



## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12228>

### Структурно-спектроскопические исследования эпитаксиально-доращиваемых контактных слоев GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN

П. В. Середин<sup>1</sup>✉, Д. Л. Голощанов<sup>1</sup>, Д. Е. Костомаха<sup>1</sup>, Я. А. Пешков<sup>1</sup>, Н. С. Буйлов<sup>1</sup>,  
А. А. Гайворонская<sup>1</sup>, А. М. Мизеров<sup>2</sup>, С. Н. Тимошнев<sup>2</sup>, М. С. Соболев<sup>2</sup>, Е. В. Убыйвовк<sup>3</sup>,  
В. И. Земляков<sup>4</sup>, П. П. Куцько<sup>5</sup>, П. Л. Пармон<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>ФГБУ ВОИ «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет  
имени Ж. И. Алферова Российской академии наук»  
ул. Хлопина, 8к3, лит. А, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,  
Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург 199034, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>4</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»»,  
Пл. Шокина, 1, г. Зеленоград, Москва 124498, Российская Федерация

<sup>5</sup>АО «Научно-исследовательский институт электронной техники»,  
ул. Старых Большевиков, д.5, Воронеж 394033, Российская Федерация

#### Аннотация

В работе демонстрируется, что с использованием технологии молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ ПА) могут быть сформированы структурно-качественные эпитаксиально-доращиваемые контактные GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN на виртуальных подложках GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в Ga-обогащенных условиях при относительно низких температурах роста ~700 °С.

Показано, что на начальной стадии роста контактных слоев происходит эффективная фильтрация дислокаций, прорастающих из буферного GaN слоя виртуальной подложки, сформированного методом MOCVD.

Выполненные на основе данных Рамановской микроспектроскопии расчёты величины остаточных напряжений указывают на высокое структурной качество GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN контактных слоев независимо от уровня легирования кремнием.

Определенное с помощью метода передающей линии контактное сопротивление, приведенное к ширине площадки, для структуры с контактным слоем n<sup>+</sup>-GaN составило ~ 0.11 Ом·мм, а для n-GaN ~ 0.5 Ом·мм.

**Ключевые слова:** молекулярно-пучковая эпитаксия, контактные слои GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN, виртуальная подложка, Рамановская микроспектроскопия

**Источник финансирования:** Исследования выполнены при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (грант № FZGU-2023-0006). Синтез контактных слоев GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN проводился в рамках исполнения гранта Министерства науки и высшего образования РФ № FSRM-2023-0006.

**Благодарности:** Авторы благодарят В. В. Лундина, А. Е. Николаева (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия) и Iurii Kim (Aalto University School of Electrical Engineering, Finland) за предоставление темплейтов GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для МПЭ ПА синтеза контактных слоев.

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

© Середин П. В., Голощанов Д. Л., Костомаха Д. Е., Пешков Я. А., Буйлов Н. С., Гайворонская А. А., Мизеров А. М., Тимошнев С. Н., Соболев М. С., Убыйвовк Е. В., Земляков В. И., Пармон П. Л., Куцько П. П., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Также авторы выражают благодарность ресурсному центру СПбГУ за использование оборудования: ПЭМ результаты, представленные в данной работе, получены с использованием оборудования МРЦ «Нанотехнологии» Санкт-Петербургского государственного университета.

Исследования проведены с использованием оборудования Лаборатории нитрид-галлиевой и кремниевой электроники Воронежского государственного университета и Научно-исследовательского института электронной техники.

**Для цитирования:** Середин П. В., Голощапов Д. Л., Костомаха Д. Е., Пешков Я. А., Буйлов Н. С., Гайворонская А. А., Мизеров А. М., Тимошнев С. Н., Соболев М. С., Убийвовк Е. В., Земляков В. И., Пармон П. Л., Куцько П. П. Структурно-спектроскопические исследования эпитаксиально-дорастиваемых контактных слоев GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 526–535. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12228>

**For citation:** Seredin P. V., Goloshchapov D. L., Kostomakha D. E., Peshkov Y. A., Buylov N. S., Gaivoronskaya A. A., Mizerov A. M., Timoshnev S. N., Sobolev M. S., Ubyivovk E. V., Zemlyakov V. I., Parmon P. L., Kutsko P. P. Structural and spectroscopic studies of epitaxially overgrown GaN, n-GaN, and n<sup>+</sup>-GaN contact layers. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(3): 526–535. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12228>

