

УДК 29.19.04

ПОЛУЧЕНИЕ ТОЛСТЫХ СЛОЕВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ МЕТОДОМ МНОГОСТАДИЙНОГО РОСТА НА ПОДЛОЖКАХ С КОЛОННОЙ СТРУКТУРОЙ

М.Г. Мынбаева^{a,b}, Д.А. Кириленко^a, А.А. Ситникова^a, А.В. Кремлева^b, В.И. Николаев^{b,a},
К.Д. Мынбаев^{a,b}, М.А. Одноблюдов^{c,b}, Х. Липсанен^d, В.Е. Бугров^b, А.Е. Романов^{b,a}

^a Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^c Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

^d Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия

Автор для переписки: mynkad@mail.ioffe.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.09.16, принята к печати 20.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1048-1055

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мынбаева М.Г., Кириленко Д.А., Ситникова А.А., Кремлева А.В., Николаев В.И., Мынбаев К.Д., Одноблюдов М.А., Липсанен Х., Бугров В.Е., Романов А.Е. Получение толстых слоев нитрида галлия методом многостадийного роста на подложках с колонной структурой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1048–1055. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1048-1055

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены процессы образования и поведения дефектов при многостадийном выращивании толстых эпитаксиальных слоев нитрида галлия методом хлорид-гидридной эпитаксии на подложках GaN/Al₂O₃ с заросшей колонной структурой, сформированных с помощью газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. **Методы.** Рост первичных слоев GaN осуществлялся методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. На поверхности этих слоев методом реактивного ионного травления создавались колонны высотой 800 нм. Далее колонны зарослись слоем нитрида галлия толщиной 3–4 мкм. На сформированной таким образом подложке проводилось многостадийное выращивание слоев GaN методом хлорид-гидридной эпитаксии с общей толщиной 100–1500 мкм. Характеризация полученных слоев проводилась с применением методов оптической и электронной микроскопии, а также спектроскопии комбинационного рассеяния света. **Основные результаты.** Плотность дислокаций в слоях, выращенных хлорид-гидридной эпитаксией, составила (3–6)·10⁷ см⁻², что было на порядок ниже, чем в использованной подложке, и на два–три порядка ниже, чем плотность дислокаций в типичных эпитаксиальных слоях GaN на обычных сапфировых подложках. Данные спектроскопии комбинационного рассеяния света показали низкий уровень напряжений в выращенных слоях и их высокую структурную однородность. По итогам исследования установлено, что в условиях многостадийного роста не катастрофические (не приводящие к разрушению образца) трещины способны к трансформации в макропоры и оказываются важным структурным элементом, способствующим протеканию релаксации напряжений в объеме толстых слоев нитрида галлия, выращиваемых на инородной подложке. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы при разработке гетероструктур на основе нитридов элементов III группы для приборов оптоэлектроники и высокочастотной и силовой микроэлектроники.

Ключевые слова

нитрид галлия, эпитаксия, дефекты, трещины, подложки

Благодарности

Работа поддержана Российским научным фондом (Грант РНФ No14-29-00086)

SYNTHESIS OF THICK GALLIUM NITRIDE LAYERS BY METHOD OF MULTI-STAGE GROWTH ON SUBSTRATES WITH COLUMN STRUCTURE

M.G. Mynbaeva^{a,b}, D.A. Kirilenko^{a,b}, A.A. Sitnikova^a, A.V. Kremleva^b, V.I. Nikolaev^{b,a}, K.D. Mynbaev^{a,b},
M.A. Odnoblyudov^{c,b}, H. Lipsanen^{d,b}, V.E. Bougrov^b, A.E. Romanov^{b,a}

^a Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^c Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

^d Aalto University, Aalto, 02150, Finland

Corresponding author: mynkad@mail.ioffe.ru

Article info

Received 11.09.16, accepted 20.10.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1048-1055

Article in Russian

For citation: Мынбаева М.Г., Кириленко Д.А., Ситникова А.А., Кремлева А.В., Николаев В.И., Мынбаев К.Д., Одоблюдов М.А., Липсанен Н., Бугров В.Е., Романов А.Е. Synthesis of thick gallium nitride layers by method of multi-stage growth on substrates with column structure. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1048–1055. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1048-1055

