

УДК 539.234

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1049-1057

МОРФОЛОГИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК AlN НА САПФИРЕ

О.В. Девицкий^{a,b}, Д.А. Никулин^b, И.А. Сысоев^b, В.Б. Осипян^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@gambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 24.07.19, принята к печати 23.09.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: 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

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты экспериментального исследования морфологии и оптических свойств пленок AlN на сапфире. В качестве экспериментальных образцов использовались тонкие пленки AlN на сапфире. **Метод.** Для получения тонких пленок использовалась установка ионно-лучевого осаждения, включающая в себя ионный источник типа КЛАН-53М с нейтрализатором ионов. Энергия ионного пучка варьировалась от 600 до 900 эВ. Ток ионного пучка составлял 60 мА, и выбирался из расчета устойчивого горения плазмы в ионном источнике. Осаждение производилось при остаточном давлении газов в вакуумной камере не менее $1,5 \times 10^{-3}$ Па, нагрев подложек производился при помощи группы галогеновых ламп общей мощностью 2500 Вт, температура подложки составляла 550–850 °С. Время осаждения составляло 1 ч. Состав азотно-аргоновой смеси изменялся путем увеличения объемной доли азота от 10 до 90 %. **Основные результаты.** Полученные тонкие пленки исследованы методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа. Исследования показали, что полученные при объемной доле азота в азотно-аргоновой смеси более 50 % тонкие пленки AlN на сапфире имеют состав, близкий к стехиометрическому. Для пленок AlN на сапфире, полученных при объемной доле азота в азотно-аргоновой смеси более 90 %, температуре подложки 800 °С и энергии пучка 600 эВ, величина коэффициента пропускания во всем оптическом диапазоне длин волн составляет не менее 92 %. Определена прямая зависимость энергии пучка от объемной доли азота в азотно-аргоновой смеси – при 900 эВ по сравнению с 600 эВ содержание азота в пленке AlN повышается с 10 % до 30–35 %. При величине энергии пучка в 600 эВ имеется незначительная зависимость от температуры подложки, и сохраняется только прямая зависимость от количества азота в азотно-аргоновой смеси. При частичной ионизации ионного пучка разница между содержанием азота в пленке AlN при разной энергии пучка входит в диапазон 5–10 %. Повышенное содержание азота в пленках (более 20 %) отрицательно влияет на оптическое совершенство пленок. При режиме частичной ионизации только при 900 эВ, температуре 800 °С и при объемной доле азота в азотно-аргоновой смеси более 50 % наблюдается снижение качества пленок. При режимах с объемной доли азота в азотно-аргоновой смеси менее 30 % наблюдается большое количество микрокапель на поверхности, с размерами в диапазоне 1–6 мкм. Состав газовой смеси с содержанием объемной доли азота в азотно-аргоновой смеси в 10 % повышает концентрацию микрокапель на поверхности пленки с увеличением доли крупных микрокапель. Наиболее оптимальный режим выявлен с частичной ионизацией пучка и энергией 600 эВ, объемной доли азота в азотно-аргоновой смеси более 50 %. Изменение температуры подложки на значение доли азота в тонкой пленке нитрида алюминия практически не влияет. **Практическая значимость.** Тонкая пленка AlN на сапфире, осажденная при температуре подложки 800 °С и объемной доли азота в азотно-аргоновой смеси равной 90 % имеет коэффициент пропускания в оптическом диапазоне 200–1100 нм более 92 %, что характеризует полученный образец тонкой пленки как оптически прозрачный.

Ключевые слова

ионно-лучевое осаждение, тонкие пленки, AlN, сапфир, атомно-силовая микроскопия

Благодарности

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

MORPHOLOGY AND OPTICAL PROPERTIES OF AlN FILMS ON SAPPHIRE

O.V. Devitsky^{a,b}, D.A. Nikulin^b, I.A. Sysoev^b, V.B. Osipyan^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 24.07.19, accepted 23.09.19

