

УДК 539.234

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184

ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ НА САПФИРОВЫЕ ПОДЛОЖКИ

О.В. Девецкий^{a,b}, Д.А. Никулин^b, И.А. Сысоев^b

^a Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

^b Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация
 Адрес для переписки: v2517@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.02.20, принята к печати 01.03.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Девецкий О.В., Никулин Д.А., Сысоев И.А. Импульсное лазерное напыление тонких пленок нитрида алюминия на сапфировые подложки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 177–184. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты экспериментального исследования морфологии поверхности, структурных и оптических свойств тонких пленок AlN на сапфире, полученных методом импульсного лазерного напыления. **Метод.** Получение пленок AlN осуществлялось с применением комбинированной установки ионно-лучевого и импульсного лазерного распыления вращающейся алюминиевой мишени твердотельным лазером AYG:Nd³⁺ с длиной волны 532 нм в атмосфере азота при давлении 3 и 4 Па. Плотность энергии лазерного импульса составляла 4 Дж/см² при длительности импульса 15 нс и частоте повторения импульсов 15 Гц, расстояние от поверхности мишени до сапфировой подложки — 50 мм, температура подложки — 600 °С.

Основные результаты. Методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа установлено, что пленки AlN, полученные при давлении азота в вакуумной камере 4 Па, имеют состав более близкий к стехиометрическому, чем пленки AlN, полученные при давлении азота в вакуумной камере 3 Па. Методом оптической спектроскопии исследованы спектры пропускания исследуемых образцов. Определено, что максимальные значения коэффициента светопропускания пленок AlN, полученных при давлении азота в вакуумной камере 3 и 4 Па (95,12 % и 97,65 % соответственно) находятся в диапазоне длин волн 400–410 нм. Величина коэффициентов светопропускания в исследованном диапазоне длин волн 300–1100 мкм составляет не менее 87 %, что характеризует полученные образцы пленки как оптически прозрачные. **Практическая значимость.** Исследованные тонкие пленки AlN можно использовать в качестве буферного слоя в оптоэлектронных устройствах, в том числе при создании светодиодов на основе GaN и Al_xGa_{1-x}N коротковолнового видимого свечения и приборов белого свечения.

Ключевые слова

импульсное лазерное напыление, тонкие пленки, AlN, сапфир, оптические свойства

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания «Разработка и создание полупроводниковых гетероинтерфейсов на основе многокомпонентных материалов для устройств СВЧ-электроники и фотоники» на 2020 г. (номер государственной регистрации АААА-А19-119040390081-2).

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184

PULSED LASER DEPOSITION OF ALUMINUM NITRIDE THIN FILMS ONTO SAPPHIRE SUBSTRATES

O.V. Devitsky^{a,b}, D.A. Nikulin^b, I.A. Sysoev^b

^a Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

^b North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation
 Corresponding author: v2517@rambler.ru

Article info

Received 05.02.20, accepted 01.03.20

Article in Russian

For citation: Devitsky O.V., Nikulin D.A., Sysoev I.A. Pulsed laser deposition of aluminum nitride thin films onto sapphire substrates. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 177–184 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184

Abstract

Subject of Research. The paper presents experimental study results of surface morphology and structural and optical properties of sapphire AlN films obtained by pulsed laser spraying. **Method.** Thin AlN films on sapphire were used as experimental samples. The preparation of AlN films was carried out using a combined installation of ion-beam and pulsed laser radiation. The deposition process was performed by sputtering a rotating aluminum target with 532 nm wavelength AYG: Nd³⁺ laser in the atmosphere of very pure nitrogen at the pressure of 3 and 4 Pa. The energy density of the laser pulse was 4 J/cm² with a pulse duration of 15 ns and a pulse repetition rate of 15 Hz. The distance from the target surface to the sapphire substrate was 50 mm; the substrate temperature was 600 °C. **Main Results.** Using scanning electron microscopy and energy dispersive analysis, it was found that AlN films obtained at the nitrogen pressure in a vacuum chamber of 4 Pa have a composition more related to stoichiometric than AlN films obtained at the nitrogen pressure in a vacuum chamber of 3 Pa. The optical spectroscopy was used to study the transmission spectra of the samples under research. It was determined that the maximum transmission coefficient values of AlN films obtained at the nitrogen pressure in the vacuum chamber of 3 Pa (95.12 %) and 4 Pa (97.65 %) are within the wavelength range of 400–410 nm. The transmittance in the studied wavelength range of 300–1100 μm is at least 87 %, which characterizes the obtained film samples as optically transparent. **Practical Relevance.** The studied thin AlN films can be used as a buffer layer in optoelectronic devices, including the case of creating light-emitting diodes based on GaN and Al_xGa_{1-x}N of short-wave visible light and white-emitting devices.

Keywords

pulsed laser spraying, thin films, AlN, sapphire, optical properties

Acknowledgments

The publication was prepared as a part of the 2020-year state task “Development and creation of semiconductor heterointerfaces based on multicomponent materials for microwave electronics and photonics devices” (state registration number AAAA-A19-119040390081-2).

Введение

Соединения нитридов третьей группы (A³N) являются одними из самых перспективных материалов для оптоэлектроники, так как они имеют прямозонную структуру, а также значения ширины запрещенной зоны (E_g) A³N перекрывают весь видимый оптический диапазон и большую часть ультрафиолетового диапазона длин волн [1–3].

