

III-НИТРИДНЫЕ НЕМТ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С УЛЬТРАТОНКИМ БАРЬЕРОМ AlN : ПОЛУЧЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

© 2024 г. А. С. Гусев*, А. О. Султанов, Р. В. Рыжук,
Т. Н. Неволина, Д. Цунваза, Г. К. Сафаралиев, Н. И. Каргин

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: ASGusev@mephi.ru

Поступила в редакцию 13.08.2024 г.

После доработки 20.09.2024 г.

Принята к публикации 20.09.2024 г.

Методом МЛЭ с плазменной активацией азота получены III-нитридные НЕМТ гетероструктуры, содержащие ультратонкий барьер AlN . Исследовано влияние режимов нуклеации и роста буферного слоя на кристаллическое качество, морфологию поверхности и электрофизические свойства экспериментальных ГС. Слоевое сопротивление оптимизированной ГС составило менее 230 Ом/□. Изготовлены тестовые СВЧ транзисторы с затвором Шоттки. Предложена параметрическая модель НЕМТ на основе AlN/GaN ГС.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, GaN , ультратонкий AlN барьер, НЕМТ

DOI: 10.31857/S0544126924060066

1. ВВЕДЕНИЕ

III-нитридные НЕМТ гетероструктуры (гетероэпитаксиальные структуры с 2D электронным газом) — это основа для формирования мощных СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем. В настоящее время известно много вариантов $Al^{III}N$ гетероэпитаксиальных структур (ГС) с 2D электронным газом. Наиболее распространенными и изученными являются ГС с барьерным слоем на основе тройных соединений $AlGaN$ и $InAlN$. Альтернативу им ввиду своих фундаментальных преимуществ (низкое слоевое сопротивление и подавление короткоканальных эффектов) могут составить ГС с ультратонким барьером AlN . Подобные ГС признаны рядом авторов [1–11] как наиболее перспективный материал для увеличения удельной мощности СВЧ ЭКБ и продвижения вверх по шкале частот. У AlN/GaN ГС ввиду большой разницы в спонтанной (являющейся следствием низкой симметрии кристаллической решетки) и пьезоэлектрической (обусловленной механическими напряжениями) поляризации между AlN и GaN достижима чрезвычайно высокая плотность двумерного электронного газа (2DEG), более $6 \cdot 10^{13}$ см⁻² по некоторым теоретическим оценкам [4, 5]. Кроме того, в подобных структурах следует ожидать и относительно высокую подвижность электронов из-за отсутствия рассеяния на неоднородностях

твердого раствора $AlGaN$ [12]. Уникальное сочетание высокой плотности 2DEG и относительно высокой подвижности позволяет получать рекордно низкие значения слоевого сопротивления. В качестве доказательства последнего утверждения на рис. 1 приводится зависимость слоевого сопротивления (ρ_s) от плотности 2DEG (n_s) для ГС с барьерными слоями различного вида, построенная на основе анализа литературных данных [2, 3, 6, 9 – 11, 13 – 39]. Рекордные значения $\rho_s = 120 \div 130$ Ом/□ получены авторами [6, 11] именно в ГС с ультратонким барьером AlN . Однако низкое ρ_s — это не единственное достоинство AlN/GaN ГС применительно к НЕМТ технологии. Здесь следует отметить и высокое аспектное соотношение L_g/d (где L_g — длина затвора изготавливаемого транзистора, d — толщина барьера), которое в разы больше данного параметра, реализуемого в классических $AlGaIn/GaN$ ГС, что дает возможность свободно масштабировать параметр L_g (а значит и предельную частоту усиления по току $f_t \approx L_g^{-1}$), не опасаясь проявления эффектов короткого канала в полевом транзисторе: снижения порогового напряжения, снижения потенциального барьера под затвором (DIBL-эффект) и др. Поэтому исследования и разработки в предметной области вдвойне актуальны (направлены одновременно на увеличение удельной выходной мощности и частоты отсечки III-нитридных приборов).

Целью данной работы являлось развитие физико-технологических подходов к получению *HEMT*-гетероструктур с ультратонким *AlN* барьером, включая изготовление на основе экспериментальных ГС тестовых образцов СВЧ транзисторов.

2. ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Все экспериментальные ГС выращивались в установке молекулярно-лучевой эпитаксии *GEN 930* (“*Veeco*”), оснащенной азотно-плазменным активатором *UNI-Bulb Veeco RF*. Мощность ВЧ-источника и поток азота составляли 350 Вт и 1,6 стандартных кубических сантиметра в минуту, соответственно. В качестве подложек для экспериментов были использованы пластины лейкосапфира диаметром 50,8 мм, имеющие вицинальный угол $0,25^\circ$ рабочей поверхности в сторону плоскости *m* относительно сингулярной грани *c*. Перед началом роста подложки 30 минут отжигали в вакууме при температуре 1000°C , затем проводилась процедура нитридации (т. е. выдержка пластины в потоке активного азота при той же температуре в течение 5 минут).

Нуклеационный слой *AlN* с расчетной толщиной 40 нм формировался в азот-обогащенных условиях ($F_{Al}/F_N \approx 0,6$) при стационарных потоках алюминия и азота. Температуру нуклеации T_n варьировали от образца к образцу в диапазоне от 610 до 810°C (согласно показаниям термопары) с целью анализа влияния данного параметра на кристаллическую структуру, морфологию поверхности и электрофизические свойства ГС. При выращивании буферного *GaN* слоя расчетной толщины 1650 нм в азот стабилизированных условиях применялась *MME* методика [40, 41] ($t_1 = 8$ с; $t_2 = 14$ с, количество циклов 990). *GaN* буфер получали при потоке *Ga*, эквивалентном давлению $P^* = 7,5 \cdot 10^{-7}$ Торр, и средней температуре подложки $\langle T_s \rangle$ в пределах $750 - 753^\circ\text{C}$ (по ИК пирометру). Конкретное значение T_s в рамках указанного диапазона выбиралось исходя из необходимости поддержания постоянной скорости роста нитрида галлия для всех

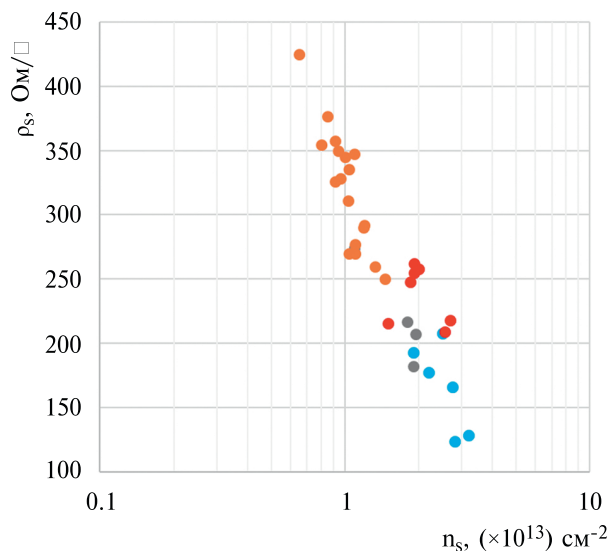


Рис. 1. Зависимость ρ_s от n_s для ГС с барьерными слоями различного состава: $Al_xGa_{1-x}N$ ($0,18 \leq x \leq 0,36$) – коричневые маркеры; $In_xAl_{1-x}N$ ($x = 0,17-0,18$) – красные маркеры; $InAlGaN$ с различной мольной долей *In* – серые маркеры; *AlN* – голубые маркеры [2, 3, 6, 9–11, 13–39].

экспериментальных образцов данной серии. Легирование ГС не проводилось. Зародышеобразование и рост контролировали *in situ* методом дифракции быстрых отраженных электронов (*ДОбЭ*). Типичные дифракционные картины, регистрируемые от исходной сапфировой подложки и экспериментальных образцов в направлении $[11\bar{2}0]$ на стадиях нуклеации и формирования *GaN* буфера приведены на рис. 2, *a* и *b*. В свою очередь, смена наблюдаемого типа реконструкции поверхности *GaN* с 1×1 (рисунок 2, *в*) на 2×2 в случае остановки ростового процесса и снижения T_s до 600°C (рисунок 2, *г*) свидетельствует о ее металлической (*Ga*) полярности [42].

