

**Влияние стехиометрии состава пленок нитрида алюминия на
диэлектрический отклик**

А.В. Солнышкин¹, И.Т. Зезянов¹, О.Н. Сергеева¹, С.А. Кукушкин², М.В. Старицын³,
Ш.Ш. Шарофидинов⁴, Н.В. Шаренкова⁴, С.В. Сенкевич⁴, И.П. Пронин⁴

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33

²ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН»

199178, Россия, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 61 литера А

³ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных
материалов «Прометей» им. И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49

⁴ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

a.solnyshkin@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.172

Аннотация: Исследовано влияние нестехиометричности тонких монокристаллических слоев нитрида алюминия (AlN) на их структуру и диэлектрические свойства. Тонкие слои AlN были выращены методом хлорид-гидридной эпитаксии на монокристаллической подложке кремния с наноразмерным буферным слоем карбида кремния, выращенный методом твердотельного замещения ($SiC/Si(111)$). Фазовый анализ структур проводился методом рентгеноструктурного анализа с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7, а изучение микроструктуры и состав поперечных сечений проводилось на растровом электронном микроскопе Lira3 Tescan. Слои нитрида алюминия различались составом – с сильной нестехиометричностью (~18%) и составом, близким с стехиометрии (~ 4%). Выявлено, что увеличение нестехиометричности приводит к возрастанию межплоскостного расстояния гексагональной (вюрцитной) структуры и деформации кристаллической решетки тонких слоев нитрида алюминия. Для нестехиометрических пленок наблюдалось усиление релаксационных явлений диэлектрической проницаемости в низкочастотной области спектра и рост диэлектрических потерь в 1,5-2 раза в исследованной области частот, а также в условиях приложения смещающих полей. Предполагается, что наличие асимметрии вольт-фарадных характеристик обусловлено вкладом объемно-зарядовой поляризации и изменением величины спонтанной поляризации.

Ключевые слова: хлорид-гидридная эпитаксия, подложка нанокарбида кремния на кремнии, эпитаксиальные слои AlN , нестехиометричность состава, диэлектрические свойства.

Солнышкин Александр Валентинович – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры физики конденсированного состояния вещества, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Зезянов Иван Тимофеевич – аспирант 4 года обучения, кафедра физики конденсированного состояния вещества, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Сергеева Ольга Николаевна – к.ф.-м.н., доцент, ведущий инженер кафедры физики конденсированного состояния вещества, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Кукушкин Сергей Арсеньевич – д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией структурных и фазовых превращений в конденсированных средах, ФГБУН «Институт проблем машиноведения РАН»

Старицын Михаил Владимирович – инженер 3 категории, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

Шаренкова Наталия Викторовна – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

Сенкевич Станислав Викторович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

Пронин Игорь Петрович – д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

Original paper

Influence of stoichiometry of aluminum nitride films composition on the dielectric response

A.V. Solnyshkin¹, I.T. Zezyanov¹, O.N. Sergeeva¹, S.A. Kukushkin², M.V. Staritsyn³,
Sh.Sh. Sharofidinov⁴, N.V. Sharenkova⁴, S.V. Senkevich⁴, I.P. Pronin⁴

¹*Tver State University, Tver, Russia*

²*Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, St. Petersburg, Russia*

³*NRC «Kurchatov institute» – CRISM «Prometey», St. Petersburg, Russia*

⁴*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.172

Abstract: The effect of non-stoichiometry of thin single-crystal layers of aluminum nitride (*AlN*) on their structure and dielectric properties was investigated. Thin *AlN* layers were grown by chloride-hydride epitaxy on a silicon substrate with a nanoscale buffer layer of silicon carbide grown by solid state substitution (*SiC/Si(111)*). Phase analysis of the structures was carried out by X-ray structural analysis using X-ray DRON-7 diffractometer, and the microstructure and composition of cross sections were studied using Lira3 Tescan scanning electron microscope. The aluminum nitride layers differed in composition - with strong non-stoichiometry (~ 18%) and with a composition close to stoichiometry (~ 4%). It was revealed that the increase in non-stoichiometry leads to an increase in the interplanar distance of the hexagonal (wurtzite) structure and deformation of the crystal lattice of thin layers of aluminum nitride. For non-stoichiometric films, an increase in relaxation phenomena of permittivity in the low-frequency region of the spectrum and an increase in dielectric losses by 1.5-2 times in the studied frequency range were observed as well as under the conditions of applying bias fields. It is assumed that the presence of asymmetry in the capacitance-voltage characteristics is due to a contribution of the volume-charge polarization and a change in the magnitude of spontaneous polarization.

Keywords: chloride hydride epitaxy, nano carbide silicon on silicon substrate, *AlN* epitaxial layers, non-stoichiometry of composition, dielectric properties.

