



## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12227>

## Исследования остаточных упругих напряжений в многопериодных сверхрешетках GaN/AlN, выращенных на подложке SiC/Si

П. В. Середин<sup>1</sup>✉, Ш. Ш. Шарофидинов<sup>2</sup>, Д. Л. Голощачов<sup>1</sup>, Н. С. Буйлов<sup>1</sup>, К. А. Еремеев<sup>1</sup>, Ш. А. Юсупова<sup>2</sup>, С. А. Кукушкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,  
Университетская пл. 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБУН «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук»,  
ул. Политехническая, 26, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБУН «Институт Проблем Машиноведения Российской академии наук»,  
Большой проспект В.О, 61, Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

### Аннотация

Впервые методом хлорид-гидридной эпитаксии на гибридной подложке SiC/Si, синтезированной методом согласованного замещения атомов, сформирована многослойная гетероструктура, состоящая из периодически расположенных слоев GaN и AlN.

Комплексное исследование гетероструктуры с использованием наномасштабного Рамановского картирования упругих напряжений показало, что в верхнем GaN слое величина двухосного напряжения  $\sigma_{xx}$  имеет минимальное значение  $\sim -0.12$  ГПа. При этом в сверхрешетках, расположенных в верхней части гетероструктуры, напряжения практически отсутствуют.

**Ключевые слова:** GaN, AlN, сверхрешетка, Рамановская спектроскопия

**Благодарности:** Доступ к оборудованию получен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FZGU-2023-0006 и № 075-15-2021-1351. Гибридные подложки SiC/Si были синтезированы с использованием оборудования УНУ «Физика, химия и механика кристаллов и тонких пленок» (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург).

**Для цитирования:** Середин П. В., Шарофидинов Ш. Ш., Голощачов Д. Л., Буйлов Н. С., Еремеев К. А., Юсупова Ш. А., Кукушкин С. А. Исследования остаточных упругих напряжений в многопериодных сверхрешетках GaN/AlN, выращенных на подложке SiC/Si. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 518–525. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12227>

**For citation:** Seredin P. V., Sharofidinov Sh. Sh., Goloshchapov D. L., Buylov N. S., Eremeev K. A., Yusupova S. A., Kukushkin S. A. Residual strain evaluation in GaN/AlN multiperiod superlattices grown on SiC/Si. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(3): 518–525. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12227>

✉ Середин Павел Владимирович, e-mail: paul@phys.vsu.ru

© Середин П. В., Шарофидинов Ш. Ш., Голощачов Д. Л., Буйлов Н. С., Еремеев К. А., Кукушкин С. А., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

III-нитриды (GaN, AlN, AlGaN) обладают уникальными физическими и химическими свойствами по сравнению с другими полупроводниками [1–3]. Они обладают высокой твердостью, хорошей теплопроводностью и хорошим сопротивлением к радиации и химическим веществам. Эти свойства делают III-нитриды надежным кандидатом на роль полупроводников для устройств современной высокочастотной и мощной электроники [3–6].

Обычно III-нитриды выращивают на таких подложках, как сапфир и карбид кремния (SiC), но все чаще используется кремниевая подложка, в том числе пористая [7–9], доступная в больших диаметрах и, что наиболее важно, имеющая необходимые тепловые характеристики и электрические свойства. Однако из-за высокой степени рассогласования параметров кристаллических решеток между пленками III-нитридов и иностранной подложкой, а также различия в коэффициентах температурного расширения (КТР) этих материалов, во время роста возникают достаточно высокие упругие напряжения [10], снижение которых в эпитаксиальных слоях сверхрешетки является актуальной задачей. При этом деформация несоответствия в эпитаксиальных системах с несогласованной решеткой может быть уменьшена за счет создания высокой плотности структурных дефектов, а также роста переходных буферных слоев на основе многопериодных сверхрешеток. Поэтому настройка и анализ деформации в III-нитридах является важной задачей [11]. Для контроля деформации в основном используется рентгеновская дифракция, которая является мощным методом надежного и неразрушающего анализа гетероструктур [12, 13]. Однако в последнее время предпочтение отдается Рамановской спектроскопии [14, 9], чье большое преимущество по сравнению с рентгеновской дифракцией состоит в возможности пространственно-разрешенной оценки неоднородностей деформации. Включение в измерительную схему комбинационного рассеяния микроскопов и моторизованных подвижек, позволяющих выполнять смещение образца в плоскости сканирования с субмикронным шагом, даёт возможность изучить распределение остаточных напряжений и их флуктуации в слоях гетероструктуры с высоким пространственным разрешением. Учитывая тот факт, что деформационная инженерия представляет собой один из самых мощных методов настройки оптических и электронных

свойств полупроводниковых соединений AIIIIN, то исследования остаточных напряжений в эпитаксиальных слоях нитрида галлия, выращенного с использованием переходных буферных слоев на основе многопериодных GaN/AlN сверхрешеток, является актуальной задачей.

