

УДК 538.91

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТОПОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, НАНЕСЕННЫХ ПРИ НИЗКОЙ МОЩНОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ, ДЛЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Р. Йотилакшми<sup>1</sup>, С. Сандип<sup>1</sup>, Ю. А. Митягин<sup>2</sup>,  
М. П. Теленков<sup>2</sup>, К. К. Нагараджа<sup>1</sup>

*Нитрид алюминия, перспективный пьезоэлектрический материал, выращенный при температуре ниже 400 °С, совместим с КМОП и может быть использован для широкого применения в пьезоэлектрических приложениях. Целью работы было выращивание тонких пленок AlN, ориентированных по оси с, методом реактивного магнетронного распыления при относительно низкой мощности распыления. Тонкие пленки AlN были осаждены при низкой мощности распыления 100 и 125 Вт и при температуре распыления 300 °С. Методы рентгеновской дифракции и атомно-силовой микроскопии были использованы для характеристики структурной и поверхностной топографии осажденных тонких пленок. В пленках, выращенных при мощности 125 Вт, наблюдалась ориентация плоскости (002) перпендикулярно оси с. Было обнаружено, что шероховатость пленок составляет 7.00 Å, а асимметрия распределения шероховатости близка к нулю. Эта фазово-чистая пленка в будущем может быть использована для различных пьезоэлектрических устройств.*

**Ключевые слова:** AlN, магнетронное распыление, пьезоэлектричество.

*Введение.* Нитрид алюминия, кристаллизующийся в структуру вюрцита – хорошо известный пьезоэлектрический материал с осью с в качестве направления поляриза-

<sup>1</sup> Лаборатория материалов для альтернативных источников энергии, Манипальский технологический институт, Манипальская Академия высшего образования, Манипал, 576 104, Индия.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: mityagina@lebedev.ru.

ции. Благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам он находит широкое применение – от преобразователей солнечной энергии до биосенсоров. Кроме того, это один из хорошо изученных материалов для применения в светодиодах УФ-области спектра. AlN имеет широкую запрещенную зону 6.2 эВ [1] с высокой теплопроводностью 320 Вт/мК [2], высокой термической стабильностью до 2000 °С [3], что обеспечивает работоспособность устройств на его основе в суровых условиях окружающей среды и искусственно созданных экстремальных условиях. Очень высокая скорость звука  $\sim 10000$  м/с [4] делает AlN перспективным материалом для устройств на поверхностных и объемных акустических волнах (SAW и BAW), а также для обработки радиочастотных сигналов [5]. Свойства AlN можно дополнительно варьировать для получения желаемых функций, ориентированных на приложение.

В дополнение ко всему этому этот материал характеризуется достаточно умеренной величиной пьезоэлектрического коэффициента  $\sim 5.5$  пм/В [6] и одновременно значительным коэффициентом электромеханической связи  $\sim 0.23$  [7]. AlN легко выращивать при температуре ниже 400 °С, что упрощает интеграцию в технологию КМОП (CMOS). Тонкие пленки на основе AlN могут быть изготовлены в одной микросхеме, что позволит сэкономить время и затраты на производство. Таким образом, AlN является наиболее подходящим пьезоэлектрическим материалом для приложений.

AlN можно выращивать методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [8], химического осаждения из паровой фазы оксидов металлов (MOCVD) [9], импульсного лазерного осаждения (PLD) [10], реактивного магнетронного распыления (RMS) [7, 11] и т. д. Мы использовали RMS как экономически выгодный метод выращивания тонких пленок AlN. Выращивание и изготовление тонких пленок приборного качества, пригодных для интеграции в микроэлектромеханические системы (МЭМС), более сложны. Мощность распыления существенно влияет на скорость осаждения, качество кристаллов, морфологию поверхности и пьезоэлектрические свойства выращенных пленок. В большинстве работ, чисто приборного применения, AlN наносится при сравнительно высокой мощности распыления [12–17]. В этой работе мы стремимся наносить тонкие пленки AlN, ориентированные по оси  $c$ , при относительно низкой мощности распыления в диапазоне 100–125 Вт и определить нижнюю границу мощности распыления для получения ориентированных кристаллических плёнок.