Alexander V. Solnyshkin – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Condensed Matter Physics, Tver State University, ORCID: 0000-0002-4044-8761

Ivan T. Zezyanov – 4th postgraduate student, Department of Condensed Matter Physics, Tver State University

Olga N. Sergeeva – Ph. D., Associate Professor, Leading Engineer of the Department of Condensed Matter Physics, Tver State University, ORCID: 0000-0001-9469-4063

Sergey A. Kukushkin – Dr. Sc., Professor, Head of laboratory, Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, ORCID: 0000-0002-2973-8645

Mikhail V. Staritsyn – Engineer of the 3rd category, NRC «Kurchatov institute» – CRISM «Prometey», ORCID: 0000-0002-0088-4577

Shukrillo S. Sharofidinov – Ph. D., Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0003-0354-5981

Natalya V. Sharenkova – Ph. D., Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0001-6471-6233

Stanislav V. Senkevich – Ph. D., Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0002-4503-1412

Igor P. Pronin – Dr. Sc., Leading Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0003-3749-8706

Поступила в редакцию/received: 01.07.2025; после рецензирования/revised: 27.07.2025; принята/accepted: 30.07.2025.

1. Введение

В последнее время нитрид алюминия (*AlN*) все больше используется в силовой электронике и светодиодной технике, в которых используются гетероструктуры на основе нитридов галлия, индия и алюминия [1-3]. Нитрид алюминия является широкозонным полупроводником с величиной запрещенной зоны 6,3 эВ. Его кристаллическая структура относится к вюрцитной группе кристаллов и характеризуется полярной гексагональной

осью. Низкие диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери в сочетании с приемлемыми пьезоэлектрическими свойствами позволяет рассматривать нитрид алюминия как один из наиболее эффективных материалов современной микроэлектромеханики (*MEMS*) [4-6]. Кроме того, тонкие пленки *AlN* проявляют высокие пьезоэлектрические свойства и могут быть эффективными материалами для разнообразных устройств ИК-техники [7-9].

Также пристальное внимание обращено к исследованию сегнетоэлектрических свойств тонких пленок нитридов, где атомы алюминия были частично заменены скандием ($Al_{1-x}Sc_xN$) [10-14]. В большинстве своем поликристаллические (текстурированные) пленки субмикронных толщин были получены методом реактивного ионно-плазменного распыления металлических мишеней и *Sc*, которые осаждались на технологически значимые подложки. В частности показано, что спонтанная поляризация в таких тонкопленочных соединениях может достигать рекордных для сегнетоэлектриков значений $\sim 100-150$ мкКл/см² [12-14]. Однако коэрцитивные поля в таких соединениях оказываются на полтора-два порядка выше, чем, например, в перовскитовых сегнетоэлектриках и составляют $\sim 2-5$ МВ/см (при содержании атомов скандия 43-27% соответственно) [12]. Уменьшение содержания скандия приводило к увеличению коэрцитивного поля, и в тонких пленках чистого нитрида алюминия это поле достигало величин 6-8 МВ/см [14]. Таким образом, данные работ [12-14] свидетельствуют о том, что поляризация в тонких пленках нитрида алюминия может переключаться под действием сильного внешнего поля.

В этой связи вновь возрастает интерес непосредственно к исследованию физических свойств нитрида алюминия, как кристаллов, так и монокристаллических пленок, исследований по которым явно не хватает [15-17]. Малое число таких работ связано, по всей видимости, с недостатком эффективных (конкурентоспособных) методов их выращивания и низким качеством структуры, что препятствует возможности приложения огромных электрических полей (свыше 10^7 В/см), которые необходимы для исследования процессов переключения поляризации. В этой связи в настоящей работе исследуются структура и диэлектрические свойства эпитаксиальных пленок *AlN*, выращенных методом хлорид-гидридной эпитаксии (ХГЭ) [18-19].

2. Объекты и методы исследования

В работе проводилось сравнительное исследование тонких слоев, эпитаксиально выращенных методом ХГЭ на подложке карбида кремния на кремнии (*SiC/Si*) [18, 19]. Монокристаллический буферный нанослой

на кремниевой подложке толщиной ~ 100 нм был сформирован методом замещения атомов [20, 21], что позволяет выращивать тонкие слои с минимальным (менее 1%) рассогласованием параметров решетки.

Характеризация структуры исследуемых пленок $AlN/SiC/Si$ проводилась методами рентгеноструктурного фазового анализа $\theta-2\theta$ (рентгеновский дифрактометр Дрон-7) и растровой электронной микроскопии (Lira3 Tescan). Для определения состава пленок использовался энергодисперсионный детектор X-Max. Энергия зондирующего электронного пучка составляла 20 кэВ. Для проведения электрофизических измерений на свободную поверхность AlN наносились платиновые контактные площадки размером 1×1 мм, а нижний контакт формировался нанесением серебряного электрода на проводящий скот кремниевой подложки.