Ранее экспериментально было доказано [15, 16], что рост структурно-качественных III-нитридов (AlN, GaN и AlGaN) может быть выполнен с использованием гибридной подложки SiC/Si, в том числе с их последующим отделением от подложки. Например, в работе [16] были выращены без трещин монокристаллические слои: AlN толщиной до 300 мкм; AlGaN толщиной до 400 мкм; GaN толщиной до 200 мкм; GaN полуполярной (11 $\bar{2}$ 4) ориентации до 35 мкм.

Поэтому целью нашей работы стало исследование остаточных упругих напряжений в эпитаксиальной периодической гетероструктуре и на ее основе многопериодных сверхрешеток из соединений GaN/AlN после ее отсоединения от гибридной подложки.

## 2. Материалы и методы

Задача роста объемного слоя GaN с хорошей кристаллической структурой, с последующим его отделением эпитаксиальной пленки от подложки решалась в работе с использованием метода хлоридной газофазной эпитаксии (ХГФЭ), который давно зарекомендовал себя как относительно дешевый способ получения объемных пленок III-нитридов на подложках кремния или сапфира. В качестве подложки для гетероструктуры использовалась гибридная подложка SiC/Si(111), синтезированная методом согласованного замещения атомов [17–19]. Для избегания трещинообразования, учитывая несоответствие параметров кристаллических решеток и коэффициентов термического расширения, использовался метод осаждения сверхрешеток между основными слоями AlN и GaN. Первоначально осаждался тонкий слой AlN, после чего добавлялся 2-й элемент (Ga) и в пропорции 50 на 50 выращивался слой сверхрешетки AlN/GaN в течение 20 мин. На следующем этапе растили очередной слой AlN, на котором растился следующий слой сверхрешетки AlN/GaN. В конце был выращен слой GaN с толщиной порядка 3.5 мкм. Рост структуры проходит в реакторе при высокой температуре ( $T \sim 1000$  °C). В качестве газовой смеси использовали аммиак (NH<sub>3</sub>) и аргон (Ar), скорость потока которых составляла 1000 и 4000 мл/мин соответственно. Поток Al и Ga был

одинаковым и составлял 100 мл/мин. После роста подложка была удалена.

Диагностика образцов была выполнена с использованием микроструктурно-спектроскопических методов анализа. Микроскопические исследования были выполнены с использованием растрового электронного микроскопа JSM-7001F, Jeol, Япония. Спектры комбинационного рассеяния получены с использованием конфокального Рамановского микроскопа РамМикс 532 (EnSpectr, Москва, Россия) с длиной волны возбуждающего излучения 532 нм. Сканирование осуществлялось с использованием 60× объектива. Мощность в фокусном пятне 30 мВт. Спектры детектировались в диапазоне 100–2000 см<sup>-1</sup> и спектральным разрешением 1 см<sup>-1</sup>. Исследование пространственной области образца производилось с использованием двухосевой моторизованной подвижки с шагом 0.25 мкм вдоль всей структуры образца. Были получены спектры в геометрии  $z(xy)\bar{z}$  и  $x(xy)\bar{x}$ .

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены схема многослойной гетероструктуры GaN/AlN, а также микроскопические изображения поперечного сечения образца с различным увеличением, полученные с использованием сканирующей электронной микроскопии.

Неоднократно было показано, что информация о тонких структурных свойствах свободной пленки на основе многопериодных сверхрешеток GaN/AlN получена с использованием метода комбинационного рассеяния света. Рамановская

спектроскопия является чрезвычайно полезным инструментом для неразрушающего контроля полупроводниковых наноструктур.

На рис. 2 представлен Рамановский спектр образца, собранный в геометрии  $z(xy)\bar{z}$ .

