УДК 537.226.4 *Оригинальная статья*

Диэлектрический отклик в тонкопленочных гетероструктурах с нанослоями AlGaN

И.Т. Зезянов[1], А.В. Солнышкин[1], О.Н. Сергеева[1], Ш.Ш. Шарофидинов[2], И.П. Пронин[2], Н.В. Шаренкова[2], Е.Ю. Каптелов[2], М.В. Старицын[3]

[1]ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33
[2]ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»
194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
[3]ФГУП Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»
191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49
o_n_sergeeva@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.044

Аннотация: Гетероструктуры на основе *AlGaN*, благодаря стабильности их тепловых и электрических свойств в широком интервале температур, являются функциональными материалами для различных областей микроэлектроники и фотоники. В данной работе тонкопленочные гетероструктуры $Al_xGa_{1-x}N$ получены методом хлорид-гидридной эпитаксии на подложках *SiC/Si*. Методами рентгеноструктурного фазового анализа и сканирующей электронной микроскопии были исследованы их микроструктурные особенности. Исходя из анализа микроструктуры установлено, что исследуемые тонкопленочные структуры представляют собой сложные соединения, содержащие нанослои *AlGaN* различного состава. Анализ процессов образования прослоек в периодической структуре *AlGaN* свидетельствует о том, что она является результатом самоорганизации состава и образования сложного композитного материала. В ходе исследований диэлектрического отклика пленок на основе *AlGaN* установлено, что в композитах, содержащих многослойную структуру, имеет место дисперсия диэлектрической проницаемости, а ее величина в сравнении с пленками *AlN* значительно увеличивается, особенно в низкочастотной области, благодаря повышенной омической проводимости. Неоднозначное поведение тангенса диэлектрических потерь и вольт-фарадных характеристик подтверждает утверждение о значительной электропроводности в структурах, содержащих слои *AlGaN*. Этот диэлектрический отклик, особенно в высокочастотной области, можно связать с объемно зарядовой поляризацией, которая формируется на границах раздела *AlGaN* различного состава, а также на интерфейсе слоев *AlGaN* и *SiC*.

Ключевые слова: подложки карбида кремния на кремнии, хлорид-гидридная эпитаксия, эпитаксиальные слои AlGaN, дисперсия диэлектрической проницаемости, вольт-фарадные характеристики.

Зезянов Иван Тимофеевич – аспирант 4 года обучения кафедры конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Солнышкин Александр Валентинович – д.ф.-м.н., профессор кафедры конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Сергеева Ольга Николаевна – к.ф.-м.н., ведущий инженер кафедры конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович – 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»

© И.Т. Зезянов, А.В. Солнышкин, О.Н. Сергеева, Ш.Ш. Шарофидинов, И.П. Пронин, Н.В. Шаренкова, Е.Ю. Каптелов, М.В. Старицын, 2026

Шаренкова Наталья Викторовна – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»
Каптелов Евгений Юрьевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»
Старицын Михаил Владимирович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФГУП Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»

Original paper

Dielectric response in thin-film heterostructures with AlGaN nanolayers

I.T. Zezyanov[1], A.V. Solnyshkin[1], O.N. Sergeeva[1], Sh.Sh. Sharofidinov[2], I.P. Pronin[2], N.V. Sharenkova[2], E.Yu. Kaptelov[2], M.V. Staritsyn[3]
[1]Tver State University, Tver, Russia
[2]Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia
[3]Central Research Institute of Structural Materials «Prometey» named by I.V. Gorynin of National Research Center «Kurchatov Institute», St. Petersburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.044

Abstract: *AlGaN*-based heterostructures are functional materials for various applications in microelectronics and optics, owing to the preservation of their thermal and electrical properties over a wide temperature range. In this study, $Al_xGa_{1-x}N$ thin-film multilayer structures were grown on *SiC/Si* substrates using hydride vapour phase epitaxy. Their microstructural characteristics were investigated using X-ray diffraction, phase analysis, and scanning electron microscopy. Microstructural analysis reveals that the thin-film structures under investigation are complex compounds containing *AlGaN* nanolayers of different composition. An analysis of the formation processes of the interlayers within the periodic *AlGaN* structure indicates that this structure results from the compositional self-organization and formation of a complex composite material. Studies of the dielectric response of *AlGaN*-based films have revealed that composites incorporating a multilayer structure exhibit dielectric permittivity dispersion; the magnitude of the permittivity increases significantly – particularly in the low-frequency range – due to enhanced ohmic conductivity. The complex behaviour of the dielectric loss tangent and the capacitance-voltage characteristics corroborates the conclusion that structures containing *AlGaN* layers possess significant electrical conductivity. In the high-frequency range, this dielectric response can be attributed to a space-charge polarization arising at the boundaries between *AlGaN* layers of different compositions, as well as at the *AlGaN/SiC* interface.

