



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.2>

УДК: 538.975

**ОПТИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ  
ДЛЯ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ ОАВ-РЕЗОНАТОРОВ**

**А.Ю. Куклев<sup>1,2,3</sup>, В.И. Струнин<sup>1,3</sup>, Л.В. Баранова<sup>1,3</sup>,  
Н.А. Давлеткильдеев<sup>1,3</sup>, Н.А. Чириков<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН,  
644024, Омск, пр. Карла Маркса, 15

<sup>2</sup> Омский научно-исследовательский институт приборостроения,  
644071, Омск, ул. Масленникова, 231

<sup>3</sup> Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,  
644077, Омск, пр. Мира, 55-А

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2025 г.

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования внутренних механических напряжений и показателя преломления тонких пленок AlN, полученных методом магнетронного осаждения при рабочем давлении в вакуумной камере 0,1 Па и 0,2 Па. Показано, что показатель преломления полученных пленок возрастает при увеличении мощности магнетронного разряда от 400 Вт до 1000 Вт при фиксированных давлениях 0,1 Па и 0,2 Па. Полученные значения механических напряжений в аналогичном интервале мощности разряда, говорят об уменьшении внутренних напряжений при увеличении рабочего давления с 0,1 Па до 0,2 Па, и находятся в диапазоне от 2,65 ГПа до 3,37 ГПа и от -0,27 ГПа до 1,84 ГПа.

**Ключевые слова:** внутренние напряжения, магнетронное распыление, нитрид алюминия, пьезоэлектрический резонатор, тонкие пленки.

**Финансирование:** Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

**Автор для переписки:** Куклев Александр Юрьевич, [alexanderkuklev@mail.ru](mailto:alexanderkuklev@mail.ru)

## **Введение**

Тонкие пьезоэлектрические пленки нитрида алюминия (AlN) все чаще используются в качестве компонента в различных областях микроэлектроники, например, при создании микроэлектромеханических систем (МЭМС), в качестве диэлектрических и пьезоэлектрических слоев при проектировании устройств акустоэлектроники [1, 2]. Физические свойства AlN, такие как: большая ширина запрещенной зоны (порядка 6 эВ), низкая шероховатость поверхности (2-6 нм), высокая скорость продольной акустической волны (11 км/с), значение продольного пьезомодуля  $d_{33}$  (4-5 пм/В) делают его перспективным материалом для использования в качестве пьезоэлектрического слоя в резонаторах на объемных акустических волнах (ОАВ) [3, 4].

Актуальной научно-технической задачей является создание высокодобротных пьезоэлектрических резонаторов и фильтров на основе пленок AlN. Такие устройства могут быть использованы для генерации и селекции сигналов, в системах беспроводной связи (5G, Wi-fi) и должны обеспечивать стабильную работу в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) от 1 ГГц до 20 ГГц. Наибольшее распространение получили конструкции СВЧ резонаторов на ОАВ, такие как: многочастотный составной резонатор, резонатор мембранныго типа, резонатор с воздушным зазором и резонатор с акустическим брэгговским отражателем [5]. Наиболее технологичным вариантом формирования многослойных тонкопленочных структур является метод вакуумного магнетронного распыления.

Основными параметрами пьезоэлектрического резонатора являются его добротность, резонансный промежуток и рабочая частота. Частота определяется толщиной пьезоэлектрической пленки, а добротность зависит от следующих параметров: пьезоэлектрический отклик, фазовый и стехиометрический состав

поликристаллической пленки, а также внутренние механические напряжения. На эти параметры влияют технологические режимы магнетронного способа формирования пленок, такие как: состав газовой смеси, рабочее давление, мощность разряда, температура подложки.

Целью данной работы является определение влияния рабочего давления в вакуумной камере и мощности магнетронного разряда, в процессе формирования пленок AlN, при фиксированной температуре подложки и составе газовой смеси, на их оптические и механические характеристики.