Abstract

Subject of Research. The paper deals with processes of formation and transformation of defects during multi-stage growth of thick gallium nitride layers with hydride vapor phase epitaxy on GaN/Al₂O₃ substrates with buried column pattern formed with the use of metal-organic vapor phase epitaxy. **Methods.** The growth of initial GaN layers was performed with the use of metal-organic vapor phase epitaxy. On the surface of the initial layers columns with the height of 800 nm were generated by means of ion etching. These columns were overgrown with 3–4 μm-thick GaN layers. On thus formed substrate multi-stage growth of GaN layers was performed with the use of hydride vapor-phase epitaxy. The total thickness of GaN layers was 100–1500 μm. The grown layers were studied by optical and electron microscopy and Raman spectroscopy. **Main Results.** Density of threading dislocations in the layers grown by hydride vapor-phase epitaxy was $(3-6) \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}$, that was one order of magnitude lower than in the used substrate, and two to three orders lower than dislocation density in typical GaN layers grown on commercial sapphire substrates. Raman spectroscopy data were indicative of low level of mechanical stress in the layers and their high structural uniformity. It was established that under multi-stage growth conditions, non-catastrophic cracks (those that do not cause sample destruction) are able to transform into macropores and appear to be an important structural element, serving to stress relaxation in the bulk of thick gallium nitride layers grown on foreign substrates. **Practical Relevance.** The results of the study can be used in the development of III-nitride heterostructures for optoelectronics and high-power and high-frequency microelectronics.

Keywords

gallium nitride, epitaxy, defects, cracks, substrates

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF Grant No.14-29-00086)

Введение

Наблюдаемый в настоящее время недостаток высококачественных подложек из нитридов элементов III группы для последующего наращивания нитридных эпитаксиальных слоев ограничивает характеристики и замедляет развитие коротковолновой оптоэлектроники и высокочастотных и мощных электронных устройств. Широко используемый подход, заключающийся в гетероэпитаксиальном наращивании нитридных слоев на инородные подложки, такие как сапфир (Al₂O₃), имеет ряд недостатков, ограничивающих функциональные возможности создаваемых приборов. Несоответствие параметров кристаллической решетки эпитаксиальных слоев, составляющих рабочую область электронных приборов, и подложки приводит к возникновению в гетероструктурах дефектов, ухудшающих характеристики приборов. Несоответствие температурных коэффициентов расширения эпитаксиальных слоев и подложки приводит к появлению напряжений, вызывающих растрескивание структур. Негативный вклад в снижение функционала приборов вносит и низкая теплопроводность сапфировых подложек, что ограничивает рассеяние тепла и ведет к перегреву рабочей области приборов с последующим ухудшением характеристик вплоть до полной их деградации. Наряду с этим, многолетние усилия по получению объемных кристаллов для создания «родственных» нитридных подложек, в частности, подложек из нитрида галлия (GaN), с использованием традиционных способов объемного роста, разработанных для широкого класса полупроводниковых материалов, до сих пор не увенчались успехом. Это обусловлено рядом фундаментальных характеристик нитридов элементов III группы. Прежде всего, равновесное давление паров азота над этими соединениями при умеренных температурах является чрезвычайно высоким. Нитриды элементов III группы начинают разлагаться при температурах ниже их температур плавления, что затрудняет осуществление обычных способов объемного роста. Проблема высокого равновесного давления азота над GaN была впервые решена с использованием установки выращивания из раствора, рассчитанной на сверхвысокие давления ($2 \cdot 10^4$ атм) [1]. Развитый метод позволил получить первые кристаллы нитрида галлия малой площади. Получение первых объемных кристаллов GaN послужило важным этапом в изучении фундаментальных свойств материала и способствовало бурному развитию научных основ технологий нитридных полупроводников. Однако сам подход с точки зрения массового производства не имел экономической целесообразности и не получил дальнейшего развития. Дополнительным фактором, обусловившим необходимость поиска альтернативных технологий, послужило и то, что электрические характеристики получаемого объемного GaN оказались ограничеными высокой фоновой концентрацией носителей. Так, концентрация электронов в образцах, выращенных при высоком давлении, составляла более $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [2]. Это заведомо не позволяло осуществлять контролируемое легирование материала и, таким образом, существенно ограничивало его использование в технологиях устройств микроэлектроники. Соответственно, существенным шагом вперед в этой области была бы разработка методов получения качественной подложки из нитридов элементов III группы для изготовления микроэлектронных устройств.

