

Текстура тонких пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления

© В.И. Струнин^{1,2}, Л.В. Баранова^{1,2}, Б.Т. Байсова^{1,2}

¹ Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

² Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, Омск, Россия

E-mail: baranova@omsu.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2025 г.

В окончательной редакции 16 июня 2025 г.

Принято к публикации 17 июля 2025 г.

Представлены результаты исследования текстуры тонких пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления. Исследована зависимость размеров и степени преимущественной ориентации кристаллитов от условий формирования тонких пленок (давления, мощности разряда, состава плазмообразующего газа).

Ключевые слова: пленки нитрида алюминия, магнетронное распыление, текстура, размер области когерентного рассеяния.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.20.61402.20368

В последнее время тонкие пленки нитрида алюминия (AlN) находят широкое применение в микроэлектронике благодаря своим превосходным акустическим свойствам [1,2].

В современной науке и промышленности широко используются различные методы получения тонких пленок, например ионно-плазменные, ионно-лучевые и методы термовакuumного напыления [2]. Один из наиболее эффективных способов получения тонких пленок — метод магнетронного распыления [3,4].

Однако на физические свойства пьезоэлектрических пленок AlN существенно влияют параметры и условия их осаждения [5,6], так как они определяют способ расположения атомов алюминия и азота на подложке и, следовательно, микроструктуру формируемой пленки.

Под внутренней микроструктурой тонких пленок в более широком понимании подразумевают размер зерна, напряжения, деформации и текстуру — преимущественную ориентацию зерен (кристаллитов) в пленках. Микроструктура пленок существенным образом зависит от подложки, на которую нанесена пленка, и условий получения. Управление текстурой стало важной задачей в технологии тонких пленок. Степень текстурированности часто меняется в процессе роста тонкой пленки, и наиболее выраженная текстура достигается только после того, как слой достигнет определенной толщины. Таким образом, для оптимизации процесса осаждения производителям тонких пленок требуется информация о текстуре для различных технологических режимов.

Несмотря на многочисленные исследования, посвященные формированию тонких пленок нитрида алюминия методом магнетронного распыления, современные модели не позволяют предсказать конечную структуру тонкой пленки при изменении различных параметров распыления [3,7,8], и для режимов, указанных в статье,

не установлена взаимосвязь между параметрами осаждения и физическими свойствами получаемой пленки. Так как данные пленки предназначены для использования в качестве пьезоэлектрического слоя в микроэлектронных резонаторах на объемных акустических волнах и их свойства напрямую влияют на функциональные свойства этих устройств, установление зависимости структуры и текстуры пленки от конкретных технологических режимов является важным и обуславливает актуальность данного исследования.

Структурные и морфологические свойства полностью определяют возможность применения тонких пленок нитрида алюминия в том или ином типе устройства [9]. В частности, для применения в устройствах на поверхностных акустических волнах тонкие пленки AlN должны обладать гладкой поверхностью и преимущественной ориентацией (002), так как пьезоэлектрические свойства сильно зависят от кристаллографической ориентации пленки. Таким образом, целью работы является исследование текстуры тонких пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления, а именно определение размеров и степени преимущественной ориентации кристаллитов в зависимости от условий формирования тонких пленок (давления, мощности разряда, состава плазмообразующего газа).

Исследуемые пленки AlN формировались на ситалловых подложках методом магнетронного распыления мишени Al (99.99%) в реактивной среде Ar/N₂ на установке нанесения многокомпонентных покрытий. Перед напылением производилась химическая обработка подложек, затем подложки помещались в вакуумную камеру, где для дальнейшей очистки мишени от возможных окислов перед процессом формирования пленок проводилось распыление мишени в среде аргона при закрытой заслонкой подложке и подводимой к мишени