Article in Russian

For citation: 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

Abstract

Subject of Research. The paper presents the results of an experimental study on morphology and optical properties of AlN films on sapphire. Thin AlN films on sapphire were used as experimental samples. **Method.** To obtain thin films, an ion beam deposition setup was used, which includes the ion source of the CLAN-53M type with an ion neutralizer. The ion beam energy ranged from 600 to 900 eV. The ion beam current was 60 mA, and it was chosen based on the steady-state plasma burning in the ion source. Deposition was carried out at the residual pressure of gases in the vacuum chamber of at least 1.5×10^{-3} Pa; the substrates were heated using a group of halogen lamps with the total power of 2500 W; the substrate temperature was 550–850 °C. The precipitation time was one hour. The composition of the nitrogen-argon mixture was changed by increasing the volume fraction of nitrogen from 10 to 90 %. **Main Results.** The obtained thin films were studied by scanning electron microscopy and energy dispersive analysis. Studies have shown that thin nitrogen AlN films on sapphire obtained with a volume fraction of nitrogen in a nitrogen-argon mixture of more than 50 % have a composition close to stoichiometric one. For AlN films on sapphire, obtained with a volume fraction of nitrogen in a nitrogen-argon mixture of more than 90 %, substrate temperature of 800 °C and the beam energy of 600 eV, the transmittance in the entire optical wavelength range is at least 92 %. The direct dependence of the beam energy on the volume fraction of nitrogen in the nitrogen-argon mixture is determined: at 900 eV, as compared to 600 eV, the nitrogen content in the AlN film rises from 10 % to 30–35 %. When the beam energy is 600 eV, there is an insignificant dependence on the substrate temperature and only the direct dependence on the amount of nitrogen in the nitrogen-argon mixture remains. With partial ionization of the ion beam, the difference between the nitrogen content in the AlN film at different beam energies is in the range of 5–10 %. The increased nitrogen content in the films (more than 20 %) adversely affects the optical perfection of the films. With the partial ionization mode only at 900 eV, the temperature of 800 °C, and with the volume fraction of nitrogen in the nitrogen-argon mixture more than 50 %, the decrease in the quality of the films is observed. Under modes with a volume fraction of nitrogen in a nitrogen-argon mixture of less than 30 %, a large number of microdroplets are observed on the surface with sizes in the range of 1–6 μm. The composition of the gas mixture with the content of the volume fraction of nitrogen in the nitrogen-argon mixture of 10 % increases the concentration of microdroplets on the film surface with the increase in the proportion of large microdroplets. The most optimal mode was revealed with the beam partial ionization, the energy of 600 eV, and the volume fraction of nitrogen in the nitrogen-argon mixture more than 50%. The change in the substrate temperature has practically no effect on the nitrogen fraction in a thin film of aluminum nitride. **Practical Relevance.** A thin AlN film on sapphire deposited at the substrate temperature of 800 °C and volume fraction of nitrogen in the nitrogen-argon mixture equal to 90 % has a transmittance more than 92 % in the optical range of 200–1100 nm, that characterizes the obtained thin film sample as optically transparent.

Keywords

ion beam deposition, thin films, AlN, sapphire, atomic force microscopy

Acknowledgments

The paper was prepared as part of the implementation of the State Enterprise “Development and creation of semiconductor hetero interfaces based on multicomponent materials for microwave electronics and photonics devices” state registration number AAAA-A19-119040390081-2.

Введение

В последние пять лет коммерческие перспективы для нитрида галлия (GaN) и его материалов на его основе значительно выросли [1]. За последнее десятилетие прогресс развития и масштаб использования структур на основе GaN только увеличивается [2, 3]. С коммерциализацией GaN для светодиодов и выпуск лазерных диодов на основе GaN для следующего поколения оптических систем хранения и передачи данных, GaN будет продолжать играть важную роль в оптоэлектронике. Эти устройства предназначены для удовлетворения высокого спроса на высокочастотные электронные компоненты высокой мощности [4, 5]. Диапазон применения крайне широк: от силовых высоковольтных источников питания до оптико-волоконной связи и радиотелескопов [6].

Создание многокомпонентных низкоразмерных гетероструктур на основе соединения GaInPAs и его твердых растворов в свою очередь позволяет существенно увеличить параметры вышеуказанных приборов и создать ряд новых решений, соответствующих довольно широкому кругу требований. Влияние дислокаций может быть устранено использованием буферных слоев различных материалов. Одним из наиболее совместимых по параметрам кристаллической решетки оказался нитрид алюминия (AlN), для которого были освоены методы металлоорганической газофазовой и молекулярно-лучевой эпитаксии [7–9].

В настоящее время относительно простой метод ионно-лучевого осаждения может представлять интерес, как альтернативный метод выращивания как самих гетероструктур GaN, так и буферных слоев AlN для них на сапфире [10]. Несмотря на наличие достаточного количества работ по данной теме исследования, в них не упоминается применение данного метода при температурах подложки, близких к температуре плавления алюминия, поэтому данная работа посвящена исследованию по этой актуальной теме.

Целью данной работы является исследование оптических свойств и морфологии пленок AlN, полученных методом ионно-лучевого осаждения на сапфировых подложках.

Материалы и методы

Получение тонких пленок AlN на сапфире производилось при помощи установки ионно-лучевого осаждения [11].

Осаждение производилось путем бомбардировки алюминиевой мишени, чистой 99,99 % производства компании «Актан-вакуум», ионным источником КЛАН-53М с нейтрализатором ионов [12]. Источник снабжался азотно-аргоновой смесью из баллона для сверхчистых газов посредством регулятора РРГ-10, чистота используемых газов 99,999 %. Энергия ионного пучка варьировалась от 600 до 900 эВ. Ток ионного пучка составлял 60 мА, и выбирался из расчета устойчивого горения плазмы в ионном источнике. Осаждение производилось при остаточном давлении газов в вакуумной камере не менее $1,5 \times 10^{-3}$ Па, нагрев подложек производился при помощи группы галогеновых ламп общей мощностью 2500 Вт, температура подложки составляла 550–850 °С. Время осаждения составляло 1 ч. Состав азотно-аргоновой смеси изменялся путем увеличения объемной доли азота (N₂) от 10 до 90 %.