Keywords: silicon carbide-on-silicon substrates, chloride-hydride epitaxy, epitaxial AlGaN layers, dielectric permittivity dispersion, capacitance-voltage characteristics.

Ivan T. Zezyanov – 4th year postgraduate student, Condensed Matter Department, Tver State University
Alexander V. Solnyshkin – Dr. Sc., Professor, Condensed Matter Department, Tver State University, ORCID: 0000-0002-4044-8761
Olga N. Sergeeva– Ph. D., Senior Engineer, Condensed Matter Department, Tver State University, ORCID: 0000-0001-9469-4063
Shukrillo S. Sharofidinov – Ph. D., Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0003-0354-5981
Igor P. Pronin – Dr. Sc., Senior Researcher, Leading Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0003-3749-8706
Natalya V. Sharenkova – Ph. D., Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0001-6471-6233
Evgeny Y. Kaptelov– Ph. D., Senior Researcher, Ioffe Institute, ORCID: 0000-0002-7423-6943
Mikhail V. Staritsyn – Ph. D, Senior Researcher, Central Research Institute of Structural Materials «Prometey» named by I.V. Gorynin of National Research Center «Kurchatov Institute», ORCID: 0000-0002-0088-4577

Поступила в редакцию/received: 20.07.2026; после рецензирования/revised: 30.08.2026; принята/accepted: 07.09.2026.

1. Введение

В настоящее время широкозонные полупроводники на основе нитридов (AlN, GaN, $AlGaN$) активно используются при производстве оптоэлектронных приборов и устройств [1]. Благодаря высокой теплопроводности и механической прочности такие материалы являются перспективными в качестве функциональных элементов силовой микроэлектроники и фотоники, а благодаря наличию полярных свойств – в электромеханических устройствах [2-7].

Полупроводниковый нитрид алюминия галлия $AlGaN$ представляет собой твердый раствор нитрида алюминия AlN и нитрида галлия GaN. Благодаря его уникальным свойствам и их тепловой стабильности в широком интервале температур многие исследования были посвящены совершенствованию методов производства чистого [8] и легированного [9] нитрида алюминия-галлия высокого качества. В 1990-х годах успехи в синтезе качественных пленок широкозонных нитридных полупроводников AlN и GaN позволили создать транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT – high-electronmobility transistor) для СВЧ электроники на основе гетероструктур $GaN/AlGaN$. Исследования в этой области до сих пор являются актуальными. В последние годы в индустрии высоких технологий разрабатывается стандарт беспроводной системы шестого поколения (6G). Для беспроводной технологии 6G транзисторы $GaN/AlGaN/GaN$ (HEMTs) с широкой полосой пропускания и высокой подвижностью электронов становятся отличными кандидатами благодаря их высокой мощности и возможности мелкосерийного изготовления для получения микросхем небольшого и доступного размера [7].

Кроме полупроводниковых свойств нитриды алюминия-галлия, характеризующиеся наличием полярной оси, являются одним из базовых и высокоэффективных материалов для создания устройств микроэлектромеханики. Если диэлектрические и электромеханические свойства кристаллов и тонких пленок AlN изучены достаточно хорошо, то в силу заметной нестехиометричности составов $AlGaN$, его диэлектрические свойства до настоящего времени практически не исследованы.

Целью настоящей работы являлось изучение структуры и диэлектрических свойств пленок $AlGaN$, сформированных на подложках SiC/Si.

2. Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использованы образцы тонкопленочных гетероструктур на основе $AlGaN$, эпитаксиально выращенных методом хлорид-гидридной эпитаксии на подложках SiC/Si. Технология роста эпитаксиальных слоев $AlGaN$ описана в работах [10]. Изучались следующие типы структур на основе $AlGaN$: монослойная

структура; композит, состоящий из чередующихся слоев с повышенным содержанием Ga; гетероструктура с нанометровой периодичностью слоев $AlGaN$.

Кристаллическая структура образцов контролировалась методом рентгеноструктурного анализа $\theta - 2\theta$ (Дрон-3). Микроструктурные исследования поверхности и сколов образцов $AlGaN / SiC / Si$ были проведены с помощью методов растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке Lira 3 (Tescan). Для определения состава гетероструктур использовался метод электроннозондового рентгеновского микроанализа (энергодисперсионная приставка X-Max (Oxford Instruments). Энергия зондирующего электронного пучка составляла 12 кВ.