## 1. Введение

Нитриды третьей группы (АІІІN) являются полупроводниками третьего поколения, расширение диапазона применения которых активно изучается в последние десятилетия [1]. При этом ключевой проблемой создания жизнеспособных приборных технологических решений на основе АІІІN является выбор подложки для эпитаксиального синтеза и метода интеграции с ней [2–4]. Решёточно-согласованные подложки GaN зачастую являются коммерчески невыгодными несмотря на тот факт, что они позволяют синтезировать приборные гетероструктуры на основе GaN с лучшими характеристиками и кристаллическим качеством материала. Альтернативное решение данной проблемы может заключаться в использовании для формирования активных областей АІІІN гетероструктур виртуальных подложек (темплейтов) типа «GaN/подложка», в которых буферный слой уже синтезирован на коммерчески-доступной подложке (Si, SiC, sapphire) при помощи эпитаксиальных технологий. На текущий момент, для формирования темплейтов типа «GaN/подложка» в основном используются два метода: газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (MOCVD) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) [3].

Вторым значимым вопросом при создании устройств на основе АІІІN является формирование омических контактов, которые не только обеспечивают связь между приборной структурой и схемой обработки сигнала, но и являются основой для дальнейшего улучшения производительности финальных приборов. Омический контакт металла и полупроводника должен быть не только совместимым, но и долговечным и температурно-стабильным [5] с учетом типа проводимости контактного слоя и технологических постопераций.

Формирование качественного омического контакта в приборах на основе широкозонных

АІІІN соединений является до сих пор неразрешенной проблемой [6]. Наличие дефектов в слоях АІІІN, склонность к окислению металлов в условиях высоких температур также может влиять на контактные свойства. По этой причине сегодня все более актуальными становятся исследования, направленные на снижение контактного сопротивления при формировании омических контактов к АІІІN гетероструктурам.

В настоящее время существует целый ряд технологических решений для снижения контактного сопротивления, среди которых использование мультислоев Ti/Al/X/Au [7]. Также показано, что формирование полностью заглубленных омических контактов на основе Ti дает хорошие значения удельного контактного сопротивления [6]. Однако наряду с традиционной технологией вжигаемых омических контактов [5] в настоящее время проводится широкий спектр исследований по созданию омических контактов без использования процедуры высокотемпературного отжига, так называемых, невжигаемых омических контактов [8–13]. В частности, в работах [10–13] показана потенциальная возможность формирования подобных контактов с относительно низким контактным сопротивлением при помощи эпитаксиального дорастивания сильнолегированных кремнием контактных слоев n<sup>+</sup>-GaN с концентрацией электронов более 1·10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup> методом МПЭ ПА.

Настоящая работа посвящена сравнительным исследованиям структурных, морфологических и электрических свойств нелегированных GaN и легированных кремнием n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN контактных слоев, синтезированных методом МПЭ ПА на виртуальных подложках GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенных с использованием методики предэпитаксиальной очистки GaN поверхности подложек, разработанной авторами ранее и подробно описанной в [14]. Обзор литературы указыва-

ет на отсутствие исследований подобного рода, что подчеркивает актуальность данной работы.

## 2. Материалы и методы

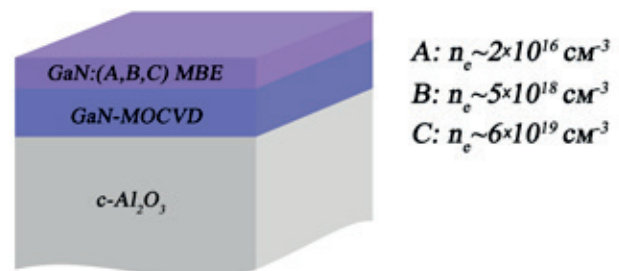
В работе формирование контактных слоев GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN производилось с помощью метода МПЭ ПА на установке промышленного типа Veeco Gen 200 [14]. Синтез осуществлялся на виртуальных подложках, которые представляли собой нелегированные слои GaN толщиной порядка 2.5 мкм, выращенные на сапфировых подложках с ориентацией (0001) методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) [18].

После MOCVD синтеза виртуальные подложки GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> извлекались на атмосферу для проведения стандартных процедур подготовки для МПЭ ПА синтеза слоев, которые подробно описаны в работе [14].