Из всех соединений A³N нитрид алюминия (AlN) обладает одним из уникальных сочетаний физических свойств, имеющих большое значение для практического применения:

- широкая запрещенная зона E_g (6,2 эВ);
- высокая теплопроводность (с поликристаллической структурой до 258 Вт/(м·К) и с монокристаллической структурой 319 Вт/(м·К)) [4];
- низкое значение линейного коэффициента температурного расширения (ЛКТР) ($4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при температуре 20–500 °C) [5];
- высокий показатель твердости по шкале Мооса — 9 [6];

— высокая устойчивость при нагреве вплоть до 2100 °C [7] в инертной среде (окисление на воздухе начинается около 980 °C [8]), что делает AlN превосходным материалом для нелинейной оптики;

— высокая устойчивость к термическим ударам.

Наиболее важной особенностью AlN является его способность образовывать с нитридом галлия (GaN) твердые растворы Al_xGa_{1-x}N. Оптические фотоприемники на основе Al_xGa_{1-x}N могут иметь длинноволновую границу чувствительности в широком диапазоне 200–1850 нм. Кроме того, тонкие пленки AlN в последнее время стали широко использоваться в качестве буферного слоя для роста GaN на различных подложках и для улучшения качества пленок GaN. Наиболее часто тонкие пленки AlN используются в качестве буферного слоя для снижения плотности дислокаций в тонких пленках GaN на сапфировой подложке (Al₂O₃) [9]. Повышенная плотность дислокации на границе пленка — подложка связана с большим несоответствием решетки между GaN и сапфировой подложкой (табл. 1).

Таблица 1. Постоянные решетки и ЛКТР AlN, GaN и сапфира [10]

| Соединение | Постоянная решетки, нм | Рассогласование постоянных решетки, % | ЛКТР, 10 ⁻⁶ К ⁻¹ | Рассогласование ЛКТР, % |
|------------|------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|
| AlN | $a = 0,3112$ | — | 4,2 | — |
| | $c = 0,4982$ | — | 5,3 | — |
| GaN | $a = 0,3189$ | -2,4 | 5,59 | -2,5 |
| | $c = 0,5185$ | -3,9 | 3,17 | 6,7 |
| Сапфир | $a = 0,4758$ | -34,6 | 7,5 | -44 |
| | $c = 1,2991$ | -61,65 | 8,57 | -38,1 |

Наиболее часто используемыми методами получения тонких пленок AlN и GaN на Al₂O₃ являются методы металлоорганической газовой и молекулярно-лучевой эпитаксии, ионно-лучевого осаждения и импульсного лазерного напыления (ИЛН) [11–13]. Наиболее перспективным из этих методов является ИЛН [14, 15], это в первую очередь обусловлено тем, что в данном методе осаждаемый материал поступает на подложку дискретно. Причем за временной промежуток между импульсами и, соответственно, отсутствием поступающего на поверхность подложки вещества, происходят процессы, способствующие образованию зародышей, ориентированных с той же кристаллографической ориентацией, что и подложка. Также метод ИЛН позволяет получать качественные пленки при более низких температурах подложки, чем при других методах. Это косвенно подтверждается в работе [16], в ней методом ИЛН из алюминиевой мишени в атмосфере азота (N₂) при 600 °С были получены тонкие пленки AlN с различной долей металлического алюминия. Исследование рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии высокого разрешения пика Al_{2p} свидетельствует о том, что пленка AlN, полученная при давлении азота 30 мторр, имеет гексагональную фазу и стехиометрический состав.

Целью данной работы является получение тонких пленок AlN на Al₂O₃ методом ИЛН и исследование их оптических свойств, морфологии и микроструктуры поверхности.

Материалы и методы

Получение пленок AlN осуществлялось с применением комбинированной установки ионно-лучевого и ИЛН [17]. Процесс напыления осуществлялся распылением вращающейся алюминиевой мишени (чистотой 99,99 % производства компании «Актан-вакуум») лазерным излучением второй гармоники АУГ:Nd³⁺-лазера в атмосфере особо чистого азота и аргона (Ar) в объемном соотношении 9:1 при давлении 3 и 4 Па. Плотность энергии лазерного импульса составляла 4 Дж/см² при длительности импульса в 15 нс и частоте повторения импульсов 15 Гц. Расстояние от поверхности мишени до сапфировой подложки составляло 50 мм, температура подложки составляла 600 °С.

В качестве экспериментальных образцов использовались подвергнутые ионно-лучевой полировке [18] сапфировые подложки размерами 10 × 10 × 1,2 мм.

Отмывка образцов производилась в ультразвуковой ванне (УЗВ) Codyson CD-4810 с рабочей частотой 40 кГц и последовательной обработкой со сменой рабочих растворов следующим образом:

- 1) устранялись сильные загрязнения предварительной отмывкой в 10 % щелочном растворе «ТМ-Редрад» в течение 30 мин при температуре рабочего раствора 40 °С;
- 2) удалялись отмывочные реагенты с поверхности образцов в дистиллированной воде в УЗВ в течение 15 мин с последующим осушением в сушильном шкафу при температуре 60 °С;

- 3) образцы отмывались в УЗВ в течение 5 мин в ацетоне марки ХЧ, затем 15 мин в абсолютном изопропанол.

Подложки после очистки незамедлительно устанавливались в оснастку. Непосредственно перед процессом осаждения уже в откачанном объеме установки производилась очистка образцов отжигом в течение 15 мин при температуре 600 °С. Для исследования морфологии поверхности и топографии скола поверхности применялся сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Jeol JSM-6010 LA. При контроле толщины выполнялся разлом образца и исследование скола под малым углом наклона к электронному пучку (около 3–5°). В случае тонких пленок дополнительно выполнялось осаждение тонкой пленки золота методом магнетронного напыления на поверхность образца для устранения эффекта заряда диэлектрической поверхности, что позволяет повысить разрешение съемки и измерить толщину напыляемых тонких пленок на сапфире.

