

Исследования структурных и механических свойств тонких пленок AlGaN на гибридных подложках nano-SiC/Si

© А.С. Гращенко¹, С.А. Кукушкин¹, Ш.Ш. Шарофидинов²

¹ Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
199178 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: asgrashchenko@bk.ru

Поступила в Редакцию 16 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 августа 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Выполнено экспериментальное исследование структурных характеристик поверхности и параметров твердости и модуля упругости тонких пленок AlGaN, выращенных на гибридных подложках nano-SiC/Si. С помощью методов атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования исследованы слои AlGaN на nano-SiC на Si с ориентациями (001), (011) и (111). Показано, что ориентация подложки Si оказывает существенное влияние на структуру поверхности пленок AlGaN и параметр модуля упругости AlGaN вблизи поверхности. Определена шероховатость и структурные характеристики поверхности слоев AlGaN, выращенных на гибридных подложках на nano-SiC на Si. Измерены параметры модуля упругости пленок AlGaN вблизи поверхности и в объеме пленки. Экспериментально определены параметры твердости тонких пленок AlGaN на nano-SiC на Si.

Ключевые слова: тонкие пленки, ACM, наноиндентирование, гетероструктуры, nano-SiC/Si, AlGaN.

DOI: 10.61011/FTP.2023.07.56784.5166C

Тонкие пленки нитрида алюминия-галлия AlGaN обладают уникальными физическими и механическими свойствами, что делает их идеальным материалом для создания высокопроизводительных электронных и оптоэлектронных устройств, таких как светодиоды, лазеры, транзисторы и другие. Они обладают высокой термостабильностью, высокой электрической проводимостью и широким спектром оптических свойств. Оптимизация условий роста и кристаллического направления позволяет дополнительно улучшить свойства этих структур для различных практических применений. Интеграция AlGaN-слоев с кремниевыми технологиями имеет большое значение для микроэлектроники, так как позволяет расширить возможности и улучшить характеристики устройств. В частности, это позволяет создавать высокоэффективные светодиоды и лазеры, которые идеально подходят для использования в освещении, дисплеях и оптических связях. Также интеграция AlGaN-слоев с кремниевыми технологиями позволяет создавать высококачественные транзисторы и другие электронные устройства с высокой производительностью и надежностью. Кроме того, интеграция AlGaN-слоев с кремниевыми технологиями позволяет сократить затраты на производство и улучшить экономическую эффективность производства электронных устройств. В целом интеграция AlGaN-слоев с кремниевыми технологиями является важным шагом в развитии микроэлектроники и создании новых высокопроизводительных и эффективных устройств.

Одной из основных проблем при росте слоев AlGaN на кристаллах кремния Si является несоответствие параметров решетки и коэффициентов термического рас-

ширения между AlGaN и Si. Это приводит к появлению дефектов в структуре, таких как дислокации, нарушения кристаллической ориентации и другие. Кроме того, при росте слоев AlGaN на пластинах Si возникают проблемы с контролем состава и концентрации примесей в структуре. Это может привести к изменению оптических и электрических свойств материала и снижению производительности устройств. Еще одной проблемой является высокая температура роста высококачественных слоев AlGaN на кристаллах Si, которая может приводить к деградации структуры и ухудшению характеристик устройств. Для решения этих проблем необходимо проводить оптимизацию условий роста слоев AlGaN на кристаллах Si, включая выбор оптимальных параметров температуры, давления и скорости роста. Также могут использоваться различные методы компенсации несоответствия параметров решетки, в частности на поверхности кремния создают различного рода буферные слои [1,2].

В настоящей работе предлагается использовать для роста тонких пленок AlGaN подложки Si с предварительно синтезированным по методу согласованного замещения атомов [3] слоем карбида кремния нанометровой толщины nano-SiC [4]. Такая конфигурация гибридной подложки nano-SiC/Si впервые используется для роста тонких пленок AlGaN. Основной особенностью используемой конфигурации nano-SiC является то, что поверхность пластины в результате синтеза заметно не модернизируется. В результате рост слоев AlGaN осуществляется на слое SiC с шероховатостью поверхности 0.5 нм, что сопоставимо с промышлен-