После завершения роста *GaN* буфера при стационарном потоке алюминия ($F_{Al}/F_N \approx 1$)

Таблица 1. Условия роста и параметры экспериментальных ГС с ультратонким барьером *AlN*

№	<i>AlN</i> (нуклеационный слой)			<i>GaN</i> (буферный слой)			<i>AlN</i> (барьерный слой)			Полная толщина ГС SE/SEM
	T_n ($^\circ\text{C}$) ТС	T_{Al} ($^\circ\text{C}$)	Оценка толщины слоя, нм	$\langle T_s \rangle$ ($^\circ\text{C}$) Руго	T_{Ga} , ($^\circ\text{C}$)	Оценка толщины слоя, нм	Время роста слоя, с	T_{Al} ($^\circ\text{C}$)	Оценка толщины слоя, нм	
165	610	1060/990	38,8	750	976/1139	1652	45	1086/1025	5,8	1698/1690
164	660	1060/990	42,5	752	977/1139	1658	45	1086/1025	5,6	1707/1700
163	710	1060/990	39,5	753	976/1139	1695	45	1086/1025	5,5	1741/1730
160	810	1060/989	–	751	977/1139	–	45	1086/1025	–	–/1670
Среднеквадратичное отклонение (σ), нм										25
Коэффициент вариации (C_v), %										1,5

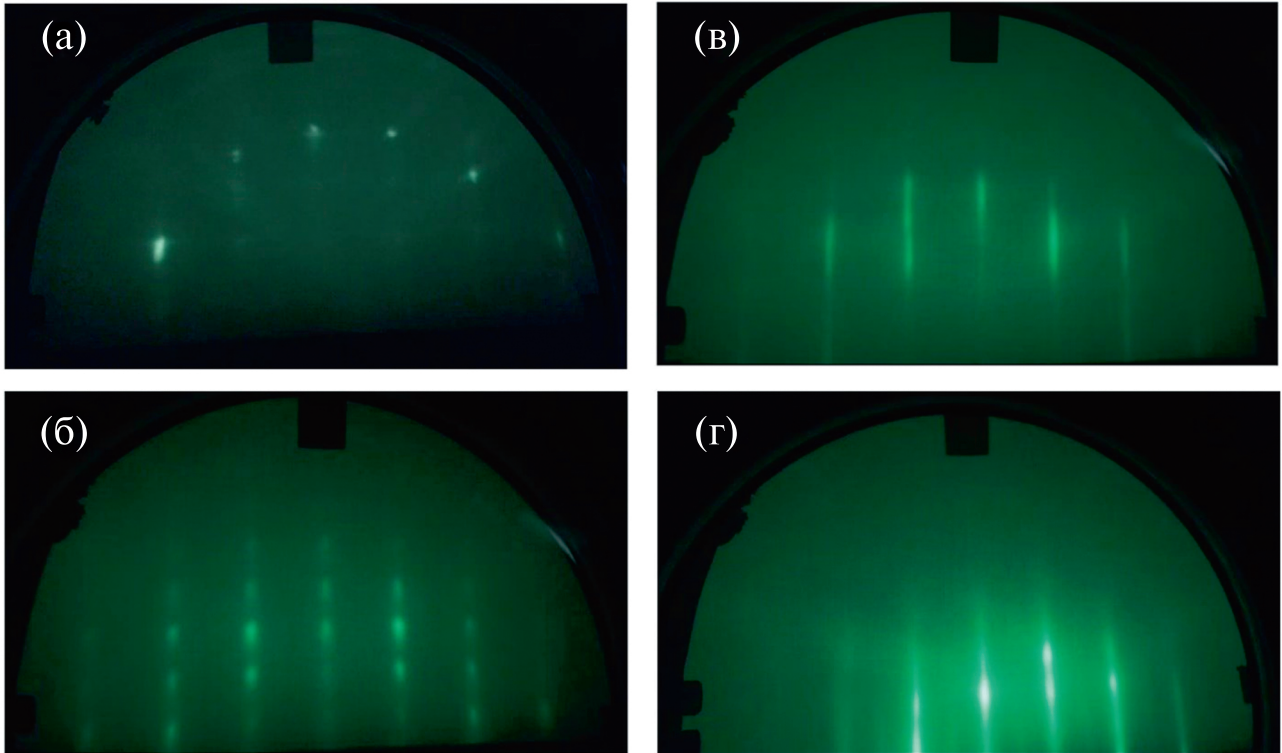


Рис. 2. Типичные картины ДОБЭ от исходной подложки (а) и экспериментальных ГС в направлении $[11\bar{2}0]$ на стадии нуклеации (б); в процессе формирования GaN буфера (в); в случае остановки процесса роста GaN и снижения параметра T_s до 600°C (г).