Рядом исследовательских групп было показано, что подложки из нитрида галлия с требуемыми физическими свойствами могут быть получены на основе монокристаллических пластин. Такие пластины могут быть изготовлены путем наращивания толстых эпитаксиальных слоев GaN на инородные подложки. Используемые исходные подложки впоследствии могут быть удалены различными методами химического или физического травления [3–6]. В настоящее время одним из наиболее востребованных методов получения монокристаллических пластин GaN является метод хлорид-гидридной эпитаксии (ХГЭ), поскольку он обеспечивает высокие скорости роста, что позволяет получать толстые, свыше 300 мкм, эпитаксиальные слои. Дополнительным преимуществом метода ХГЭ является относительно низкая себестоимость получаемого материала, что определяет экономическую целесообразность при его внедрении в массовое производство нитридных подложек. При этом нерешенной проблемой до сих пор остается растрескивание пластин при их охлаждении от температуры выращивания до комнатной температуры и (или) в условиях постростовой обработки. В настоящей работе обсуждается подход, позволяющий преодолеть существующие ограничения способов получения толстых высококачественных слоев нитрида галлия, которые при отделении от сапфировой подложки могут быть использованы в качестве пластин для последующего выращивания нитридных приборных структур.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В качестве исходной подложки использовались (0001)-ориентированные пластины сапфира. Отметим, что наряду с такими преимуществами, как доступность пластин больших размеров и их высокое качество, у таких подложек существует и ряд недостатков: уже упомянутые несоответствия параметров кристаллической решетки и коэффициентов теплового расширения, а также кристаллохимическое несоответствие с нитридными материалами. Как следствие, в эпитаксиальных слоях нитридов, выращенных на такие подложки, наблюдаются высокая (10^9 – 10^{10} см⁻²) плотность проникающих дислокаций и высокий уровень остаточных напряжений. Для решения этой проблемы в данной работе были использованы подложки со структурированной поверхностью. Выбор оптимальной геометрии структурирования подложек основывался на данных математического моделирования напряженно-деформированного состояния в пленках GaN на сапфировых пластинах [7, 8]. В результате были выбраны подложки с оптимизированной колонной структурой [9].

Рост слоев GaN осуществлялся в вертикальном реакторе для газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (ГФЭ МОС). Первичные слои нитрида галлия толщиной 3,2–4,6 мкм, предназначенные для структурирования, выращивались на низкотемпературном буферном слое GaN. Структурирование полученных слоев проводилось стандартным методом реактивного ионного травления GaN в индуктивно-связанной плазме Cl₂/Ar. Для создания упорядоченных колонных структур были изготовлены маски, полученные методом нанопечати (так называемые «Nano-Imprint Lithography») [10]. В результате на поверхности пластин GaN/Al₂O₃ были сформированы колонны высотой 800 нм. Ряды колонной структуры подложки ГФЭ МОС GaN/Al₂O₃ были ориентированы в одном из направлений параллельно плоскостям GaN (010), а в другом – параллельно плоскостям GaN (210) (рис. 1). Далее, с целью получения сплошной ростовой поверхности, колонны зарастивались, с использованием того же метода ГФЭ МОС, слоем нитрида галлия толщиной 3–4 мкм. При зарастивании местами нуклеации сплошного слоя GaN служили вершины колонн. В результате этого процесса были получены пластины GaN/Al₂O₃ со сплошной поверхностью и заглубленными структурированными слоями, и эти пластины далее были использованы в качестве подложек для роста нитрида галлия методом ХГЭ. Выращивание эпитаксиальных слоев GaN методом ХГЭ производилось при атмосферном давлении в горизонтальном реакторе, помещенном в многозонную печь с резистивным нагревом [11]. Температура роста варьировалась в пределах 950–1050 °С. Скорость роста, в зависимости от технологических режимов, изменялась от 60 до 100 мкм/ч. В качестве газа носителя использовался аргон чистоты 99,997%, источниками служили металлический Ga (99,9999%) и газообразный NH₃ (99,999%). Для хлорирования Ga использовали газообразный HCl чистоты 99,999%. Толщины выращенных слоев составляли 100–1500 мкм. Характеризация полученных слоев проводилась с применением методов оптической микроскопии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а также спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

Дефектная структура полученных образцов была изучена методом ПЭМ. Использовались электронные микроскопы Philips EM-420 (ускоряющее напряжение 80 кВ, разрешение 0,5 нм) и Jeol JEM-2100F (ускоряющее напряжение 200 кВ, разрешение 0,2 нм). Для подготовки образцов для исследований методом ПЭМ были использованы обычные процедуры механического утонения с последующим травлением ионами Ag⁺ при энергиях 3–4 кэВ. Данные исследований ПЭМ показали, что при зарастивании колонн в слое ГФЭ МОС GaN возникают границы коалесценции двух различных типов. Границы, параллельные плоскостям (210), практически не содержали дефектов. Границы вдоль плоскостей (010) были образованы зигзагообразными стенками из призматических дефектов упаковки. Концентрация прорастающих дислокаций в слое ГФЭ МОС GaN составляла $(1\text{--}4) \cdot 10^8$ см⁻².

На рис. 2 показан фрагмент поперечного среза приповерхностной области эпитаксиального слоя толщиной 650 нм, выращенного методом ХГЭ на подложке GaN/Al₂O₃ с заглубленной колонной структурой, полученной методом ГФЭ МОС. Исследование дислокаций в слое, выращенном методом ХГЭ, показало наличие краевых и смешанных дислокаций. При этом винтовые дислокации, которые являются типичными для толстых слоев нитрида галлия, выращенных при высоких скоростях ХГЭ [12], обнаружены не были. В верхней части слоя, выращенного ХГЭ, плотность дислокаций составляла $(3-6) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$, что было на порядок ниже, чем в использованной подложке, сформированной с помощью метода ГФЭ МОС, и, что важно, на два-три порядка ниже, чем плотность дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN, выращиваемых на обычных сапфировых подложках без использования приемов структурирования. Более подробное описание микроскопической дефектной структуры толстых слоев нитрида галлия, выращенных ХГЭ на подложках с колонной структурой, приведено в работе [9].