В силу оптической прозрачности GaN и AlN и большой глубины анализа Рамановского спектрометра в геометрии  $z(xy)\bar{z}$  в спектре присутствуют моды комбинационного рассеяния от различных слоев гетероструктуры.

В соответствии с геометрией комбинационного рассеяния света и правил отбора для кристаллической структуры вюрцита (пространственная группа  $P3m1$ ), которую имеют фазы GaN и AlN, в спектре комбинационного рассеяния для каждой фазы может наблюдаться характер-

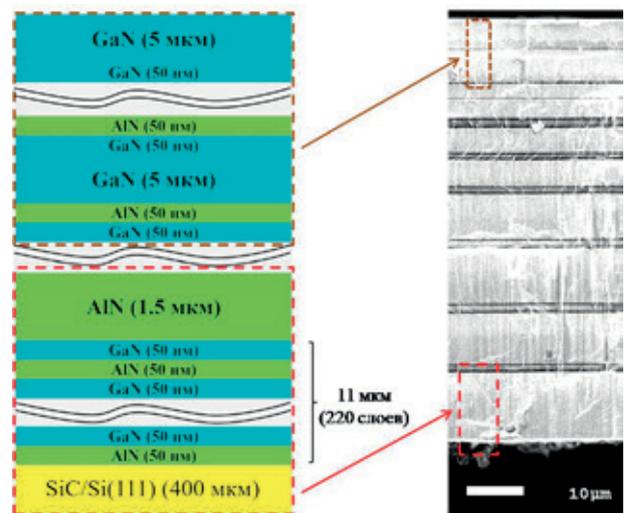


Рис. 1. РЭМ изображение гетероструктуры и схематические изображения сверхрешеток двух типов

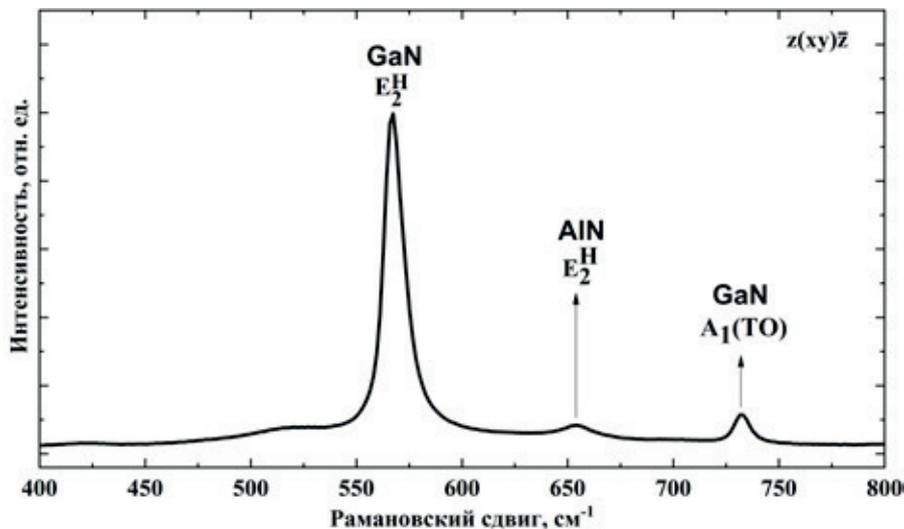


Рис. 2. Рамановский спектр пленки в геометрии  $z(xy)\bar{z}$

ный набор из шести продольных оптических (LO) и поперечных оптических (TO) фононных мод [20, 21]. Анализ экспериментальных данных (см. рис. 2) показывает, что в спектре присутствуют четыре колебания. Первый и наиболее интенсивный максимум около  $567\text{ см}^{-1}$  является фононной модой  $E_2^{\text{high}}$  вюрцитного GaN [22, 23]. Менее интенсивный пик вблизи  $735\text{ см}^{-1}$  является модой  $A_1(\text{LO})$  GaN. Колебание в спектре около  $653\text{ см}^{-1}$  является модой  $E_2^{\text{high}}$  AlN, самой сильной из разрешенных мод в пленках вюрцитного AlN для геометрии обратного рассеяния  $z(xy)z'$ , использованной в нашем эксперименте [24].