формировался ультратонкий барьер AlN. Условия выращивания и параметры конструкции экспериментальных ГС сведены в табл. 1. В завершение на поверхность ГС наносился “cap” слой из нитрида галлия толщиной ≈ 1 нм (в табл. 1 не указан).

Как следует из данных табл. 1, среднеквадратичное отклонение (σ) параметра полной толщины ГС составляет 25 нм при его среднем значении 1698 нм, а коэффициент вариации (C_v) не превышает 1,5 %, что свидетельствует об удовлетворительной

Таблица 2. Электрофизические параметры экспериментальных ГС AlN/GaN с различной T_n

№ ГС	Холловские параметры 2DEG для экспериментальных ГС (при 300 К)			Удельное сопротивление буферного слоя GaN по данным холловских измерений (300 К)
	μ_H (см ² В ⁻¹ с ⁻¹)	n_s (см ⁻²)	ρ_s (Ом/□)	ρ_s (Ом/□)
165	—	—	—	$3,9 \cdot 10^5$
164	934	$2,22 \cdot 10^{13}$	302	$1,5 \cdot 10^6$
163	1066	$2,58 \cdot 10^{13}$	227	$1,6 \cdot 10^8$
160	870	$2,23 \cdot 10^{13}$	322	$3,1 \cdot 10^8$

Таблица 3. Условия роста и параметры экспериментальных ГС AlN/GaN с различной $\langle T_s \rangle$

№ ГС	$\langle T_s \rangle$ (°C) – Pyro	μ_H (см ² В ⁻¹ с ⁻¹)	n_s (см ⁻²)	ρ , Ом/□	RMS, нм
180	745	796	$2,63 \cdot 10^{13}$	299	0,68
179	748	973	$2,69 \cdot 10^{13}$	239	—
193	750,4	1018	$2,63 \cdot 10^{13}$	234	0,65
163	753	1066	$2,58 \cdot 10^{13}$	227	0,72
181	755	950	$2,84 \cdot 10^{13}$	232	0,84
183	762	536	$2,37 \cdot 10^{13}$	492	1,04

воспроизводимости технологических параметров. Также отклонения между результатами сканирующей электронной микроскопии (*SEM*) и спектральной эллипсометрии (*SE*), указанными в столбце полной толщины, составляют мене 1 %, демонстрируя хорошую сходимости модели при аппроксимации зависимостей угловых величин Δ и Ψ от длины волны.

Для определения основных электрофизических параметров ГС (холловской подвижности, концентрации носителей заряда в канале, слоевого сопротивления полной ГС) были выполнены измерения эффекта Холла. Измерения проводились на установке HMS-3000 (“*Esopia*”) при комнатной температуре в геометрии ван дер Пау с расположением контактов в углах квадрата размером 5×5 мм. Контакты наносились на предварительно вырезанные куски пластин путем подпаивания индия. Величина магнитного поля, перпендикулярного плоскости образца, составляла 0,55 Тл. Измерения осуществлялись в нескольких местах исходных пластин, затем полученные значения усреднялись (табл. 2).

Значений холловской подвижности (μ_H) и слоевой концентрации носителей (n_s), характерных для квазидвумерного электронного газа, в случае низкотемпературной нуклеации при $T_n = 610^\circ\text{C}$ (ГС № 165) зафиксировано не было. Наилучшими электрофизическими параметрами обладает экспериментальная ГС № 163 ($\mu_H = 1066 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$ при $n_s = 2,58 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) с температурой нуклеации 710°C .

На этой же пластине зафиксировано рекордное для данной работы значение холловской подвижности: $1100 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, что при $n_s = 2,54 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ приводит к величине удельного сопротивления в $223 \text{ Ом}/\square$. Дальнейшее увеличение температуры зародышеобразования (нуклеационного роста) до $T_n = 810^\circ\text{C}$ не повлекло за собой улучшение транспортных свойств. ГС № 160 демонстрирует посредственную холловскую подвижность ($870 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$) при сравнимой с ГС № 164 слоевой концентрации носителей ($2,23 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$), что соответствует значению сопротивления канала ($322 \text{ Ом}/\square$).