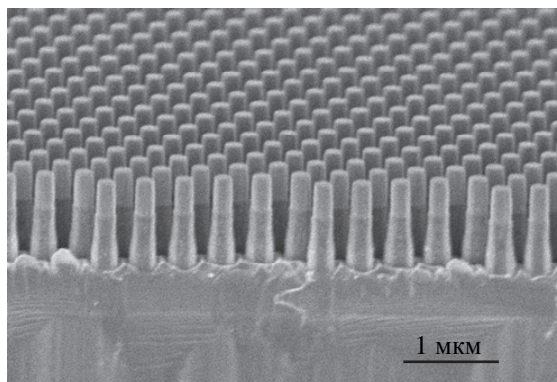


Рис. 1. Изображение поверхности и поперечного среза пластины GaN/Al₂O₃ со сформированной колонной структурой, полученное сканирующей электронной микроскопией

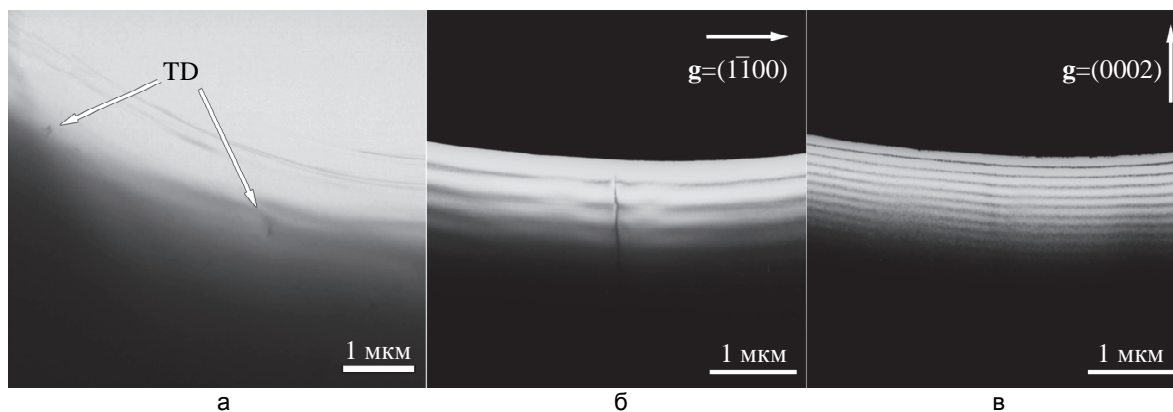


Рис. 2. Изображения просвечивающей электронной микроскопии верхней части слоя GaN, выращенного хлорид-гидридной эпитаксией: (а) – планарное изображение, стрелками отмечены места выхода на поверхность прорастающих дислокаций (обозначены как «TD»); (б) и (в) представляют изображения краевой дислокации, полученные в двух различных отражениях:

(б) – в отражении $(\bar{1}10)$; (в) – в отражении (0002) . Так как вектор Бюргерса краевой дислокации перпендикулярен направлению роста, при выбранном направлении вектора дифракции g дислокация на изображении исчезает

Исследования КРС проводились при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния на спектрометре T64000 производства фирмы Horiba Jobin-Yvon (Франция), оборудованном конфокальным микроскопом VX41 фирмы Olympus. В качестве источника возбуждения использовался лазер YAG:Nd (длина волны возбуждения 532 нм). Лазерный луч фокусировался в пятно диаметром около 1 мкм. Во всех случаях направление падения лазерного луча совпадало с направлением роста слоев GaN. Исследования показали, что полуширина линии фонона симметрии $E_2(\text{high})$, регистрировавшейся для слоя, выращенного методом ХГЭ, составляла $2,1 \text{ см}^{-1}$, что близко к значению $1,9 \text{ см}^{-1}$, зарегистрированному для образца объемного GaN, обладавшего высоким структурным совершенством [13]. Значение частоты фонона симметрии $E_2(\text{high})$ крайне чувствительно к наличию в слоях деформаций. Для исследованного слоя оно было равно $567,6 \text{ см}^{-1}$ и близко к значению, характерному для объемного GaN ($567,8 \text{ см}^{-1}$) [14]. Таким образом, можно было говорить о том, что в исследованном эпитаксиальном слое практически отсутствовали упругие деформации. При наличии в полупроводниковом материале свободных электронов вследствие их взаимодействия с продольными фононами возникают связанные плазмон-ЛО-фононные

моды, частотное положение которых зависит от концентрации свободных электронов (n). В исследуемом слое, выращенном ХГЭ, значение частоты фонона $A_1(LO)$ ($733,7 \text{ см}^{-1}$) лишь незначительно отличалось от его значения в компенсированном GaN ($733,0 \text{ см}^{-1}$). Это свидетельствовало о том, что концентрация свободных электронов в слое была достаточно низкой и не превышала $(5-6) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [15]. Сходные данные серии измерений КРС, проведенных в разных точках поверхности эпитаксиального слоя, свидетельствовали о его высокой структурной однородности.