Для послыоного исследования структуры с высоким пространственным разрешением была выполнена съемка в геометрии  $x(xy)\bar{x}$  с шагом 250 нм. Это позволило получить набор фононных мод из областей многопериодных сверхрешеток GaN/AlN (рис. 3), а также от буферных слоев AlN (рис. 4)

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что в выбранной для эксперимента геометрии съемки  $x(xy)\bar{x}$  в спектрах из областей сверхрешетки GaN/AlN (см рис. 3) вместе с интенсивной неполярной фононной модой  $E_2^{\text{high}}$  GaN (см. рис. 2) активными являются полярные колебания  $A_1(\text{TO})$  GaN и  $E_1(\text{TO})$  GaN, локализованные около  $535$  и  $555\text{ см}^{-1}$  соответст-

венно. Эти колебания являются характерными для GaN кристалла со структурой вюрцита [25]. Можно заметить, что в зависимости от расстояния от подложки до исследуемой области наблюдается не только частотный сдвиг для фононных мод  $A_1(\text{TO})$ ,  $E_1(\text{TO})$ ,  $E_2^{\text{high}}$  GaN, но и изменение их относительных интенсивностей.

Что касается комбинационного рассеяния от буферных слоев AlN (см рис. 4), то в спектрах являются активными три моды  $E_2^{\text{high}}$ ,  $A_1(\text{TO})$  и  $E_1(\text{TO})$ , интенсивность которых слабо зависит от области локализации слоя AlN в пленке. Кроме того, нужно обратить внимание на то, что в спектрах из областей (слоев) буферного AlN в области  $530\text{--}580\text{ см}^{-1}$  (рис. 4) наблюдаются колебания, приписываемые  $A_1(\text{TO})$ ,  $E_2^{\text{high}}$  GaN. Этот факт может быть связан с тем, что в процессе съемки область генерации полезного сигнала распространялась в соседние слои сверхрешетки, что в свою очередь указывает на отклонение плоскости скола от перпендикулярного к поверхности образца.

Наблюдаемые сдвиги фононных мод различной симметрии определенно связаны с деформациями слоев, обусловленными разницей в параметрах решетки и коэффициентах термического расширения материалов слоев, возникающих при росте гетероструктуры. Можно за-

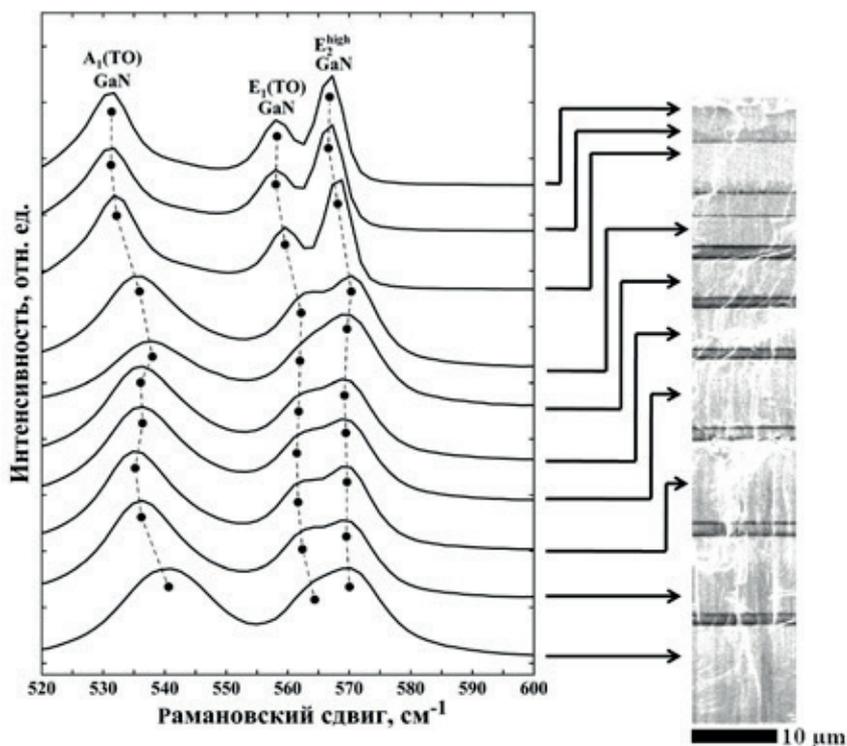


Рис. 3. Рамановские спектры из областей сверхрешеток GaN/AlN, снятые в геометрии  $z(xy)\bar{z}$