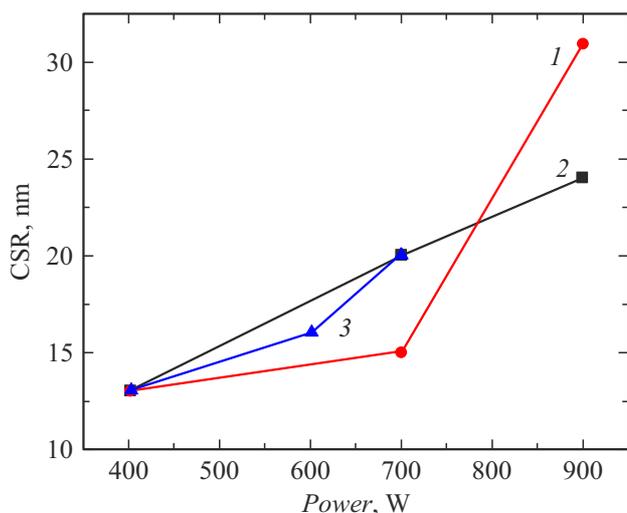


Рис. 1. Зависимость размера ОКР от мощности разряда. 1 — 10 sccm, 0.1 Pa; 2 — 5 sccm, 0.1 Pa; 3 — 5 sccm, 0.07 Pa.

мощности, превышающей на 10–15% мощность при формировании пленок нитрида алюминия.

Пленки нитрида алюминия формировались при следующих технологических режимах. Поток Ar/N_2 варьировались (в стандартных кубических сантиметрах в минуту, sccm): 4/5 и 4/10. Мощность, подаваемая на мишень, варьировалась от 400 до 900 W, температура подложки составляла 350 °C, а давление изменялось от 0.07 до 0.1 Pa. Расстояние от мишени до подложки составляло 100 mm. Давление было выбрано таким образом, чтобы длина свободного пробега частиц была сравнима с расстоянием от мишени до подложки. Известно, что при давлениях в камере 0.1 Pa длина свободного пробега составляет 10 cm, а при давлении 0.07 Pa ~ 13 cm. Мишень находилась на расстоянии 10–11 cm от подложки. Таким образом, механизм доставки распыленных атомов алюминия до подложки является бесстолкновительным

процессом. Температура осаждения AlN выбиралась так, чтобы в совокупности с давлением из расчетов модели Торнтон структурных зон формирования тонких пленок режим формирования тонкой пленки попадал в зону T [10], что позволяет выращивать тонкие пленки со столбчатой, плотноупакованной структурой, при этом кристаллиты будут расти перпендикулярно подложке — по оси (002). Оптимальные значения мощности магнетронного разряда и соотношений потоков плазмообразующих газов были получены нами в предыдущих работах [11–14].

Дифрактометрический анализ структурных параметров тонких пленок нитрида алюминия производился на дифрактометре XRD-6000 на $CuK\alpha$ -излучении. Исследовались фазовый состав и структурные параметры образцов. Анализировались области когерентного рассеяния (ОКР) и преимущественная ориентация пленок с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

На рис. 1 приведена зависимость размера ОКР от мощности магнетронного разряда. Из рис. 1 видно, что с увеличением мощности магнетронного разряда от 400 до 900 W увеличивается размер ОКР. С ростом мощности магнетронного разряда энергия адатомов и их поверхностная подвижность повышается, что приводит к образованию кристаллитов большего размера.

На рис. 2 приведена зависимость размера ОКР от давления газа. Для пленок, полученных при концентрации азота 10 sccm в газовой смеси, с ростом давления ОКР уменьшается (рис. 2, *a*), в то время как при концентрации азота 5 sccm наблюдается обратная зависимость (рис. 2, *b*). Объясняется это тем, что при большей концентрации атомов азота в плазме рабочего газа (10 sccm) уменьшается количество атомов алюминия, обладающих высокой энергией, попадающих на подложку. Параллельно с данным фактором увеличение давления рабочего газа также приводит к рассеянию распыленных атомов алюминия из-за их столкновения с

