

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 537.226

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9055>

**Особенности роста и состава гетероструктур  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/por-Si/Si(111)$ , выращенных с использованием буферного слоя пористого кремния**

А. С. Леньшин<sup>1,2✉</sup>, П. В. Середин<sup>1</sup>, Д. С. Золотухин<sup>1</sup>, А. Н. Бельтюков<sup>3</sup>, А. М. Мизеров<sup>4</sup>, И. А. Касаткин<sup>5</sup>, А. О. Радам<sup>1</sup>, Э. П. Домашевская<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий,  
пр. Революции, 19, Воронеж 394036, Российская Федерация

<sup>3</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО Российской академии наук,  
ул. им. Татьяны Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Российская Федерация

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова  
Российской академии наук,  
ул. Хлопина, 8, корпус 3, литер А, Санкт-Петербург 194021, Российская Федерация

<sup>5</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург 199034, Российская Федерация

**Аннотация**

В работе исследована эффективность внедрения в молекулярно-пучковую технологию роста гетероструктуры на монокристаллическом кремнии  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/Si(111)$  в качестве переходного слоя нанопористого кремния и его влияние на морфологические характеристики и атомный состав поверхностных слоев гетероструктур. В ходе исследования рентгеноструктурными, микроскопическими и рентгенофотоэлектронными методами установлено, что гетероструктура, выращенная с использованием нанопористого буферного слоя  $por-Si$  на монокристаллической пластине кремния  $Si(111)$   $n$ -типа обладает более однородной структурой эпитаксиального слоя и морфологией его поверхности.

**Ключевые слова:** переходной слой пористого кремния, гетероструктуры, эпитаксия

**Источник финансирования:** работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда 19-72-10007. Часть работы выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FZGU-2020-0036 в рамках Государственного Задания Вузам.

**Благодарности:** исследования методом растровой электронной микроскопии выполнены в центре коллективного пользования Воронежского государственного университета. Исследования методом XPS выполнены с использованием оборудования ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» при УдмФИЦ УрО РАН». Рентгеноструктурные исследования выполнены с использованием оборудования научно-ресурсного центра «Рентгеноструктурные методы исследования» Санкт-Петербургского государственного университета.

**Для цитирования:** Леньшин А. С., Золотухин Д. С., Бельтюков А. Н., Середин П. В., Мизеров А. М., Касаткин И. А., Радам А. О., Домашевская Э. П. Особенности роста и состава гетероструктур  $Al_xGa_{1-x}N/AlN/Si$ , выращенных с использованием буферного слоя пористого кремния. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(1): 51–58. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9055>

✉ Леньшин Александр Сергеевич, e-mail: [lenshinas@mail.ru](mailto:lenshinas@mail.ru)

© Леньшин А. С., Золотухин Д. С., Бельтюков А. Н., Середин П. В., Мизеров А. М., Касаткин И. А., Радам А. О., Домашевская Э. П., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

**For citation:** Lenshin A. S., Zolotukhin D. S., Beltyukov A. N., Seredin P. V., Mizerov A. M., Kasatkin I. A., Radam A. O., Domashevskaya E. P. Characteristics of the formation and composition of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$  heterostructures grown using a porous silicon buffer layer. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2022;24 (1): 51–58. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9055>

## 1. Введение

Интеграция III-N технологии с существующей кремниевой технологией крайне перспективна с точки зрения создания новых типов СВЧ и оптоэлектронных приборов. Использование кремниевых подложек для роста III-N гетероструктур практически выгодно из-за их коммерческой доступности и развитости Si-технологии. Основная проблема интеграции двух технологий - значительное рассогласование параметров кристаллических решеток и коэффициентов температурного расширения, что приводит к возникновению большого количества дефектов, неконтролируемым флуктуациям состава твердых растворов, отслаиванию и растрескиванию гетероструктур. Не менее важной проблемой в производстве мощных нитридных СВЧ-транзисторов является теплоотвод от приборов, рассеиваемая мощность которых составляет десятки ватт [1–5].