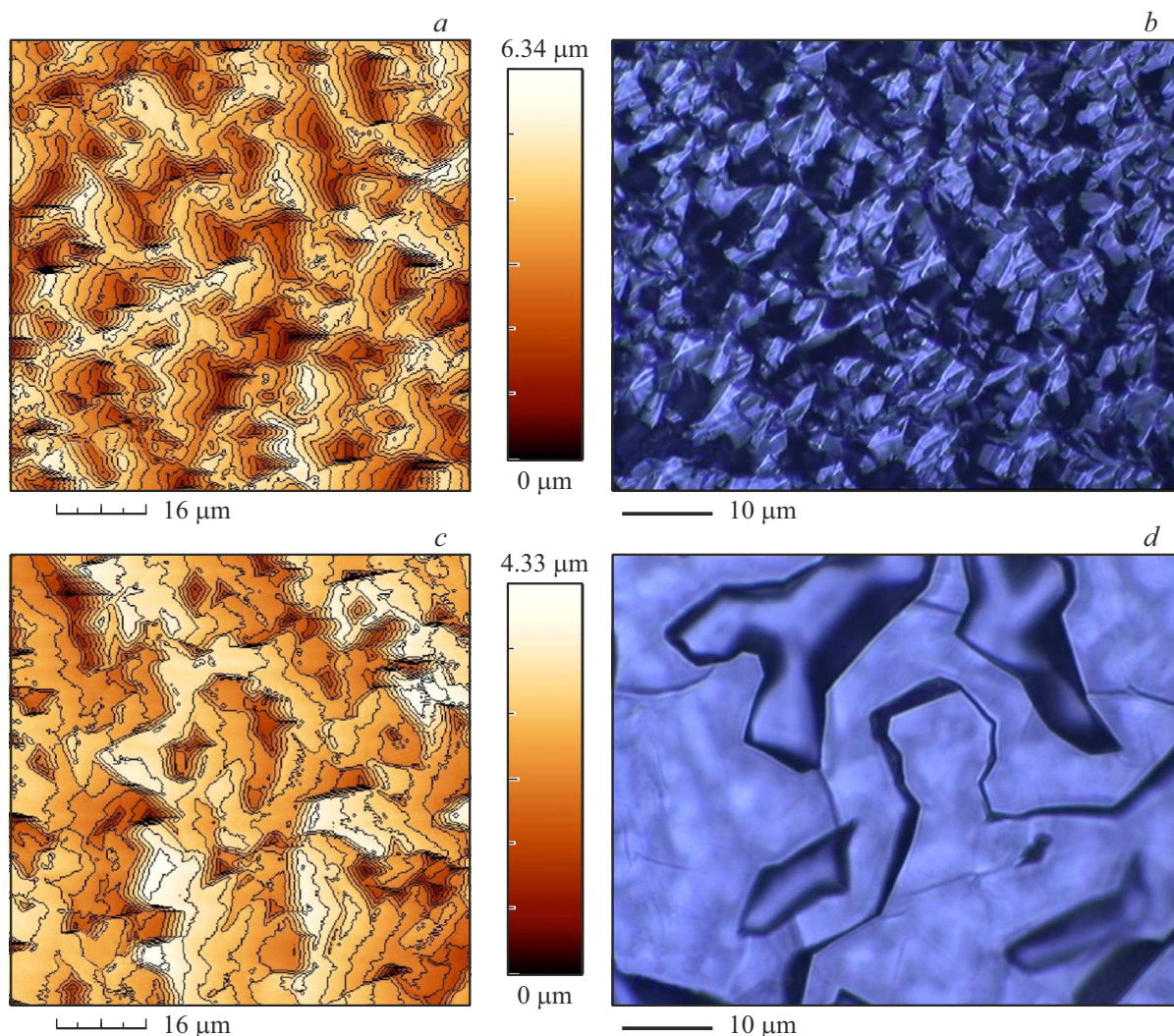


Рис. 1. АСМ-изображения гетероструктур AlGaIn/SiC/Si(001) (a), AlGaIn/SiC/Si(011) (c) и оптические изображения гетероструктур AlGaIn/SiC/Si(001) (b), AlGaIn/SiC/Si(011) (d). (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

ными кристаллами SiC. При этом подобные структуры можно синтезировать на Si любого кристаллического направления. В настоящей работе исследуются только структуры, выращенные на Si с ориентациями (001), (011) и (111). Эти ориентации кремниевых пластин используются в промышленности наиболее часто. Таким образом, исследования морфологии поверхности и механических свойств тонких пленок AlGaIn на nano-SiC на Si с ориентациями (001), (011) и (111) являются важной задачей для материаловедения.