Полученные результаты указывали на то, что использование структурированной подложки способствует снижению дефектности слоев нитрида галлия, выращенных ХГЭ. Однако эксперименты по росту толстых, свыше 600 мкм, слоев нитрида галлия показали, что проблема рассогласования наращиваемых слоев с подложками, созданными на основе сапфировых пластин, по коэффициенту термического расширения, не может быть решена в полной мере только за счет структурирования. Напряжения несоответствия для сопрягаемой пары нитрид галлия/сапфир имеют сжимающий характер в эпитаксиальном слое и растягивающий в подложке. Это является причиной возникновения трещин при охлаждении образца после роста. Трещины возникают в подложке и распространяются в слой, и зачастую это приводит к разрушению всей пластины.

Проблема трещинообразования была решена авторами с использованием многостадийного проведения процесса ХГЭ. Было установлено, что трещины, образующиеся в толстых слоях нитрида галлия, успешно зарастают при проведении повторной эпитаксии. На рис. 3 приведены результаты изучения распространения трещин в структуре слоев GaN. Процесс ХГЭ проводился в три этапа, и суммарная толщина наращенных слоев составила 1 мм. Три приведенные фотографии исследованного образца были получены при различной глубине резкости оптического микроскопа. Это позволило получить картину залегания трещин на различной глубине структуры. Из рис. 3 видно, что количество трещин значительно уменьшается с каждым проведенным ростовым процессом.

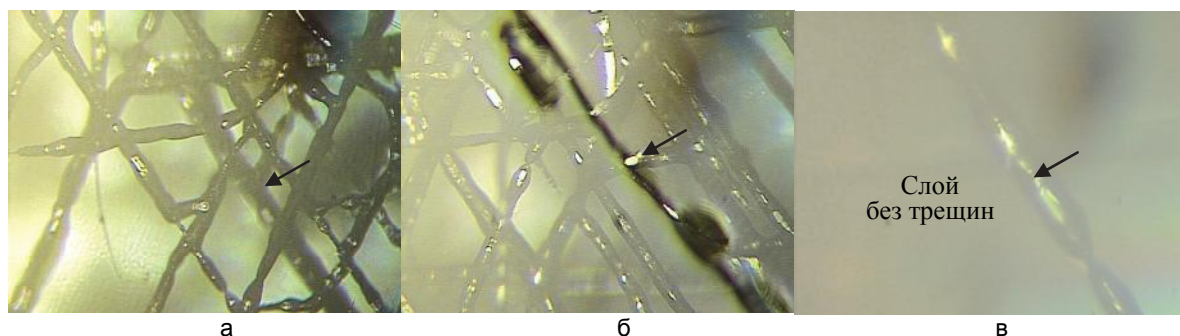


Рис. 3. Иллюстрация динамики процесса (а–в) сокращения числа трещин при многостадийном процессе хлорид-гидридной эпитаксии. Стрелкой обозначена одна из трещин, которая эволюционирует вплоть до полного зарастания в последнем цикле эпитаксии

Проведенные исследования ПЭМ показали, что в условиях ростового процесса трещины эволюционируют в цепочки макропор, глубина залегания которых составляет 10–15 мкм под поверхностью образца. Полученный результат согласуется с результатами исследований, проведенных с помощью оптической микроскопии (рис. 3, в). Дополнительно было обнаружено, что макропоры способствуют перенаправлению распространения прорастающих дислокаций (рис. 4), что, в свою очередь, приводит к снижению их плотности до уровня 10^7 см^{-2} и менее.