Актуальным способом решения данных проблем является введение в гетероструктуру III-N/Si(111) различных переходных буферных слоев: многопериодных сверхрешеток, слоев чередующейся 2D–3D морфологии, слоев с плавным изменением состава [6–7]. При этом толщины буферных слоев могут достигать нескольких десятков микрометров. Основными методами выращивания приборных гетероструктур являются газофазная эпитаксия из металлорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ).

Целью работы является установить влияние внедрения в технологию роста гетероструктуры  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$  в качестве переходного слоя- нанопористого кремния por-Si на структурно-морфологические характеристики и атомный состав поверхностных слоев рентгеноструктурными, микроскопическими и рентгеноэлектронными методами.

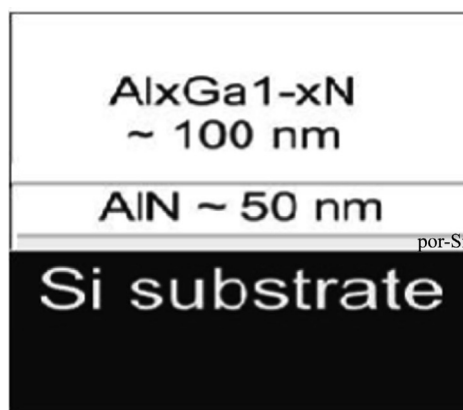
## 2. Экспериментальная часть. Получение гетероструктур методом МПЭ и структурно-морфологические методы исследования

Гетероструктуры (ГС)  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}(111)$  двух типов без переходного пористого слоя и с переходным слоем por-Si выращивались одновременно на одной монокристаллической пластине кремния Si(111) методом молекулярно-

пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота (МПЭ ПА) на установке Veeco Gen 200 одновременно [7]. В качестве подложек для роста  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$  слоев гетероструктур были использованы традиционные подложки монокристаллического кремния Si(111) марки КДБ, на половине поверхности которых предварительно были сформированы нанопористые слои толщиной около 20 нм и средним диаметром пор менее 3 нм по оригинальной методике, описанной в [8]. Непосредственно перед ростом гетероструктуры подложки были отожжены и нитридизованы в течение 30 мин [9] в ростовой камере установки.

Ростовые процессы формирования всех слоев, составляющих ГС, происходили в металл-обогащенных условиях. Скорость роста контролировалась и ограничивалась потоком азота и составляла  $F_N \sim 0.05$  мкм/час. Для предотвращения травления кремниевой подложки жидким Ga с образованием Ga-Si эвтектики на поверхности подложек был сформирован буферный AlN слой. После этого происходил рост основного слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . На рис. 1 представлены ожидаемый дизайн, задаваемый технологическим режимом роста, и ожидаемые толщины слоев гетероструктуры  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}$  с буферным слоем нанопористого кремния.

Морфология выращенных гетероструктур была исследована на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6380 LV и атомно-силовом микроскопе (АСМ) SOLVER P47 PRO, статистический анализ морфологии поверхности проведен в программе NOVA.



**Рис. 1.** Дизайн гетероструктуры  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}$  с буферным слоем нанопористого кремния

Исследования образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS-ray photoelectron spectroscopy) были выполнены на спектрометре фирмы SPECS. Глубина анализа поверхности образцов методом XPS составляет 1–2 нм.

При обработке результатов измерений для определения линии фона и вычитания фона были использованы алгоритмы Ширли. Для определения энергии связи основных уровней элементов гетероструктуры в качестве реперной линии была использована линия C1s естественных углеводородных загрязнений поверхности образца, не подвергнутого специальной очистке, приведенная к энергии связи  $E_b[\text{C}1s] = 285$  эВ. Идентификация основных уровней элементов и их химического состояния проводилась с использованием базы данных рентгеновских фотоэлектронных спектров Национального института стандартов США [10].