Для роста слоев AlGaIn использовали подложки Si с наномасштабным слоем SiC. Синтез слоев SiC проводили методом замещения атомов на подложках Si *p*-типа проводимости, легированных бором и с кристаллографическими направлениями (001), (011) и (111). Подложки Si с ориентацией (011) и (111) были без отклонения от базового направления, а подложка Si с ориентацией (001) была отклонена на 4° к направлению (111). Синтез слоев SiC происходил в те-

чение 10 мин при температуре 1100°C и давлении внутри реактора 0.5, 0.7 и 2.3 Торр для подложек с кристаллографической ориентацией (001), (011) и (111) соответственно. Толщина синтезированных слоев SiC, по данным спектральной эллипсометрии, равна 4 нм, шероховатость поверхности, по данным оптической профилометрии, равна 0.5 ± 0.2 нм. Рост слоев AlGaIn проводился методом хлорид-гидридной эпитаксии (ХГЭ) [5,6] при температуре 1020°C в атмосфере аммиака и аргона, общий поток которых был равен 1 и 4 л/мин соответственно. Для переноса атомов алюминия и галлия использовался поток хлороводорода, равный 0.2 и 0.1 л/мин соответственно. Толщина слоев AlGaIn, сформированных на гибридных подложках nano-SiC/Si, составляла 6–9 мкм. Морфология поверхности пленок AlGaIn была исследована методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью микроскопа Easy Scan фирмы Nanosurf, а параметры твердости и модуля упругости слоев AlGaIn измерялись методом

наноиндентирования на приборе NanoTest 600 фирмы Micromaterials.

По данным АСМ, структура поверхности пленок AlGaN на nano-SiC на Si с ориентациями (001), (011) и (111) существенно отличается. В случае слоя AlGaN на гибридной подложке nano-SiC/Si(001) (рис. 1, *a* и *b*) структура поверхности состоит из кристаллических кластеров в виде хребтов. Плоскости склонов наклонены на $45 \pm 5^\circ$ и $20 \pm 3^\circ$ относительно общей плоскости поверхности образца, при этом площади проекции этих склонов занимают 40 и 60% общей площади АСМ-изображения соответственно. Высота хребтообразных кластеров равна 2–4 мкм. Среднеквадратичная шероховатость поверхности AlGaN в этом случае равна 0.8 мкм.

Структура поверхности пленки AlGaN, сформированной на гибридной подложке nano-SiC/Si(011), представляет собой гладкие террасы площадью до 20 мкм^2 (рис. 1, *c* и *d*) с резкими склонами на краях. Террасы занимают $> 70\%$ от общей площади АСМ-изображения. Наклон поверхности террас и склонов относительно общей плоскости поверхности образца равен 5 ± 1 и $25 \pm 5^\circ$ соответственно. Высота склонов такой структуры, по данным АСМ, равна 2.0–0.3 мкм. Структура поверхности слоя AlGaN на nano-SiC/Si(011) имеет среднеквадратичную шероховатость 0.5 мкм.

Анализ данных АСМ пленки AlGaN на nano-SiC/Si(111) показал, что структура поверхности этого образца наиболее гладкая. Среднеквадратичная шероховатость поверхности слоя AlGaN в этом случае равна 60 нм. Структура поверхности AlGaN, сформированного на nano-SiC/Si(111), состоит из кластеров в виде холмов высотой 200–400 нм (рис. 2). По данным АСМ, холмы имеют округлую форму с диаметром основания от 10 до 30 мкм. Наклон боковых склонов холмообразной структуры поверхности слоя AlGaN относительно общей плоскости образца равен $0.5\text{--}1.8^\circ$. В пленках AlGaN на nano-SiC/Si(111) обнаружены ростовые ямки. Эти ростовые дефекты, известные как „питы (pit)“, возникают при росте пленок AlGaN на дефектных местах гибридных подложек nano-SiC/Si.

Измерения механических характеристик пленок AlGaN, выращенных на nano-SiC/Si, проводили методом наноиндентирования вблизи поверхности и внутри слоя AlGaN. Анализ начального этапа наноиндентирования (рис. 3), когда происходит преимущественно упругая деформация, проводили с помощью модернизированного соотношения Герца [7]. Сопоставление экспериментальных данных с модернизированным соотношением Герца показало, что параметры приведенного модуля упругости вблизи поверхности для пленок AlGaN на nano-SiC на Si с ориентациями (001), (011) и (111) существенно отличаются. Вблизи поверхности приведенный модуль упругости равен 150 ± 50 , 190 ± 50 и 310 ± 40 ГПа для гетероструктур AlGaN/SiC на Si с ориентацией (001), (011) и (111) соответственно.