Измерения емкости проводились с помощью измерителя иммитанса E7-30 в частотном диапазоне $25 - 3 \cdot 10^6$ Гц. Величина измерительного напряжения составляла 1 В.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) проанализированы торцовые сколы $AlN/SiC/Si(111)$ структур, полученных в режимах отбора (регистрации) вторичных электронов (левая часть изображений) и обратно рассеянных электронов (правая часть изображений), на которых прослеживаются все слои, входящие в структуры (см. рис. 1). Анализ исследуемых структур тонких слоев AlN показал, что они отличаются по своему составу. Среднее элементное соотношение атомов азота и алюминия, измеренное на сколе первого образца, составляло $N/Al = 54,1/45,9$, что свидетельствует о достаточно сильном отклонении от стехиометрии состава пленки нитрида алюминия. Во втором образце состав AlN был близок к стехиометрическому и составлял $N/Al = 49,0/51,0$.

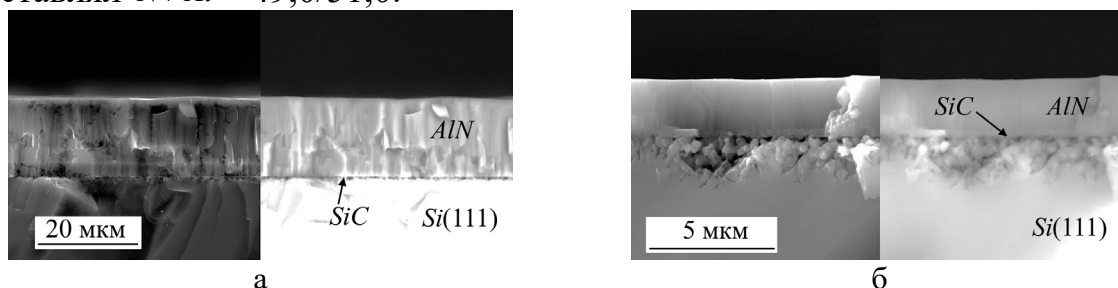


Рис. 1. СЭМ изображения поперечных сколов в образцах нестехиометрического (а) и состава, близкого к стехиометрическому (б).

Если в первом случае наблюдалось существенное отклонение состава от стехиометрического, недостаток в котором атомов алюминия составлял $\sim 18\%$, то во втором случае, напротив, наблюдался некоторый

избыток атомов алюминия, достигающий ~4%. Толщина слоя AlN , определенная по данным СЭМ для слоя нестехиометрического состава, составляла 15,6 мкм (см. рис. 1 а), а для слоя состава, близкого к стехиометрическому (см. рис. 1 б), – 1,8 мкм.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа положение рефлекса 002 гексагональной структуры вюрцита на дифрактограмме соответствовала $2\theta = 35,8^\circ$ для образца нестехиометрического состава и $2\theta \sim 36,15^\circ$ для образца состава, близкого к стехиометрическому (см. рис. 2). В первом случае наблюдался достаточно уширенный рефлекс с полушириной $\sim 0,19^\circ$ (см. рис. 2 а). Во втором образце наблюдалось расщепление на два отдельных узких пика, соответствующих $2\theta \sim 36,10^\circ$ и $\sim 36,20^\circ$. По всей видимости, смещение рефлекса 002 на дифрактограмме (см. рис. 2 а) в сторону меньших углов θ (т.е. увеличение межплоскостного расстояния гексагональной решетки на величину $\sim 1\%$, с 0,499 до 0,504 нм) непосредственно связано с появлением нестехиометричности в слое нитрида алюминия и локальным разбросом состава слоев. Подобное элементное соотношение может способствовать деформации решетки и уширению рефлекса.

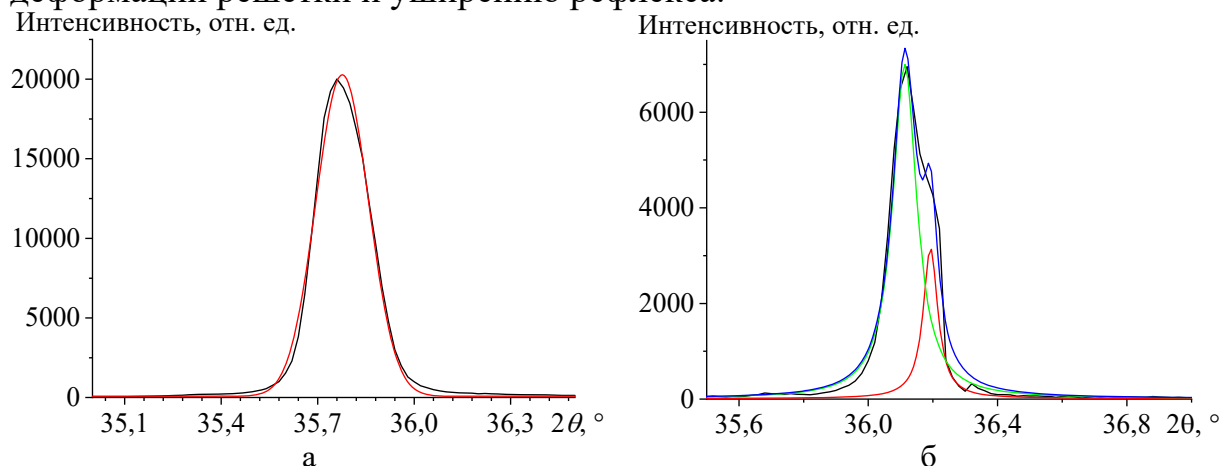


Рис. 2. Фрагменты дифрактограмм (2θ , рефлекс 002) тонких слоев AlN образцов нестехиометрического (а) и состава, близкого к стехиометрическому (б).