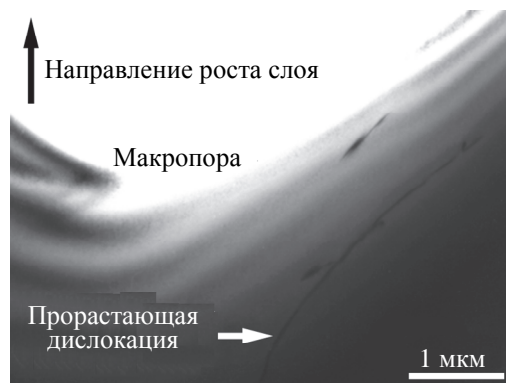


Рис. 4. Изображение просвечивающей электронной микроскопии поперечного сечения слоя GaN, показывающее макропору и прорастающую дислокацию, изменившую направление распространения вблизи стенки макропоры

Очевидно, что изменение направления дислокационной линии определяется твердофазными процессами, в частности, массопереносом с образованием двух встречных потоков: вакансий к трещине и атомов вещества по направлению к дислокации. Первый из потоков определяет формоизменение трещины, а второй – движение дислокации внутри кристалла. Оба процесса, в свою очередь, способствуют понижению свободной энергии и релаксации напряжений в структуре растущего слоя. Таким образом, можно полагать, что в условиях многостадийного роста некатастрофические (т.е. не приводящие к разрушению образца) трещины являются важным структурным элементом, способствующим протеканию релаксационных процессов в объеме толстых слоев нитрида галлия, наращиваемых на инородной подложке. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлены фотографии пластины на различных этапах многостадийного процесса зарастивания. Видно, что как в первом, так и во втором случаях пластина не подверглась разрушению и сохраняет свою целостность.

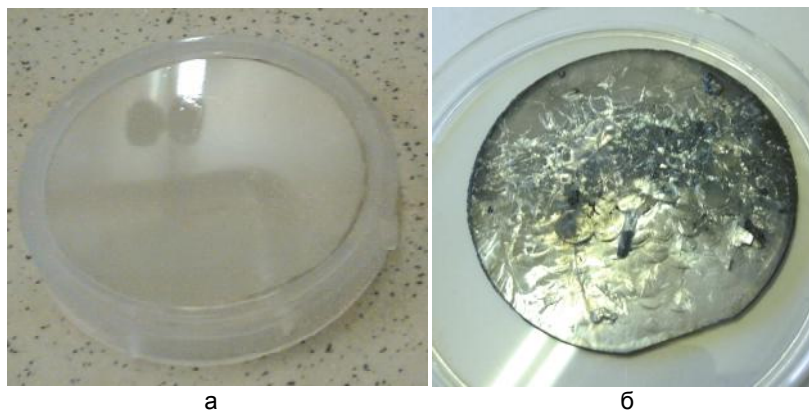


Рис. 5. Фотографии структур со слоями GaN толщиной 100 мкм (а) и 1000 мкм (б), выращенными методом хлорид-гидридной эпитаксии. Диаметр пластин – 5,08 см

Заключение

В работе был обсужден подход, позволяющий преодолеть ограничения существующих способов получения толстых высококачественных слоев нитрида галлия, которые могут быть использованы в качестве подложек для дальнейшего выращивание эпитаксиальных слоев для приборного применения. Представленные результаты электронно-микроскопического исследования и оптической характеристики толстых слоев нитрида галлия, выращенных на подложках с колонной структурой, демонстрируют возможности избранного подхода с использованием многостадийного процесса роста методом хлорид-гидридной эпитаксии для получения высококачественных собственных подложек, предназначенных для проведения гомоэпитаксии нитридов металлов III группы. В ходе проведенных исследований впервые был выявлен феномен формоизменения трещин в условиях эпитаксии, который, по-видимому, вносит существенный вклад в релаксацию структурных напряжений в объеме толстых слоев нитрида галлия, наращиваемых на инородной подложке.

Литература

1. Karpinski J., Jun J., Porowski S. Equilibrium pressure of N₂ over GaN and high pressure solution growth of GaN // *Journal of Crystal Growth*. 1984. V. 66. N 1. P. 1–10. doi: 10.1016/0022-0248(84)90070-8
2. Porowski S. Bulk and homoepitaxial GaN-growth and characterization // *Journal of Crystal Growth*. 1998. V. 189–190. P. 153–158.
3. Kelly M.K., Ambacher O., Dimitrov R., Angerer H., Handschuh R., Stutzmann M. Laser-processing for patterned and free-standing nitride films // *Materials Research Society Symposium*. 1998. V. 482. P. 973–978.
4. Detchprohm T., Hiramatsu K., Amano H., Akasaki I. Hydride vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using a ZnO buffer layer // *Applied Physics Letters*. 1992. V. 61. N 22. P. 2688–2690. doi: 10.1063/1.108110
5. Melnik Yu., Nikolaev A., Nikitina I., Vassilevski K., Dimitriev V. Properties of free-standing GaN bulk crystals grown by HVPE // *Materials Research Society Proceedings*. 1997. V. 482. P. 269–274.
6. Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. High-power, long-lifetime