Параметры твердости и приведенного модуля упругости внутри пленок AlGaN определяли с помощью метода

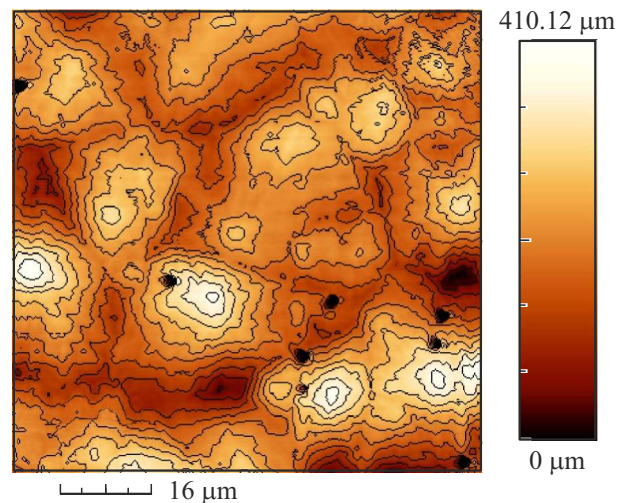


Рис. 2. АСМ-изображения гетероструктур AlGaN/SiC/Si(111).

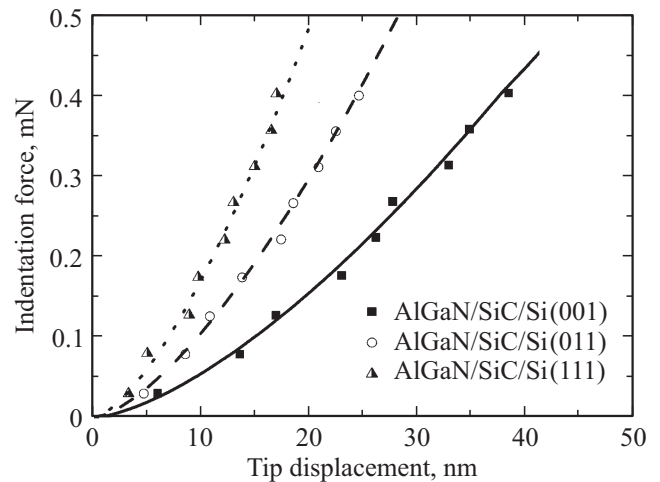


Рис. 3. Зависимости силы вдавливания от смещения индентора на начальном этапе наноиндентирования гетероструктур AlGaN/SiC/Si. Точки — экспериментальные данные, линии — модернизированные соотношения Герца.

Оливера–Фарра [8]. Анализ данных наноиндентирования показал, что среднее значение модуля упругости внутри пленок AlGaN для всех исследуемых образцов равно 300 ГПа. Наибольшее стандартное отклонение от среднего значения приведенного модуля упругости 100 ГПа наблюдалось при наноиндентировании гетероструктуры AlGaN/SiC/Si(001). В случае пленок AlGaN на nano-SiC на Si с ориентациями (011) и (111) стандартное отклонение от среднего значения приведенного модуля упругости равно 40 ГПа. По данным наноиндентирования, твердость пленок AlGaN на nano-SiC на Si с ориентацией (001), (011) и (111) равна 15 ± 4 , 12 ± 1 и 18 ± 3 ГПа соответственно. В работе [9] было обнаружено явление самоорганизации при росте пленок AlGaN на гибридных подложках nano-SiC/Si, которое приводит к формированию прослоек (доменов)

с составом AlGa_xN, близким к стехиометрическому. Эти прослойки расположены между слоями Al_xGa_{1-x}N с низким содержанием Al ~ 20%. Таким образом, верхний слой пленки AlGa_xN на nano-SiC/Si представляет собой композитный материал Al_{0.2}Ga_{0.8}N. Так как толщина слоя Al_{0.2}Ga_{0.8}N больше 1 мкм [9], при наноиנדентировании измеряются механические характеристики именно этого слоя. Модуль упругости AlN и GaN, по данным наноиנדентирования [10,11], составляет 320 и 295 ГПа соответственно. Используя закон Вегарда и значения модулей упругости AlN и GaN из [10,11], можно оценить концентрацию Al и Ga в исследуемых пленках AlGa_xN. Результаты наноиנדентирования подтверждают, что концентрация Al и Ga составляет 20 и 80% соответственно, что согласуется с результатами работы [9].