При контроле стехиометрического состава пленки с использованием энергодисперсионной приставки СЭМ исследовалась рентгенограмма в характеристических точках наблюдаемой границы осажденного слоя. Дополнительно применялся метод картирования поверхности, позволяющий изучить распределение массовой доли химических элементов по поверхности образца для анализа механизмов роста пленки при осаждении. Оптические свойства тонких пленок AlN были исследованы при помощи спектрометра СФ-56 в диапазоне 250–1100 нм.

Результаты и обсуждение

Схема проведения процесса ИЛН приведена на рис. 1. Лазерное излучение фокусируется на поверхности вращающейся алюминиевой мишени, распыляет ее в объем вакуумной камеры, в результате чего происходит образование плазменного факела. Плазменный факел состоит из атомов, ионов, кластеров алюминия и азота, а также микрокапель алюминия. С увеличением количества лазерных импульсов плазменный факел расширяясь, достигает поверхности вращающейся сапфировой подложки, на поверхности которой происходит образование зародышей AlN и в дальнейшем рост пленки.

Для равномерного распыления материала мишени и получения пленок с низкой шероховатостью необходимо, чтобы лазерный импульс как можно реже попадал в одни и те же точки поверхности мишени. По этой причине при ИЛН пленок AlN сканирование лазерного луча по поверхности мишени производилось системой позиционирования луча, позволяющей перемещать луч построчно в пределах заданного прямоугольника (рис. 2). Система позиционирования лазерного излучения включает в себя: три поворотные призмы с углом поворота 90° и фокусирующую линзу. Призмы и фокусирующая линза закреплены на подвижных платформах таким образом, что могут передвигаться шаговыми двигателями фирмы Standa с точностью до 5 мкм по всем трем осям координат. Управление шаговыми двигателями осуществляется при помощи про-

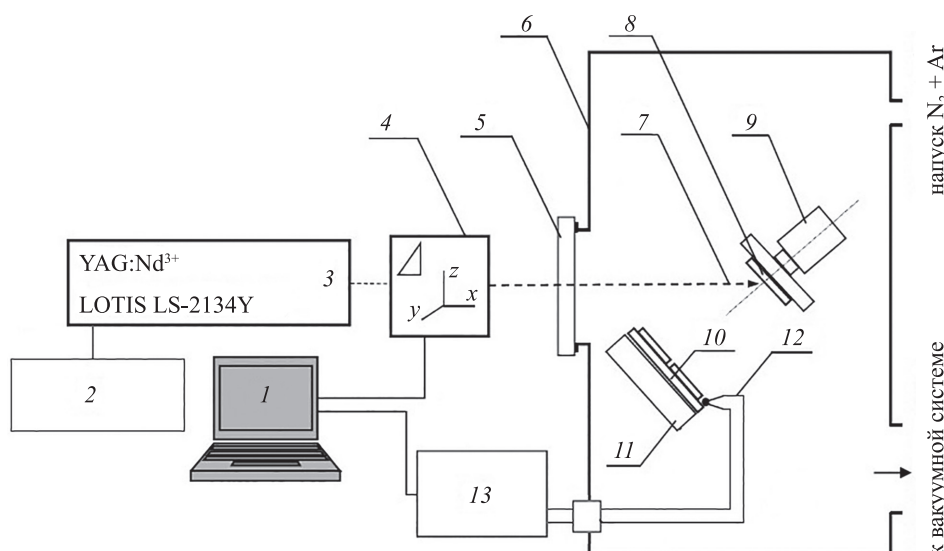


Рис. 1. Схема проведения импульсного лазерного напыления AlN на Al₂O₃:

1 — компьютер; 2 — пульт управления лазером; 3 — лазер LOTIS LS-2134Y; 4 — система позиционирования лазерного излучения; 5 — кварцевое окно; 6 — вакуумная камера; 7 — лазерный луч; 8 — алюминиевая мишень; 9 — вращающийся держатель мишени; 10 — вращающийся подложкодержатель с сапфировой подложкой; 11 — нагреватель подложек; 12 — термопара; 13 — система контроля температуры подложки

граммы, установленной на персональный компьютер. В интерфейсе программы задается: массив координат, по которым лазерный луч будет фокусироваться на поверхности мишени; скорость его перемещения; фокусное расстояние; направление сканирования (строчный режим сканирования или сканирование по периметру) и величину перемещения по оси z, обеспечивающую фокусировку лазерного луча на поверхности мишени.

При ИЛН тонких пленок AlN на сапфире использовался строчный режим сканирования, площадь прямоугольника, образованного сканированием лазерного луча, составила 8 см², скорость перемещения лазерного луча — 0,5 мм/с.