Данные (HR) XRD были получены при 305 К на дифрактометре Bruker D8 Discover с монохроматором Ge220.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Данные рентгеновской дифракции

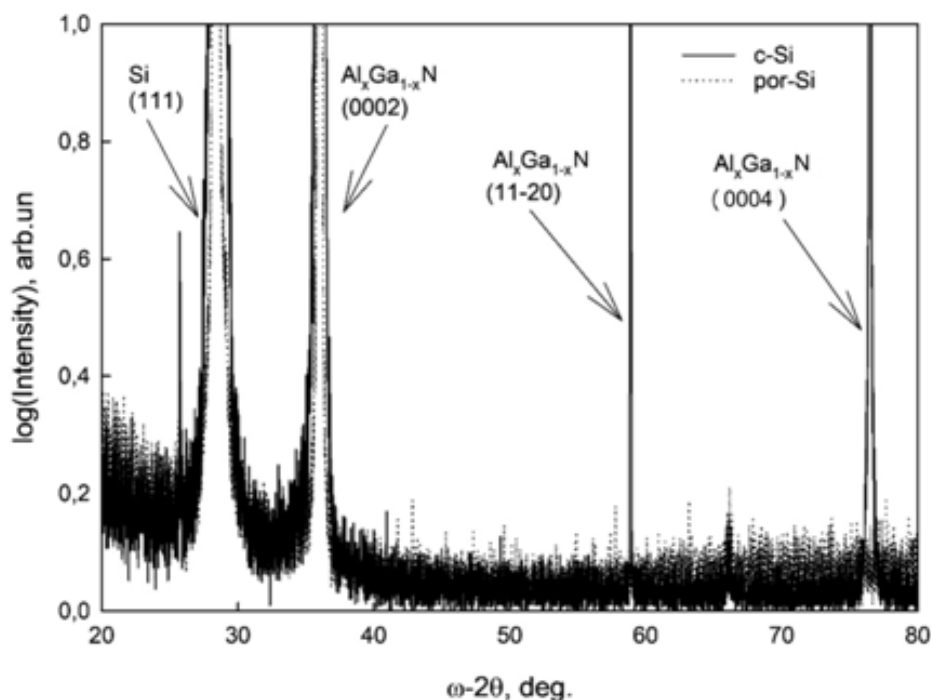
На рис. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа в  $\omega$ - $2\theta$  геометрии с использованием характеристического излучения меди. Из экспериментальных данных видно, что на-

иболее интенсивной на сканах обеих гетероструктур является дифракционная линия (111) кремниевой подложки Si(111). Кроме того, на обоих сканах присутствуют высокоинтенсивные рефлексы (0002) от базовой плоскости элементарной ячейки в виде гексагона, принадлежащие твердому раствору  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  гексагональной сингонии. Присутствие на дифрактограмме гетероструктуры с подслоем por-Si (точечные на рис. 2) только отражения от базовой плоскости (0002) свидетельствует о монокристаллическом состоянии эпитаксиальной пленки.

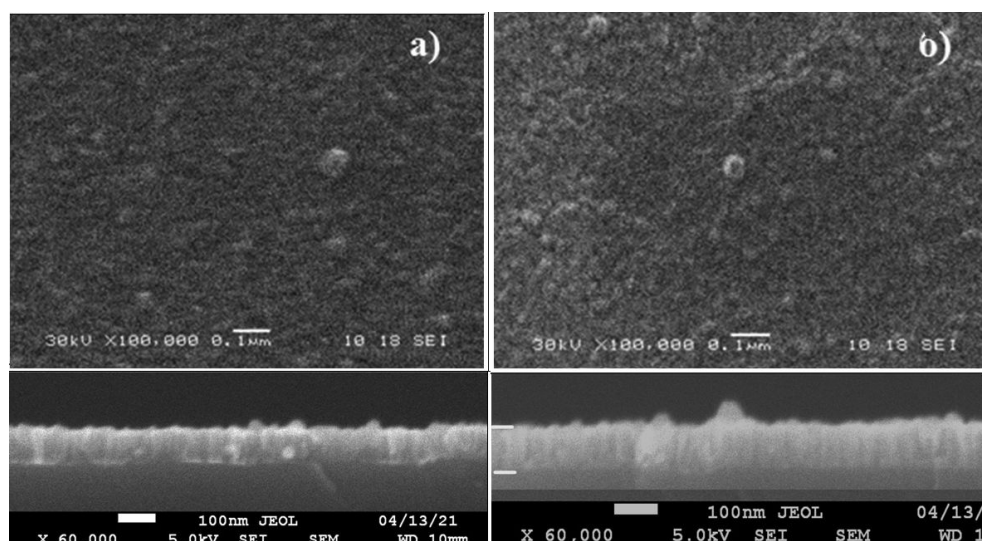
При этом на дифрактограмме гетероструктуры, выращенной на c-Si(111)-подложке без пористого подслоя (сплошные кривые на рис. 2), присутствует отражение от плоскости (11–20) твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . Появление этого отражения может быть связано с зарастанием столбиков твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  в направлении  $\langle 11-20 \rangle$ . Аналогичных отражений на  $\omega$ - $2\theta$  скане гетероструктуры с пористым подслоем не наблюдается, что свидетельствует о большей однородности и совершенстве ее кристаллической структуры.