## **1. Методика эксперимента**

Формирование пленок AlN осуществлялось методом вакуумного магнетронного распыления мишени чистого Al (99,999 %) в реактивной газовой смеси аргона и азота, на установке для нанесения многокомпонентных покрытий. На ситалловых (СТ-50-1-0,6) и кремниевых (КДБ-10) подложках размерами 20x16 мм были получены серии образцов AlN в диапазоне мощностей от 400 Вт до 1000 Вт при фиксированном соотношении потока аргона к азоту – 4/6 sccm и давлениях в вакуумной камере – 0,1 Па и 0,2 Па. Рабочее давление в вакуумной камере поддерживалось путем регулировки положения высоковакуумного затвора турбомолекулярного насоса. Толщина пленок контролировалась в реальном времени, датчиком на основе кварцевого резонатора с чувствительностью – 0,05 нм/с. Температура подложки составляла – 350°C и поддерживалась в процессе осаждения пленок.

Исследование внутренних механических напряжений осуществлялось интерференционным методом на микроинтерферометре Линника МИИ-4. Радиус кривизны ситалловой подложки измерялся до и после осаждения пленки AlN. Расчет внутренних напряжений производился по формуле Стоуни [6, 7]:

$$\sigma_{BH} = \frac{\left( \frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_s} \right) \cdot E \cdot h_s^2}{6h(1-\gamma)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{bh}$  – величина механических напряжений (ГПа),  $h_s$  – толщина подложки,  $h_f$  – толщина нанесенного слоя (пленки),  $R_s$  и  $R_f$  – радиусы кривизны поверхности подложки до и после формирования пленки, соответственно,  $E$  – модуль Юнга материала пластины,  $\gamma$  – коэффициент Пуассона материала пластины.

Для тех же образцов, осажденных в едином вакуумном цикле на кремниевые пластины, определялся показатель преломления. Исследование показателя преломления осуществлялось с помощью метода спектральной эллипсометрии на основе решения обратной задачи эллипсометрии для оптической модели «среда/пленка/подложка» путем подгонки модельных спектров эллипсометрических углов  $\Delta$  и  $\Psi$  к полученным экспериментальным спектрам [8].

Спектры эллипсометрических углов регистрировались с помощью автоматического спектрального эллипсометра АСЭБ-10М в диапазоне длин волн 350–1050 нм при угле падения 70°.

## 2. Результаты и обсуждение

Технологические режимы магнетронного осаждения, результаты измерения показателя преломления и внутренних напряжений пленок AlN, полученных при соотношении потоков Ar/N<sub>2</sub> – 4/6 sccm и давлении в вакуумной камере – 0,1 Па представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерений в пленках AlN полученных при давлении 0,1 Па.

Образец	Температура подложки, °C	Мощность магнетронного разряда, Вт	Механические напряжения пленок AlN, ГПа	Показатель преломления
№ 1	350	400	2,65	1,94
№ 2	350	600	2,6	1,97
№ 3	350	800	3,04	2,08
№ 4	350	1000	3,37	1,99

Исходя из данных, представленных в таблице, был построен график зависимости механических напряжений в полученных пленках AlN (рис. 1).