В качестве экспериментальных образцов использовались подвергнутые ионно-лучевой полировке [10] сапфировые подложки размерами 20 × 20 × 1,2 мм.

Для исследования морфологии поверхности и топологии сколов тонких пленок использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Jeol JSM-6010 LA. Для определения толщины пленки выполнялся скол, который исследовался под малым углом наклона к электронному пучку (около 3–5°). В случае тонких пленок дополнительно выполняется осаждение тонкой пленки золота методом магнетронного напыления на поверхность образца для устранения эффекта заряда диэлектрической поверхности, что позволит повысить разрешение съемки и измерить толщину напыляемых тонких пленок на сапфире.

При контроле стехиометрического состава пленки с использованием энергодисперсионной приставки растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6010 LA выполнялась рентгенограмма в характеристических точках наблюдаемой границы напыленного слоя. Дополнительно применяется метод картирования поверхности, позволяющий изучить распределение массовой доли химических элементов по поверхности образца для характеристики протекаемых процессов при эпитаксии.

Спектры пропускания оптически видимого и ультрафиолетового диапазонов исследованы при помощи спектрометра СФ-56. Полученные спектры пропускания образцов тонких пленок позволяют судить о качестве осаждаемых пленок и возможности практического применения их для нужд оптоэлектроники [13].

Исследование морфологии поверхности тонких пленок проводилось на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Ntegra Aura, оснащенный сканером с кремниевым зондом и золотым напылением CSG30 для работы в контактном режиме. Обработка изображений производилась на свободно распространяемом программном обеспечении Gwyddion [14]. Наблюдалась морфология поверхности образцов до и после осаждения, также выполнялось исследование границы напыления порядка шириной 5–10 мкм при размерах сканируемой области 100 × 100 мкм. Обработка полученных с помощью АСМ данных включала в себя вычитание поверхности второго порядка и определение величины средней арифметической шероховатости поверхности и была произведена в программной среде Nova 1000 [15].

Для точного анализа топологии скола образцов гладких тонких пленок (с отсутствием микрокапель) произведено напыление тонкой пленки золота методом магнетронного напыления установкой SpinCoater.

Результаты и обсуждение

СЭМ-изображение поверхности тонкой пленки AlN на сапфировой подложке, полученной при объемной доле азота $c(\text{N}_2)$ в азотно-аргоновой смеси равной 10 %, представлено на рис. 1. На поверхности пленок, представленных на рисунке, наблюдается достаточно большое количество микрокапель алюминия различного размера.

На рис. 2 представлена топология скола поверхности данного образца тонкой пленки. На рисунке отчетливо видно, что толщина осажденной пленки AlN составила 0,330 мкм. Высота микрокапли алюминия составляет 0,564 мкм, исходя из того, что за точку отсчета была принята граница раздела сапфира и пленки AlN.

Наличие микрокапель легко объяснить тем, что при малых концентрациях азота в азотно-аргоновой смеси осаждаемая пленка AlN имеет нестехиометрический состав, при таком низком $c(\text{N}_2)$ азот не переходит в достаточно активное состояние, а также в связи с тем, что коэффициенты распыления азота и аргона различаются, осаждение пленки сопровождается повышенным содержанием кластеров алюминия, являющихся

в дальнейшем центрами агломерации адататов алюминия. Подобное состояние поверхности наблюдалось для образцов, полученных при $c(N_2)$ менее 50 %.

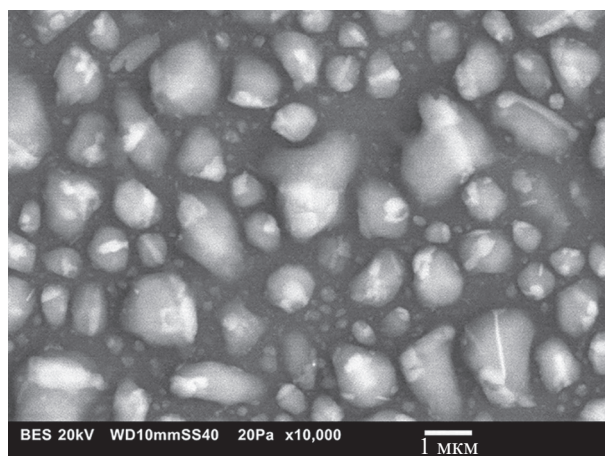


Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности тонкой пленки AlN на сапфире, полученной при температуре подложки 800 °С и $c(N_2)$ равном 10 %