Непосредственно перед началом МПЭ ПА роста контактных слоев, поверхности виртуальных подложек проходили процедуру очистки [14]. Первоначально предэпитаксиальная очистка виртуальных подложек производилась в ростовой камере установке МПЭ ПА в потоке активированных частиц азота при постепенном увеличении температуры подложки от  $T_s = 400$  °C до  $T_s = 600$  °C с последующей экспозицией поверхности подложки в потоке активированного азота при фиксированном значении  $T_s = 600$  °C в течение 1 часа. После этого была осуществлена окончательная процедура очистки GaN поверхности, основанная на осаждении нескольких монослоев Ga на поверхность виртуальной подложки с последующей тепловой десорбцией осажденного Ga с поверхности. В настоящей работе использовалось пять периодов осаждения/десорбции галлия на GaN поверхности виртуальной подложки, нагретой до  $T_s = 700$  °C, т. е. до температуры, при которой еще не наблюдается интенсивного разложения GaN, но при этом поток тепловой десорбции Ga из жидкой фазы составляет  $F_{Ga}^{des} \sim 0.3$  мкм/ч [15]. В каждом цикле данного этапа осаждение атомов галлия обеспечивалось во время 10 секундной экспозиции GaN на поверхности виртуальной подложки в потоке галлия  $F_{Ga} \sim 0.4$  мкм/ч, что соответствовало осаждению порядка одного монослоя Ga. После этого поток Ga перекрывался заслонкой на 10 секунд для термической десорбции осажденного галлия с GaN поверхности. При этом на протяжении всей процедуры адсорбции/десорбции галлия наблюдалась «линейчатая» картина диф-

ракции отраженных быстрых электронов (ДОБЭ) с яркими и тонкими рефlekсами, характерными для относительно гладкой поверхности GaN.

Сразу после окончания предэпитаксиальной очистки поверхностей виртуальных подложек на них методом МПЭ ПА выращивались нелегированные (образец А) и легированные кремнием (образцы В и С) слои GaN с толщинами порядка 250 нм при постоянных значениях  $T_s = 700$  °C,  $F_{Ga} \sim 0.25$  мкм/ч,  $F_N \sim 0.05$  мкм/ч и различными температурами кремниевого эффузионного источника  $T_{Si} = 1020$ -1110 °C. Общая схема образцов с контактными слоями GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схематическое изображение гетероструктур с контактными слоями: образец А – GaN; образец В – n-GaN; образец С – n<sup>+</sup>-GaN

Для синтеза образцов А и С использовалась виртуальная подложка GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с точно ориентированной c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) подложкой, в то время как для создания образца В использована подложка c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с отклонением 0.5° от направления [0001].

Кристаллическая структура образцов исследовались с использованием высокоразрешающей рентгеновской дифракцией с привлечением рентгеновского дифрактометра ДРОН-8Т с CuKα излучением и угловой воспроизводимостью ± 0.0001°.

Спектры комбинационного рассеяния получены с использованием Рамановского микроскопа RamMics 532 (EnSpectr, Москва, Россия) с длиной волны возбуждающего излучения 532 нм. Сканирование осуществлялось с использованием 20х объектива, размер фокусного пятна ~ 8 мкм, мощность 30 мВт. Спектры комбинационного рассеяния были зарегистрированы в геометрии  $z(xyz)z$  в диапазоне 100–2000 см<sup>-1</sup> и спектральным разрешением 1 см<sup>-1</sup>. Определение положения линий и значений полной ширины на половине высоты (FWHM) как для слоя GaN, так и для Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> было выполнено на основе аппроксимации максимумов с использованием набора функций

Войта [16]. Обработка проводилась с использованием программного обеспечения OriginPro. Точное определение спектрального положения максимумов Рамановских линий обеспечивалось за счет измерения положения LO-моды калибровочной пластины Si. Калибровка выполнялась как перед, так и после каждого измерения образца с использованием  $\times 20$  объектива.

Исследования качества поверхности и гетероинтерфейсов с помощью просвечивающей растровой электронной микроскопии (STEM) и высокоугловой кольцевой сканирующей просвечивающей электронной микроскопии в темном поле (HAADF-STEM) проводились с помощью просвечивающего электронного микроскопа Zeiss Libra 200 FE с применением ускоряющего напряжения 200 кэВ.

Металлизация омических контактов формировалась на установке электроннолучевого напыления металлов Kurt J. Lesker AXXIS.

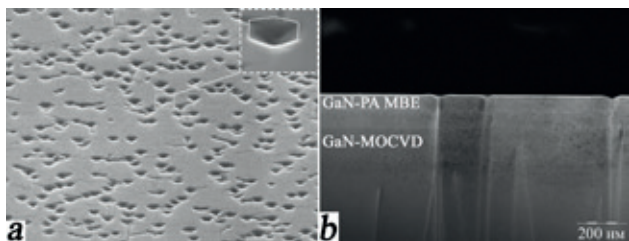
Электрофизические измерения выполнены в четырехзондовой конфигурации Ван-дер-Пау при комнатной температуре на измерительной установке Esoria HMS-3000.

Измерение контактных сопротивлений производилось по методу передающей линии (МПЛ).

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Характеристики эпитаксиальных слоев GaN, такие как структура и морфология поверхности, кристаллическое совершенство и плотность прорастающих дислокаций будут играть важную роль в определении характеристик гетероструктуры. Поэтому в первую очередь было проведено исследование поверхности и гетероинтерфейса.