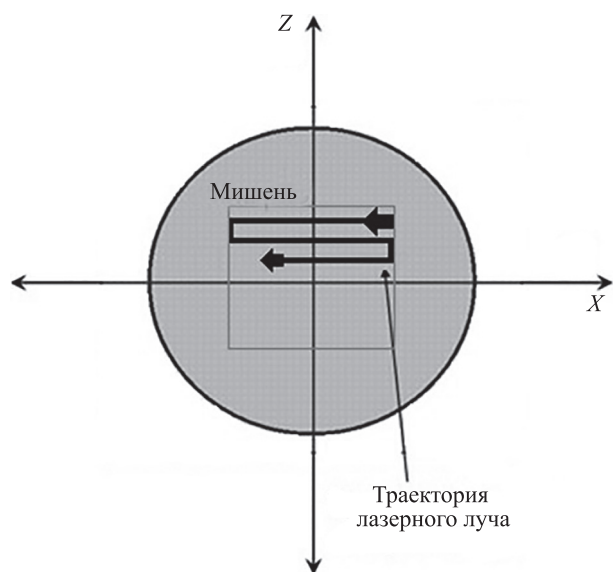


Рис. 2. Схема перемещения траектории лазерного луча по поверхности мишени при импульсном лазерном напылении

СЭМ-изображение поверхности тонкой пленки AlN на Al₂O₃, напыленной при давлении азота в вакуумной камере в 3 Па представлено на рис. 3. Из рис. 3 видно, что на поверхности пленки наблюдаются микрокапли размером до 1 мкм. Наличие микрокапель на поверхности полученных ИЛН пленок AlN объясняется отсутствием системы прямой механической сепарации микрокапель.

Энергодисперсионный анализ, проведенный:

- на поверхности микрокапли (в точке 001) показал, что микрокапли в большей степени состоят из: алюминия — 77,35 %; азота — 9,87 %; кислорода — 12,77 %;
- на поверхности пленки AlN (в точке 002) имеет близкое к стехиометрическому составу содержание:

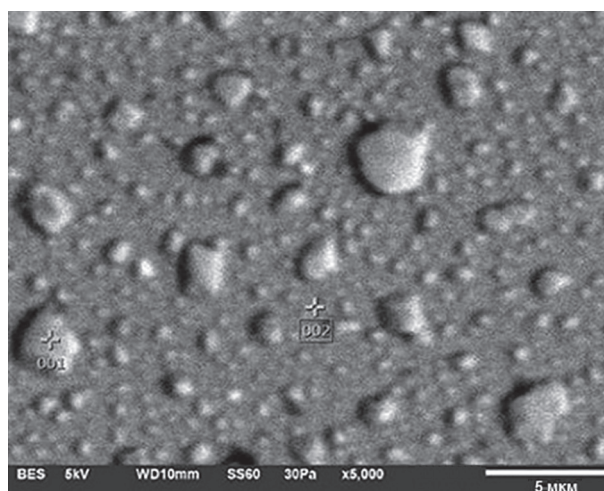


Рис. 3. СЭМ-изображение поверхности тонкой пленки AlN на Al₂O₃, полученной при давлении азота в вакуумной камере в 3 Па

алюминия — 47,31 %, азота — 26,17 %; кислорода — 26,53 %.

На поверхности пленок AlN, полученных при давлении азота в вакуумной камере в 4 Па, наблюдалось практически отсутствие микрокапель (рис. 4). С увеличением давления азота (как активного фонового газа) в камере количество микрокапель снизилось вследствие того, что плазменный факел в процессе ИЛН в основном состоит из нейтральной атомной компоненты материала мишени. Также следует отметить, что проведение термического отжига при температуре от 800 °С позволяет полностью избавиться от микрокапель на поверхности, а также значительно улучшить структурные свойства пленок.

Участок пленки AlN выбран на границе осаждения пленки, что позволяет по итогам энергодисперсионного анализа выявить долю содержания азота как на поверхности пленки, так и на поверхности подложки. Элементный состав образца представлен в табл. 2. Спектр характеристического рентгеновского излучения поверхности тонкой пленки AlN на сапфире изображен на рис. 4.

Из анализа значений, представленных в табл. 2, можно отметить аномально высокое содержание кислорода на поверхности пленки AlN, а также преобладание массовой доли алюминия по сравнению с азотом. Данный факт можно объяснить влиянием сапфировой подложки.

Пучок электронов катодной пушки растрового электронного микроскопа проникает на глубину до 350 нм, вызывая характерное рентгеновское излучение из подложки вследствие торможения электронов на атомах кристаллической решетки. В таких тонких слоях пучок электронов проникает в материал подложки, вызывая преобладание пиков алюминия и кислорода в общем спектре пленки.

Для точного анализа топологии скола образца произведено напыление тонкой пленки золота (Au) методом магнетронного напыления установкой Spin Coater. СЭМ-изображение скола образца тонкой пленки AlN на сапфире, полученного при давлении азота в вакуумной камере в 4 Па, изображено на рис. 5.

На рис. 5 отчетливо видны границы слоев AlN/Al₂O₃ и AlN/Au, что можно объяснить эффективным механизмом стекания заряда с диэлектрической подложки из сапфира. Толщина осажденных слоев Au составила 30 нм и AlN — 168 нм.