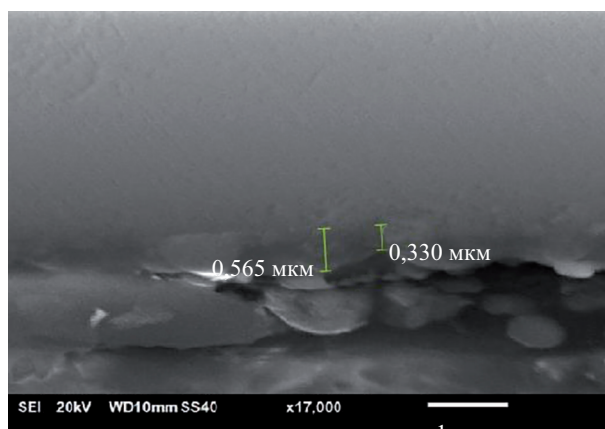


Рис. 2. Топология поверхности скола образца тонкой пленки AlN на сапфире, полученной при температуре подложки 800 °С и $c(N_2)$ равном 10 %

Исследования морфологии поверхности образца, полученного при температуре подложки 800 °С и $c(N_2)$ равном 30 % методом атомно-силовой микроскопии, проводились для расчета шероховатости. Полученная профилограмма образца в области осажденной пленки AlN, изображена на рис. 3, а. На данной профилограмме присутствуют острые пики с крутыми склонами. Подобное состояние микрорельефа характерно для образцов, подвергшихся ионно-лучевой обработке поверхности.

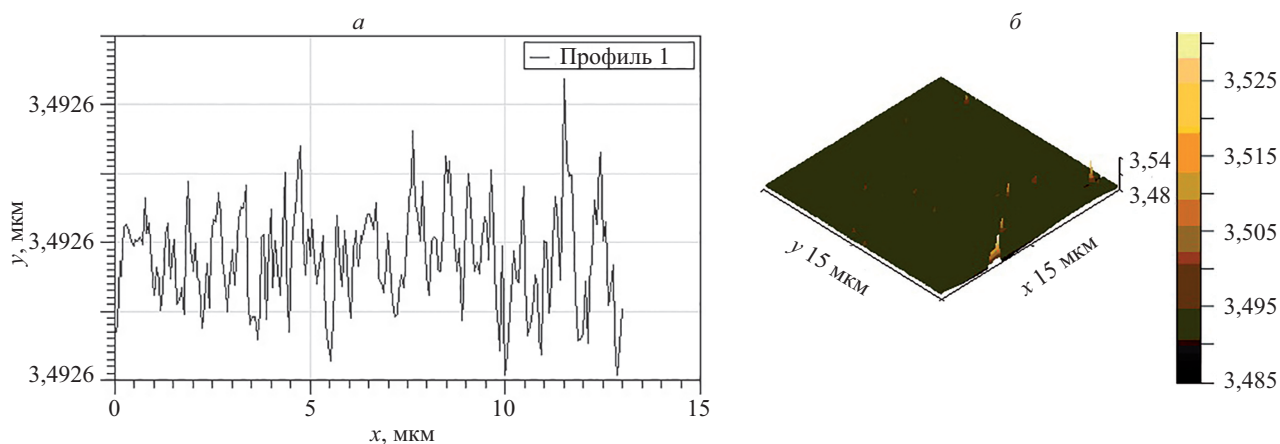


Рис. 3. Профилограмма (а) и АСМ-изображение поверхности (б) тонкой пленки AlN, осажденной на сапфире при температуре подложки 800 °С и $c(N_2)$ равном 30 %

АСМ-изображения поверхности данного образца представлены на рис. 3, б. Средняя арифметическая шероховатость Ra для данного образца пленки AlN на сапфире составила 0,8 нм при исходной шероховатости подложки в 0,2 нм.

Для согласования измеренных ранее толщин пленок методами растровой электронной микроскопии произведен анализ фронта осаждаемой пленки. На рис. 4, б представлен результат данного анализа в виде АСМ-изображения поверхности. Следует отметить наличие микрокапель на поверхности, которое приводит к появлению артефактов высотой до 330 нм. На рис. 4, а представлена профилограмма, снятая по нормали к фронту осаждения пленки. Подведение зонда АСМ к измеряемой плоскости производилось со стороны области чистой сапфировой подложки (участок Al_2O_3 на рис. 4, а), на участке около 20 мкм наблюдается плавное нарастание фронта осаждаемой пленки AlN.