Поскольку исследуемые тонкие слои, сформированные на кремниевых подложках, являются гетероструктурами, были исследованы их диэлектрические свойства в зависимости от частоты измерительного электрического поля. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (ϵ) для слоев нитрида алюминия, отличающихся по стехиометрии, представлены на рис. 3. Как видно из графиков, в области низких частот до 10^3 Гц наблюдается незначительная дисперсия диэлектрической проницаемости, которую можно связать с небольшим вкладом проводимости тонкого слоя. Однако для слоя, отличающегося сильной нестехиометричностью состава (см. рис. 3 а) величина ϵ несколько больше при 10^2 Гц, чем для слоя с составом, близким к

стехиометрическому (см. рис. 3 б). Начиная с частоты $5 \cdot 10^5$ Гц, наблюдается незначительный ее рост. Такое поведение характерно для всех исследуемых конденсаторных структур и может быть связано с наличием объемно-зарядовой поляризации, которая возникает на границе раздела и дает вклад в величину диэлектрической проницаемости.

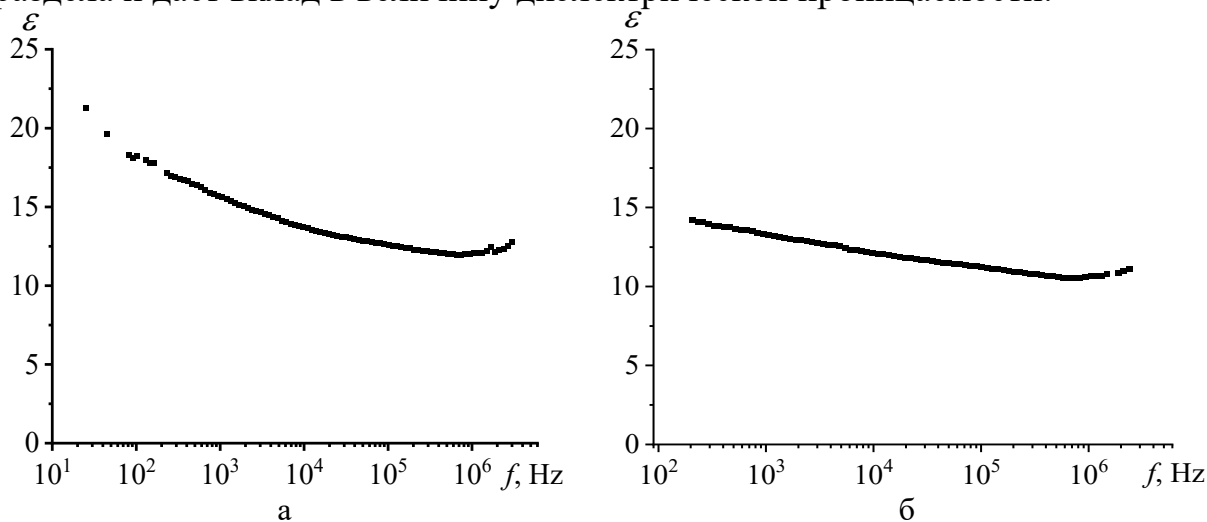


Рис. 3. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости структур: нестехиометрического (а) и состава, близкого к стехиометрическому (б).