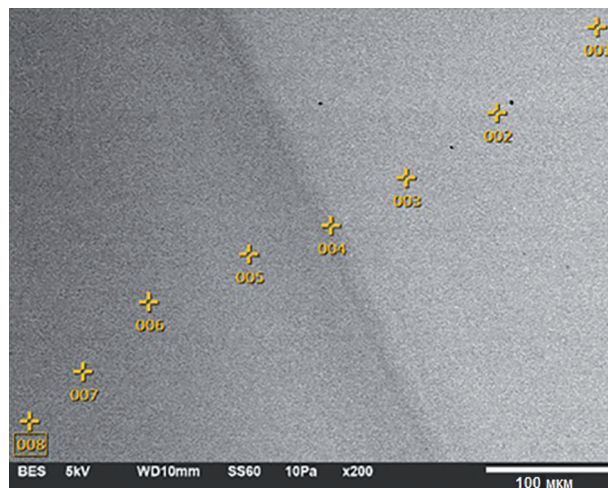


Рис. 4. СЭМ-изображение поверхности тонкой пленки AlN на сапфире, полученной при давлении азота в вакуумной камере в 4 Па

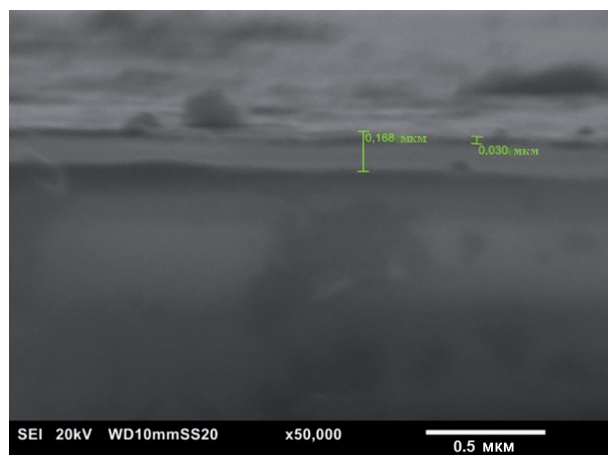


Рис. 5. СЭМ-изображение скола образца тонкой пленки AlN на сапфире, полученного при давлении азота в вакуумной камере в 4 Па

Для подтверждения данного эффекта проведен энергодисперсионный анализ в режиме картирования, позволяющий характеризовать элементный состав поверхности образца с высоким разрешением. Анализ произведен для 7288 точек поверхности пленки

Таблица 2. Энергодисперсионный анализ поверхности пленки AlN и сапфира

| Точка | Массовая доля кислорода, % | Массовая доля азота, % | Массовая доля алюминия, % |
|-------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| 001 | 51,45 | — | 48,55 |
| 002 | 51,83 | — | 48,17 |
| 003 | 52,16 | — | 47,84 |
| 004 | 54,95 | — | 45,05 |
| 005 | 43,91 | 10,31 | 45,77 |
| 006 | 42,83 | 13,69 | 43,94 |
| 007 | 42,83 | 13,39 | 43,78 |
| 008 | 42,50 | 14,04 | 43,45 |

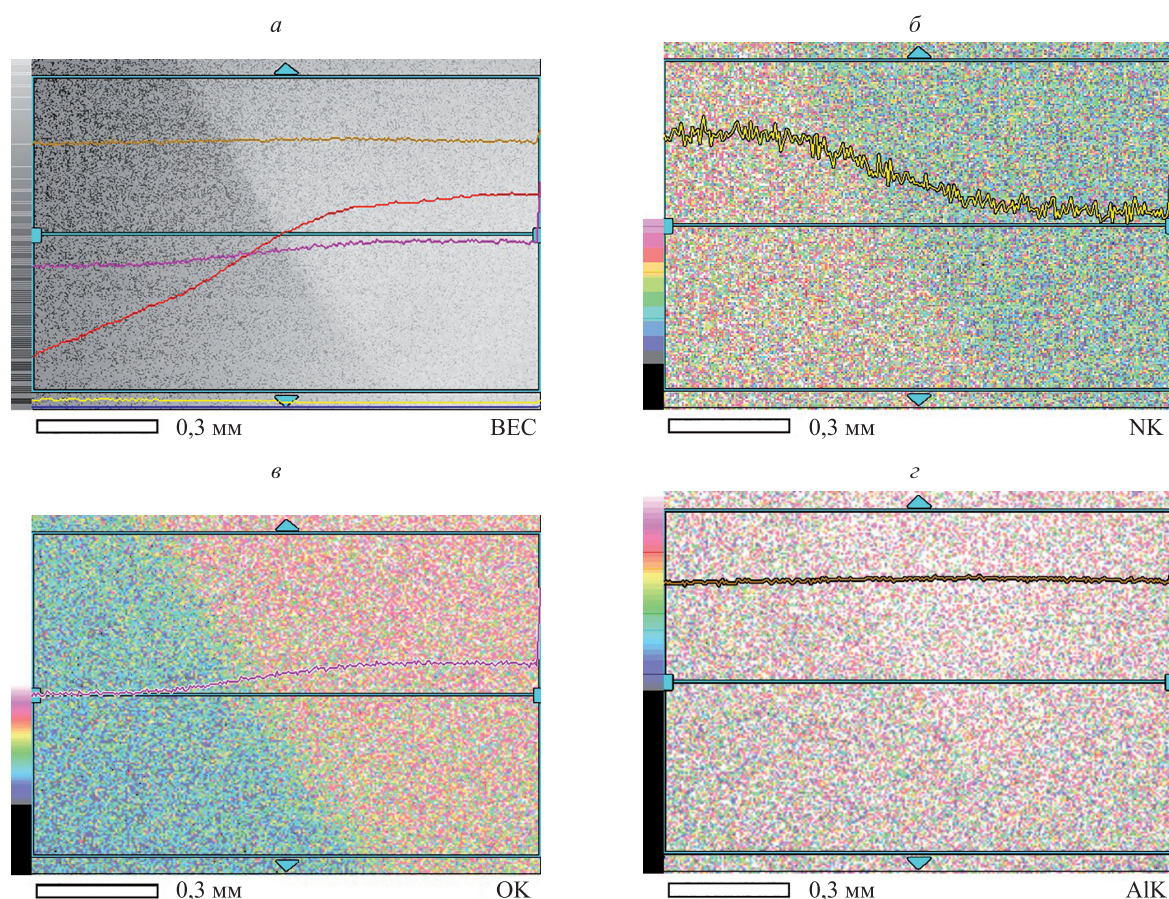


Рис. 6. Картирование границы осажденной тонкой пленки AlN на сапфире: изображение образца в обратно-рассеянных электронах (а); карты распределения содержания в образце: азота (б); кислорода (в); алюминия (г)

AlN и сапфира при энергии пучка электронов 10 кэВ с общей выдержкой порядка 1,5 ч. Представленное на рис. 6 картирование границы напыленной тонкой пленки AlN подтверждает вышеописанное предположение.