Изображения поверхности и профиля контактных слоев GaN, полученных при различных уровнях легирования кремнием, представ-



**Рис. 2.** Изображение образца С, в котором контактный  $n^+$ -GaN слой был синтезирован методом МПЭ ПА на виртуальной подложке GaN/c- $Al_2O_3$  в Ga-обогащенных условиях роста: STEM изображение поверхности (а); (HAADF-STEM изображение гетероинтерфейса б)

лены на снимках STEM и HAADF-STEM (рис. 2.) Для всех образцов независимо от величины внедренной примеси наблюдается хорошая гладкая морфология поверхности с равномерно распределенными по поверхности ямками - V-дефектами, которые имеют характерную форму перевернутых гексагональных пирамидок (см. вкладку к рис. 2а). Эти ямки образованы низкоиндексными кристаллографическими плоскостями и наблюдаются при осаждении пленок нитридов на различных подложках [17,18].

Поскольку для формирования контактных слоев GaN,  $n$ -GaN и  $n^+$ -GaN были использованы темплеты GaN/sapphire, то очевидно, что для гетеропары имеется существенное несоответствие как параметров кристаллических решеток, так и коэффициентов температурного расширения (16 и 34 % соответственно). Оба эти фактора приводят к появлению деформаций и градиентов распределения напряжений в толстом буферном слое GaN [19], и являются движущей силой для образования V-образных ямок в верхних контактных эпитаксиальных слоях.

Ранее было показано, что дно каждой ямки всегда связано с дефектом, в основе которого прорастающая дислокация (ПД), а плотность дефектов практически всегда эквивалентна плотности ПД [20]. Таким образом, формирование V-дефектов в верхних контактных слоях GaN,  $n$ -GaN и  $n^+$ -GaN может быть объяснено как прорастанием дислокаций из виртуальной подложки, так и возникновением новых дислокаций на интерфейсе между поверхностью виртуальной подложки и контактным слоем GaN из-за недостаточно эффективной предэпитаксиальной очистки поверхности темплеты.

Для исследования эволюции прорастающих дислокаций при МПЭ ПА синтезе слоев GaN на темплетях GaN/c- $Al_2O_3$  были проведены исследования поперечного сечения одного из образцов с верхним контактным слоем  $n^+$ -GaN методом просвечивающей электронной микроскопии в темном поле. На рис. 2б показано типичное HAADF-STEM-изображение границы раздела между GaN слоем виртуальной подложки и верхним контактным  $n^+$ -GaN слоем, полученным МПЭ ПА.

Анализ результатов HAADF-STEM позволяет сделать вывод о фильтрации прорастающих дислокаций (ПД) в контактных слоях GaN,  $n$ -GaN и  $n^+$ -GaN. Видно, что число прорастающих дислокаций в верхнем МПЭ ПА слое по сравнению с буферным нижним GaN слоем виртуальной

подложки GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, выращенным методом MOCVD, уменьшено. Часть ПД отфильтровывается вблизи интерфейса с верхним контактным GaN слоем, но дислокации все еще присутствуют.

Наблюдаемый эффект фильтрации прорастающих дислокаций может быть обусловлен эволюцией морфологии поверхности контактного GaN слоя на начальной стадии МПЭ ПА синтеза на GaN поверхности виртуальной подложки. В частности, относительно низкие температуры подложки, использованные при МПЭ ПА синтезе GaN, могли приводить к формированию трёхмерных GaN островков нуклеации, которые достаточно быстро разрастались и коалесцировали в сплошной GaN слой с гладкой морфологией поверхности, как было показано в работе [21]. Вместе с тем, во время начальной стадии островкового МПЭ ПА роста GaN для ПД становится энергетически более выгодным их отклонение от первоначального вертикального направления распространения [22]. Энергетический выигрыш определяется за счет уменьшения энергии ПД, т. к. линия прорастающей дислокации становится короче при ее отклонении к грани островка по сравнению с энергией дислокации, распространяющейся в направлении роста GaN слоя.