Для анализа качества *GaN* буфера образцы ГС были подвергнуты плазмохимическому травлению на глубину, обеспечивающую полное удаление нитрида алюминия (около 20 нм). Удельное сопротивление экспериментальных образцов после снятия барьера, рассчитанное исходя из результатов холловских измерений, также представлено в таблице 2. В работе получены ГС (№ 162 и 163), содержащие высокоомный *GaN* буфер со значением $\rho_s \sim 10^8 \text{ Ом}/\square$, 157 дополнительного легирования атомами углерода или железа. Причем при уменьшении температуры зародышеобразования (ГС № 164 и 165) наблюдается существенная (на два-три порядка) деградация изолирующих свойств буферного слоя.

На втором этапе для оптимизации режимов формирования буферного слоя был выращен ряд образцов с различной $\langle T_s \rangle$ (средняя температура роста *GaN* буфера по ИК пирометру). $\langle T_s \rangle$ варьировалась от образца к образцу в диапазоне

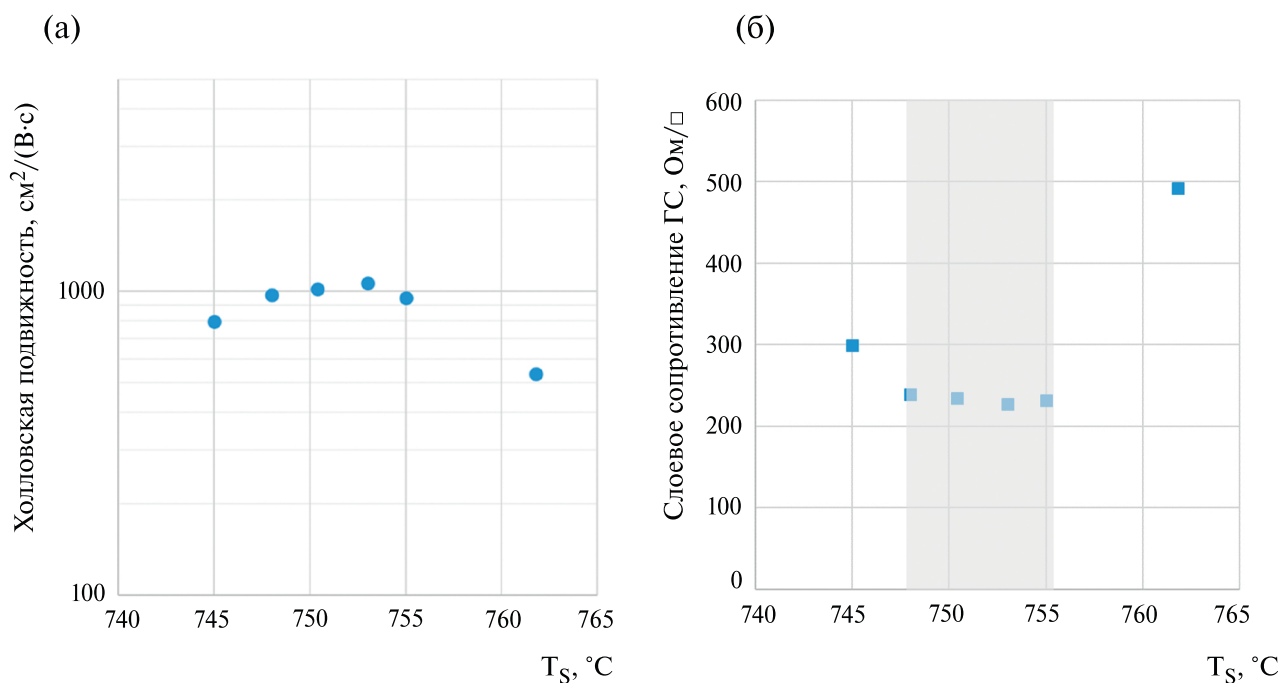


Рис. 3. (а) зависимость подвижности 2DEG от параметра $\langle T_s \rangle$; (б) зависимость слоевого сопротивления полной ГС от параметра $\langle T_s \rangle$.