Т а б л и ц а 1

*Экспериментальные параметры изготовленных образцов AlN*

Мишень	Al
Мощность распыления	100W, 125W
Температура распыления	300 °C
Давление в камере	$6 \times 10^{-7}$ mbar
Давление при распылении	$6.6 \times 10^{-3}$ mbar
Подложка	Si(111)

*Эксперимент.* Для выращивания тонкой пленки AlN посредством реактивного распыления использовалось радиочастотное магнетронное распыление. Детали осажденных пленок приведены в табл. 1. Пленки AlN выращивались на кремниевой подложке (111). Перед загрузкой образца в вакуумную камеру проводилась стандартная процедура очистки поверхности Si (RCA1, RCA2 и HF), чтобы избавиться от собственных оксидов на подложке. После загрузки образцов в вакуумную камеру ее откачивали до базового давления  $6 \times 10^{-7}$  мбар. Al-мишень предварительно распылялась в течение 10–15 минут газообразным аргоном для удаления оксидов с поверхности мишени при закрытом затворе мишени. Затем, вводя азот в качестве химически активного газа, выращивалась пленка AlN на Si (111) с температурой распыления 300 °C. Сохраняя все параметры распыления постоянными, были выращены пленки AlN при мощности распыления 100 и 125 Вт.

Толщину осажденных пленок измеряли профилометром Dektak XT Stylus. Для характеристики структурных свойств использовалась рентгеновская дифракция высокого разрешения (HRXRD), а для исследования топографических характеристик поверхности напыленных пленок AlN – атомно-силовая микроскопия (АСМ).

*Результаты и обсуждение.*

Структурный анализ: HRXRD. HRXRD был проведен для исследования влияния мощности распыления на осажденные тонкие пленки AlN. Для вюрцита плоскость AlN (002) является наиболее плотноупакованной плоскостью с характерными дифракционными рефлексами около  $36.05^\circ$ . Из приведенной на рис. 1 дифрактограммы видно, что тонкие пленки AlN, выращенные при мощности 100 Вт, лишены кристаллической структуры, тогда как пленки, выращенные при мощности 125 Вт, демонстрируют сильную ориентацию по оси *c* при угле дифракции  $36.06^\circ$ . Соответствующее значение ширины на полувысоте рефлекса от плоскости (002) составило  $0.38^\circ$ . Мы использовали закон Брэгга, уравнение Дебая Шеррера, для расчета параметра решетки в направлении оси

*c* и размера кристаллитов. Параметр решетки в направлении *c* и размер кристаллитов пленок AlN, выращенных при 125 Вт, составили  $4.97 \pm 0.05 \text{ \AA}$  и  $21.81 \pm 1.74 \text{ нм}$ , соответственно.