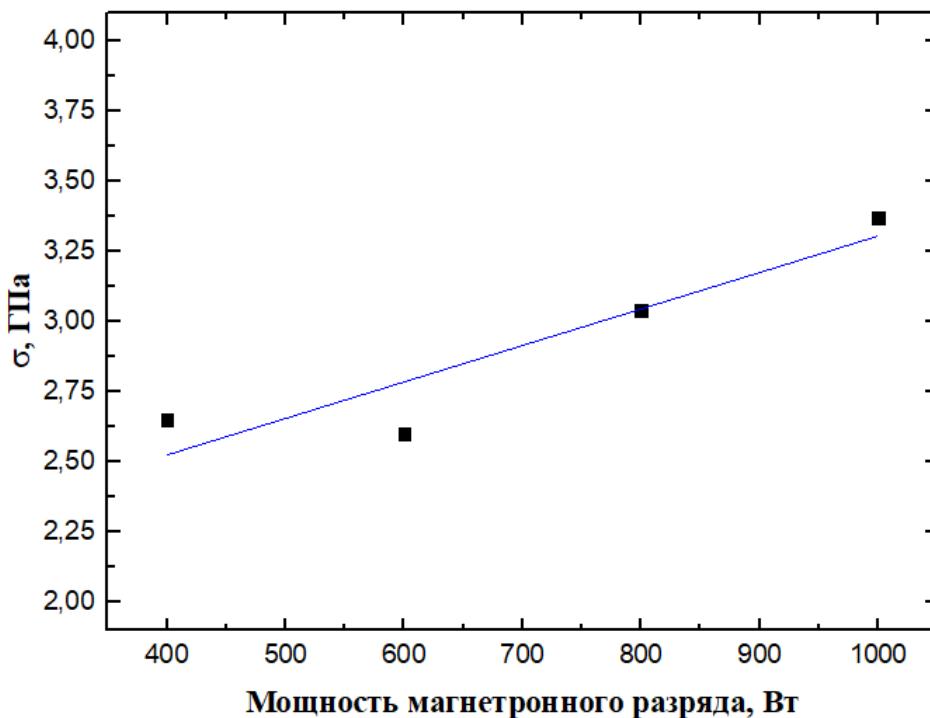


Рис. 1. Зависимость внутренних напряжений пленок AlN от мощности магнетронного разряда при давлении 0,1 Па.

Как показано на рисунке 1 значение  $\sigma_{\text{вн}}$  возрастает от 2,65 ГПа до 3,37 ГПа с ростом мощности магнетронного разряда от 400 Вт до 1000 Вт, что связано с увеличением кинетической энергии атомов алюминия, с ростом мощности магнетронного разряда и получением более плотноупакованной столбчатой структуры кристаллитов в объеме пленки [9].

На рис. 2 представлена зависимость показателя преломления от мощности магнетронного разряда в пленках AlN полученных при соотношении Ar/N<sub>2</sub> – 4/6 и рабочем давлении – 0,1 Па.

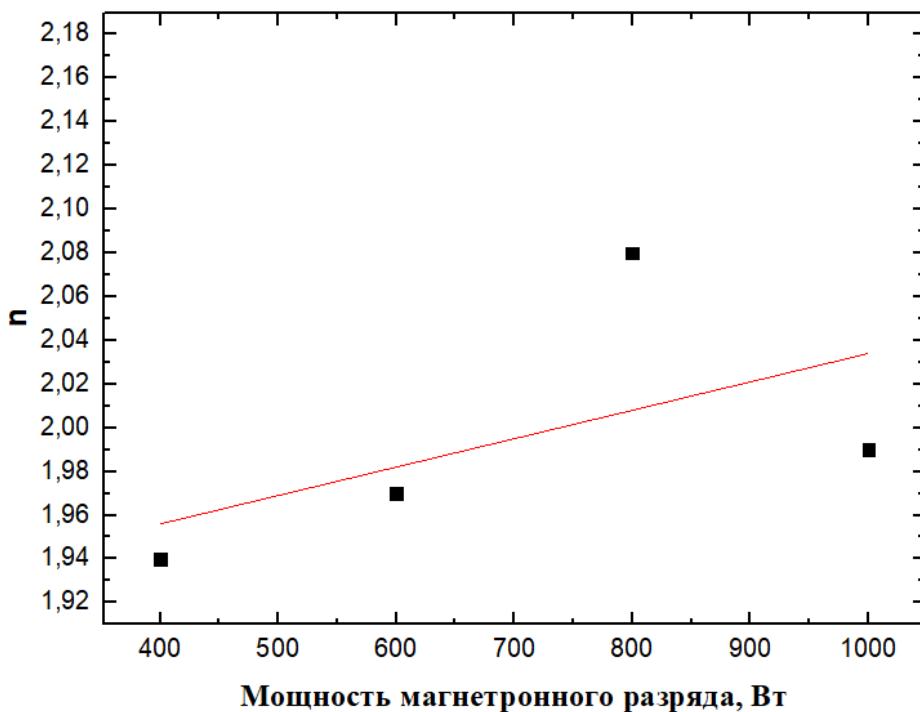


Рис. 2. Зависимость показателя преломления пленок AlN от мощности магнетронного разряда при давлении 0,1 Па.

Как известно из литературных данных, показатель преломления поликристаллических пленок AlN находится в диапазоне от 1,9 до 2,2 [10-12], что обусловлено различным стехиометрическим составом Al:N в получаемых пленках.

Технологические режимы магнетронного осаждения, результаты измерения показателя преломления и внутренних напряжений пленок AlN, полученных при соотношении потоков Ar/N<sub>2</sub> – 4/6 sccm и давлении в вакуумной камере – 0,2 Па представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерений в пленках AlN полученных при давлении 0,2 Па.