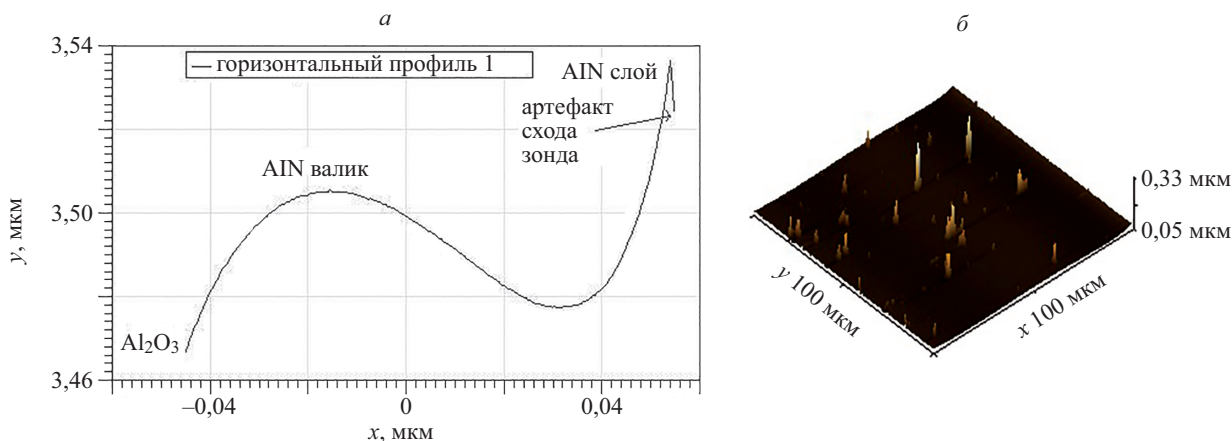


Рис. 4. Профилограмма (а) и АСМ-изображение поверхности (б) тонкой пленки AlN, осажденной на сапфире при температуре подложки 800 °С и $c(N_2)$ равном 10 %

Следующие 40–45 мкм представлены более плавным, но отрицательным фронтом с уменьшением высоты пленки. На расстоянии в 70 мкм от участка чистой сапфировой подложки начинается резкий рост высоты пленки с крутым фронтом, оканчивающийся окончательно сформировавшейся поверхностью пленки AlN. Подобный эффект возникновения «валика» можно объяснить эффектом переотражения от края маски. Край располагался приблизительно на провале высоты. При облучении образцов ионным пучком в области под краем маски происходило два процесса — осаждение и распыление. Именно дополнительный эффект распыления от края оснастки, помимо прямого пучка осаждаемого материала, и вызвал локальное снижение скорости роста осаждения, вызвавшее смещение высот напыляемого слоя с образованием «валика» перед фронтом нарастания пленки. Заканчивается профилограмма резким перепадом высоты в виде острого пика, что является характерным для атомно-силовой микроскопии артефактом отвода зонда от поверхности.

По итогам проведенного анализа профилограмм и морфологии образцов следует отметить оценку высоты осажденного слоя в диапазоне 100–120 нм. Эти данные приближены к исследованиям сколов методами растровой электронной микроскопии, измеренное значение высоты составило 120–140 нм. Этот факт может охарактеризовать метод измерения толщины осажденной пленки посредством определения фронта пленки атомно-силовой микроскопией как перспективный, но требующий более подробного изучения для корреляции полученных данных на материалах с разной упругостью, твердостью и диэлектрической проницаемостью.

Исследование оптических свойств тонких пленок AlN на сапфире. Проведенная оценка коэффициента светопропускания критична для изделий оптоэлектроники. Необходимый минимум для светоизлучающих гетероструктур, а также приемников излучения на их основе составляет порядка 80–85 %. В частности, для синих и белых светодиодов наиболее характерна область светопропускания в диапазоне 400–450 нм. Именно из-за минимального коэффициента в 85 % в диапазоне длин волн 400–1100 нм выгодно отличается сапфир, в том числе и используемые для исследований сапфировые подложки.

Из представленного на рис. 5 спектра пропускания образца осажденной при температуре 800 °С и $c(N_2)$ равном 90 % пленки AlN видно, что минимальный коэффициент светопропускания видимого диапазона составляет не менее 92 %, что характеризует полученный образец оптически прозрачным. Пленка, полученная при $c(N_2)$ равном 50 %, имеет более низкое светопропускание. По результатам элементного анализа содержание азота в данном образце пленки составило около 33 %, что говорит о ее нестехиометрическом составе. Поэтому в оптическом диапазоне проявляется сильное поглощение в длинах волн от 400 до 550 нм при коэффициенте пропускания 48–70 %. Причем с увеличением длины волны коэффициент пропускания не увеличивается.

На рис. 6 изображены графики зависимости массовой доли азота в тонкой пленке AlN от соотношения парциального давления азота в азотно-аргоновой смеси.