Таким образом, в настоящей работе впервые были проведены исследования структурных и механических характеристик тонких пленок AlGa_xN, сформированных методом ХГЭ на подложках nano-SiC/Si с ориентацией Si (001), (011) и (111). Методом АСМ определены характерные структурные параметры поверхности слоев AlGa_xN на nano-SiC/Si. Показано, что структура поверхности слоев AlGa_xN, выращенных на подложках Si с ориентациями (001), (011) и (111), кардинально отличается. Определена среднеквадратичная шероховатость поверхности слоев AlGa_xN на nano-SiC на Si с ориентациями (001), (011) и (111), которая равна 800, 500 и 60 нм соответственно. Следует отметить, что для создания микроэлектронных и оптоэлектронных приборов с высокой точностью и надежностью работы требуется поверхность кристаллов с очень низкой шероховатостью, обычно < 1 нм. Методом наноиנדентирования были впервые измерены параметры твердости и модуля упругости слоев AlGa_xN, выращенных на гибридных подложках nano-SiC/Si.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУП ИПМаш РАН № FFNF-2021-0001 Министерства науки и высшего образования РФ. Экспериментальные исследования проводились с использованием уникальной научной установки „Физика, химия и механика кристаллов и тонких пленок“ (Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Q. Zhang, X. Yin, E. Martel, S. Zhao. Mater. Sci. Semicond. Process., **135**, 106099 (2021). DOI: 10.1016/j.mssp.2021.106099
- [2] P. Arifin, H. Sutanto, A. Subagio. Coatings, **12**, 94 (2022). DOI: 10.3390/coatings12010094

- [3] S.A. Kukushkin, A.V. Osipov. J. Phys. D: Appl. Phys., **47**, 313001 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/47/31/313001
- [4] A.S. Grashchenko, S.A. Kukushkin, A.V. Osipov. Techn. Phys. Lett., **46**, 1012 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020100235
- [5] S.S. Sharofidinov, S.A. Kukushkin, A.V. Red'kov, A.S. Grashchenko, A.V. Osipov. Techn. Phys. Lett., **45**, 711 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019070277
- [6] S.A. Kukushkin, S.S. Sharofidinov. Phys. Solid State, **61**, 2342 (2019). DOI: 10.1134/S1063783419120254
- [7] A.S. Grashchenko, S.A. Kukushkin, A.V. Osipov. Phys. Solid State, **61**, 2310 (2019). DOI: 10.1134/S106378341912014X
- [8] W.C. Oliver, G.M. Pharr. J. Mater. Res., **7**, 1564 (1992). DOI: 10.1557/JMR.1992.1564
- [9] S.A. Kukushkin, S.S. Sharofidinov, A.V. Osipov, A.S. Grashchenko, A.V. Kandakov, E.V. Osipova, K.P. Kotlyar, E.V. Ubyivovk. Phys. Solid State, **63**, 442 (2021). DOI: 10.1134/S1063783421030100
- [10] T.A. Rawdanowicz, J. Sankar, J. Narayan, V. Godbole. MRS Online Proceedings Library (OPL), **594**, 507 (1999). DOI: 10.1557/PROC-594-507
- [11] R. Nowak, M. Pessa, M. Sukanuma, M. Leszczynski, I. Grzegory, S. Porowski, F. Yoshida. Appl. Phys. Lett., **75**, 2070 (1999). DOI: 10.1063/1.124919

Редактор А.Н. Смирнов

Studies of structural and mechanical properties of AlGa_xN thin films on nano-SiC/Si hybrid substrates

A.S. Grashchenko¹, S.A. Kukushkin¹,
S.S. Sharofidinov^{1,2}

¹ Institute for Problems in Mechanical Engineering
Russian Academy of Sciences,
199178 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract An experimental study of the structural characteristics of the surface and the parameters of hardness and elastic modulus of thin AlGa_xN films grown on nano-SiC/Si hybrid substrates was carried out. AlGa_xN layers on nano-SiC on Si with orientations (001), (011) and (111) have been investigated using atomic force microscopy and nanoindentation method. It is shown that the orientation of the Si substrate has a significant effect on the surface structure of AlGa_xN films and the elastic modulus parameter of AlGa_xN near the surface. The surface roughness and structural characteristics of AlGa_xN layers grown on nano-SiC on Si hybrid substrates have been determined. The elastic modulus parameters of AlGa_xN films near the surface and in the film volume have been measured. The hardness parameters of AlGa_xN thin films on nano-SiC on Si were experimentally determined.