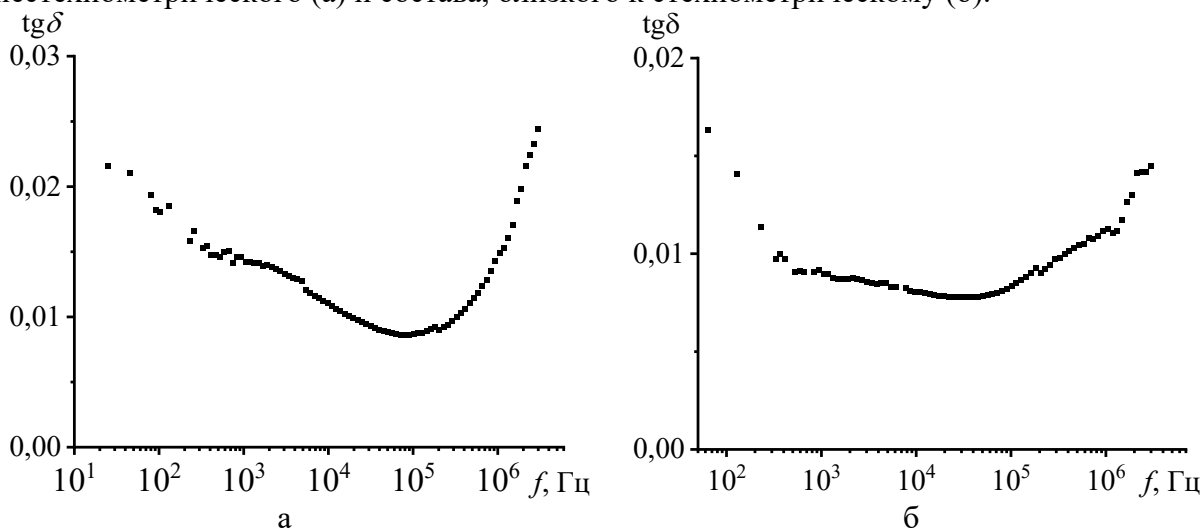


Рис. 4. Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь структур $AlN/SiC/Si$, нестехиометрического (а) и состава, близкого к стехиометрическому (б).

Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) от частоты, представленные на рис. 4, в большей степени характеризуют наличие дисперсии, чем зависимости диэлектрической проницаемости. Как видно из рис. 4, диэлектрические потери в пленках достаточно малы, и для стехиометрического состава (см. рис. 4 б) в интервале частот $1 - 10^3$ Гц не превышают 1%. Относительно слабая дисперсия диэлектрических потерь в низкочастотном диапазоне от 10 до 10^3 Гц может быть обусловлена малой проводимостью исследуемых структур. Результаты измерения

проводимости по постоянному току показали, что данные пленки имеют достаточно малую величину удельной электропроводности ($\sigma < 10^{-9} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$).

При частотах свыше 10^5 Гц наблюдается рост величины $\text{tg}\delta$, особенно для структур нестехиометрического состава (см. рис. 4 а). Как указывалось выше, такое поведение $\text{tg}\delta$ может быть связано с миграционной (объемно-зарядовой) поляризацией на интерфейсе.

Для исследования электрофизических свойств гетероструктур использовались вольт-фарадные характеристики (ВФХ). Зависимости емкости исследуемых структур от величины смещающего электрического напряжения приведены на рис. 5. Изначально, положительный потенциал прикладывался к верхнему электроду. Как видно из рис. 5 б ёмкость структуры стехиометрического состава слабо зависит от величины и направления приложенного постоянного напряжения, в то время как для нестехиометрического слоя, в зависимости емкости от величины и направления внешнего смещающего напряжения, прослеживается асимметрия в поведении. В случае, когда на верхний электрод прикладывался отрицательный потенциал, с его ростом величина емкости уменьшалась.

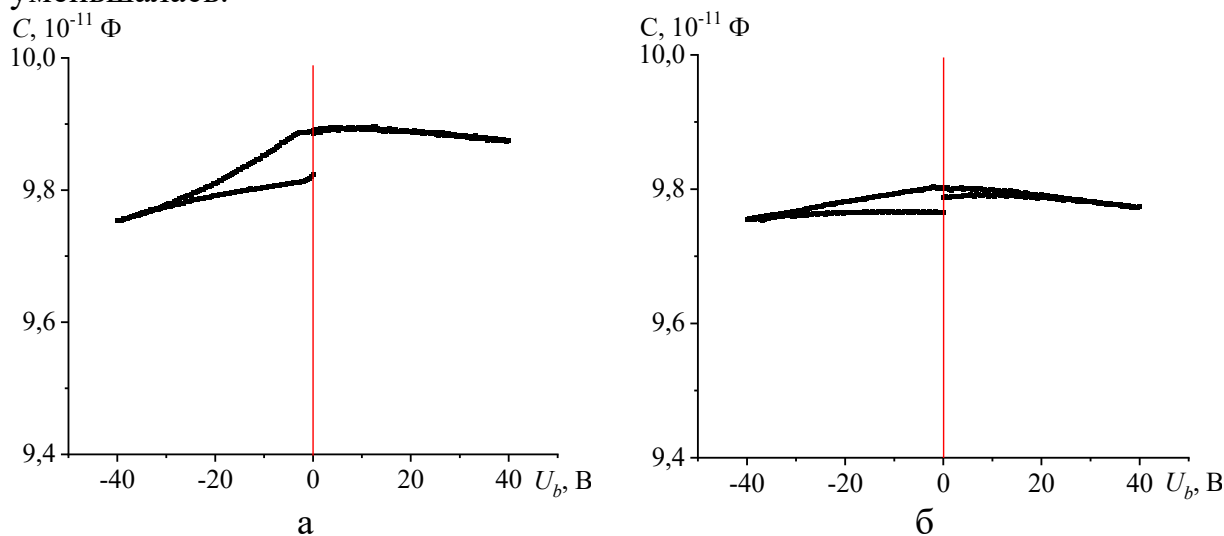


Рис. 5. ВФХ для структур $AlN/SiC/Si$ нестехиометрического (а) и состава, близкого к стехиометрическому (б). Частота измерительного поля равна 10^3 Гц.