Образец	Температура подложки, °С	Мощность магнетронного разряда, Вт	Механические напряжения пленок AlN, ГПа	Показатель преломления
№ 5	350	400	-0,27	2,08
№ 6	350	600	0,85	2,11
№ 7	350	800	1,84	2,12
№ 8	350	1000	1,2	2,13

Исходя из данных, представленных в таблице, был построен график зависимости механических напряжений в полученных пленках AlN (рис. 3).

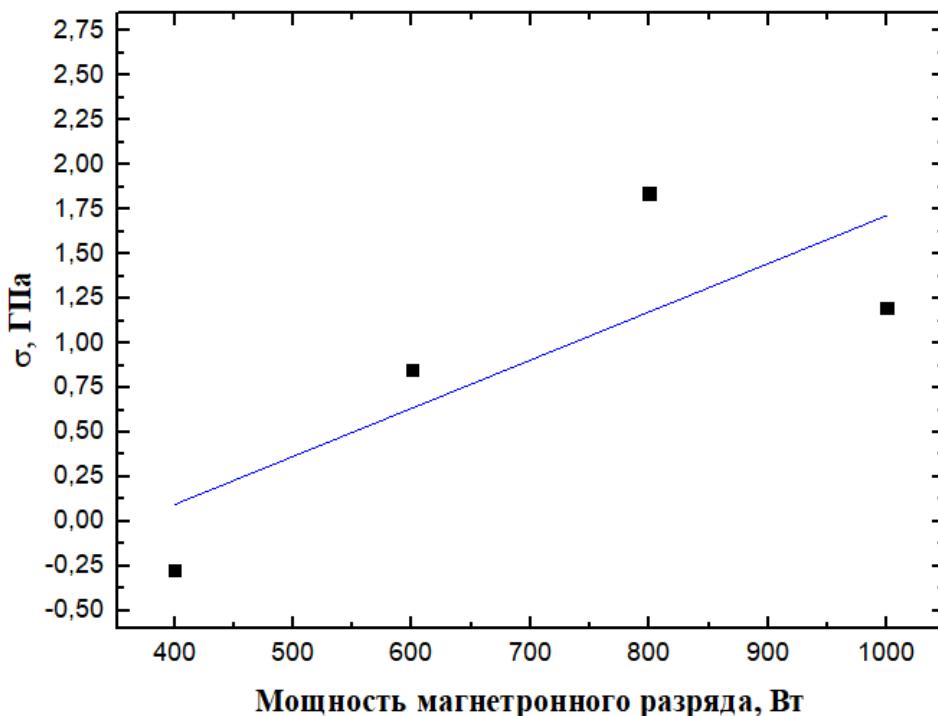


Рис. 3. Зависимость внутренних напряжений пленок AlN от мощности магнетронного разряда при давлении 0,2 Па.

Как показано на рисунке 3 значение  $\sigma_{\text{вн}}$  возрастает от -0,27 ГПа до 1,84 ГПа, при увеличении мощности магнетронного разряда от 400 Вт до 800 Вт и уменьшаются до 1,2 ГПа, при дальнейшем увеличении мощности до 1000 Вт, что можно объяснить увеличением количества распыляемого алюминия и влиянием столкновений между самими атомами алюминия, что снижает их кинетическую энергию при осаждении на подложку, в результате чего снижается плотность упаковки кристаллитов [9]. Полученные результаты коррелируют с работой [13], в которой исследовались пленки AlN полученные DC магнетронным осаждением при рабочем давлении 0,2 Па, где с ростом мощности от 300 Вт до 600 Вт, механические напряжения возрастили с 0,9 ГПа до 1,3 ГПа, а затем снижались до 1,2 ГПа, при росте мощности до 900 Вт. В работе [14] также отмечается увеличение внутренних напряжений от 0,7 ГПа до 1,3 ГПа с ростом мощности магнетронного разряда при ВЧ-магнетронном осаждении.

На рис. 4 представлена зависимость показателя преломления для пленок, полученных при рабочем давлении – 0,2 Па.