Кроме того, исследования синтезированных образцов при помощи ТЕМ также показывают, что в контактных слоях GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN не наблюдается образования дополнительных дефектов, которые могли появиться в результате недостаточно эффективной очистки поверхности GaN MOCVD слоя виртуальной подложки от

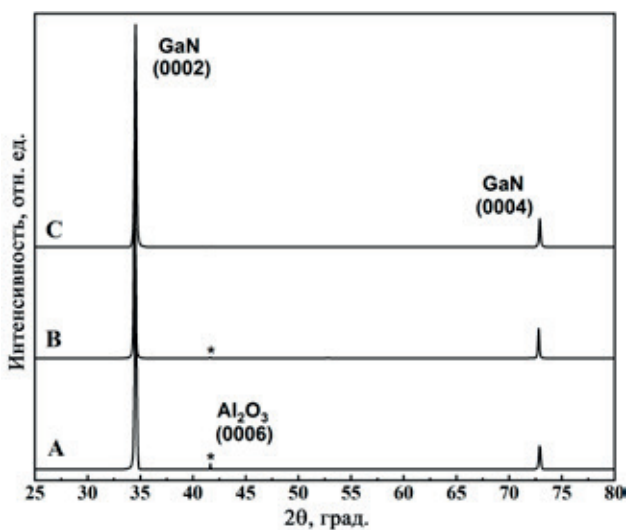
чужеродных атомов или из-за деградации поверхности, которая могла произойти в процессе предэпитаксиальной очистки. Это свидетельствует об эффективности использованного метода предэпитаксиальной очистки GaN поверхности виртуальной подложки.

Кристаллическая структура и качество эпитаксиальных гетероструктур изучены с использованием высокоразрешающей рентгеновской дифракции (XRD), которая может дать прямую информацию о влиянии примеси кремния на кристаллические свойства полупроводников AlInBV и AlInN [23,24]. На рис. 3 приведены результаты XRD измерений в широком интервале бреговских углов.

На XRD 2θ-сканах всех образцов присутствуют максимумы, которые принадлежат 0002 и 0004 отражениям GaN с вюрцитной решеткой. В то же время на всех сканах можно заметить слабоинтенсивные рефлексы, принадлежащие сапфировой подложке. Присутствие на XRD сканах дифракционных максимумов одной базальной серии свидетельствует о монокристаллическом состоянии эпитаксиальных GaN слоев.

Дополнительная структурная информация о свойствах контактных слоев GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN была получена методом спектроскопии комбинационного рассеяния, которая позволяет изучить особенности кристаллической структуры тонких эпитаксиальных пленок и их перфектность в масштабе параметров кристаллической решетки [25]. Спектры комбинационного рассеяния от образцов демонстрируются на рис. 4. Представленные на рис. 4 спектры комбинационного рассеяния являются типичными для с-плоскости (0001) монокристалла GaN. В них наблюдаются максимумы около ~567 и 734 см<sup>-1</sup> (рис. 4а,б), которые в соответствии с теорией групп для GaN с вюрцитным типом кристаллической решетки, являются поперечными A<sub>1</sub>(TO) и E<sub>2</sub><sup>high</sup> фоновыми модами [26,27]. В то же время присутствующие в спектрах пики в области 415 см<sup>-1</sup>, а также 750 см<sup>-1</sup> представляют типичные характеристические продольные оптические (LO) моды с симметрией A<sub>1g</sub> и E<sub>1g</sub> (LO) и принадлежащие сапфировой подложке [28].

Следует обратить внимание на еще одну спектральную особенность, наблюдаемую при комбинационном рассеянии для контактных слоев n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN (образцы В и С, см вставку к рис. 4г). В области 465–500 см<sup>-1</sup> наблюдается низкоинтенсивное плечо, появление которого



**Рис. 3.** XRD 2θ-сканы для образцов с контактными слоями GaN, n-GaN и n<sup>+</sup>-GaN. Рефлексы от подложки обозначены индексом\*



пряжений в эпитаксиальных слоях в виду высокой чувствительности  $E_2^{\text{high}}$  к деформациям кристаллической решетки [31]. Для оценки величины остаточных биаксиальных напряжений в эпитаксиальных контактных слоях использовалась типичная формула:

$$\Delta\omega = k\sigma_{xx}. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta\omega$  – Рамановский сдвиг частоты моды  $E_2^{\text{high}}$  GaN,  $\sigma_{xx}$  – величина остаточного двухосного напряжения в GaN эпитаксиальной пленке,  $k$  – коэффициент преобразования двухосного напряжения в Рамановский сдвиг. Значение коэффициента преобразования для  $E_2^{\text{high}}$  моды GaN составляет  $4.3 \text{ (см}^{-1} \cdot \text{ГПа}^{-1})$  [32].

Результаты показывают, что величина остаточных напряжений в GaN контактном слое (образец А) находится на уровне  $\sigma_{xx} \sim 0.1$  ГПа. Аналогичная малая величина  $s_{xx} \sim 0.11$  ГПа наблюдается и для слоя  $n^+$ -GaN (образец С), указывая на высокую степень релаксации напряжений. При этом полученный результат коррелирует известными данными об остаточной деформации в слоях GaN, легированных Si при росте на сапфировой подложке [33]. В то же время остаточные биаксиальные напряжения в слое n-GaN (для образца В) находятся на более высоком уровне  $\sigma_{xx} \sim 0.4$  ГПа, что вероятно является следствием использования при создании виртуальной подложки GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> разориентированной сапфировой подложки (см. раздел Методы).