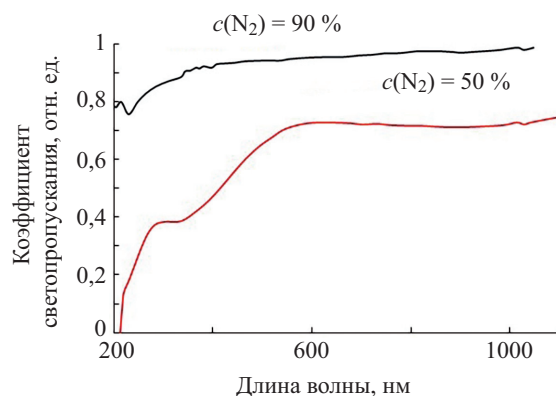


Рис. 5. Спектр пропускания образца пленки AlN на сапфире, осажденной при температуре подложки 800 °C и $c(N_2)$ равном 90 и 50 %

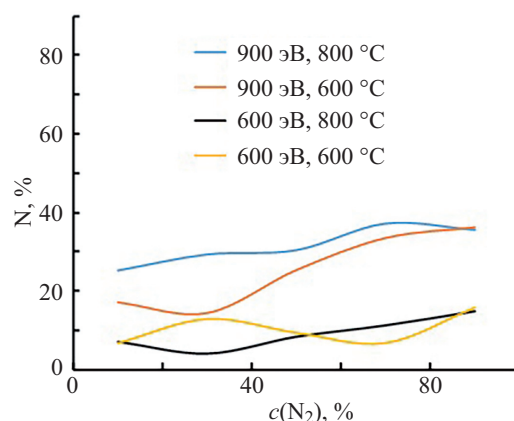


Рис. 6. Зависимость содержания азота в массовом соотношении N в тонкой пленке от соотношения газовой смеси $c(N_2)$ при различных режимах осаждения и полной ионизации ионного пучка

При полной ионизации можно отметить прямую зависимость энергии пучка от $c(N_2)$ — при 900 эВ по сравнению с 600 эВ доля азота повышается с 10 до 30–35 %. При величине энергии пучка в 600 эВ имеется незначительная зависимость от температуры подложки и сохраняется только прямая зависимость от количества азота в газовой смеси.

При частичной ионизации наблюдается большее схождение зависимостей с лучшей предсказуемостью результатов (рис. 7). Разница между долями азота при разной энергии пучка входит в диапазон 5–10 %. Повышенное содержание азота в пленках (более 20 %) отрицательно влияет на оптическое совершенство пленок. При режиме частичной ионизации только на участке при 900 эВ, температуре 800 °C и при $c(N_2)$ более 50 % наблюдается снижение качества пленок. При режимах с $c(N_2)$ менее 30 % наблюдается большое количество микрокапель на поверхности с наибольшими характерными размерами в диапазоне 1–6 мкм. Состав газовой смеси с содержанием азота 10 % повышает концентрацию микрокапель на поверхности пленки с увеличением доли крупных включений. Наиболее оптимальный режим выявлен с частичной ионизацией пучка энергией 600 эВ и долей азота в смеси более 50 %. Изменение температуры подложки на значение доли азота в тонкой пленке AlN практически не влияет.

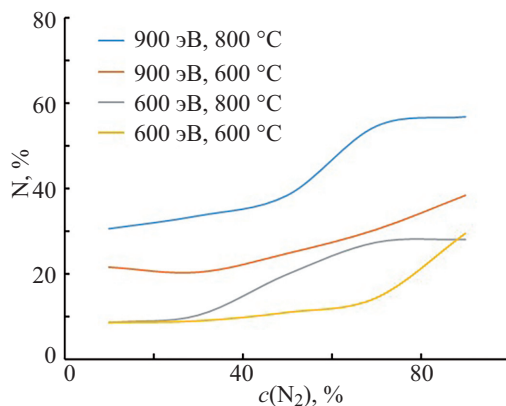


Рис. 7. Зависимость содержания азота в массовом соотношении N в тонкой пленке от соотношения газовой смеси $c(N_2)$ при различных режимах осаждения и частичной ионизации пучка

На основе полученных данных о светопропускании образцов в видимом диапазоне составлена зависимость коэффициента светопропускания от режимов осаждения. Представленный график на рис. 8 отображает подобную зависимость для ионного пучка с частичной ионизацией пучка. Можно отметить высокую прозрачность пленок со светопропусканием более 80 % при повышении доли азота в газовой смеси более 70 %.

Ключевым моментом является положительное влияние энергии 600 эВ при данном режиме, тогда как при повышении энергии пленки становятся полупрозрачными с коэффициентом светопропускания менее 60 % и с участками поглощения в спектре светопропускания в диапазоне 400–450 и 400–550 нм. Изменение распределения меняется при достижении $c(N_2)$ в 90 % – при вышеописанном режиме прозрачность снижается на 10–20 %. Наиболее оптимальным режимом является температура подложки в 800 °С с величиной энергии ионного пучка в 600 эВ.