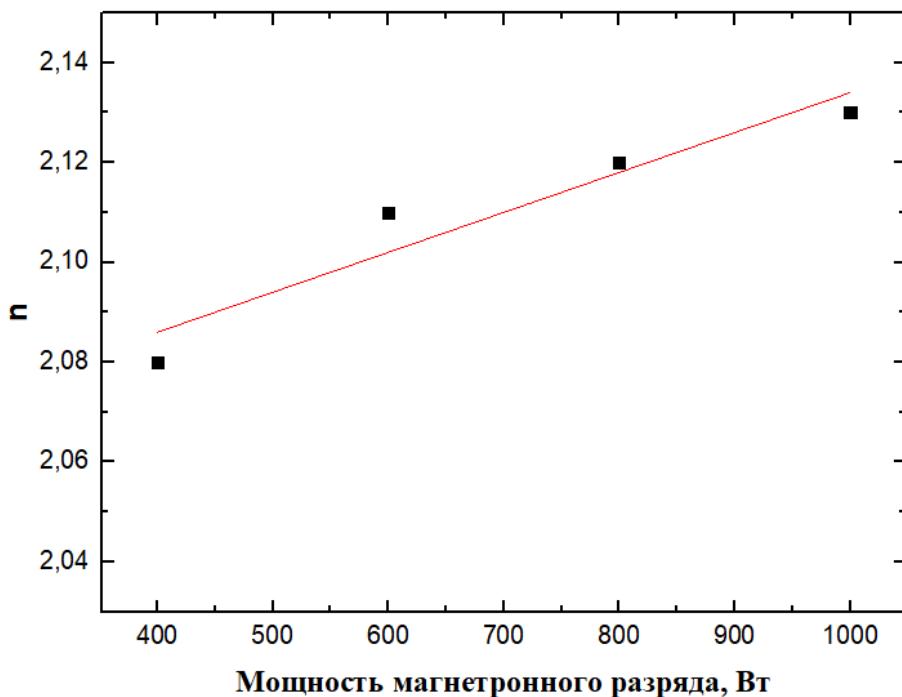


Рис. 4. Зависимость показателя преломления от мощности магнетронного разряда при давлении 0,2 Па.

На представленных зависимостях можно наблюдать увеличение показателя преломления пленок AlN от 2,08 до 2,13 с возрастанием мощности магнетронного разряда от 400 Вт до 1000 Вт.

Можно сделать вывод, что показатель преломления пленок увеличивается с мощностью магнетронного разряда при фиксированном давлении. Увеличение показателя преломления с ростом мощности объясняется увеличением количества распыляемого алюминия с поверхности мишени, в результате чего пленка обогащается Al, и ширина запрещенной зоны уменьшается, что обсуждается в работах [10-12]. Это обусловлено большим коэффициентом распыления мишени аргоном, чем азотом, ввиду меньшего потенциала ионизации и большей атомной массы аргона.

Увеличение давления в вакуумной камере с 0,1 Па до 0,2 Па, также приводит к возрастанию значения показателя преломления. При распылении в реактивной атмосфере Ar/N<sub>2</sub> увеличение давления от 0,1 Па до 0,2 Па, приводит к росту концентрации рабочих газов, но т.к. мишень распыляется

преимущественно аргоном, ввиду большего коэффициента распыления ионами аргона в сравнении с ионами молекулярного и атомарного азота, увеличение давления приводит к увеличению количества распыляемого алюминия, что сопровождается увеличением силы тока магнетронного разряда при заданной мощности и фиксированном составе газовой смеси (рис. 5) и последующему формированию пленки, обогащенной алюминием, что как следствие уменьшает ширину запрещенной зоны и объясняет увеличение показателя преломления.