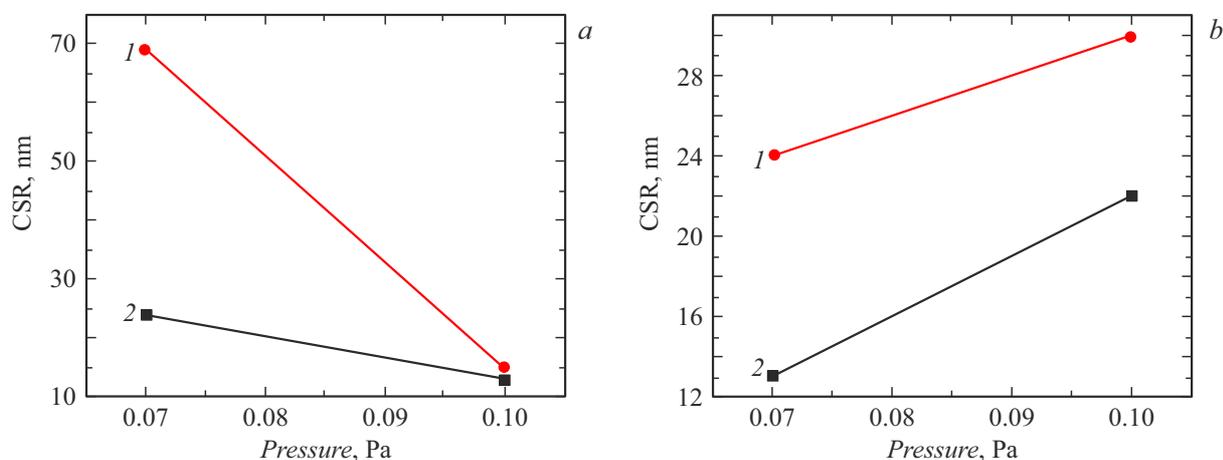


Рис. 2. Зависимость размера ОКР от давления газа при различной концентрации азота: *a* — 10 sccm (1 — 700 W, 2 — 400 W); *b* — 5 sccm (1 — 900 W, 2 — 400 W).

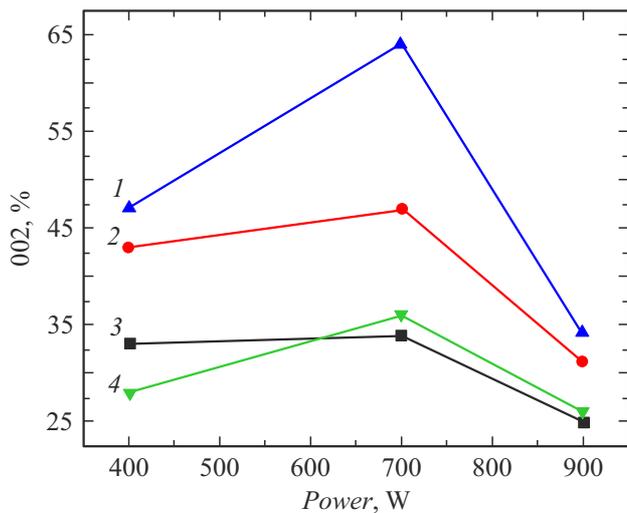


Рис. 3. Зависимость степени преимущественной ориентации (002) от мощности разряда. 1 — 10 sccm, 0.07 Pa; 2 — 5 sccm, 0.1 Pa; 3 — 5 sccm, 0.07 Pa; 4 — 10 sccm, 0.1 Pa.

атомами аргона. Результатом влияния этих двух факторов является снижение миграционной способности осаждаемых на подложку атомов алюминия, что приводит к уменьшению размеров кристаллитов. При более низких концентрациях азота (5 sccm) с ростом давления рабочего газа наблюдается увеличение размера кристаллитов, что связано с ускорением процесса диффузии адсорбированных на поверхности подложки атомов алюминия и поглощения мелких кристаллитов более крупными.