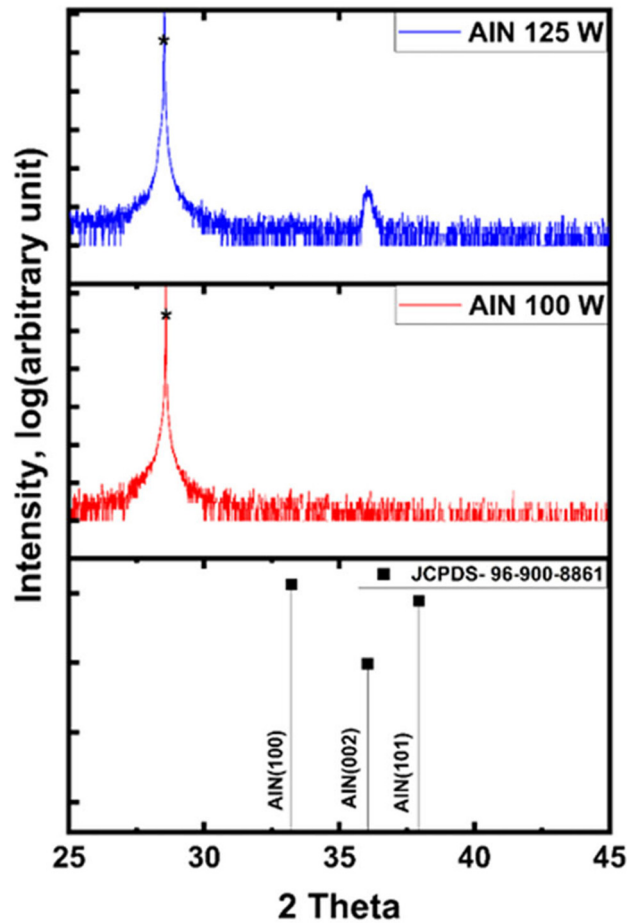


Рис. 1: Рентгеновские дифрактограммы (HRXRD) тонких пленок AlN, выращенных при мощности распыления 100 и 125 Вт.

Т а б л и ц а 2

Параметры шероховатости поверхности для пленок AlN

Свойства	AlN-100W	AlN-125W
Среднеквадратичная шероховатость ( $\text{\AA}$ )	1.76	7.00
Асимметрия поверхности	0.413700	-0.902700
Экссесс поверхности	4.830500	6.323900

При низкой мощности распыления (100 Вт) распыленные атомы Al и N имеют более низкую кинетическую энергию; соответственно, они могут сталкиваться с распыляемыми ионами и терять кинетическую энергию, прежде чем достигнут подложки и организуются в плотноупакованную структуру. Это может быть причиной аморфной структуры выращенных пленок AlN при мощности 100 Вт. При увеличении же мощности распыления от 100 до 125 Вт наблюдалось появление интенсивного рефлекса (002). Это свидетельствует о том, что по мере увеличения мощности распыления возможность распыляемых атомов Al и N достигнуть подложки и кристаллизироваться в плотноупакованную структуру вюрцита возрастает за счет их большей кинетической энергии.

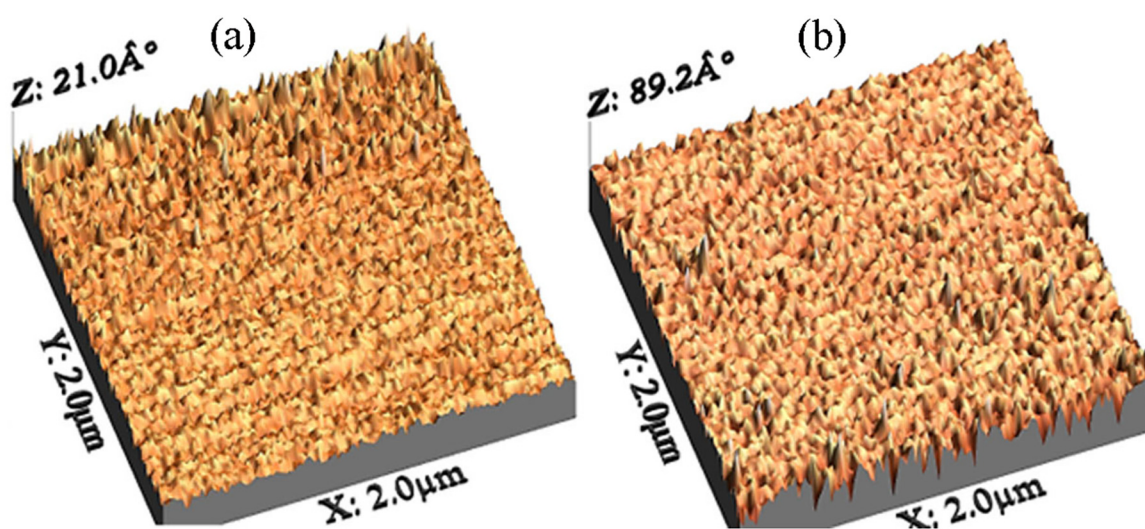


Рис. 2: Топография поверхности тонких пленок AlN, выращенных при мощности распыления 100 и 125 Вт. Данные получены методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Топография поверхности: АСМ. Топография поверхности тонких пленок AlN исследовалась с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) в постукивающем режиме. АСМ-изображения и шероховатость были обработаны и проанализированы с помощью программного обеспечения WSxM. На рис. 2 показана топография поверхности тонких пленок AlN, нанесенных при мощности распыления 100 и 125 Вт, соответственно. Среднеквадратическая (RMS) шероховатость в Å, асимметрия поверхности, эксцесс поверхности (безразмерные числа) обоих образцов сведены в табл. 2. Асимметрия поверхности и эксцесс поверхности говорят нам о распределении шероховатости, расположении впадин и пиков, присутствующих в пленках. Нулевой параметр асимметрии поверхности означает, что пленки, выращенные при мощности распыления 125 Вт, имеют симмет-