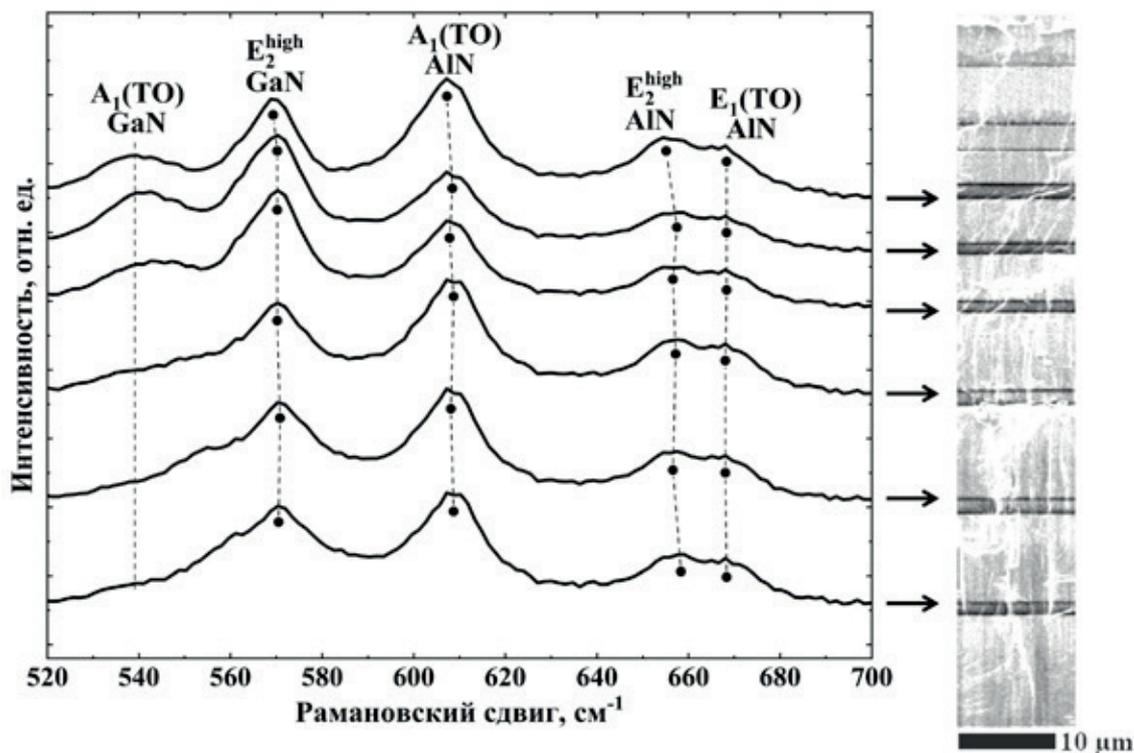


Рис. 4. Рамановские спектры от буферных слоев AlN, снятые в геометрии  $z(xy)\bar{z}$

метить, что сдвиги фононных колебаний, принадлежащих фононам от AlN и GaN в различных слоях сверхрешеток, а также в буферных слоях, имеют разные направления, что указывает на разный тип деформаций, возникающий в этих слоях.

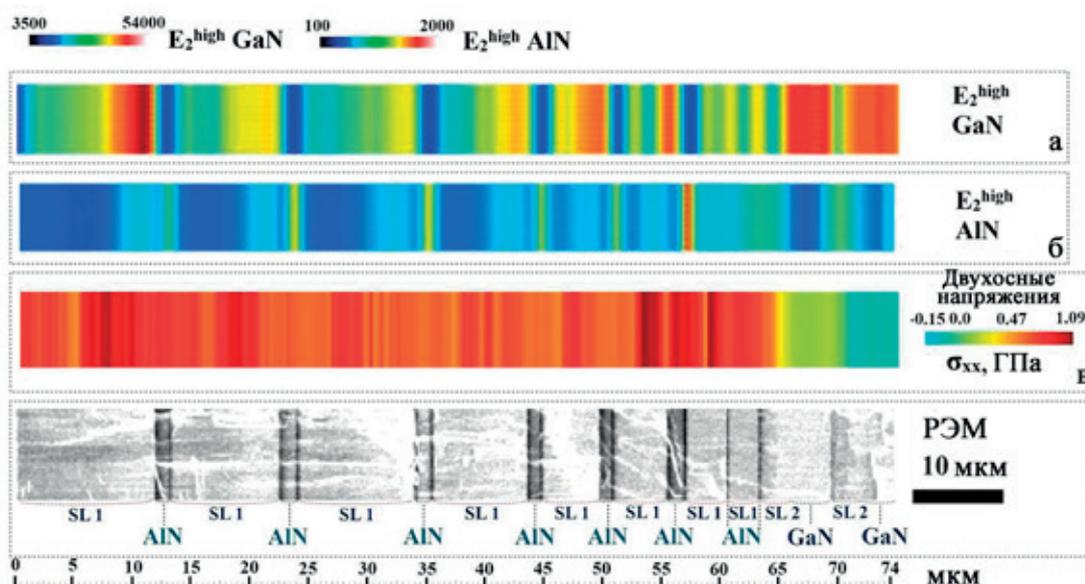
Проводя измерения микро-рамановского рассеяния из области скола гетероструктуры посредством скоординированных спектральных сканов, может быть получено химическое изображение структуры в разрезе слоев на основе вариации интенсивности спектральных линий, отражающих распределение неполярных  $E_2^{high}$  GaN и  $E_2^{high}$  AlN колебательных мод в области интерфейса. Для этого в каждом спектре, соответствующем конкретной точке в области сканирования, определены интегральные площади под выбранными Рамановскими линиями.