Для проведения электрофизических измерений на свободную поверхность исследуемых пленок наносились платиновые контактные площадки размером 1×1 мм. Нижним электродом служил проводящий слой карбида кремния, выращенный методом топохимического замещения на подложке кремния [11]. Диэлектрические свойства таких тонкопленочных конденсаторных структур исследовались с помощью измерителя иммитанса Е7-30 в частотном диапазоне 25-3·10^6 Гц. Величина измерительного напряжения составляла 1 В.

3. Экспериментальные результаты

Результаты рентгенодифракционного анализа пленок приведены на рис. 1. Дифрактрограмма монослойного образца (см. рис. 1 а) характеризуется рефлексом (002) с 2θ = 35,5 °, что соответствует атомному соотношению галлия к алюминию Ga / Al равному 39/61.

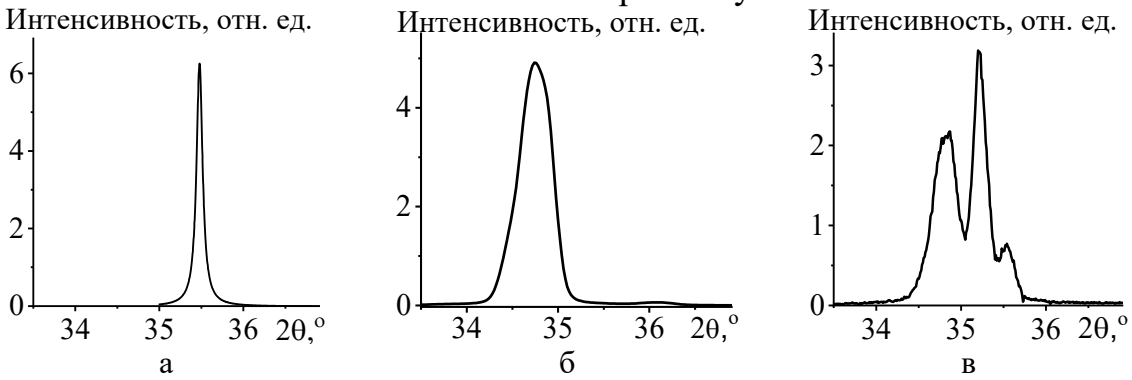


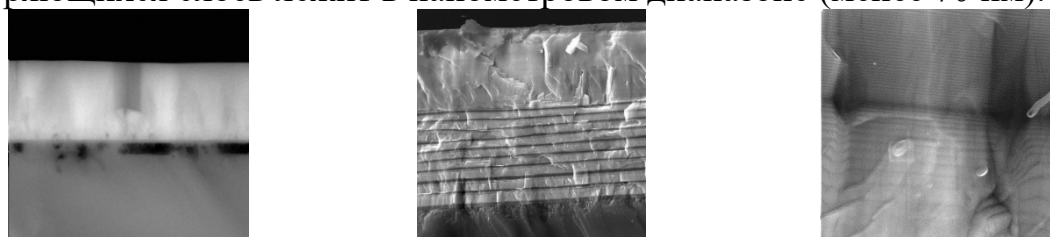
Рис. 1. Дифрактограммы $AlGaN$: а – монослойной структуры, б – композита, в – гетероструктуры с наноразмерной периодичностью слоев, отличающихся составом.

Уширенный пик при $2\theta = 34{,}7°$ для композита, представленного на рис. 1 б, соответствует усредненному атомному соотношению $Ga / Al = 80/20$, а второй пик при $2\theta = 36{,}1°$ соответствует нитриду алюминия и отвечает тонким прослойкам AlN толщиной 250 нм (см. рис. 2 б).

В гетероструктуре с нанометровыми слоями (см. рис. 1 в) на рентгеновском спектре наблюдаются 3 пика: центральный пик

соответствует атомному соотношению $Ga/Al = 56/44$, второй по интенсивности – 84/16, третий пик, наиболее слабый – 30/70.

Используя растровую электронную микроскопию (РЭМ) и данные элементного состава, полученные методом энергодисперсионной спектроскопии, проведен детальный анализ микроструктуры сколов исследуемых пленок. На рис. 2 а представлено РЭМ-изображение монослойной структуры на основе $AlGaN/SiC/Si$ толщиной 2 мкм и установлено, что атомное соотношение Ga/Al, равное 38/62, соответствует данным рентгенодифракционного анализа. Рис. 2 б иллюстрирует присутствие периодически чередующих слоев $AlGaN$ с различным соотношением Ga/Al. Периодическая структура нижней части пленки состояла из слоев толщиной 1,7 мкм, содержащих высокий процент галлия ($Ga/Al = 84/16$) и прослоек, толщиной 255 нм с преобладающим содержанием алюминия ($Ga/Al = 33/67$). Верхний слой толщиной 12,8 мкм характеризуется преобладающим содержанием галлия ($Ga/Al = 69/31$). Общая толщина композита составляет приблизительно 30 мкм. Гетероструктура, представленная на рис. 2 в, состоит из нижнего слоя, обогащенного галлием с непрерывным уменьшением периодичности в чередовании слоев с различным соотношением Ga/Al. Период повторяющихся слоев лежит в нанометровом диапазоне (менее 70 нм).