ричное распределение шероховатостей [18]. Среднеквадратическая шероховатость составила  $1.76 \text{ \AA}$  и  $7.00 \text{ \AA}$ , соответственно, для пленок, осажденных при мощности 100 и 125 Вт. Оба образца имеют среднеквадратичную шероховатость поверхности менее 3 нм. Это указывает на меньшие акустические потери в осажденных распылением пленках AlN, что является очень полезным свойством для их применения в электроакустических устройствах [19].

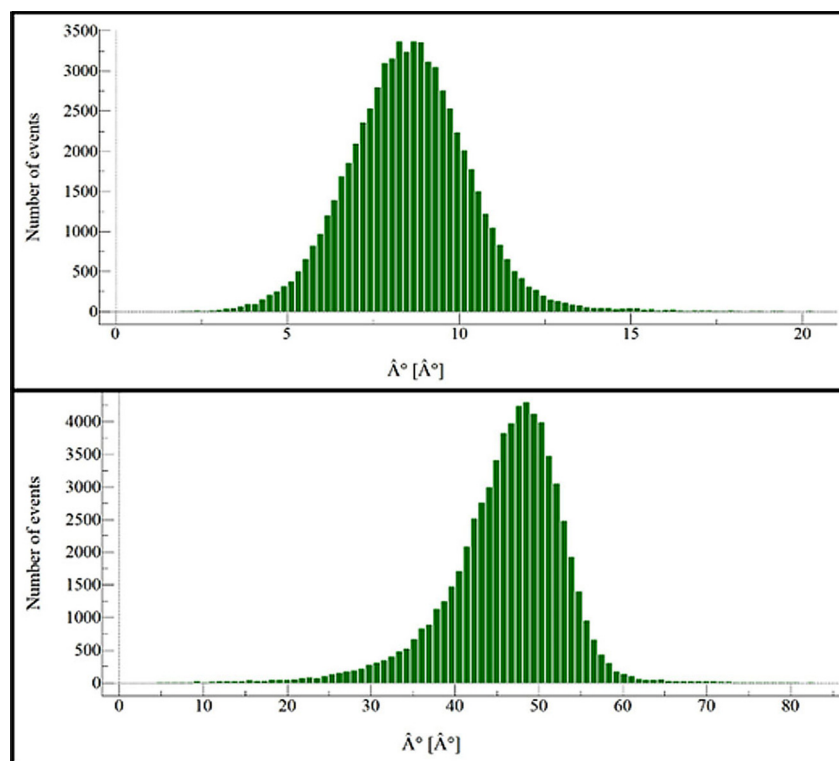


Рис. 3: Гистограммы распределения шероховатостей пленок AlN, полученные с помощью пакета программ WSX M.

*Заключение.* В данной работе методом магнетронного распыления выращены тонкие пленки AlN при относительно низкой мощности распыления (100 и 125 Вт) и температуре распыления  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Анализ HRXRD показал, что тонкие пленки AlN, выращенные при 100 Вт, были аморфными по своей природе из-за низкой кинетической энергии распыляемых атомов, тогда как пленки, выращенные при мощности распыления 125 Вт, имели сильную ориентацию вдоль кристаллографической оси  $c$ . Это указывает на то, что пленки, выращенные при мощности 125 Вт, имеют достаточную кинетическую энергию для распыленных атомов, чтобы достичь подложки и перестроиться в плотноупакованную структуру. АСМ-анализ показывает, что шероховатость пленок, выращенных

при 125 Вт, составила 7.00 Å, а распределение шероховатости в пленках симметрично – асимметрия распределения близка к нулю. Данные фазово-чистые пленки AlN в будущем могут быть использованы в пьезоэлектрических устройствах.