На рис. 5а, б представлены результаты гиперспектрального картирования на основе распределения интенсивности выбранных колебаний и одновременно приведено РЭМ изображение сканированной области. Результаты химического картирования представлены с использованием цветового кодирования. Чем теплее цвет, тем выше интенсивность соответствующего фонона, а, следовательно, и содержание фазы в данной области.

Анализ результатов гиперспектрального картирования (см. рис. 5а, б) наглядно визуализирует структуру слоев в образце: на картах выделяются полосы с наибольшей/наименьшей интенсивностью GaN/AlN, а расстояние между этими полосами прекрасно коррелирует с изображением РЭМ.

Однако при этом нужно отметить, что в слоях, образующих сверхрешетки GaN/AlN, количественный состав и интенсивности локализованных мод сильно зависят не только от периода сверхрешетки, но и от области локализации. Хорошо видно, что неполярная  $E_2^{high}$  GaN мода имеет максимальную интенсивность в верхних слоях областей сверхрешеток с градиентным изменением периода.

Как было отмечено ранее, остаточная деформация в тонких эпитаксиальных пленках является важным вопросом при изготовлении устройств. При росте многослойных гетероструктур на основе нитридов третьей группы на инородных подложках наблюдаемая в пленках остаточная деформация является результатом баланса между двумя конкурирующими компонентами деформации: деформацией теплового несоответствия, возникающей из-за различий в коэффициентах теплового расширения, и деформацией, связанной с возникновением



**Рис. 5.** Гиперспектральное рамановское картирование области скола пленки на основе на основе распределения интенсивности фононных мод  $E_2^{\text{high}}$  GaN (а) и  $E_2^{\text{high}}$  AlN (б), а также распределения упругих напряжений в многослойной гетероструктуре (в)

ем дефектов структуры [26]. Результаты многочисленных работ показывают, что частотное положение мод  $E_2^{\text{high}}$  GaN и AlN зависит от деформаций кристаллической решетки. Поэтому оценку величины остаточных напряжений в различных слоях гетероструктуры можно получить, исходя из определения частотного сдвига в Рамановском спектре основных колебательных мод:  $E_2^{\text{high}}$  GaN и  $E_2^{\text{high}}$  AlN.

Расчет остаточных напряжений в области скола эпитаксиальной пленки выполнен, исходя из частотного положения моды  $E_2^{\text{high}}$  GaN с использованием соотношения:

$$\sigma_{xx} = \frac{\Delta\omega}{K}, \quad (1)$$

где  $\Delta\omega$  – Рамановский сдвиг относительно ненапряженного слоя,  $K$  – постоянная величина для GaN  $K_{\text{GaN}} = 4.3 \text{ см}^{-1} \cdot \text{ГПа}$ .

На рис. 5в представлена карта двухосных напряжений в области скола пленки. Хорошо видно, что в верхнем GaN слое величина двухосного напряжения  $\sigma_{xx}$  имеет минимальное значение  $\sim -0.12 \text{ ГПа}$ . При этом в верхних сверхрешетках SL2-типа (с постоянным периодом) напряжения находятся на минимальном уровне.

