of atoms: A model of the formation of V-defects during the growth of GaN. *Physics of the Solid State*, 2015, vol. 57, no. 9, pp. 1899–1907. <https://doi.org/10.1134/s1063783415090218>
 9. Hospodková A., Hájek F., Hubáček T., Gedeonová Z., Hubík P., Hývl M., Pangráč J., Dominec F., Košutová T. Electron transport properties in high electron mobility transistor structures improved by V-Pit formation on the AlGaIn/GaN interface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, vol. 15, no. 15, pp. 19646–19652. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c00799>
 10. Wu F., Ewing J., Lynsky C., Iza M., Nakamura S., DenBaars S.P., Speck J.S. Structure of V-defects in long wavelength GaN-based light emitting diodes. *Journal of Applied Physics*, 2023, vol. 133, no. 3, pp. 035703. <https://doi.org/10.1063/5.0135278>
 11. Nikolaev V.I., Polyakov A.Ya., Stepanov S.I., Pechnikov A.I., Nikolaev V.V., Yakimov E.B., Scheglov M.P., Chikiryaka A.V., Guzilova L.I., Timashov R.B., Shapenkov S.V., Butenko P.N. Record thick $\kappa(\varepsilon)$ -Ga₂O₃ epitaxial layers grown on GaN/c-sapphire. *Technical Physics*, 2023, vol. 68, no. 12, pp. 689–694. <https://doi.org/10.1134/s1063784223080236>
 12. Kukushkin S.A., Osipov A.V. New method for growing silicon carbide on silicon by solid-phase epitaxy: Model and experiment. *Physics of the Solid State*, 2008, vol. 50, no. 7, pp. 1238–1245. <https://doi.org/10.1134/s1063783408070081>
 13. Osipov A.V., Sharofidinov S.S., Osipova E.V., Kandakov A.V., Ivanov A.Y., Kukushkin S.A. Growth and optical properties of Ga₂O₃ layers of different crystalline modifications. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 12, pp. 1802. <https://doi.org/10.3390/coatings12121802>
 14. Kremleva A.V., Sharofidinov Sh.Sh., Smirnov A.M., Podlesnov E., Dorogov M.V., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., Romanov A.E. Growth of thick gallium oxide on the various substrates by halide vapor phase epitaxy. *Materials Physics and Mechanics*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 164–171. https://doi.org/10.18720/MPM.4422020_2
 15. Yakimov E.B., Polyakov A.Y., Nikolaev V.I., Pechnikov A.I., Scheglov M.P., Yakimov E.E., Pearton S.J. Electrical and recombination properties of polar orthorhombic κ -Ga₂O₃ films prepared by halide vapor phase epitaxy. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, no. 7, pp. 1214. <https://doi.org/10.3390/nano13071214>

Авторы

Иванов Андрей Юрьевич — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 58333833500](https://orcid.org/0000-0003-0737-9079), <https://orcid.org/0000-0003-0737-9079>, aiivanov@itmo.ru

Шарофидинов Шукрилло Шамсутдинович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 9739001900](https://orcid.org/0000-0003-0354-5981), <https://orcid.org/0000-0003-0354-5981>, shukrillo71@mail.ru

Панов Дмитрий Юрьевич — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57208226091](https://orcid.org/0000-0001-8715-9505), <https://orcid.org/0000-0001-8715-9505>, dmitriipnv@itmo.ru

Кремлева Арина Валерьевна — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 57204369404](https://orcid.org/0000-0002-7045-0918), <https://orcid.org/0000-0002-7045-0918>, avkremleva@itmo.ru

Бауман Дмитрий Андреевич — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57197463747](https://orcid.org/0000-0002-5762-5920), <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>, dabauman@itmo.ru

Романов Алексей Евгеньевич — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; руководитель сектора, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 7202768874](https://orcid.org/0000-0003-3738-408X), <https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>, alexey.romanov@niuitmo.ru

Authors

Andrey Yu. Ivanov — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 58333833500](https://orcid.org/0000-0003-0737-9079), <https://orcid.org/0000-0003-0737-9079>, aiivanov@itmo.ru

Shukrillo Sh. Sharofidinov — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 9739001900](https://orcid.org/0000-0003-0354-5981), <https://orcid.org/0000-0003-0354-5981>, shukrillo71@mail.ru

Dmitrii I. Panov — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57208226091](https://orcid.org/0000-0001-8715-9505), <https://orcid.org/0000-0001-8715-9505>, dmitriipnv@itmo.ru

Arina V. Kremleva — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Senior Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 57204369404](https://orcid.org/0000-0002-7045-0918), <https://orcid.org/0000-0002-7045-0918>, avkremleva@itmo.ru

Dmitrii A. Bauman — PhD (Physics & Mathematics), Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57197463747](https://orcid.org/0000-0002-5762-5920), <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>, dabauman@itmo.ru

Alexey E. Romanov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Professor, Chief Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Head of Sector, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 7202768874](https://orcid.org/0000-0003-3738-408X), <https://orcid.org/0000-0003-3738-408X>, alexey.romanov@niuitmo.ru