На рис. 3 приведена зависимость степени преимущественной ориентации (002) от мощности магнетронного разряда. Увеличение мощности магнетронного разряда приводит к повышению скорости осаждения. Тонкие пленки, нанесенные при низкой мощности разряда, имеют низкую степень ориентации вдоль плоскости (002), что может быть связано с тем, что атомы, распыленные

в направлении подложки, не обладают необходимой энергией для формирования хорошо ориентированной структуры. Последующее увеличение мощности приводит к изменению микроструктуры и образованию текстурированной пленки с разориентированными друг относительно друга зернами, так как повышение скорости осаждения приводит к снижению поверхностной диффузии. Исходя из анализа экспериментальных данных оптимальная мощность магнетронного разряда, при которой кристаллиты формируются с наибольшей степенью преимущественной ориентации, составляет 700 W.

На рис. 4 приведена зависимость степени преимущественной ориентации (002) от давления газа. Для пленок, полученных при концентрации азота 10 sccm, с ростом давления степень ориентации вдоль (002) становится меньше (рис. 4, *a*), а для пленок, полученных при концентрации азота 5 sccm, наблюдается увеличение степени ориентации вдоль (002) с ростом давления (рис. 4, *b*). Объясняется это тем, что ионы аргона обладают большей атомной массой и, следовательно, при преобладании их в составе газовой смеси при бомбардировке мишени будет выбиваться большее количество атомов алюминия с более высокой кинетической энергией, которые, попадая на подложку, будут формировать плоскость (002). Энергия образования плотноупакованной (002)-плоскости AlN больше, чем у плоскостей с другими ориентациями, поэтому высокая энергия распыленных атомов алюминия будет способствовать росту плоскости (002). С увеличением концентрации азота увеличивается число столкновений распыленных атомов алюминия с атомами азота, что приводит к потере энергии и снижению количества высокоэнергетических атомов алюминия, попадающих на подложку и участвующих в создании плотноупакованной плоскости (002).

Таким образом, в работе представлены результаты исследования текстуры тонких пленок нитрида алюминия в зависимости от условий их формирования. Исследована зависимость размера ОКР и степени преимущественной

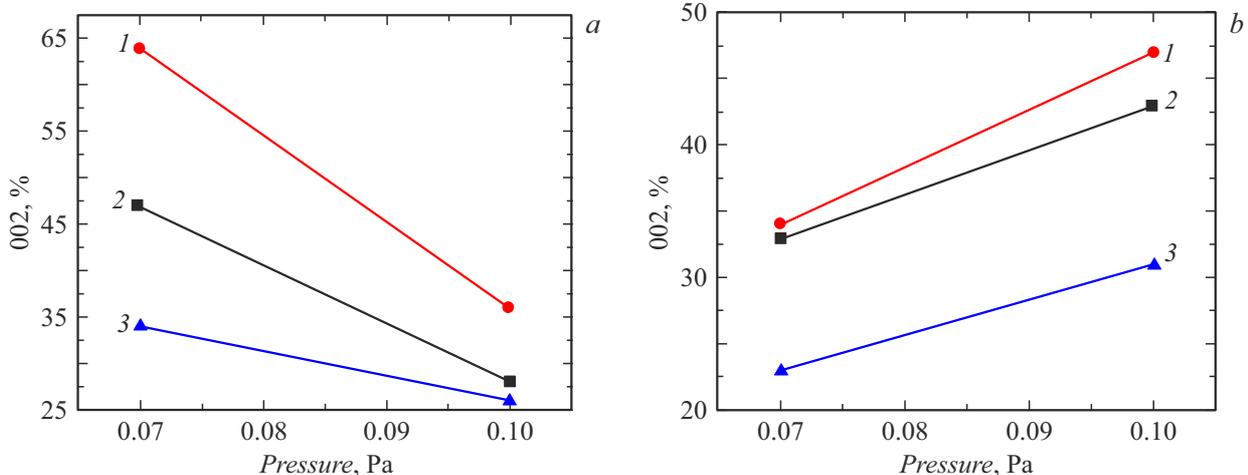


Рис. 4. Зависимость степени ориентации (002) от давления газа при концентрации азота 10 (*a*) и 5 sccm (*b*). 1 — 700 W, 2 — 400 W, 3 — 900 W.