На последнем этапе исследований на поверхности образцов были сформированы омические контакты Ti/Al (20/100 нм) с помощью магнетронного распыления. После чего определялась подвижность, концентрация носителей и удельное сопротивление по Холловским измерения с использованием метода Ван-дер-Пау. Результаты представлены табл. 2.

Контактные площадки тестовой структуры омических контактов имели кольцевую геометрию с длинной внешней окружности 400 мкм. Использование такой топологии позволи-

ло проводить измерения контактного сопротивления без изоляции активных элементов [34]. В результате с помощью метода передающей линии (МПЛ) в соответствии с [35] удалось определить контактное сопротивление, приведенное к ширине площадки, которое для структуры с контактным слоем  $n^+$ -GaN (образец С) составило  $\sim 0.11$  Ом·мм, а для n-GaN (образец В)  $\sim 0.5$  Ом·мм. Обе величины находятся в согласии с результатами метода Ван-дер-Пау (см. табл. 2).

Следует отметить, что для структуры с контактным слоем GaN (образец А) измерения Холловских характеристик оказалось затруднительным ввиду высоких значений удельного сопротивления ( $\sim 1 \cdot 10^4$  Ом·см), что может свидетельствовать о достаточной низкой собственной проводимости этого слоя.

#### 4. Заключение

В работе демонстрируется, что с использованием технологии молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота могут быть созданы доращиваемые контактные GaN, n-GaN и  $n^+$ -GaN слои к виртуальным подложкам GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в Ga-обогащенных условиях. При этом реализована эффективная фильтрация дислокаций, прорастающих из буферного GaN слоя виртуальной подложки, сформированного методом MOCVD.

Выполненные на основе данных Рамановской микроспектроскопии расчёты величины остаточных напряжений указывают на высокое структурной качество GaN, n-GaN и  $n^+$ -GaN контактных слоев независимо от уровня легирования кремнием.

Определенное с помощью метода передающей линии контактное сопротивление, приведенное к ширине площадки, для структуры с контактным слоем  $n^+$ -GaN составило  $\sim 0.11$  Ом·мм, а для n-GaN  $\sim 0.5$  Ом·мм.

#### 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. Liu A.-C., Lai Y.-Y., Chen H.-C., Chiu A.-P., Kuo H.-C. A Brief overview of the rapid progress and

**Таблица 2.** Данные холловских измерений методом Ван-дер-Пау

Образец	Подвижность носителей, см <sup>2</sup> /Вс	Концентрация носителей, см <sup>-3</sup>	Удельное сопротивление Ом·см
А (GaN)	–	$2 \cdot 10^{16}$	–
В (n-GaN)	265	$-5 \cdot 10^{18}$	$4.7 \cdot 10^{-2}$
С ( $n^+$ -GaN)	105	$-6 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{-2}$

proposed improvements in gallium nitride epitaxy and process for third-generation semiconductors with wide bandgap. *Micromachines*. 2023;14(4): 764. <https://doi.org/10.3390/mi14040764>

2. Elwaradi R., Mehta J., Ngo T. H., ... Cordier Y. Effects of GaN channel downscaling in AlGaIn–GaN high electron mobility transistor structures grown on AlN bulk substrate. *Journal of Applied Physics*. 2023;133(14): 145705. <https://doi.org/10.1063/5.0147048>

3. Zeng X., Wu Y., He G., Zhu W., Ding S., Zeng Z. High-pure AlN crystalline thin films deposited on GaN at low temperature by plasma-enhanced ALD. *Vacuum*. 2023;213: 112114. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112114>

4. Yang L., Huang W., Wang D., ... Wang X. AlN/GaN HEMTs with  $f_{max}$  exceeding 300 GHz by using Ge-doped n+GaIn ohmic contacts. *ACS Applied Electronic Materials*. 2023;5(9): 4786–4791. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c00555>

5. Wu C.-Y., Chao T.-S., Chou Y.-C. A high thermal stability ohmic contact for GaN-based devices. *Nanoscale Advances*. 2023;5(19): 5361–5366. <https://doi.org/10.1039/D3NA00491K>

6. Greco G., Iucolano F., Roccaforte F. Ohmic contacts to gallium nitride materials. *Applied Surface Science*. 2016;383: 324–345. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.016>

7. Liu Y. Recent research on ohmic contacts on GaN-based materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;738(1): 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/738/1/012007>