#### 3.2. Морфология образцов по данным растровой электронной и атомно-силовой микроскопии

На рис. 3. представлены РЭМ изображения поверхности гетероструктур, полученных на



**Рис. 2.** Рентгенограммы XRD гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}$ , выращенных на подложках c-Si(111) (точечная линия) и por-Si/c-Si(111) (сплошная линия)



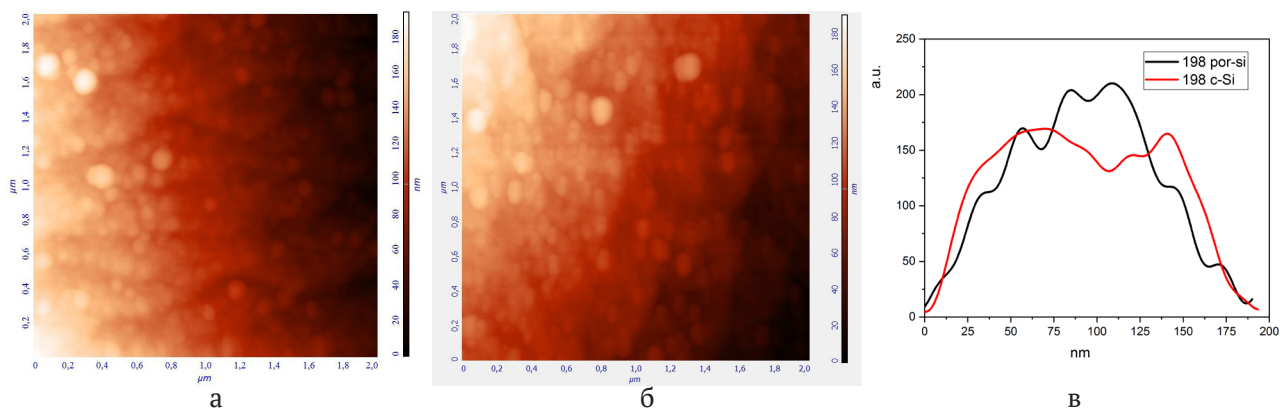
**Рис. 3.** РЭМ-изображения поверхности и скола гетероструктур: а) на подложке монокристаллического кремния  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}(111)$ ; б) с использованием буферного слоя  $\text{por-Si}$  ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ )

подложках монокристаллического кремния (а) и с использованием буферного подслоя пористого кремния (б).

На поверхности образцов просматриваются неоднородности структуры субмикронных размеров, вызванные столбчатой структурой пленки, наблюдаемой на РЭМ-изображениях сколов образцов. Аналогичную столбчатую структуру пленок мы наблюдали в гетероструктурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Si}(111)$  [11–12]. Сравнение морфологии гетероструктур двух типов, с подслоем  $\text{por-Si}$  и без него, показывает, что при росте на пористом слое наблюдается меньший разброс по размерам неоднородностей поверхности, т.е. структура пленки более однородная по сравнению с гетероструктурой, выращенной без буферного слоя. Это заключение подтверждает предшествующие данные XRD.