References

1. Karpinski J., Jun J., Porowski S. Equilibrium pressure of N₂ over GaN and high pressure solution growth of GaN. *Journal of Crystal Growth*, 1984, vol. 66, no. 1, pp. 1–10. doi: 10.1016/0022-0248(84)90070-8
2. Porowski S. Bulk and homoepitaxial GaN-growth and characterization. *Journal of Crystal Growth*, 1998, vol. 189–190, pp. 153–158.
3. Kelly M.K., Ambacher O., Dimitrov R., Angerer H., Handschuh R., Stutzmann M. Laser-processing for patterned and free-standing nitride films. *Materials Research Society Symposium*, 1998, vol. 482, pp. 973–978.
4. Detchprohm T., Hiramatsu K., Amano H., Akasaki I. Hydride vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using a ZnO buffer layer. *Applied Physics Letters*, 1992, vol. 61, no. 22, pp. 2688–2690. doi: 10.1063/1.108110
5. Melnik Yu., Nikolaev A., Nikitina I., Vassilevski K., Dimitriev V. Properties of free-standing GaN bulk crystals grown by HVPE. *Materials Research Society Proceedings*, 1997, vol. 482, pp. 269–274.
6. Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. High-power, long-lifetime

- InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes grown on pure GaN substrates // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1998. V. 37. N 3B. P. L309–L312.
- Ивукин И.Н., Артемьев Д.М., Бугров В.Е., Одоблюдов М.А., Романов А.Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния в тонких структурированных пленках нитрида галлия на сапфировых подложках // ФТТ. 2012. Т. 54. № 12. С. 2294–2297.
 - Ivukin I.N., Bougrov V.E., Romanov A.E., Odnoblyudov M.A. Reduction of mechanical stresses in GaN/sapphire templates via formation of regular porous structure // *Physica Status Solidi C*. 2012. V. 9. N 3–4. P. 1057–1059. doi: 10.1002/pssc.201100170
 - Mynbaeva M.G., Kremleva A.V., Kirilenko D.A., Sitnikova A.A., Pechnikov A.I., Mynbaev K.D., Nikolaev V.I., Bougrov V.E., Lipsanen H., Romanov A.E. TEM study of defect structure of GaN epitaxial films grown on GaN/Al₂O₃ substrates with buried column pattern // *Journal of Crystal Growth*. 2016. V. 445. P. 30–36. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2016.04.011
 - Nikolaev V.I., Golovatenko A.A., Mynbaeva M.G., Nikitina I.P., Seredova N.V., Pechnikov A.I., Bougrov V.E., Odnoblyudov M.A. Effect of nano-column properties on self-separation of thick GaN layers grown by HVPE // *Physica Status Solidi C*. 2014. V. 11. N 3–4. P. 502–504. doi: 10.1002/pssc.201300432
 - Melnik Yu.V., Nikolaev A.E., Stepanov S., Nikitina I.P., Vassilevski K., Ankudinov A., Musikhin Yu., Dmitriev V.A. HVPE GaN and AlGaIn 'substrates' for homoepitaxy // *Material Science Forum*. 1998. V. 264–268. P. 1121–1124.
 - Liliental-Weber Z., Chen Y., Ruvimov S., Washburn J. Formation mechanism of nanotubes in GaN // *Physical Review Letters*. 1998. V. 79. N 15. P. 2835–2838.
 - Roder C., Lipski F., Habel F., Leibiger G., Abendroth M., Himcinschi C., Kortus J. Raman spectroscopic characterization of epitaxially grown GaN on sapphire // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013. V. 46. N 28. Art. 285302. doi: 10.1088/0022-3727/46/28/285302
 - Davydov V.Yu., Averkiev N.S., Goncharuk I.N., Nelson D.K., Nikitina I.P., Polkovnikov A.S., Smirnov A.N., Jacobson M.A., Semchinova O.K. Raman and photoluminescence studies of biaxial strain in GaN epitaxial layers grown on 6H-SiC // *Journal of Applied Physics*. 1997. V. 82. N 10. P. 5097–5102. doi: 10.1063/1.366310
 - Emtsev V.V., Davydov V.Yu., Kozlovskii V.V., Lundin V.V., Poloskin D.S., Smirnov A.N., Shmidt N.M., Usikov A.S., Aderhold J., Klausung H., Mistele D., Rotter T., Stemmer J., Semchinova O., Graul J. Point defects in gamma-irradiated n-GaN // *Semiconductor Science and Technology*. 2000. V. 15. N 1. P. 73–78. doi: 10.1088/0268-1242/15/1/313
 - InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes grown on pure GaN substrates. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 37, no. 3B, pp. L309–L312.
 - Ivukin I.N., Artem'ev D.M., Bugrov V.E., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E. Simulation of a stress-strain state in thin structured gallium nitride films on sapphire substrates. *Physics of the Solid State*, 2012, vol. 54, no. 12, pp. 2421–2424. doi: 10.1134/S1063783412120165
 - Ivukin I.N., Bougrov V.E., Romanov A.E., Odnoblyudov M.A. Reduction of mechanical stresses in GaN/sapphire templates via formation of regular porous structure. *Physica Status Solidi C*, 2012, vol. 9, no. 3–4, pp. 1057–1059. doi: 10.1002/pssc.201100170
 - Mynbaeva M.G., Kremleva A.V., Kirilenko D.A., Sitnikova A.A., Pechnikov A.I., Mynbaev K.D., Nikolaev V.I., Bougrov V.E., Lipsanen H., Romanov A.E. TEM study of defect structure of GaN epitaxial films grown on GaN/Al₂O₃ substrates with buried column pattern. *Journal of Crystal Growth*, 2016, vol. 445, pp. 30–36. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2016.04.011
 - Nikolaev V.I., Golovatenko A.A., Mynbaeva M.G., Nikitina I.P., Seredova N.V., Pechnikov A.I., Bougrov V.E., Odnoblyudov M.A. Effect of nano-column properties on self-separation of thick GaN layers grown by HVPE. *Physica Status Solidi C*, 2014, vol. 11, no. 3–4, pp. 502–504. doi: 10.1002/pssc.201300432
 - Melnik Yu.V., Nikolaev A.E., Stepanov S., Nikitina I.P., Vassilevski K., Ankudinov A., Musikhin Yu., Dmitriev V.A. HVPE GaN and AlGaIn 'substrates' for homoepitaxy. *Material Science Forum*, 1998, vol. 264–268, pp. 1121–1124.
 - Liliental-Weber Z., Chen Y., Ruvimov S., Washburn J. Formation mechanism of nanotubes in GaN. *Physical Review Letters*, 1998, vol. 79, no. 15, pp. 2835–2838.
 - Roder C., Lipski F., Habel F., Leibiger G., Abendroth M., Himcinschi C., Kortus J. Raman spectroscopic characterization of epitaxially grown GaN on sapphire. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, vol. 46, no. 28. Art. 285302. doi: 10.1088/0022-3727/46/28/285302
 - Davydov V.Yu., Averkiev N.S., Goncharuk I.N., Nelson D.K., Nikitina I.P., Polkovnikov A.S., Smirnov A.N., Jacobson M.A., Semchinova O.K. Raman and photoluminescence studies of biaxial strain in GaN epitaxial layers grown on 6H-SiC. *Journal of Applied Physics*, 1997, vol. 82, no. 10, pp. 5097–5102. doi: 10.1063/1.366310
 - Emtsev V.V., Davydov V.Yu., Kozlovskii V.V., Lundin V.V., Poloskin D.S., Smirnov A.N., Shmidt N.M., Usikov A.S., Aderhold J., Klausung H., Mistele D., Rotter T., Stemmer J., Semchinova O., Graul J. Point defects in gamma-irradiated n-GaN. *Semiconductor Science and Technology*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 73–78. doi: 10.1088/0268-1242/15/1/313