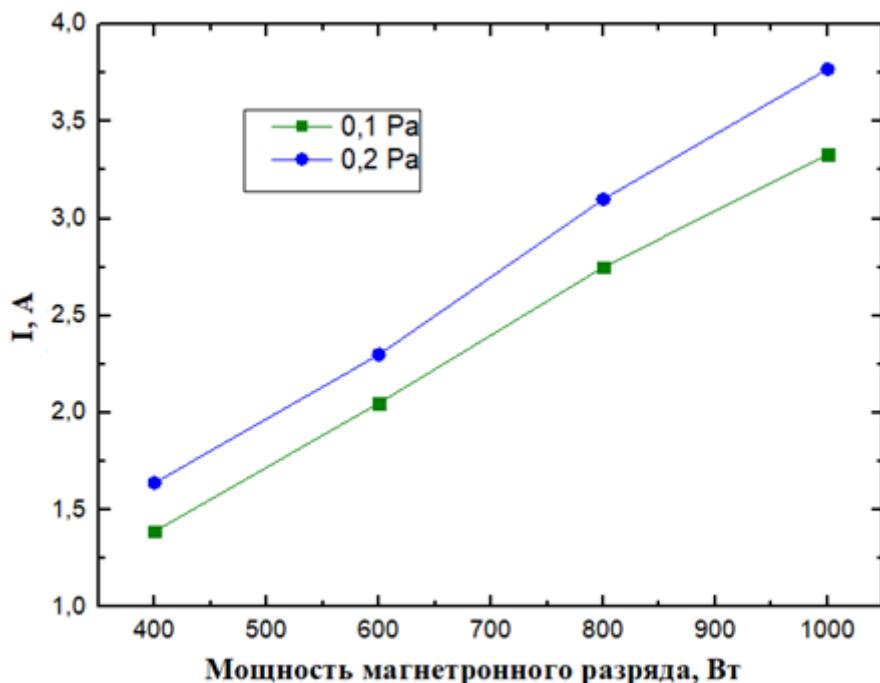


Рис. 5. Зависимость силы тока магнетронного разряда от его мощности при рабочем давлении 0,1 Па и 0,2 Па.

На механические напряжения в пленках нитрида алюминия влияют несколько факторов. Механические напряжения могут быть вызваны как внутренними структурными факторами (в процессе роста пленки) обусловленными технологическими режимами формирования, так и внешними (взаимодействие структуры -пленка-подложка-) [15]. В работе [16] при схожих технологических параметрах наблюдался переход от сжимающих напряжений к растягивающим с увеличением толщины пленок от 0,01 мкм до 1,1 мкм. В работах [17] и [18] также приводятся результаты о росте растягивающих напряжений при увеличении количества аргона в составе реактивной газовой

смеси и переходе напряжений от сжимающих к растягивающим с возрастанием мощности разряда, соответственно.

Разница в результатах экспериментальных исследований механических напряжений в пленках AlN обусловлена отличительными технологическими особенностями систем магнетронного осаждения, таких как: расстояние от мишени до подложки, тип и мощность магнетронного разряда, материал и температура подложки, рабочее давление в вакуумной камере, состав газовой смеси, наличие или отсутствие потенциала, подаваемого на подложку, что подтверждается исследованиями авторов статей [9, 15-18].

## **Заключение**

Показано, что показатель преломления полученных пленок находится в пределах от 1,93 до 2,08 для серии образцов при фиксированном давлении 0,1 Па, возрастая в диапазоне мощностей от 0,4 кВт до 1 кВт. Значения показателя преломления для аналогичной серии при фиксированном давлении 0,2 Па приводят к более высоким значениям показателя преломления от 2,08 до 2,13.

Значения внутренних механических напряжений при изменении мощности разряда от 0,4 кВт до 1 кВт лежат в диапазоне от 2,65 ГПа до 3,37 ГПа для серии пленок, полученных при давлении 0,1 Па, что говорит о наличии растягивающих внутренних напряжений. Для серии пленок, полученных при 0,2 Па, эти значения лежат в диапазоне от -0,27 ГПа до 1,84 ГПа, что говорит о переходе от сжимающих напряжений к растягивающим.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при магнетронном осаждении пленок нитрида алюминия повышение давления в камере приводит к увеличению показателя преломления пленок и к снижению механических напряжений в пленках.