Анализ профильных РЭМ-изображений показывает совпадение фактических толщин слоев ГС с заложенными в технологический процесс. При этом распределение неоднородностей поверхности по латеральным размерам, вызванные столбчатой структурой пленки, были получены из анализа изображений атомно-силовой микроскопии (рис. 4).

На рис. 4. представлены АСМ изображения поверхности и профили распределения по размерам неоднородностей двух гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}(111)$  выращенных непосредственно на подложке  $\text{c-Si}(111)$  и с предварительно сформированным буферным слоем пористого кремния. Для образцов с буферным слоем  $\text{por-Si}$  наблюдается меньший разброс по размерам неоднородностей по сравнению с гетероструктурой, выращенной на кристаллическом кремнии



**Рис. 4.** АСМ-изображения поверхности гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}$ , выращенных на подложках: монокристаллическом  $\text{c-Si}(111)$  (а), и с пористым подслоем  $\text{por-Si}/\text{c-Si}(111)$  (б), и профили распределения по размерам неоднородностей на их поверхности (в)

(рис. 4а). Средний размер неоднородностей поверхности образцов, выращенных с использованием буферного слоя  $\text{por-Si}$  составляет  $\sim 100$  нм. У образцов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}$ , выращенных на кристаллическом кремнии наблюдается два максимума распределения наноколонн по размерам  $\sim 65$  и  $130$  нм (рис. 4в).

### 3.3. Атомный состав поверхности гетероструктур по данным метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии XPS.

На рис. 5 и 6 представлены XPS остовных уровней  $\text{Al } 2p$ ,  $\text{Ga } 2p$  и  $\text{N } 1s$  гетероструктур, полученных непосредственно на монокристаллическом кремнии  $\text{s-Si}(111)$  (рис. 5) и с пористым подслоем (рис. 6). В табл. 1 приведены энергии связи, определенные с точностью  $0.05$  эВ, и полуширины XPS остовных уровней для этих двух гетероструктур.

Анализ XPS спектров показывает, что на поверхности образцов обеих гетероструктур атомы  $\text{Al}$  и  $\text{Ga}$  образуют химические связи с азотом и имеют практически одинаковые энергии связей (как и полуширины) спектров остовных уровней всех трех элементов твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , близкие по значениям к энергии связи алюминия и галлия в нитридах [10]. Кроме того, на спектрах  $\text{Al } 2p$  проявляется вклад слабоинтенсивной компоненты окисленного алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $E_b = 75.5$  эВ), образовавшегося на поверхности образцов при контакте с воздухом. Аналогичной компоненты на спектре  $\text{Ga } 2p$  не наблюдается, однако на низкоэнергетический склон спектра галлия накладывается оже-линия азота  $\text{N KLL}$ .  $\text{N } 1s$  спектры азота имеют энергии связей, соответствующие нитридам  $\text{Al}$  и  $\text{Ga}$  [10]. Кроме того, на спектрах азота можно наблюдать малоинтенсивную гидридную компоненту,