Авторы

Мынбаева Марина Гелиевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mgm@mail.ioffe.ru

Кириленко Демид Александрович – научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Demid.Kirilenko@mail.ioffe.ru

Ситникова Алла Алексеевна – старший научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, sitnikova@mail.ioffe.ru

Кремлева Арина Валерьевна – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, avkremleva@corp.ifmo.ru

Николаев Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; заведующий лабораторией, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Vladimir.i.nikolaev@gmail.com

Мынбаев Карим Джафарович – доктор физико-

Authors

Marina G. Mynbaeva – PhD, senior researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mgm@mail.ioffe.ru

Demid A. Kirilenko – researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Demid.Kirilenko@mail.ioffe.ru

Alla A. Sitnikova – senior researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, sitnikova@mail.ioffe.ru

Arina V. Kremleva – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, avkremleva@corp.ifmo.ru

Vladimir I. Nikolaev – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Head of laboratory, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Vladimir.i.nikolaev@gmail.com

Karim D. Mynbaev – D.Sc., Head of laboratory, Ioffe Institute, Saint

математических наук, заведующий лабораторией, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mynkad@mail.ioffe.ru

Одноблюдов Максим Анатольевич – кандидат физико-математических наук, исполнительный директор, СПбГПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация; ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Maxim.odnobyudov@spbstu.ru

Липсанен Харри Калев – PhD, профессор, профессор, Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, harri.lipsanen@aalto.fi

Бугров Владислав Евгеньевич – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru

Романов Алексей Евгеньевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; главный научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Alexey.romanov@niuitmo.ru

Petersburg, 194021, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mynkad@mail.ioffe.ru

Maxim A. Odnobyudov – PhD, Executive Director, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; leading engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Maxim.odnobyudov@spbstu.ru

Harri Lipsanen – PhD, Full Professor, Aalto University, Aalto, 02150, Finland; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, harri.lipsanen@aalto.fi

Vladislav E. Bougrov – D.Sc., Associate professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru

Alexey E. Romanov – D.Sc., Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Chief researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Alexey.romanov@niuitmo.ru