8. Ambacher O. Growth and applications of group III-nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1998;31(20): 2653–2710. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/20/001>

9. Yue Y., Hu Z., Guo J., ... Xing H. InAlN/AlN/GaN HEMTs with regrown ohmic contacts and  $f_T$  of 370 GHz. *IEEE Electron Device Letters*. 2012;33(7): 988–990. <https://doi.org/10.1109/LED.2012.2196751>

10. Hong S.J., Kim K. (Kevin). Low-resistance ohmic contacts for high-power GaN field-effect transistors obtained by selective area growth using plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 2006;89(4): 042101. <https://doi.org/10.1063/1.2234566>

11. Zheng Z., Seo H., Pang L., Kim K. (Kevin). Non-alloyed ohmic contact of AlGaIn/GaN HEMTs by selective area growth of single-crystal n+–GaN using plasma assisted molecular beam epitaxy. *Physica Status Solidi (a)*. 2011;208(4): 951–954. <https://doi.org/10.1002/pssa.201026557>

12. Guo J., Cao Y., Lian C., ... Xing H. (Grace). Metal-face InAlN/AlN/GaN high electron mobility transistors with regrown ohmic contacts by molecular beam epitaxy. *Physica Status Solidi (a)*. 2011;208(7): 1617–1619. <https://doi.org/10.1002/pssa.201001177>

13. Bo Song, Mingda Zhu, Zongyang Hu, ... Xing H.G. Ultralow-leakage AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on Si with non-alloyed regrown ohmic contacts. *IEEE Electron Device Letters*. 2016;37(1): 16–19. <https://doi.org/10.1109/LED.2015.2497252>

14. Мизеров А. М., Тимошнев С. Н., Никитина Е. В., ... Буравлев А. Д. Особенности МПЭ ПА синтеза слоев n+–GaN на виртуальных подложках GaN/c-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Физика и техника полупроводников*. 2019;53(9): 1212–1217. <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.09.48126.09>

15. Brandt O., Yang H., Ploog K. H. Surface kinetics of zinc-blende (001) GaN. *Physical Review B*. 1996;54(7): 4432–4435. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.4432>

16. Wells R. J. Rapid approximation to the Voigt/Faddeeva function and its derivatives. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1999;62(1): 29–48. [https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(97\)00231-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(97)00231-8)

17. Zsebök O., Thordson J. V., Andersson T. G. Surface morphology of MBE-grown GaN on GaAs(001) as function of the N/Ga-ratio. *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*. 1998;3: 1-11. <https://doi.org/10.1557/S1092578300000867>

18. Zsebök O., Thordson J. V., Gunnarsson J. R., Zhao Q. X., Ilver L., Andersson T. G. The effect of the first GaN monolayer on the nitridation damage of molecular beam epitaxy grown GaN on GaAs(001). *Journal of Applied Physics*. 2001;89(7): 3662–3667. <https://doi.org/10.1063/1.1345516>

19. Liao H., Wei T., Zong H., ... Hu X. Raman investigation on the surface carrier concentration of single GaN microrod grown by MOCVD. *Applied Surface Science*. 2019;489: 346–350. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.346>

20. Lee Y.-J., Kuo H.-C., Lu T.-C., ... Lin S.-Y. Study of GaN-based light-emitting diodes grown on chemical wet-etching-patterned sapphire substrate with V-shaped pits roughening surfaces. *Journal of Lightwave Technology*. 2008;26(11): 1455–1463. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.922151>

21. 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;47(6): 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.239>

22. Ruvimov S., Liliental-Weber Z., Washburn J., ... Weber E. R. Effect of N/Ga flux ratio in GaN buffer layer growth by MBE on (0001) sapphire on defect formation in the GaN main layer. *MRS Proceedings*. 1999;572: 295. <https://doi.org/10.1557/PROC-572-295>

23. Середин П. В., Терновая В. Е., Глотов А. В., ... Prutskij T. Рентгеноструктурные исследования гетероструктур на основе твердых растворов Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>P<sub>1-y</sub>:Si. *Физика твердого тела*. 2013;55(10):



2046–2049. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/1203>

24. Середин П. В., Глотов А. В., Леньшин А. С., ... Структура и оптические свойства гетероструктур на основе твердых растворов  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y)_{1-z}\text{Si}_z$ , полученных методом МOCVD. *Физика и техника полупроводников*. 2014;48(1): 23–31. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/26950>

25. 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  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Si}(111)$  heterostructures with nanocolumn morphology of thin film. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2018;104: 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2018.07.024>