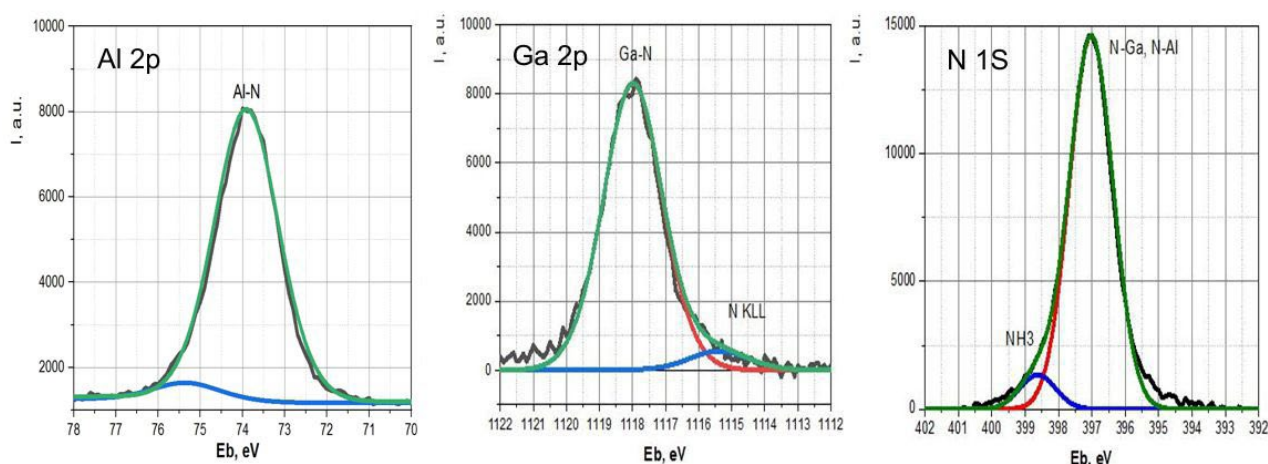


Рис. 5. XPS  $\text{Al } 2p$ ,  $\text{Ga } 2p$  и  $\text{N } 1s$  в гетероструктурах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}(111)$ , выращенных на подложке монокристаллического кремния  $\text{Si}(111)$

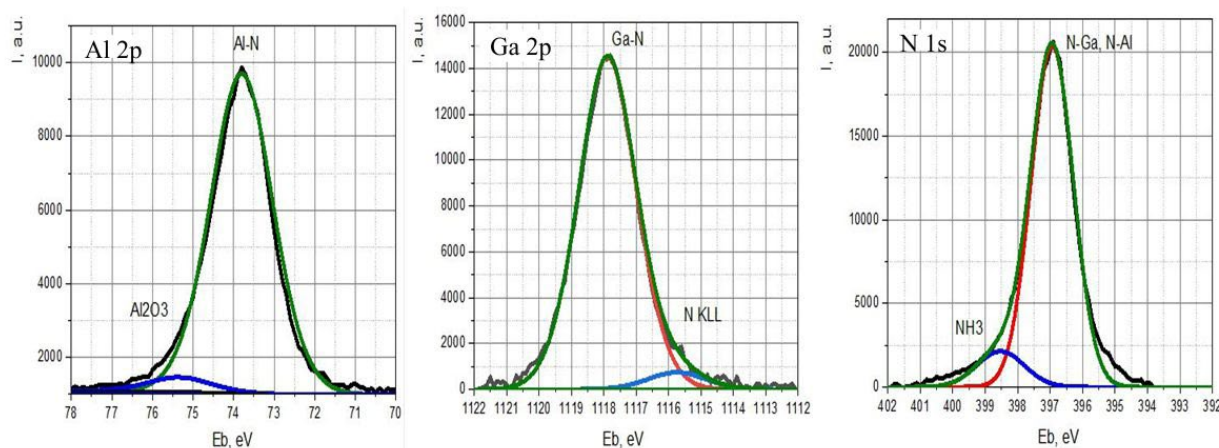


Рис. 6. XPS  $\text{Al } 2p$ ,  $\text{Ga } 2p$  и  $\text{N } 1s$  в гетероструктурах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$ , выращенных на подложке монокристаллического кремния  $\text{Si}(111)$  с буферным слоем пористого кремния

**Таблица 1.** Энергии связи и полуширины XPS основных уровней Al 2p, Ga 2p<sub>3/2</sub> и N 1s для гетероструктур, выращенных на c-Si(111) и на por-Si/c-Si(111)

	Энергия связи, эВ/ Полуширина, эВ					
	Al2p		Ga2p <sub>3/2</sub>		N1s	
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{c-Si}$	73.80	1.64	1117.92	2.10	396.97	1.55
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{por-Si}/\text{c-Si}$	73.91	1.72	1117.87	2.15	396.93	1.56
AlN [10]	73.90		1117.80		397.0 397.30	
GaN [10]						
GaN [10]						
AlN [10]						

по-видимому, от остаточных реагентов на поверхности гетероструктур (связи типа  $\text{NH}_3$ ,  $E_b = 398.7$  эВ [10]).