#### 4. Заключение

В работе впервые демонстрируется, что методом хлорид-гидридной эпитаксии на гибридной подложке SiC/Si, синтезированной методом

согласованного замещения атомов, сформирована многослойная гетероструктура, состоящая из периодически расположенных слоев GaN и AlN.

Общая толщина выращенной структуры составила  $\sim 78 \text{ мкм}$ . Показано, с использованием наномасштабного картирования в верхних слоях GaN величина двухосного напряжения  $\sigma_{xx}$  имеет минимальное значение  $\sim 0.12 \text{ ГПа}$ . При этом в сверхрешетках, расположенных в верхней части структуры, напряжения практически отсутствуют.

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

1. Zou C., Zhao Z., Xu M., ... Li S. GaN/Gr (2D)/Si (3D) Combined high-performance hot electron transistors. *ACS Nano*. 2023;17(9): 8262–8270. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12435>
2. Das P., Wu T.-L., Tallur S. Design and analysis of high electron mobility transistor inspired: III-V electro-optic modulator topologies. *Semiconductor Science and Technology*. 2020;35(9): 095028. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab9ea9>

3. Kohen D., Nguyen X. S., Yadav S., ... Fitzgerald E. A. Heteroepitaxial growth of In<sub>0.30</sub>Ga<sub>0.70</sub>As high-electron mobility transistor on 200 mm silicon substrate using metamorphic graded buffer. *AIP Advances*. 2016;6(8): 085106. <https://doi.org/10.1063/1.4961025>
4. Jang W.-H., Kim H.-S., Kang M.-J., Cho C.-H., Cha H.-Y. Recessed AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> UV phototransistor. *Journal of Semiconductor Technology and Science*. 2019;19(2): 184–189. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2019.19.2.184>
5. Encomendero J., Faria F. A., Islam S. M., ... Xing H.G. New tunneling features in polar III-nitride resonant tunneling diodes. *Physical Review X*. 2017;7(4): 041017. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.7.041017>
6. Singh M. M., Siddiqui M. J., Saxena A. Comparative simulation of GaAs and GaN based double barriers-resonant tunneling diode. *Procedia Computer Science*. 2016;85581–85587. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.224>
7. Seredin P. V., Lenshin A. S., Mizerov A. M., Leiste H., Rinke M. Structural, optical and morphological properties of hybrid heterostructures on the basis of GaN grown on compliant substrate por-Si(111). *Applied Surface Science*. 2019; 4761049–4761060. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.239>
8. Seredin P. V., Goloshchapov D. L., Lenshin A. S., Mizerov A. M., Zolotukhin D. S. Influence of por-Si sublayer on the features of heteroepitaxial growth and physical properties of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Si(111) heterostructures with nanocolumn morphology of thin film. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2018; 104101–104110. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2018.07.024>
9. Seredin P. V., Goloshchapov D. L., Arsentyev I. N., Sharofidinov S., Kasatkin I. A., Prutskij T. HVPE fabrication of GaN sub-micro pillars on preliminarily treated Si(001) substrate. *Optical Materials*. 2021; 117111130. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111130>
10. Ansah-Antwi K. K., Soh C. B., Liu H., Chua S. J. Growth optimization and characterization of GaN epilayers on multifaceted (111) surfaces etched on Si(100) substrates. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2015;33(6): 061517. <https://doi.org/10.1116/1.4933201>
11. Gao N., Chen J., Feng X., ... Kang J. Strain engineering of digitally alloyed AlN/GaN nanorods for far-UVC emission as short as 220 nm. *Optical Materials Express*. 2021;11(4): 1282. <https://doi.org/10.1364/OME.422215>
12. Kuchuk A. V., Kryvyi S., Lytvyn P. M., ... Salamo G. J. The peculiarities of strain relaxation in GaN/AlN superlattices grown on vicinal GaN (0001) substrate: Comparative XRD and AFM study. *Nanoscale Research Letters*. 2016;11(1): 252. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1478-6>
13. Seredin P. V., Glotov A. V., Ternovaya V. E., ... Tarasov I. S. Effect of silicon on relaxation of the crystal lattice in MOCVD-hydride Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/Si/GaAs(100) heterostructures. *Semiconductors*. 2011;45(4): 481–492. <https://doi.org/10.1134/S106378261104021X>
14. Davydov V., Roginskii E., Kitaev Y., ... Smirnov M. Phonons in short-period GaN/AlN superlattices: Group-theoretical analysis, ab initio calculations, and Raman spectra. *Nanomaterials*. 2021;11(2): 286. <https://doi.org/10.3390/nano11020286>
15. Sharofidinov Sh. Sh., Kukushkin S. A., Red'kov A. V., Grashchenko A. S., Osipov A. V. Growing III–V semiconductor heterostructures on SiC/Si substrates. *Technical Physics Letters*. 2019;45(7): 711–713. <https://doi.org/10.1134/S1063785019070277>
16. Kukushkin S. A., Sharofidinov Sh. Sh. A new method of growing AlN, GaN, and AlGa<sub>N</sub> bulk crystals using hybrid SiC/Si substrates. *Physics of the Solid State*. 2019;61(12): 2342–2347. <https://doi.org/10.1134/S1063783419120254>
17. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Theory and practice of SiC growth on Si and its applications to wide-gap semiconductor films. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2014;47(31): 313001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/31/313001>
18. Kukushkin S. A., Osipov A. V. Nanoscale single-crystal silicon carbide on silicon and unique properties of this material. *Inorganic Materials*. 2021;57(13): 1319–1339. <https://doi.org/10.1134/S0020168521130021>
19. Кукушкин С. А., Осипов А. В. Эпитаксиальный карбид кремния на кремнии. Метод согласованного замещения атомов (обзор). *Журнал общей химии*. 2022;92(4): 547–577. <https://doi.org/10.31857/S0044460X22040023>
20. Olivier A., Wang H., Koke A., Baillargeat D. Gallium nitride nanowires grown by low pressure chemical vapour deposition on silicon substrate. *International Journal of Nanotechnology*. 2014;11(1/2/3/4): 243. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2014.059826>
21. Borowicz P., Gutt T., Malachowski T. Structural investigation of silicon carbide with micro-Raman spectroscopy. In: *2009 MIXDES-16th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits Systems*. 2009; 177–180.
22. Davydov V. Yu., Kitaev Yu. E., Goncharuk I. N., ... Evarestov R. A. Phonon dispersion and Raman scattering in hexagonal GaN and AlN. *Physical Review B*. 1998;58(19): 12899–12907. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.12899>
23. Feng Y., Saravade V., Chung T.-F., ... Lu N. Strain-stress study of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/AlN heterostructures on c-plane sapphire and related optical properties.