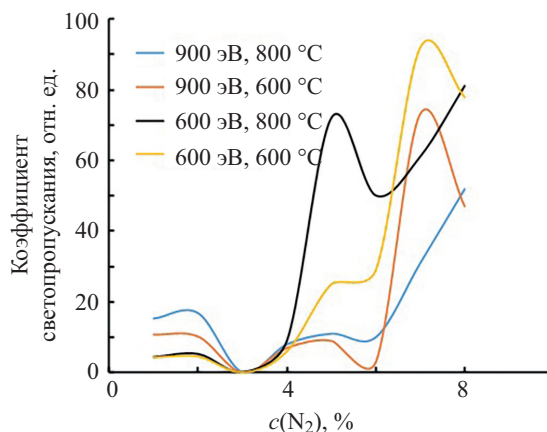


Рис. 8. Зависимость коэффициента светопропускания на длине волны 400 нм от $c(N_2)$ при полной ионизации ионного пучка

Режим частичной ионизации ионного пучка также положительно влияет на распределение характеристик. График с полученными данными отображен на рис. 9.

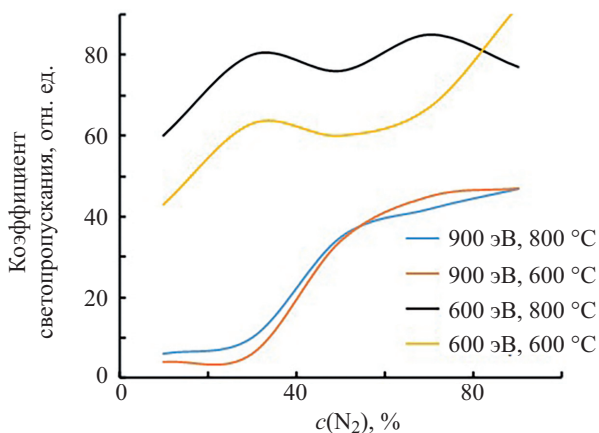


Рис. 9. Зависимость коэффициента светопропускания на длине волны 400 нм от $c(N_2)$ при частичной ионизации ионного пучка

Следует отметить большую степень стабильности в полученных данных с минимизацией выбросов и большей предсказуемостью, такой же эффект выглаживания проявляется и при изучении доли азота в пленке. В режиме с частичной ионизацией доля участков с приемлемой прозрачностью пленок увеличивается. Так, прозрачность пленок в 80 % достигается уже при доле азота 30 % в газовой смеси, но только для высокотемпературного режима 800 °С с энергией 600 эВ. Имеется особенность и для выявленного ранее оптимального режима с полной ионизацией пучка — при повышении доли ионов в ионном пучке прозрачность пленок выше 80 % достигается только с $c(N_2)$ более 80 %.

Заключение

По результатам проведенного исследования выявлены зависимости влияния параметров ионно-лучевого осаждения (состав газовой смеси, энергия ионного пучка, температура подложки, степень нейтрализации ионного пучка) на морфологию поверхности и оптические свойства пленок. Наиболее оптимальный

режим выявлен с частичной ионизацией пучка и энергией 600 эВ, объемной доли азота в азотно-аргоновой смеси более 50 %.

Полученные тонкие пленки исследованы методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа. Исследования показали, что полученные при объемной доле азота в азотно-аргоновой смеси более 50 % тонкие пленки AlN на сапфире имеют состав близкий к стехиометрическому. Для пленок AlN на сапфире, полученных при объемной доле азота в азотно-аргоновой смеси более 90 %, температуре подложки 800 °C и энергии пучка 600 эВ, величина коэффициента пропускания во всем оптическом диапазоне длин волн составляет не менее 92 %.

Тонкая пленка AlN на сапфире, осажденная при температуре подложки 800 °C и с(N₂) равном 90 %, имеет коэффициент пропускания в оптическом диапазоне 200–1100 нм более 92 %, что характеризует полученный образец тонкой пленки как оптически прозрачный.

Литература

1. Qin M.L., Du X.L., Li Z.X., Humail I.S., Qu X.H. 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
2. Ryou J.-H., Lee W. GaN on sapphire substrates for visible light-emitting diodes // *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs): Materials, Technologies, and Applications*. 2018. P. 43–78. (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials). doi: 10.1016/B978-0-08-101942-9.00003-4
3. 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
4. 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
5. 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
6. Bian Y., Liu M., Ke G., Chen Y., Di Battista J., Chan E., Yang Y. Aluminum nitride thin film growth and applications for heat dissipation // *Surface and Coatings Technology*. 2015. V. 267. P. 65–69. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.060
7. Kueller V., Knauer A., Brunner F., Zeimer U., Rodriguez H., Kneissl M., Weyers M. Growth of AlGaIn and AlN on patterned AlN/sapphire templates // *Journal of Crystal Growth*. 2011. V. 315. N 1. P. 200–203. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2010.06.040
8. Lutsenko E.V., Rzhetski M.V., Vainilovich A.G., Svitsiankou I.E., Shulenkova V.A., Muravitskaya E.V., Alexeev A.N., Petrov S.I., Yablonskii G.P. MBE AlGaIn/GaN HEMT Heterostructures with Optimized AlN Buffer on Al₂O₃ // *Semiconductors*. 2018. V. 52. N 16. P. 2107–2110. doi: 10.1134/S1063782618160170
9. Двошерстов М.Ю., Чередник В.И., Беляев А.В., Денисова А.В., Сидорин А.П. Гетероэпитаксиальные структуры AlN/Al₂O₃ и GaN/Al₂O₃ для акустоэлектронных СВЧ устройств // *Современные наукоемкие технологии*. 2010. № 9. С. 24–30.
10. 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
11. Девцкий 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
12. Лунин Л.С., Синельников Б.М., Сысоев И.А. Особенности ионно-лучевой полировки поверхности сапфира // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018. № 9. С. 73–77. doi: 10.1134/S020735281809010X