По аналогии с работами [13,14], содержание алюминия в пленке может быть рассчитано на основе соотношения (1):

$$x_{\text{Al}} = \frac{I_{\text{Al}_{2\text{P}_3}} / F_{\text{Al}_{2\text{P}_3}}}{(I_{\text{Al}_{2\text{P}_3}} / F_{\text{Al}_{2\text{P}_3}} + I_{\text{Ga}_{2\text{P}_3}} / F_{\text{Ga}_{2\text{P}_3}})}, \quad (1)$$

где  $I$  – интегральная интенсивность фотоэлектронных максимумов соответствующих линий в спектре, а  $F$  – фактор чувствительности ( $F_{\text{Ga}_{2\text{P}_3}} = 2.75$  и  $F_{\text{Al}_{2\text{P}_3}} = 0.54$ ). Определенные на основе соотношения (1) значения концентрации атомов Al в твердом растворе составили  $x_{\text{a,cryst}} = 0.49$  и  $x_{\text{a,por}} = 0.54$  для образцов, выращенных непосредственно на монокристаллическом кремнии  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}(111)$  и с использованием пористого буферного слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{Si}/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$  соответственно, что достаточно хорошо совпадает с заложенными при синтезе ожидаемыми технологическими значениями  $x = 0.50$ . Небольшая разница значений  $x$  двух гетероструктур может быть связана с их такими же небольшими структурно-морфологическими различиями.

#### 4. Заключение

Впервые методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота были сформированы гетероструктуры типа  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{por-Si}/\text{Si}(111)$  с использованием буферного слоя в виде пористого кремния por-Si.

Рентгеноструктурными и электронномикроскопическими методами показано, что формирование твердого раствора  $\text{Al}_{0.54}\text{Ga}_{0.46}\text{N}$  на буферном слое пористого кремния способствует более однородному распределению по размерам и ориентации в базовом направлении наноклонным твердого раствора по сравнению с аналогичным

твердым раствором  $\text{Al}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{N}$ , выращенными одновременно на той же пластине монокристаллического кремния без пористого слоя в одинаковых технологических условиях.

Небольшая вариация поверхностного состава твердого раствора на ~ 5 % в сторону Al на подложке с буферным пористым слоем может быть связана с более однородными структурно-морфологическими характеристиками этой гетероструктуры.

#### Заявленный вклад авторов

Леньшин А. С. – научное руководство, концепция исследования, синтез образцов, написание текста, итоговые выводы. Золотухин Д. С. – написание текста, итоговые выводы. Бельтюков А. Н. – проведение измерений, написание текста. Середин П. В. – проведение измерений, написание текста. Мизеров А. М. – синтез образцов, написание текста. Касаткин И. А. – проведение измерений, написание текста. Радам А. О. – проведение измерений. Домашевская Э. П. – редактирование текста, итоговые выводы.

#### 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. Ho V. X., Al Tahtamouni T. M., Jiang H. X., Lin J. Y., Zavada J. M., Vinh N.Q. Room-temperature lasing action in GaN quantum wells in the infrared 1.5  $\mu\text{m}$  region. *ACS Photonics*. 2018;5: 1303–1309. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b01253>
2. Laurent T., Manceau J.-M., Monroy E., Lim C. B., Renneson S., Semond F., Julien F. H., Colombelli R. Short-wave infrared ( $\lambda = 3 \mu\text{m}$ ) intersubband polaritons in the GaN/AlN system. *Applied Physics Letters*. 2017;110: 131102. <https://doi.org/10.1063/1.4979084>

3. Ajay A., Lim C. B., Browne D. A., Polaczynski J., Bellet-Amalric E., den Hertog M. I., Monroy E. Inter-subband absorption in Si- and Ge-doped GaN/AlN heterostructures in self-assembled nanowire and 2D layers. *Physica Status Solidi B*. 2017;254: 1600734. <https://doi.org/10.1002/pssb.201600734>

4. Gkanatsiou A. A., Lioutas Ch. B., Frangis N., Polychroniadis E. K., Prystawko P., Leszczynski M. Electron microscopy characterization of AlGaN/GaN heterostructures grown on Si (111) substrates. *Superlattices and Microstructures*. 2017;103: 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2016.10.024>