а б в

Рис. 2. РЭМ-изображения сколов структур на основе $AlGaN$: а – монослоя, б – композита, в – гетероструктуры с наноразмерной периодичностью слоев $AlGaN$.

Верхние слои с периодичностью 10 нм характеризуются составом с атомным соотношением $Ga/Al = 64/36$, что не противоречит данным, рассчитанным из спектров дифракции рентгеновских лучей. Анализ процессов образования прослоек в периодической структуре $AlGaN$ свидетельствует о том, что верхняя часть структуры является результатом самоорганизации состава. Образование такой сложной гетероструктуры, по всей видимости, связано с периодической релаксацией механических напряжений, накапливающихся в процессе ее роста, как было показано ранее [12].

Можно полагать, что изменение состава в исследованных структурах сопровождается формированием гетеропереходов и системы встроенных объемных зарядов, которые могут приводить к особенностям в поведении их диэлектрических свойств.

На рис. 3 приведены частотные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для всех исследованных структур.

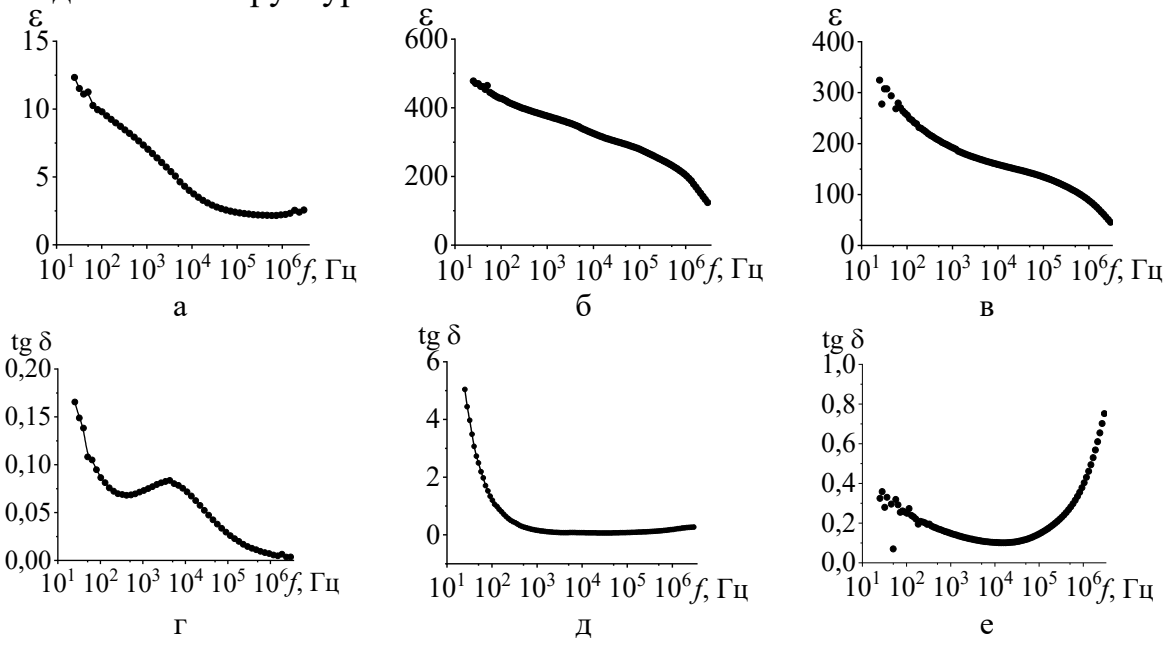


Рис. 3. Дисперсионные зависимости диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ для структур на основе $AlGaN$: а, г – монослойной пленки, б, д – композита, в, е – гетероструктуры с наноразмерной периодичностью слоев.