Возможно, такая ассиметричная зависимость $C(U)$ связана как с инжекцией носителей заряда из электродов в пленку AlN , что вносит дополнительный вклад в величину объемного заряда на интерфейсе AlN/SiC , так и с изменением величины спонтанной поляризации (P_s) тонких слоев нитрида алюминия, ориентированной от верхней свободной поверхности к подложке [18], под действием смещающего электрического поля. В случае, когда внешнее поле направлено против вектора спонтанной поляризации (случай, когда на верхний электрод подается отрицательный

потенциал), величина емкости уменьшается с ростом смещающего напряжения за счет уменьшения величины P_s .

4. Заключение

Методом хлорид-гидридной эпитаксии на подложке $SiC/Si(111)$ выращены эпитаксиальные (монокристаллические) тонкие слои нитрида алюминия, отличающиеся низкой (~4%) и высокой степенью (~18%) нестехиометричности состава. Увеличение степени нестехиометричности привело к изменению ряда структурных и диэлектрических свойств:

– на дифрактограмме ($\theta-2\theta$) обнаружен сдвиг рефлекса 002 в сторону меньших углов, что говорит об увеличении межплоскостного расстояния гексагональной решетки «с» на 1%, а также уширение рефлекса, вызванное увеличением деформации кристаллической решетки;

– для нестехиометрических пленок AlN наблюдалось усиление релаксационных явлений диэлектрической проницаемости в низкочастотной области спектра и рост диэлектрических потерь в 1,5-2 раза в исследованной области частот, а также в условиях приложения смещающих полей;

– асимметрия ВФХ обусловлена вкладом объемно-зарядовой поляризации и изменением величины P_s ;

– в тонких слоях AlN сохранялась высокая устойчивость к снижению сквозной проводимости в присутствии смещающих электрических полей.

Кукушкин С.А. выполнял свою часть работы в рамках государственного задания ФГУП ИПМаш РАН № FFNF-2021-0001 Минобрнауки РФ. Шарофидинов Ш.Ш. выполнял свою часть работы в рамках государственного задания ФГУП ФТИ им. А.Ф. Иоффе № FFUG-2024-0013 Минобрнауки РФ. Сенкевич С.В., Пронин И.П., Шаренкова Н.В. выполняли свою часть работы в рамках государственного задания ФГУП ФТИ им. А.Ф. Иоффе № FFUG-2024-0042 Минобрнауки РФ.

Библиографический список:

1. **Nakamura, S.** Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes / S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh // Applied Physics Letters. – 1994. – V. 64. – I. 13. – P. 1687-1689. DOI: 10.1063/1.111832.
2. **Marcon, D.** Manufacturing challenges of GaN-on-Si HEMTs in a 200 mm CMOS fab / D. Marcon, B. De Jaeger, S. Halder, et al. // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. – 2013. – V. 26. – I. 3. – P. 361-367. DOI: 10.1109/TSM.2013.2255897.
3. **Марков, Л.К.** Тонкопленочный светодиод на основе слоев AlInGaN, выращенных на гибридных подложках SiC/S / Л.К. Марков, С.А. Кукушкин, А.С. Павлюченко и др. // Письма в журнал технической физики. – 2023. – Т. 49. – Вып. 15. – С. 3-6. DOI: 10.21883/PJTF.2023.15.55855.19616.
4. **Loeb, H.P.** Piezoelectric thin AlN films for bulk acoustic wave (BAW) resonators / H.P. Loeb, M. Klee, C. Metzmacher et al. // Materials Chemistry and Physics. – 2003. – V. 79. – I. 2-3. – P. 143-146. DOI: 10.1016/S0254-0584(02)00252-3.
5. **Trolier-McKinstry, S.** Thin film piezoelectrics for MEMS / S. Trolier-McKinstry, P. Murali // Journal of Electroceramics. – 2004. – V. 12. – I. 1-2. – P. 7-17. DOI: 10.1023/B:JECR.0000033998.72845.51.
6. **Tonisch, K.** Piezoelectric properties of polycrystalline AlN thin films for MEMS application / K. Tonisch,