ориентации (002) от давления, мощности и состава плазмообразующего газа.

Установлено, что при соотношении потоков газов (в sccm) $Ar/N_2 = 4/5$ фаза AlN с преимущественной ориентацией (002) и размер кристаллитов увеличиваются с ростом давления, а при соотношении потоков газов $Ar/N_2 = 4/10$ наблюдается обратная зависимость. Размеры ОКР и степень преимущественной ориентации увеличиваются с ростом мощности магнетронного разряда, однако начиная с некоторого значения мощности происходит снижение доли кристаллитов с преимущественной ориентацией (002). Исходя из анализа экспериментальных данных оптимальная мощность магнетронного разряда, при которой кристаллиты формируются с наибольшей степенью преимущественной ориентации (002), составляет 700 W.

Финансирование работы

Работа выполнялась в рамках финансирования по гранту РФФИ № 23-12-20010.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.L. Hickman, R. Chaudhuri, S.J. Bader, K. Nomoto, L. Li, J.C.M. Hwang, H.G. Xing, D. Jena, *Semicond. Sci. Technol.*, **36**, 044001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6641/abe5fd
- [2] В.В. Кириленко, В.М. Жигарновский, В.К. Павловский, И.П. Маркелова, А.В. Михайлов, Г.А. Муранова, *Опт. журн.*, **75** (12), 50 (2008). [V.V. Kirilenko, V.M. Zhigarnovskii, V.K. Pavlovskii, I.P. Markelova, A.V. Mikhailov, G.A. Muranova, *J. Opt. Technol.*, **75** (12), 800 (2008). DOI: 10.1364/JOT.75.000800].
- [3] M.K. Sandager, C. Kjelde, V. Popok, *Crystals*, **12**, 1379 (2022). DOI: 10.3390/cryst12101379
- [4] С.В. Зайцев, С.В. Ващилин, Д.С. Прохоренко, В.М. Нарцев, Е.И. Евтушенко, *Огнеупоры и техническая керамика*, № 7-8, 15 (2014).
- [5] A. Iqbal, F. Mohd-Yasin, *Sensors*, **18**, 1797 (2018). DOI: 10.3390/s18061797
- [6] G.F. Iriarte, J.G. Rodriguez, F. Calle, *Mater. Res. Bull.*, **45**, 1039 (2010). DOI: 10.1016/j.materresbull.2010.05.035
- [7] B. Riah, J. Camus, A. Ayad, M. Rammal, R. Zernadji, N. Rouag, M.A. Djouadi, *Coatings*, **11**, 1063 (2021). DOI: 10.3390/coatings11091063
- [8] A. Ababneh, A.M.K. Dagamseh, Z. Albataineh, M. Tantawi, Q.M. Al-Bataineh, M. Telfah, T. Zengerle, H. Seidel, *Microsyst. Technol.*, **27**, 3149 (2021). DOI: 10.1007/s00542-020-05081-4
- [9] Р.М. Закирова, Н.А. Прошутин, И.В. Федотова, А.С. Аналькин, П.Н. Крылов, *Химическая физика и мезоскопия*, **26** (3), 395 (2024). DOI: 10.62669/17270227.2024.3.34
- [10] А.Л. Каменева, *Вопросы материаловедения*, № 3 (83), 122 (2015).
- [11] L.V. Baranova, B.T. Baisova, V.I. Strunin, in *2023 IEEE XVI Int. Scientific and Technical Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)* (IEEE, 2023), p. 140–143. DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347673
- [12] L.V. Baranova, V.I. Strunin, B.T. Baisova, N.A. Chirikov, *High Energy Chem.*, **57**, S7 (2023). DOI: 10.1134/S0018143923070056
- [13] L. Baranova, B. Baisova, V. Strunin, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2270**, 012044 (2022). DOI: 10.1088/1742-6596/2270/1/012044
- [14] V.I. Strunin, B.T. Baisova, L.V. Baranova, *High Energy Chem.*, **58**, S429 (2024). DOI: 10.1134/S0018143924701297