На рис. 7 представлены спектры пропускания и фотографии образцов пленки AlN на сапфире полученной при давлении азота в вакуумной камере в 3 Па (1) и 4 Па (2). На представленных фотографиях видно, что пленка AlN, полученная при давлении азота в вакуумной камере в 3 Па визуально прозрачнее. Также следует отметить, что максимум коэффициента светопропускания приходится на диапазон длин волн 400–410 нм для образцов, полученных при давлении азота в вакуумной камере 3 и 4 Па, его значение составило 95,12 % и 97,65 % соответственно. Этот факт важен, прежде всего, потому что для синих и белых светодиодов наиболее характерна область светопропускания в диапазоне 400–450 нм [19]. Величина коэффициентов светопропускания во всем оптическом диапазоне длин волн образцов обеих пленок составляет не менее 87 %, что характеризует полученные образцы пленки как оптически прозрачные.

Таким образом, тонкие пленки AlN на сапфире, полученные импульсным лазерным напылением при температуре подложки 600 °С и при давлении азота в камере 4 Па имеют состав, близкий к стехи-

ометрическому. Значение коэффициента светопропускания пленок в оптическом диапазоне 300–1100 нм составляет не менее чем 87 %. Таким образом, исследуемые тонкие пленки AlN можно использовать в качестве буферного слоя для оптоэлектронных устройств, в частности для синих и белых светодиодов на основе GaN и $Al_xGa_{1-x}N$.

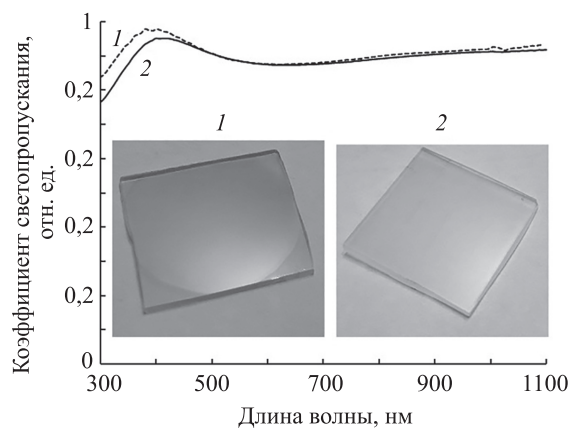


Рис. 7. Спектр пропускания образца пленки AlN на сапфире, полученной при давлении азота в вакуумной камере в 3 Па (1) и 4 Па (2)

Заклучение

Методом импульсного лазерного распыления получены тонкие пленки нитрида алюминия на сапфире. В результате исследования установлено, что наиболее близкий к стехиометрическому состав имеет пленка AlN, отожженная в атмосфере азота при давлении 4 Па. Определено, что максимальные значения коэффициента светопропускания отожженных пленок AlN приходится на диапазон длин волн 400–410 нм. При этом образец

пленки, отожженной при более высоком давлении азота в вакуумной камере (4 Па), имеет более высокое значение коэффициента светопропускания — 97,65 %, чем образец пленки, отожженной при давлении азота в вакуумной камере (3 Па) — 95,12 %. Также следует отметить, что все образцы отожженных пленок AlN можно охарактеризовать как оптически прозрачные, так как для каждого образца пленки величина коэффициента светопропускания в диапазоне длин волн 300–1100 мкм достигала не менее 87 %.