Работа финансировалась Департаментом науки и технологий правительства Индии в рамках гранта SRG/2019/002225 и Академией высшего образования Манипал (МАНЕ/CDS/PHD/IMF/2022). Р. Йотилакшми хотел бы выразить благодарность Академии высшего образования Манипал за предоставление индивидуального Т.М.А. гранта.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G. F. Iriarte, J. G. Rodríguez, F. Calle, *Mater. Res. Bull.* **45**, 1039 (2010). DOI: 10.1016/j.materresbull.2010.05.035.
- [2] A. R. Shishkin, A. A. Elagin, S. E. Mayorova, R. A. Beketov, *Recent Pat. Nanotechnol.* **10**, 146 (2016). DOI:10.2174/1872210510999160414150634.
- [3] V. Fuflyigin, E. Salley, A. Osinsky, P. Norris, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 3075 (2000). DOI: 10.1063/1.1324726.
- [4] Tsung-Tsong Wu, C.-C.M. IUTAM Symposium on Recent Advances of Acoustic Waves in Solids; Wu, T.-T., Ma, C.-C., Eds.; IUTAM Bookseries; Springer Netherlands: Dordrecht, **26**, ISBN 978-90-481-9892-4 (2010).
- [5] C. J. Chung, C. L. Wei, P. T. Hsieh, et al., *Mater. Sci. Forum* **654-656**, 1780 (2010). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.1780.
- [6] K. Tonisch, V. Cimalla, C. Foerster, et al., *Phys. Status Solidi Curr. Top. Solid State Phys.* **3**, 2274 (2006). DOI: 10.1002/pssc.200565123.
- [7] M. A. Dubois, P. Mural, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3032 (1999). DOI: 10.1063/1.124055.
- [8] Z. Hao, M. Park, D. G. Kim, et al., *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* 2019, 2019-June, 786–789. DOI: 10.1109/mwsym.2019.8700824.
- [9] E. Österlund, S. Suihkonen, G. Ross, et al., *J. Cryst. Growth.* **531**, 125345 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.125345>.
- [10] C. Stoeckel, C. Kaufmann, R. Hahn, et al., *J. Appl. Phys.* **116**, (2014). DOI: 10.1063/1.4887799.
- [11] H. Conrad, J. U. Schmidt, W. Pufe, et al., *Smart Sensors, Actuators, MEMS IV* **7362**, 73620J (2009). DOI: 10.1117/12.821715.

- [12] M. H. S. Alrashdan, A. A. Hamzah, B. Y. Majlis, M. F. Aziz, *IEEE Int. Conf. Semicond. Electron. Proceedings, ICSE* **72**, (2014). DOI: 10.1109/SMELEC.2014.6920798.
- [13] H. Jin, B. Feng, S. Dong, et al., *J. Electron. Mater.* **41**, 1948 (2012). DOI: 10.1007/s11664-012-1999-4.
- [14] N. Witit-Anun, J. Kaewkhao, S. Chaiyakun, *Adv. Mater. Res.* **770**, 177 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.770.177.
- [15] J. X. Zhang, H. Cheng, Y. Z. Chen, et al., *Surf. Coatings Technol.* **198**, 68 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.10.075>.
- [16] K.-H. Chiu, J.-H. Chen, H.-R. Chen, R.-S. Huang, *Thin Solid Films* **515**, 4819 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.12.181>.
- [17] L. Lamanna, F. Rizzi, F. Guido, et al., *Adv. Electron. Mater.* **5**, 1900095 (2019). DOI: 10.1002/aelm.201900095.
- [18] D. Pluchon, N. Huby, V. Vié, et al., *AFM Analysis on Polymer Optical Micro-Resonators: Investigation on Quality Factor Origin*. To Cite This Version: HAL Id: Hal-00854024 *AFM Analysis on Polymer Optical Micro-Resonators: Investigation on Quality Factor Origin*. 2013, DOI: 10.4236/opj.2013.34044.
- [19] M. A. Moreira, I. Doi, J. F. Souza, et al., *Microelectron. Eng.* **88**, 802 (2011). DOI: 10.1016/j.mee.2010.06.045.

Поступила в редакцию 23 октября 2023 г.

После доработки 8 апреля 2024 г.

Принята к публикации 9 апреля 2024 г.