Можно отметить наличие дисперсии диэлектрической проницаемости во всем частотном диапазоне для всех пленок $AlGaN/SiC/Si$. Для монослойной пленки (см. рис. 3 а) значения величины диэлектрической проницаемости на низких частотах сравнимы по величине с аналогичной для пленки $AlN/SiC/Si$ [13], но за счет добавления в состав пленки галлия, ее величина уменьшается с частотой вплоть до $\varepsilon = 2$ при частоте 1 МГц. Максимум на частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь (см. рис. 3 г), приходится на область частот наибыстрейшего уменьшения диэлектрической проницаемости и также отражает наличие релаксационных процессов на границе $AlGaN/SiC$.

С введением в состав пленки периодических слоев $AlGaN$ величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь существенной увеличиваются (см. рис. 3 б, в). Диэлектрические параметры испытывают существенную дисперсию во всем исследованном интервале частот. Анализ частотных зависимостей тангенса диэлектрических потерь показывает, что в этих структурах существует по крайней мере 2 области релаксации: низкочастотная и высокочастотная.

Для более полного изучения поведения емкости в полярных полупроводниковых структурах на основе $AlGaN/SiC/Si$ построены их вольт-фарадные характеристики, которые являются сильно

ассиметричными, особенно для слоистых структур (см. рис. 4). Для монослойной пленки *AlGaN* / *SiC* / *Si* емкость слабо зависит от приложенного смещающего напряжения (см. рис. 4 а). В композите, содержащем периодические слои *AlGaN*, увеличение электроемкости под действием постоянного смещающего напряжения (см. рис. 4 б) обусловлено повышением электропроводности образца, которая влияет на его диэлектрические характеристики.

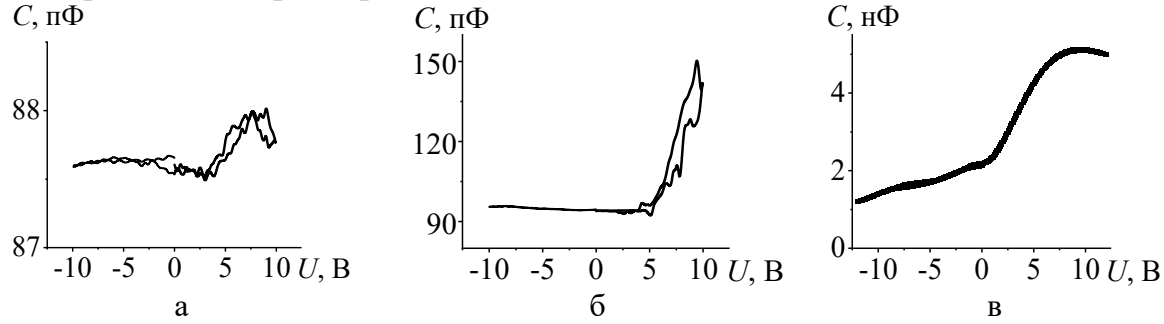


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики структур на основе *AlGaN*: а – монослоя, б – композита, в – гетероструктуры с наноразмерной периодичностью слоев *AlGaN*.

В многослойной структуре, содержащей чередующиеся слои *AlGaN* (см. рис. 4 б), при приложении постоянного поля смещения в направлении от верхнего электрода к подложке электроемкость растет и при напряжении ~ 9 В проходит через максимум. Смещающее поле направлено вдоль вектора поляризации при положительном значении напряжения. В этом случае поляризация увеличивается, а толщина гетероперехода на границе *AlGaN* / *SiC* [14] уменьшается, что приводит к росту суммарной емкости структуры. В полях, направленных противоположно, емкость монотонно уменьшается, практически в 2 раза. Подобное поведение характерно для структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Оно связано с изменением емкости интерфейсных слоев и инжекцией носителей заряда.

4. Обсуждение результатов

Наличие низкочастотной дисперсии диэлектрических характеристик в пленках *AlGaN* / *SiC* / *Si*, особенно многослойных, характерно для структур, которые имеют достаточно высокую проводимость по постоянному току. Результаты измерения удельной электропроводности пленочной структуры, дисперсия которой представлена на рис. 3 в, показали, что ее величина составляет $\sigma \sim 10^{-6}$ Ом$^{-1}$м$^{-1}$. Об этом же свидетельствуют большие значения тангенса угла диэлектрических потерь, которые в низкочастотной области превышают 6, (см. рис. 3 б). Этим же обстоятельством (достаточно высокой проводимостью) объясняется гигантская низкочастотная дисперсия диэлектрических потерь.

В области частот свыше 10^4 Гц происходит дальнейшее уменьшение величины диэлектрической проницаемости и начинается рост тангенса угла

диэлектрических потерь (высокочастотная дисперсия). Подобное поведение можно связать с объемно зарядовой поляризацией, которая формируется на границах раздела $AlGaN$ различного состава, а также на интерфейсе слоя $AlGaN$ и SiC.