26. 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>

27. 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>

28. Behera S., Khare A. Characterization of sapphire ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) thin film fabricated by pulsed laser deposition. In: *13th International Conference on Fiber Optics and Photonics*. Kanpur: OSA; 2016; P1A.15. Available at: <https://org.optica.org/abstract.cfm?URI=Photonics-2016-P1A.15>

29. Terekhov V. A., Terukov E. I., Undalov Y. K., ... Trapeznikova I. N. Effect of plasma oxygen content on the size and content of silicon nanoclusters in amorphous SiOx films obtained with plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Symmetry*. 2023;15(9): 1800. <https://doi.org/10.3390/sym15091800>

30. Solonenko D., Gordan O. D., Le Lay G., Zahn D. R. T., Vogt P. Comprehensive Raman study of epitaxial silicene-related phases on Ag(111). *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2017;8: 1357–1365. <https://doi.org/10.3762/bjnano.8.137>

31. Park A. H., Seo T. H., Chandramohan S., ... Suh E.-K. Efficient stress-relaxation in InGaN/GaN light-emitting diodes using carbon nanotubes. *Nanoscale*. 2015;7(37): 15099–15105. <https://doi.org/10.1039/C5NR04239A>

32. Tripathy S., Chua S. J., Chen P., Miao Z. L. Micro-Raman investigation of strain in GaN and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructures grown on Si(111). *Journal of Applied Physics*. 2002;92(7): 3503–3510. <https://doi.org/10.1063/1.1502921>

33. Talwar D. N., Lin H.-H., Chuan Feng Z. Anisotropic optical phonons in MOCVD grown Si-doped GaN/sapphire epilayers. *Materials Science and Engineering: B*. 2020;260: 114615. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114615>

34. Klootwijk J. H., Timmering C. E. Merits and limitations of circular TLM structures for contact resistance determination for novel III-V HBTs In: *Proceedings of the 2004 International Conference on Microelectronic Test Structures (IEEE Cat. No.04CH37516)*. Awaji Yumebutai, Japan: IEEE; 2004; 247–252. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1309489/>

35. Egorkin V. I., Zemlyakov V. E., Nezhentsev A. V., Garmash V. I., Kalyuzhnyi N. A., Mintairov S. A. Investigation of alloyed ohmic contacts in epitaxial tellurium-doped gallium arsenide layers. *Russian Microelectronics*. 2018;47(6): 388–392. <https://doi.org/10.1134/S1063739718060045>

### 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](mailto:paul@phys.vsu.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](mailto:goloshchapov@phys.vsu.ru)

Костомача Даниил Евгеньевич, аспирант, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

[danilkostomaha@gmail.com](mailto:danilkostomaha@gmail.com)

Пешков Ярослав Анатольевич, к. ф.-м. н., лаборант-исследователь, кафедра физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0939-0466>

[tangar77@mail.ru](mailto:tangar77@mail.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](mailto:buylov@phys.vsu.ru)

*Гайворонская Алиса Алексеевна*, студент, кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

[alisa.a.gaivoronskaya@gmail.com](mailto:alisa.a.gaivoronskaya@gmail.com)

*Мизеров Андрей Михайлович*, к. ф.-м. н., в. н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9125-6452>

[andreymizerov@rambler.ru](mailto:andreymizerov@rambler.ru)

*Тимошнев Сергей Николаевич*, к. ф.-м. н., в. н. с., Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9294-3342>

[timoshnev@mail.ru](mailto:timoshnev@mail.ru)

*Соболев Максим Сергеевич*, к. ф.-м. н., и. о. заведующего лабораторией наноэлектроники, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-8629-2064>

[sobolevsm@gmail.com](mailto:sobolevsm@gmail.com)

*Убийвовк Евгений Викторович*, к. ф.-м. н., с. н. с., исследовательская лаборатория механики перспективных массивных наноматериалов для инновационных инженерных приложений Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

<https://orcid.org/0000-0001-5828-4243>

[ubyivovk@gmail.com](mailto:ubyivovk@gmail.com)

*Земляков Валерий Евгеньевич*, к. т. н., в. н. с., лаборатория элементной базы наноэлектроники, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5681-9603>

[vzml@rambler.ru](mailto:vzml@rambler.ru)

*Куцько Павел Павлович*, к. т. н., генеральный директор, Научно-исследовательский институт электронной техники (Воронеж, Российская Федерация).

[kutsko@niiet.ru](mailto:kutsko@niiet.ru)

*Пармон Павел Леонидович*, директор по качеству, Научно-исследовательский институт электронной техники (Воронеж, Российская Федерация).

[p.parmon@niiet.ru](mailto:p.parmon@niiet.ru)

*Поступила в редакцию 26.02.2024; одобрена после рецензирования 26.04.2024; принята к публикации 15.05.2024; опубликована онлайн 01.10.2024.*