- V. Cimalla, Ch. Foerster et al. // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2006. – V. 132. – I. 2. – P. 658-663. DOI: 10.1016/j.sna.2006.03.001.
7. **Crisman, E.A.** Enhanced AlN nanostructures for pyroelectric sensors / R. Drehman, Miller, A. Osinsky et al. // *Physica Status Solidi C*. – 2014. – V. 11. – I. 3-4. – P. 517-520. DOI: 10.1002/pssc.201300513.
8. **Gaur, S.P.** MEMS AlN pyroelectric infrared sensor with medium to long wave IR absorber / S.P. Gaur, K. Rangra, D. Kumar // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2019. – V. 300. – Art. no. 111660. – 13 p. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111660.
9. **Сергеева, О.Н.** Влияние ориентации кремниевой подложки с буферным подслоем карбида кремния на диэлектрические и полярные свойства пленок нитрида алюминия / О.Н. Сергеева, А.В. Солнышкин, Д.А. Киселев и др. // *Физика твердого тела*. – 2019. – Т. 61. – Вып. 12. – С. 2370-2375. DOI: 10.21883/FTT.2019.12.48558.22ks.
10. **Zukauskaitė, A.** Microstructure and dielectric properties of piezoelectric magnetron sputtered w-Sc_xAl_{1-x}N thin films / A. Zukauskaitė, G. Wingqvist, J. Palisaitis et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2012. – V. 111. – I. 9. – Art. № 093527. – 7 p. DOI: 10.1063/1.4714220
11. **Liauh, W.J.** Microstructure and piezoelectric properties of reactively sputtered highly C-axis Sc_xAl_{1-x}N thin films on diamond-like carbon/Si substrate / W.J. Liauh, S. Wu, J.-L. Huang, D.-F. et al. // *Surface & Coatings Technology*. – 2016. – V. 308. – P. 101-107. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.097.
12. **Mikolajick, T.** Next generation ferroelectric materials for semiconductor process integration and their applications / T. Mikolajick, S. Slesazeck, H. Mulaosmanovic, et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2021. – V. 129. – I. 10. – Art. № 100901. – 21 p. DOI: 10.1063/5.0037617.
13. **Wall, J.M.** Sputtering process of Sc_xAl_{1-x}N thin films for ferroelectric applications / J.M. Wall, F. Yan // *Coatings*. – 2023. – V. 13. – I. 1. – Art. № 54. – 18 p. DOI: 10.3390/coatings13010054.
14. **Hasegawa, K.** Full polarization reversal at room temperature in unsubstituted AlN / K. Hasegawa, T. Ohsawa, I. Sakaguchi, N. Ohashi // *Applied Physics Letters*. – 2023. – V. 123. – I. 19. – Art. no. 192903. – 4 p. DOI: 10.1063/5.0174236.
15. **Anggraini, S.A.** Polarity inversion of aluminum nitride thin films by using Si and MgSi dopants / S.A. Anggraini, M. Uehara, K. Hirata et al. // *Scientific Reports*. – 2020. – V. 10. – Art. no. 4369. – 11 p. DOI: 10.1038/s41598-020-61285-8.
16. **Solonenko, D.** The limits of the post-growth optimization of AlN thin films grown on Si(111) via magnetron sputtering / D. Solonenko, C. Schmidt, C. Stoekel et al. // *Physica Status Solidi B*. – 2020. – V. 257. – I. 5. – Art. № 1900400. – 9 p. DOI: 10.1002/pssb.201900400.
17. **Shin, I.-S.** Epitaxial growth of single-crystalline AlN layer on Si(111) by DC magnetron sputtering at room temperature / I.-S. Shin, J. Kim, D. Lee, et al. // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2018. – V. 57. – I. 6. – Art. № 060306. – 4 p. DOI: 10.1134/S002016852113002110.7567/JJAP.57.060306.
18. **Sergeeva, O.N.** SEM, dielectric, pyroelectric and piezoelectric response of thin AlN films epitaxially grown on SiC/Si substrate / O.N. Sergeeva, A.A. Bogomolov, A.V. Solnyshkin et al. // *Ferroelectrics*. – 2015. – V. 477. – I. 1 – P. 121-130. DOI: 10.1080/00150193.2015.1000144.
19. **Кукушкин, С.А.** Пирозлектрические и пьезоэлектрические отклики тонких пленок AlN, эпитаксиально выращенных на подложке SiC/Si / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, О.Н. Сергеева и др. // *Физика твердого тела*. – 2016. – Т. 58. – Вып. 5. – С. 937-940.
20. **Кукушкин, С.А.** Новый метод твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии: модель и эксперимент / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т. 50. – Вып. 7. – С. 1188-1195.
21. **Kukushkin, S.A.** Nanoscale single-crystal silicon carbide on silicon and unique properties of this material. / S.A. Kukushkin, A.V. Osipov // *Inorganic Materials*. – 2021. – V. 57. – I. 13. – P. 1319-1339. DOI 10.1134/S0020168521130021.

References:

1. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes, *Applied Physics Letters*, 1994, vol. 64, issue 13, pp. 1687-1689. DOI: 10.1063/1.111832.
2. D. Marcon, B. De Jaeger, S. Halder, N. et al. Manufacturing challenges of GaN-on-Si HEMTs in a 200 mm CMOS fab, *IEEE transactions on semiconductor manufacturing*. 2013, vol. 26, issue 3, pp 361-367. DOI: 10.1109/TSM.2013.22558973.
3. Markov L.K., Kukushkin S.A., Pavluchenko A.S. et al. Thin-film LED based on AlInGaN layers grown on hybrid SiC/Si substrates, *Technical Physics Letters*, 2023, vol. 49, issue 8. pp. 1-4. DOI: 10.61011/TPL.2023.08.56677.19616.
4. Loeb H.P., Klee M., Metzmacher C. et al. Piezoelectric thin AlN films for bulk acoustic wave (BAW)