Известно, что в нитридных структурах сильное уменьшение величины диэлектрической проницаемости с ростом частоты, вплоть до появления эффекта отрицательной емкости, возможно из-за наличия гетеропереходов $AlGaN/AlGaN$ различных составов, где присутствуют ловушки и глубокие уровни на границе раздела. Электроны захватываются на эти ловушки или высвобождаются из них. Если скорость изменения заряда ловушек опережает изменение внешнего напряжения, это приводит к значительному уменьшению диэлектрической проницаемости, вплоть до появления кажущейся отрицательной емкости в спектрах [15]. Также на дисперсию диэлектрической проницаемости оказывают влияние поляризационные эффекты, связанные с наличием в структурах на основе $AlGaN$ спонтанной поляризации [16], которая меняет распределение двумерного электронного газа [17, 18], динамику экранирования поляризации, а также приложенного внешнего поля.

Зависимость емкости от смещающего напряжения вероятнее всего обусловлена вкладом барьерной емкости на границе $AlGaN-SiC/Si$ [19], когда барьерные свойства модулируются туннелированием электронов.

5. Заключение

В настоящей работе были исследованы диэлектрические свойства сложных композиционных структур, состоящих из периодически расположенных перпендикулярно направлению роста эпитаксиальных слоев $Al_xGa_{1-x}N$ различного состава, выращенных на гибридной подложке SiC/Si методом хлорид-гидридной эпитаксии. Показано, что в пленках $Al_xGa_{1-x}N$ наблюдается ярко выраженная дисперсия диэлектрических характеристик, которая может быть связана как с высокой проводимостью по постоянному току, так и наличием объемно зарядовой поляризации (высокочастотный интервал). Вольт-фарадная характеристика пленки, содержащей слои $AlGaN$, характеризуется заметной зависимостью емкости от величины и направления поля смещения. Для композитной структуры на основе $AlGaN$ изменение емкости связывается с инжекцией носителей заряда из верхнего металлического электрода, тогда как для пленки, содержащей чередующиеся слои $AlGaN$ различного состава, оно обусловлено вкладом емкости интерфейсных слоев и инжекцией носителей заряда. Подобные явления позволяют существенно снизить токи утечки и повысить энергоэффективность в затворах транзисторов, изготовленных на основе $AlGaN/SiC/Si$.

Библиографический список:

1. **Chen**, **Y**. Review on the progress of AlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes / Y. Chen, J. Ben, F. Xu et al. // Fundamental Research. – 2021. – V. 1. – I. 6. – P. 717-734. DOI: 10.1016/j.fmre.2021.11.005.
2. **Baca, A.G.** Al-rich AlGaN based transistors / A.G. Baca, A.M. Armstrong, B.A. Klein et al. // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2020. – V. 38. – I. 2. – Art. № 020803 – 28 p. DOI: 10.1116/1.5129803.
3. **Teo, K.H.** Emerging GaN technologies for power, RF, digital, and quantum computing applications: recent advances and prospects / K.H. Teo, Y. Zhang, N. Chowdhury et al. // Journal of Applied Physics. – 2021. – V. 130. – I. 16. – Art. № 160902 – 41 p. DOI: 10.1063/5.0061555.
4. **Rabih, A.A.S.** Aluminum nitride out-of-plane piezoelectric MEMS actuators / A.A.S. Rabih, M. Kazemi, M. Ménard et al. // Micromachines. – 2023. – V. 14. – I. 3. – Art. № 700. – 19 p. DOI: 10.3390/mi14030700.
5. **Qi, H.** Simulation and preparation of FBARs based on AlN thin films / H. Qi, H. Zhang, N. Gao et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2025. – V. 185. – Art. № 108886. – 25 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2024.108886.
6. **Yadav, N.** Effect of growth induced residual stress in epitaxial AlN thin film on SiC substrate for MEMS / N. Yadav, S. Dutta, K. Narang et al. // Transactions on Electrical and Electronic Materials. – 2025. – V. 26. – I. 1. – P. 125-133. DOI: 10.1007/s42341-024-00580-x.
7. **Cao, L.C.T.** Fluoride monolayer doping in GaN/AlGaN/GaN semiconductor/ L.C.T. Cao, S.H. Hsu, C.-L. Chu // MRS Advances. – 2023. – V. 8. – I. 16. – P. 931-936. DOI: 10.1557/s43580-023-00582-6.
8. **Xu, X.-H**. Morphological properties of AlN piezoelectric thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering / X.-H. Xu, H.-S. Wu, C.-J. Zhang et al. // Thin Solid Films. – 2001. – V. 388. – I. 1–2. – P. 62-67. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01914-3.
9. **Barshilia, H.C.** Growth and characterization of aluminum nitride coatings prepared by pulsed-direct current reactive unbalanced magnetron sputtering / H.C. Barshilia, B. Deepthi, K.S. Rajam // Thin Solid Films. – 2008. – V. 516. – I. 12. – P. 4168-4174. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.10.129.
10. **Кукушкин, С.А.** Новый метод получения объемных кристаллов AlN, GaN и AlGaN с использованием гибридных подложек SiC/Si / С.А. Кукушкин, Ш.Ш. Шарофидинов // Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61. – Вып. 12. – С. 2338-2343. DOI:10.21883/FTT.2019.12.48549.51ks.
11. **Кукушкин, С.А.** Синтез эпитаксиальных плёнок карбида кремния методом замещения атомов в кристаллической решётке кремния / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Н.А. Феоктистов.// Физика твёрдого тела. – 2014. – Т. 56. – Вып. 8. – С. 1457-1485. DOI: 10.1134/S1063783414080137.
12. **Кукушкин, С.А.** Самоорганизация состава пленок $Al_xGa_{1-x}N$, выращенных на гибридных подложках SiC/Si / С.А. Кукушкин, Ш.Ш. Шарофидинов, А.В. Осипов и др. // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – Вып. 3. – С. 363-369. DOI: 10.21883/FTT.2021.03.50587.234.
13. **Солнышкин, А.В.** Влияние стехиометрии состава пленок нитрида алюминия на диэлектрический отклик / А.В. Солнышкин, И.Т. Зезянов, О.Н. Сергеева и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 172-181. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.172.
14. **Шарофидинов, Ш.Ш**. Структура и свойства композитов на основе нитридов алюминия и галлия, выращенных на кремнии разной ориентации с буферным слоем карбида кремния / Ш.Ш. Шарофидинов, С.А. Кукушкин, М.В. Старицын и др. // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64. – Вып. 5. – С. 522-527. DOI: 10.21883/FTT.2022.05.52331.250.
15. **Byrum, L.E.** Capacitance hysteresis in GaN/AlGaN heterostructures / L.E. Byrum, G. Ariyawansa, R.C. Jayasinghe et al. // Journal of Applied Physics. – 2009. – V. 105. – I. 2. – Art. № 023709. – 5 p. DOI: 10.1063/1.3068179.
16. **Солнышкин, А.В.** Диэлектрические и пироэлектрические свойства композитов на основе нитридов алюминия и галлия, выращенных методом хлорид-гидридной эпитаксии на подложке карбида кремния на кремнии / А.В Солнышкин, О.Н. Сергеева, О.А. Шустова и др.// Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – Вып. 9. – С. 7-10. DOI: 10.21883/PJTF.2021.09.50898.18673.
17. **Foutz, B.** Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaN/GaN heterostructures / B. Foutz, J. Smart, J. R. Shealy et al. // Journal of Applied Physics. – 2000. – V. 87. – I. 1. – P. 334-344. DOI: 10.1063/1.371866.
18. **Ambacher, O.** Polarization induced interface and electron sheet charges of pseudomorphic ScAlN/GaN, GaAlN/GaN, InAlN/GaN, and InAlN/InN heterostructures / O. Ambacher, B. Christian, M. Yassine et al. // Journal of Applied Physics. – 2021. – V. 129. – I. 20. – Art. № 204501. – 15 p. DOI: 10.1063/5.0049185.
19. **Sergeeva, O.N.** Microstructure and electrical response of thin SiC films on Si substrates of p- and n-types / O.N. Sergeeva**,** A.V. Solnyshkin, G.M. Nekrasova et al. // Ferroelectrics. – 2019. – V. 542. – I. 1. – P. 52-57. DOI: 10.1080/00150193.2019.1574662.

References:

1. Chen Yu., Ben J., Xu F. et al. Review on the progress of AlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes, *Fundamental Research,* 2021, vol. 1, issue 6, pp.717-734. DOI: 10.1016/j.fmre.2021.11.005.
2. Baca A.G., Armstrong A.M., Klein B.A. et al Al-rich AlGaN based transistors, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2020, vol. 38, issue 1-2, art. no. 020803, 28 p. DOI: 10.1116/1.5129803.
3. Teo K.H., Zhang Y., Chowdhury N. et al. Emerging GaN technologies for power, RF, digital, and quantum computing applications. Recent advances and prospects, *Journal of Applied Physics,* 2021, vol. 130, issue 16, art. no. 160902, 41 p. DOI: 10.1063/5.0061555.
4. Rabih A.A.S., Kazemi M, Ménard M. et al. Aluminum nitride out-of-plane piezoelectric MEMS actuators, *Micromachines*, 2023, vol. 14, issue 3, art. no. 700, 19 p. DOI: 10.3390/mi14030700.
5. Qi H., Zhang H., Gao N. et al. Simulation and preparation of FBARs based on AlN thin films, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2025, vol. 185, art. no. 108886, 25 p. DOI: 10.1016/j.mssp.2024.108886.
6. Yadav N., Dutta S., Narang K. et al. Effect of growth induced residual stress in epitaxial AlN thin film on SiC substrate for MEMS, *Transactions on Electrical and Electronic Materials,* 2025, vol. 26, issue 1, pp. 125-133. DOI: 10.1007/s42341-024-00580-x.
7. Cao L.C.T., Hsu S.H., Chu C.-L. Fluoride monolayer doping in GaN/AlGaN/GaN semiconductor, *MRS Advances*, 2023, vol. 8, issue 16, pp. 931-936. DOI: 10.1557/s43580-023-00582-6.
8. Xu X.-H., Wu H.-S., Zhang C.-J. et al. Morphological properties of AlN piezoelectric thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 2001, vol. 388, issue 1-2, pp. 62-67. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01914-3.
9. Barshilia H.C., Deepthi B., Rajam K.S. Growth and characterization of aluminum nitride coatings prepared by pulsed-direct current reactive unbalanced magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, issue 12, pp. 4168-4174. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.10.129.
10. Kukushkin S.A., Sharofidinov Sh.Sh. A new method of growing AlN, GaN, and AlGaN bulk crystals using hybrid SiC/Si substrates, *Physics of the Solid State*, 2019, vol. 61, issue 12, pp. 2342-2347. DOI: 10.1134/S1063783419120254.
11. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Feoktistov N.A. Synthesis of epitaxial silicon carbide films through the substitution of atoms in the silicon crystal lattice: A review, *Physics of the Solid State*, 2014, vol. 56, issue 8, pp. 1507-1535. DOI: 10.1134/S1063783414080137.
12. Kukushkin S.A., Sharofidinov Sh.Sh., Osipov A.V. et al. Self-organization of the composition of AlxGa1–xN films grown on hybrid SiC/Si substrates, *Physics of the Solid State*, 2021, vol. 63, issue 3, pp. 442-448. DOI: 10.1134/S1063783421030100.
13. Solnyshkin A.V., Zezyanov I.T., Sergeeva O.N. et al. Vliyanie stechiometrii sostava plyonok nitrida aluminia na dielectricheskiy otklik [Influence of stoichiometry of aluminum nitride films composition on the dielectric response], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 172-181. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.172. (In Russian).
14. Sharofidinov Sh.Sh., Kukushkin S.A., Staritsyn M.V. et al. Structure and properties of composites based on aluminum and gallium nitrides grown on silicon of different orientations with a buffer layer of silicon carbide, *Physics of the Solid State*, 2022, vol. 64, issue 5, pp. 516-521. DOI: 10.21883/PSS.2022.05.53510.250.
15. Byrum L.E., Ariyawansa G., Jayasinghe R.C. et al. Capacitance hysteresis in GaN/AlGaN heterostructures, *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 105, issue 2, art. no. 023709, 5 p. DOI: 10.1063/1.3068179.
16. Solnyshkin A.V., Sergeeva O.N., Shustova O.A. et al. Dielectric and pyroelectric properties of composites based on aluminum and gallium nitrides grown by chloride-hydride epitaxy on a silicon carbide-on-silicon substrate, *Technical Physics Letters*, 2021, vol.47, issue. 6, pp. 466-469. DOI: 10.1134/S1063785021050138.
17. Foutz B., Smart J., Shealy J. R. et al. Two dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization in undoped and doped AlGaN/GaN heterostructures, *Journal of Applied Physics,* 2000, vol. 87, issue 1, pp. 334-344. DOI: 10.1063/1.371866.
18. Ambacher O., Christian B., Yassine M. et al. Polarization induced interface and electron sheet charges of pseudomorphic ScAlN/GaN, GaAlN/GaN, InAlN/GaN, and InAlN/InN heterostructures, *Journal of Applied Physics*, 2021, vol. 129, issue 20, art. no 204501, 15 p. DOI: 10.1063/5.0049185.
19. Sergeeva O.N., Solnyshkin A.V., Nekrasova G.M. et al. Microstructure and electrical response of thin SiC films on Si substrates of p- and n-types, *Ferroelectrics,* 2019, vol. 542, issue 1, pp. 52-57. DOI: 10.1080/00150193.2019.1574662.