Литература

- Li H., Lu X., Li X., Zhang J., Hao Y. High quality transferable AlN thin film by PLD // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 864. P. 012011. doi: 10.1088/1742-6596/864/1/012011
- Grandusky J.R., Randive R.V., Jordan T.C., Schowalter L.J. Fabrication of high performance UVC LEDs on aluminum-nitride semiconductor substrates and their potential application in point-of-use water disinfection systems // *Springer Series in Materials Science*. 2016. V. 227. P. 171–192. doi: 10.1007/978-3-319-24100-5_7
- Akasaki I., Amano H. Organometallic vapor-phase epitaxy of gallium nitride for high-brightness blue light-emitting diodes // *Semiconductors and Semimetals*. 1997. V. 48. P. 357–390. doi: 10.1016/S0080-8784(08)62408-4
- Dallaeva D., Țălu Ș., Stach S., Škarvada P., Tománek P., Grmela L. AFM imaging and fractal analysis of surface roughness of AlN epilayers on sapphire substrates // *Applied Surface Science*. 2014. V. 312. P. 81–86. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.05.086
- Qin M.L., Du X., Li Z., Humail I.S., Qu X. Synthesis of aluminum nitride powder by carbothermal reduction of a combustion synthesis precursor // *Materials Research Bulletin*. 2008. V. 43. N 11. P. 2954–2960. doi: 10.1016/j.materresbull.2007.12.008
- Belyanin A.F., Bouilov L.L., Zhirnov V.V., Kamenev A.I., Kovalskij K.A., Spitsyn B.V. Application of aluminum nitride films for electronic devices // *Diamond and Related Materials*. 1999. V. 8. N 2–5. P. 369–372. doi: 10.1016/S0925-9635(98)00412-9
- Kroke E., Loeffler L., Lange F.F., Riedel R. Aluminum nitride prepared by nitridation of aluminum oxide precursors // *Journal of the American Ceramic Society*. 2002. V. 85. N 12. P. 3117–3119. doi: 10.1111/j.1151-2916.2002.tb00595.x
- Natesan K., Reed C.B., Rink D.L., Haglund R.C. Development and performance of aluminum nitride insulating coatings for application in a lithium environment // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. V. 258–263. Part. 1. P. 488–494. doi: 10.1016/S0022-3115(98)00370-5
- Kim J., Pyeon J., Jeon M., Nam O. Growth and characterization of high quality AlN using combined structure of low temperature buffer and superlattices for applications in the deep ultraviolet // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2015. V. 54. N 8. P. 081001. doi: 10.7567/JJAP.54.081001
- Sun C.J., Kung P., Saxler A., Ohsato H., Haritos K., Razeghi M. A crystallographic model of (00·1) aluminum nitride epitaxial thin film growth on (00·1) sapphire substrate // *Journal of Applied Physics*. 1994. V. 75. N 8. P. 3964–3967. doi: 10.1063/1.356017
- Lunin L.S., Devitskii O.V., Sysoev I.A., Pashchenko A.S., Kas'yanov I.V., Nikulin D.A., Irha V.A. Ion-beam deposition of thin AlN films on Al₂O₃ substrate // *Technical Physics Letters*, 2019, V. 45, N 12, P. 1237–1240. doi: 10.1134/S106378501912023X
- Vispute R.D., Wu H., Narayan J. High quality epitaxial aluminum nitride layers on sapphire by pulsed laser deposition // *Applied Physics Letters*. 1995. V. 67. N 11. P. 1549–1551. doi: 10.1063/1.114489
- Pantha B.N., Li J., Lin J.-Y., Jiang H.X. Single phase In_xGa_{1-x}N (0.25 ≤ x ≤ 0.63) alloys synthesized by metal organic chemical vapor deposition // *Applied Physics Letters*. 2008. V. 93. N 18. P. 182107. doi: 10.1063/1.3006432
- Wang W., Yang W., Liu Z., Wang H., Wen L., Li G. Interfacial reaction control and its mechanism of AlN epitaxial films grown on Si(111) substrates by pulsed laser deposition // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. P. 11480. doi: 10.1038/srep11480
- Lunin L.S., Lunina M.L., Devitsky O.V., Sysoev I.A. Pulsed laser deposition of Al_xGa_{1-x}As and GaP thin films onto Si substrates for

References

- Li H., Lu X., Li X., Zhang J., Hao Y. High quality transferable AlN thin film by PLD. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 864, pp. 012011. doi: 10.1088/1742-6596/864/1/012011
- Grandusky J.R., Randive R.V., Jordan T.C., Schowalter L.J. Fabrication of high performance UVC LEDs on aluminum-nitride semiconductor substrates and their potential application in point-of-use water disinfection systems. *Springer Series in Materials Science*, 2016, vol. 227, pp. 171–192. doi: 10.1007/978-3-319-24100-5_7
- Akasaki I., Amano H. Organometallic vapor-phase epitaxy of gallium nitride for high-brightness blue light-emitting diodes. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, vol. 48, pp. 357–390. doi: 10.1016/S0080-8784(08)62408-4
- Dallaeva D., Țălu Ș., Stach S., Škarvada P., Tománek P., Grmela L. AFM imaging and fractal analysis of surface roughness of AlN epilayers on sapphire substrates. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 312, pp. 81–86. doi: 10.1016/j.apsusc.2014.05.086
- Qin M.L., Du X., Li Z., Humail I.S., Qu X. Synthesis of aluminum nitride powder by carbothermal reduction of a combustion synthesis precursor. *Materials Research Bulletin*, 2008, vol. 43, no. 11, pp. 2954–2960. doi: 10.1016/j.materresbull.2007.12.008
- Belyanin A.F., Bouilov L.L., Zhirnov V.V., Kamenev A.I., Kovalskij K.A., Spitsyn B.V. Application of aluminum nitride films for electronic devices. *Diamond and Related Materials*, 1999, vol. 8, no. 2–5, pp. 369–372. doi: 10.1016/S0925-9635(98)00412-9
- Kroke E., Loeffler L., Lange F.F., Riedel R. Aluminum nitride prepared by nitridation of aluminum oxide precursors. *Journal of the American Ceramic Society*, 2002, vol. 85, no. 12, pp. 3117–3119. doi: 10.1111/j.1151-2916.2002.tb00595.x
- Natesan K., Reed C.B., Rink D.L., Haglund R.C. Development and performance of aluminum nitride insulating coatings for application in a lithium environment. *Journal of Nuclear Materials*, 1998, vol. 258–263, part 1, pp. 488–494. doi: 10.1016/S0022-3115(98)00370-5
- Kim J., Pyeon J., Jeon M., Nam O. Growth and characterization of high quality AlN using combined structure of low temperature buffer and superlattices for applications in the deep ultraviolet. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 54, no. 8, pp. 081001. doi: 10.7567/JJAP.54.081001
- Sun C.J., Kung P., Saxler A., Ohsato H., Haritos K., Razeghi M. A crystallographic model of (00·1) aluminum nitride epitaxial thin film growth on (00·1) sapphire substrate. *Journal of Applied Physics*, 1994, vol. 75, no. 8, pp. 3964–3967. doi: 10.1063/1.356017
- Lunin L.S., Devitskii O.V., Sysoev I.A., Pashchenko A.S., Kas'yanov I.V., Nikulin D.A., Irha V.A. Ion-beam deposition of thin AlN films on Al₂O₃ substrate. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 12, pp. 1237–1240. doi: 10.1134/S106378501912023X
- Vispute R.D., Wu H., Narayan J. High quality epitaxial aluminum nitride layers on sapphire by pulsed laser deposition. *Applied Physics Letters*, 1995, vol. 67, no. 11, pp. 1549–1551. doi: 10.1063/1.114489
- Pantha B.N., Li J., Lin J.-Y., Jiang H.X. Single phase In_xGa_{1-x}N (0.25 ≤ x ≤ 0.63) alloys synthesized by metal organic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, no. 18, pp. 182107. doi: 10.1063/1.3006432
- Wang W., Yang W., Liu Z., Wang H., Wen L., Li G. Interfacial reaction control and its mechanism of AlN epitaxial films grown on Si(111) substrates by pulsed laser deposition. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, pp. 11480. doi: 10.1038/srep11480
- Lunin L.S., Lunina M.L., Devitsky O.V., Sysoev I.A. Pulsed laser deposition of Al_xGa_{1-x}As and GaP thin films onto Si substrates for