- resonators, *Materials Chemistry and Physics*, 2003, vol. 79, issue 2-3, pp. 143-146. DOI: 10.1016/S0254-0584(02)00252-3.
5. Trolier-McKinstry S., Murali P. Thin Film Piezoelectrics for MEMS, *Journal of Electroceramics*, 2004, vol. 12, issue 1-2, pp. 7-17. DOI: 10.1023/B:JECR.0000033998.72845.51.
6. Tonisch K., Cimalla V., Foerster Ch., et al. Piezoelectric properties of polycrystalline AlN thin films for MEMS application, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, vol. 132, issue 2, pp. 658-663. DOI: 10.1016/j.sna.2006.03.001.
7. Crisman E., Drehman A., Miller R., et al. Enhanced AlN nanostructures for pyroelectric sensors, *Physica Status Solidi C*, 2014, vol. 11, issue 3-4, pp. 517-520. DOI: 10.1002/pssc.201300513.
8. Gaur S.P., Rangra K., Kumar D. MEMS AlN pyroelectric infrared sensor with medium to long wave IR absorber, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 300, art. no. 111660, 13 p. DOI: 10.1016/j.sna.2019.1116609.
9. Sergeeva O.N., Solnyshkin A.V., Kiselev D.A. et al. The influence of silicon substrate orientation with a buffer sublayer of silicon carbide on the growth and polar properties of thin aluminum nitride films, *Physics of Solid State*, 2019, vol. 61, issue 12, pp. 2386-2391. DOI: 10.1134/S1063783419120485.
10. Zukauskaitė A., Wingqvist G., Palisaitis J. et al. Microstructure and dielectric properties of piezoelectric magnetron sputtered w-Sc_xAl_{1-x}N thin films, *Journal of Applied Physics*, 2012, vol. 111, issue 9, art. no. 093527, 7 p. DOI: 10.1063/1.4714220.
11. Liauh W.J., Wu S., Huang J.-L. et al. Microstructure and piezoelectric properties of reactively sputtered highly C-axis Sc_xAl_{1-x}N thin films on diamond-like carbon/Si substrate, *Surface & Coatings Technology*, 2016, vol. 308, pp. 101-107. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.06.097.
12. Mikolajick T., Slesazek S., Mulaosmanovic H. et al. Next generation ferroelectric materials for semiconductor process integration and their applications, *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, issue 10, art. no. 100901, 21 p. DOI: 10.1063/5.0037617.
13. Wall J.M., Yan F. Sputtering process of Sc_xAl_{1-x}N thin films for ferroelectric applications, *Coatings*, 2023, vol. 13, issue 1, art. no. 54, 18 p. DOI: 10.3390/coatings13010054.
14. Hasegawa K., Shimizu T., Ohsawa T. et al. Full polarization reversal at room temperature in unsubstituted AlN, *Applied Physics Letters*, 2023, vol. 123, issue 19, art. no. 192903, 4 p. DOI: 10.1063/5.0174236.
15. Anggraini S.A., Uehara M., Hirata K. et al. Polarity inversion of aluminum nitride thin films by using Si and MgSi dopants, *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, art. no 4369, 11 p. DOI: 10.1038/s41598-020-61285-8.
16. Solonenko D., Schmidt C., Stoeckel C. et al. The limits of the post-growth optimization of AlN thin films grown on Si(111) via magnetron sputtering, *Physica Status Solidi B*, 2020, vol. 257, issue 5, art. no 1900400, 9 p. DOI: 10.1002/pssb.201900400.
17. Shin I.-S., Kim J., Lee D. et al. Epitaxial growth of single-crystalline AlN layer on Si(111) by DC magnetron sputtering at room temperature, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 57, issue 6, art. no 060306, 4 p. DOI: 10.7567/JJAP.57.060306.
18. Sergeeva O.N., Bogomolov A.A., Solnyshkin A.V. et al. SEM, dielectric, pyroelectric and piezoelectric response of thin AlN films epitaxially grown on SiC/Si substrate, *Ferroelectrics*, 2015, vol. 477, issue 1, pp. 121-130. DOI: 10.1080/00150193.2015.1000144
19. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Sergeeva O.N. et al. Pyroelectric and piezoelectric responses of thin AlN films epitaxy-grown on a SiC/Si substrate, *Physics of Solid State*, 2016, vol. 58, issue 5, pp. 967-970. DOI: 10.1134/S1063783416050139.
20. Kukushkin S.A., Osipov A.V. New method for growing silicon carbide on silicon by solid-phase epitaxy: model and experiment, *Physics of Solid State*, 2008, vol. 50, issue 7, pp. 1238-1245. DOI: 10.1134/S1063783408070081.
21. Kukushkin S.A., Osipov A.V. Nanoscale single-crystal silicon carbide on silicon and unique properties of this material, *Inorganic Materials*, 2021, vol. 57, issue 13, pp. 1319-1339. DOI: 10.1134/S0020168521130021.