**Финансирование:** Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 124022500291-6).

## Литература

1. Закирова Р.М., Прошутин Н.А., Федотова И.В., Алалыкин А.С., Крылов П.Н. Получение и исследование пленок нитрида алюминия // ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И МЕЗОСКОПИЯ. 2024. Том 26, № 3. С. 67-79. <https://doi.org/10.62669/17270227.2024.3.34>
2. Schlögl M., Weißenbach J., Schneider M., Schmid U. Stress engineering of polycrystalline aluminum nitride thin films for strain sensing with resonant piezoelectric microbridges // Sensors & Actuators: A. Physical 349 (2023) 114067. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.114067>
3. Fiedler H., Jovic V., Mitchell D.R., Levener J., Anquillare E., Smith K.E., and Kennedy J. Tuning the electromechanical properties and polarization of aluminium nitride by ion beam-induced point defects // Acta Mater. 203, 116495 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.116495>
4. Hickman A.L., Chaudhuri R., Bader S.J., Nomoto K., Li L., Hwang J.C.M., Xing H.G., Jena D. Next generation electronics on the ultrawide-bandgap aluminum nitride platform // Semicond. Sci. Technol. 2021, 36, 044001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/abe5fd>
5. Улаева Т.Н., Чириков Н.А., Жилин Н.М., Давлеткильдеев Н.А., Казаков В.И., Шакин О.В. Влияние конструктивных параметров брэгговских отражателей на температурные зависимости резонансных характеристик микроэлектронных ОАВ-резонаторов с пьезоэлектрическим слоем из нитрида алюминия // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №11. С. 4-13.
6. Marauska S., Hrkac V., Dankwort T., Jahns R., Quenzer H.J., Knöchel R., Kienle L., Wagner B. Sputtered thin film piezoelectric aluminum nitride as a functional MEMS material // Microsyst Technol (2012) 18:787–795 <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1493-1>

7. Дюжев Н.А., Дедкова А.А., Гусев Е.Э., Новак А.В. Методика измерения механических напряжений в тонких пленках на пластине с помощью оптического профилометра // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. Том 21, № 4, 2016, с. 367-372.
8. Давлеткильдеев Н.А., Мосур Е.Ю. Оценка фазового состава тонких пленок оксида олова на основе анализа спектров их оптических параметров // Техника радиосвязи. 2020. Вып. 1 (44). С. 104–109. <https://doi.org/10.33286/2075-8693-2020-44-104-109>
9. Hiroto Takeuchi, Makoto Ohtsuka, Hiroyuki Fukuyama. Effect of sputtering power on surface characteristics and crystal quality of AlN films deposited by pulsed DC reactive sputtering // Phys. Status Solidi B 252, No. 5, 1163–1171 (2015). <https://doi.org/10.1002/pssb.201451599>
10. 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. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-6-1049-1057>
11. Marauska S. et al. Sputtered thin film piezoelectric aluminium nitride as a functional MEMS material and CMOS compatible process integration // Procedia Engineering 25 (2011) 1341 – 1344. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.331>
12. Venkataraj S., Severin D., Drese R., Koerfer F., & Wuttig M. (2006). Structural, optical and mechanical properties of aluminium nitride films prepared by reactive DC magnetron sputtering // Thin Solid Films, 502(1-2), p. 235–239. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.07.281>
13. Sandager M.K., Kjelde C., and Popok V. Growth of thin AlN films on Si wafers by reactive magnetron sputtering: Role of processing pressure, magnetron power and nitrogen/argon gas flow ratio // Crystals 12, 1379 (2022). <https://doi.org/10.3390/cryst12101379>
14. Suharyadi H. The influence of substrate bias and sputtering pressure on the deposited aluminium nitride for magnetoelectric sensors // 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1517 012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1517/1/012104>

15. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях // ЖТФ, 2020, том 90, выпуск 12, 1971–1994.
16. Pobedinskas P., Bolsée J.-C., Dexters W., Ruttens B., Mortet V., D'Haen J., Manca J.V., and Haenen K. Thickness dependent residual stress in sputtered AlN thin films // Thin Solid Films 522, 180–185 (2012).  
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.08.015>
17. Deng Gang Zong, Chung Wo Ong, Manju Aravind, Mei Po Tsang, Chung Loong Choy, Deren Lu & Dejun Ma. Tensile strength of aluminium nitride films // Philosophical Magazine, 84:31, 3353-3373, <https://doi.org/10.1080/14786430412331283604>
18. Marc-Alexandre Dubois; Paul Muralt. Stress and piezoelectric properties of aluminum nitride thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering // J. Appl. Phys. 89, 6389 (2001).  
<https://doi.org/10.1063/1.1359162>

**Для цитирования:**

Куклев А.Ю., Струнин В.И., Баранова Л.В., Давлеткильдеев Н.А., Чириков Н.А. Оптические и механические характеристики пленок нитрида алюминия, полученных методом магнетронного распыления для высокодобротных ОАВ-резонаторов // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.2>