- photoelectric converters // *Semiconductors*. 2017. V. 51, N 3. P. 387–391. doi: 10.1134/S1063782617030174
16. Chale-Laraa F., Zapata-Torres M., Caballero-Briones F., De la Cruz W., Cruz Gonz'alez N., Huerta-Escamilla C., Far'ias M.H. Deposit of AlN thin films by nitrogen reactive pulsed laser ablation using an Al target // *Revista Mexicana de Física*. 2019. V. 65. N 4. P. 345–350. doi: 10.31349/RevMexFis.65.345
17. Девицкий О.В., Касьянов И.В., Сысоев И.А. Применение комбинированной установки ионно-лучевого и импульсного лазерного излучения для получения солнечных элементов на основе тонких пленок GaP и GaAs на Si // *Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики (NanoSolar-2018): Сборник трудов VI Всероссийской научной конференции (19–20 октября 2018 г., Чебоксары) / под ред. А.В. Кокшиной, А.В. Смирнова, В.Д. Кочакова, Е.И. Терукова, А.В. Бобыля. Чебоксары, 2018. С. 120–123.*
18. Девицкий О.В., Дмитриева О.Г., Никулин Д.А., Касьянов И.В., Сысоев И.А. Исследование изменения морфологии поверхности лейкосапфира пучком ионов аргона под малым углом падения к поверхности // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 5. С. 848–854. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-848-854
19. Девицкий О.В., Никулин Д.А., Сысоев И.А., Осипян В.Б. Морфология и оптические свойства пленок AlN на сапфире // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 6. С. 1049–1057. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1049-1057
- photoelectric converters. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 387–391. doi: 10.1134/S1063782617030174
16. Chale-Laraa F., Zapata-Torres M., Caballero-Briones F., De la Cruz W., Cruz Gonz'alez N., Huerta-Escamilla C., Far'ias M.H. Deposit of AlN thin films by nitrogen reactive pulsed laser ablation using an Al target. *Revista Mexicana de Física*, 2019, vol. 65, no. 4, pp. 345–350. doi: 10.31349/RevMexFis.65.345
17. Devitsky O.V., Kasyanov I.V., Sysoev I.A. Combined installation of ion-beam and pulsed laser radiation for generation of solar cells from thin GaP and GaAs films on Si. *Proc. Nanostructured materials and converting devices for solar energy: VI All-Russian Scientific Conference. (October 19–20, 2018, Cheboksary)*. Cheboksary, 2018, pp. 120–123. (in Russian)
18. Devitsky O.V., Dmitrieva O.G., Nikulin D.A., Kasyanov I.V., Sysoev I.A. Study of leukosapphire surface morphology change by argon ion beam at small grazing angle. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 848–854. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-848-854
19. Devitsky O.V., Nikulin D.A., Sysoev I.A., Osipyan V.B. Morphology and optical properties of AlN films on sapphire. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1049–1057. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1049-1057

Авторы

Девицкий Олег Васильевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Россия, Scopus ID: 57193670678, ORCID ID: 0000-0003-3153-696X, v2517@rambler.ru

Никулин Дмитрий Александрович — ведущий инженер, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-0755-4068, dmitnikul@gmail.com

Сысоев Игорь Александрович — доктор технических наук, доцент, директор, Научно-образовательный центр фотовольтаики и нанотехнологии, Инженерный институт, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, Scopus ID: 32467535800, ORCID ID: 0000-0001-5415-0782, eianpisia@yandex

Authors

Oleg V. Devitsky — PhD, Senior Scientific Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Senior Scientific Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, Scopus ID: 57193670678, ORCID ID: 0000-0003-3153-696X, v2517@rambler.ru

Dmitry A. Nikulin — Leading Engineer, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-0755-4068, dmitnikul@gmail.com

Igor A. Sysoev — D.Sc., Associate Professor, Director, Scientific and Educational Center of Photovoltaics and Nanotechnology, Engineering Institute, North Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, Scopus ID: 32467535800, ORCID ID: 0000-0001-5415-0782, eianpisia@yandex.ru