*Scientific Reports*. 2019;9(1): 10172. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46628-4>

24. Lugh V., Clarke D. R. Defect and stress characterization of AlN films by Raman spectroscopy. *Applied Physics Letters*. 2006;89(24): 241911. <https://doi.org/10.1063/1.2404938>

25. Zeng Y., Ning J., Zhang J., ... Wang D. Raman analysis of E2 (High) and A1 (LO) phonon to the stress-free GaN grown on sputtered AlN/graphene buffer layer. *Applied Sciences*. 2020;10(24): 8814. <https://doi.org/10.3390/app10248814>

26. Hushur A., Manghnani M. H., Narayan J. Raman studies of GaN/sapphire thin film heterostructures. *Journal of Applied Physics*. 2009;106(5): 054317. <https://doi.org/10.1063/1.3213370>

### Информация об авторах

*Середин Павел Владимирович*, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6724-0063>  
paul@phys.vsu.ru

*Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович* к. ф.-м. н., с. н. с. лаборатории физики полупроводниковых приборов ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

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

*Голощанов Дмитрий Леонидович*, к. ф.-м. н., доцент, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1400-2870>  
goloshchapov@phys.vsu.ru

*Буйлов Никита Сергеевич*, к. ф.-м. н., преподаватель, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1793-4400>  
buylov@phys.vsu.ru

*Еремеев Константин Александрович*, студент, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0004-9798-6642>  
kjcncz2001@gmail.com

*Юсупова Шаира Абдувалиевна*, к. ф.-м. н., н. с. лаборатории мощных полупроводниковых приборов, отделение твердотельной электроники, ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

sh.yusupova@mail.ioffe.ru

*Кукушкин Сергей Арсеньевич*, д. ф.-м. н., профессор, заведующий лабораторией структурных и фазовых превращений в конденсированных средах, Институт проблем машиноведения РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2973-8645>  
sergey.a.kukushkin@gmail.com

*Поступила в редакцию 25.01.2024; одобрена после рецензирования 05.02.2024; принята к публикации 15.02.2024; опубликована онлайн 01.10.2024.*