5. Oh J-T., Moon Y-T., Jang J-H., Eum J-H., Sung Y-J., Lee S. Y., Song J-O., Seong T-Y. High-performance GaN-based light emitting diodes grown on 8-inch Si substrate by using a combined low-temperature and high-temperature-grown AlN buffer layer. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;732: 630–636. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.200>

6. Sugawara Y., Ishikawa Y., Watanabe A., Miyoshi M., Egawa T. Observation of reaction between a-type dislocations in GaN layer grown on 4-in. Si(111) substrate with AlGaN/AlN strained layer superlattice after dislocation propagation. *Journal of Crystal Growth*. 2017;468: 536–540. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.11.010>

7. Мизеров А. М., Тимошнев С. Н., Соболев М. С., Никитина Е. В., Шубина К. Ю., Березовская Т. Н., Штром И. В., Буравлев А. Д. Особенности начальных стадий роста GaN на подложках Si(111) при молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота. *Физика и техника полупроводников*. 2018;52(12), 1425–1429. <https://doi.org/10.21883/FTP.2018.12.46751.30>

8. Kukushkin S. A., Mizerov A. M., Osipov A. V., Redkov A. V., Timoshnev S. S. Plasma assisted molecular beam epitaxy of thin GaN films on Si(111) and SiC/Si(111) substrates: Effect of SiC and polarity issues. *Thin Solid Films*. 2018;646: 158–162. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.11.037>

9. Lenshin A. S., Kashkarov V. M., Domashevskaya E. P., Bel'tyukov A. N., Gil'mutdinov F. Z. Investigations of the composition of macro-, micro- and nanoporous silicon surface by ultrasoft X-ray spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy. *Applied Surface Science*. 2015;359: 550–559. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.10.140>

10. NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database. Режим доступа: <https://srdata.nist.gov/xps/>

11. 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>

12. 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;476: 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.239>

13. Fang Z. L., Li, Q. F. Shen X. Y., Cai J. F., Kang J. Y., Shen W. Z., Modified InGaN/GaN quantum wells with dual-wavelength green-yellow emission. *Journal of Applied Physics*. 2014;115(4): 043514. <https://doi.org/10.1063/1.4863208>

14. Середин П. В., Леньшин А. С., Золотухин Д. С., Голощапов Д. Л., Мизеров А. М., Арсентьев И. Н., Бельтюков А. Н. Исследование влияния переходного слоя нанопористого кремния на атомное и электронное строение, а также оптические свойства гетероструктур  $\text{Al}^{\text{III}}\text{N}/\text{por-Si}$ , выращенных методом плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии. *Физика и техника полупроводников*. 2019;53(7): 1010–1016. <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.07.47882.9084>

#### Информация об авторах

Леньшин Александр Сергеевич, д. ф.-м. н., в. н. с. кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет; доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1939-253X>  
lenshin@phys.vsu.ru

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

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

Золотухин Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9645-9363>  
zolotuhin@phys.vsu.ru

Бельтюков Артемий Николаевич, к. ф.-м. н., с. н. с., Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН (Ижевск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7739-7400>  
beltukov.a.n@gmail.com

Мизеров Андрей Михайлович, к. ф.-м. н., в. н. с., лаборатория наноэлектроники, Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9125-6452>  
andreymizerov@rambler.ru

*Касаткин Игорь Алексеевич*, к. г.-м. н., ведущий специалист по рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения, Санкт-Петербургский государственный университет, Ресурсный центр «Рентгенодифракционные методы исследования» (Санкт-Петербург, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9586-5397>

[igor.kasatkin@spbu.ru](mailto:igor.kasatkin@spbu.ru)

*Али Радам*, аспирант кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1072-0816>

[radam@phys.vsu.ru](mailto:radam@phys.vsu.ru)

*Домашевская Эвелина Павловна*, д. ф.-м. н., профессор кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6354-4799>

[ftt@phys.ru](mailto:ftt@phys.ru)

*Поступила в редакцию 19.10.2021; одобрена после рецензирования 29.11.2021; принята к публикации 15.12.2021; опубликована онлайн 25.03.2022.*