References

1. Qin M.L., Du X.L., Li Z.X., Humail I.S., Qu X.H. 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
2. Ryou J.-H., Lee W. GaN on sapphire substrates for visible light-emitting diodes. *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs): Materials, Technologies, and Applications*, 2018, pp. 43–78. (Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials). doi: 10.1016/B978-0-08-101942-9.00003-4
3. 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
4. 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
5. 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
6. Bian Y., Liu M., Ke G., Chen Y., Di Battista J., Chan E., Yang Y. Aluminum nitride thin film growth and applications for heat dissipation. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 267, pp. 65–69. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.11.060
7. Kueller V., Knauer A., Brunner F., Zeimer U., Rodriguez H., Kneissl M., Weyers M. Growth of AlGaIn and AlN on patterned AlN/sapphire templates. *Journal of Crystal Growth*, 2011, vol. 315, no. 1, pp. 200–203. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2010.06.040
8. Lutsenko E.V., Rzhetski M.V., Vainilovich A.G., Svitsiankou I.E., Shulenkova V.A., Muravitskaya E.V., Alexeev A.N., Petrov S.I., Yablonskii G.P. MBE AlGaIn/GaN HEMT Heterostructures with Optimized AlN Buffer on Al₂O₃. *Semiconductors*, 2018, vol. 52, no. 16, pp. 2107–2110. doi: 10.1134/S1063782618160170
9. Dvoesherstov M.Yu., Cherednick V.I., Beljaev A.V., Denisova A.V., Sidorin A.P. Heteroepitaxial structures AlN/Al₂O₃ and GaN/Al₂O₃ for HF SAW devices. *Modern high technologies*, 2010, no. 9, pp. 24–30. (in Russian)
10. 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
11. 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*, vol. 19, no. 5, pp. 848–854. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-848-854
12. Lunin L.S., Sinel'nikov B.M., Sysoev I.A. Features of Ion-Beam Polishing of the Surface of Sapphire. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 898–901. doi: 10.1134/S1027451018050105
13. Sukhoveev V., Usikov A., Kovalenkov O., Ivantsov V., Syrkin A., Dmitriev V., Collins C., Wraback M. Thick AlN layers grown by

13. Sukhoveev V., Usikov A., Kovalenkov O., Ivantsov V., Syrkin A., Dmitriev V., Collins C., Wraback M. Thick AlN layers grown by HVPE on sapphire substrates // *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 2006. V. 892. P. 743–748. doi: 10.1557/PROC-0892-FF29-03
14. Nečas D., Klapetek P. Gwyddion: An open-source software for SPM data analysis // *Central European Journal of Physics*. 2012. V. 10. N 1. P. 181–188. doi: 10.2478/s11534-011-0096-2
15. Мошников В.А., Спивак Ю.М., Алексеев П.А., Пермяков Н.В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с. HVPE on sapphire substrates. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 2006, vol. 892, pp. 743–748. doi: 10.1557/PROC-0892-FF29-03
14. Nečas D., Klapetek P. Gwyddion: An open-source software for SPM data analysis. *Central European Journal of Physics*, 2012, vol. 10, no. 1, pp. 181–188. doi: 10.2478/s11534-011-0096-2
15. Moshnikov V.A., Spivak Yu.M., Alekseev P.A., Permyakov N.V. *Atomic force microscopy for the study of nanostructured materials and instrument structures*: textbook. allowance. St. Petersburg: Publishing house of SPbGETU “LETI”, 2014, 144 p. (in Russian)

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 — студент, 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, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, Scopus ID: 32467535800, ORCID ID: 0000-0001-5415-0782, eianpisia@yandex.ru

Осипян Владимир Борисович — студент, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9280-4617, Vladimir26vip@gmail.com

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 — Student, 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, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, Scopus ID: 32467535800, ORCID ID: 0000-0001-5415-0782, eianpisia@yandex.ru

Vladimir B. Osipyanyan — Student, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9280-4617, Vladimir26vip@gmail.com