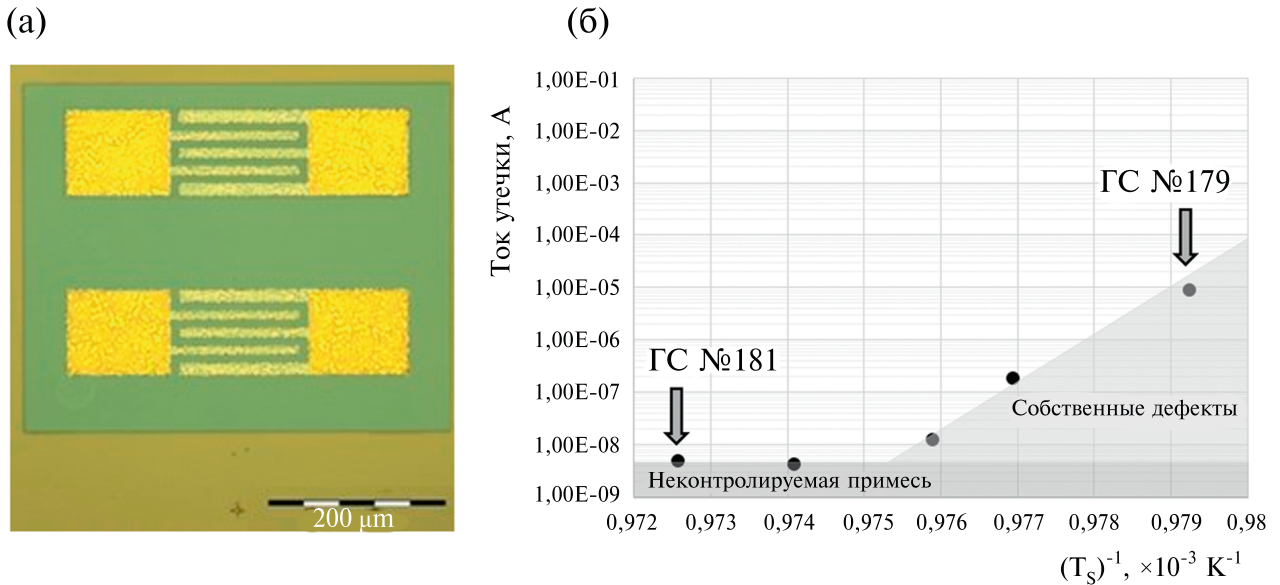


Рис. 4. (а) топология тестовой структуры, (б) экспериментальная зависимость среднего (по выборке) тока утечки через тест мезаизоляции от параметра $\langle T_s \rangle$.

745–760°C. В остальном процедура молекулярно-лучевой эпитаксии соответствовала условиям получения ГС № 163.

Экспериментальные данные о холловской подвижности (μ_H), слоевой концентрации носителей заряда (n_s) и среднеквадратичной шероховатости поверхности (RMS) экспериментальных образцов данной серии сведены в табл. 3. Оценка среднеквадратичной (RMS) шероховатости поверхности ГС выполнена на основе результатов атомно-силовой микроскопии. АСМ-измерения осуществлялись в полуконтактном режиме с применением сканирующего зондового микроскопа “Solver Open” (НТ-МДТ) на воздухе при комнатной температуре. Использовались кантилеверы марки NSG01 (длина балки 125 мкм с коэффициентом жесткости 5,1 Н/м, резонансная частота 87–230 кГц, радиус кривизны острия 10 нм).

На рис. 3 а, б показаны зависимости подвижности 2DEG и слоевого сопротивления полной ГС (ρ_s), соответственно, от параметра $\langle T_s \rangle$. Из представленных экспериментальных зависимостей следует, что ГС с наилучшими транспортными свойствами ($\rho = 230–240 \text{ Ом}/\square$) могут быть получены в диапазоне $\langle T_s \rangle \approx 748–755^\circ\text{C}$. Причем со стороны высоких температур этот диапазон ограничен увеличением шероховатости ГС, что хорошо согласуется со сведениями о термической стабильности

Таблица 4. Значения коэффициентов в модели Angelov2

I_{pk0s} , мкА	α , В ⁻¹	λ , В ⁻¹
100	0,38	0,05

нитрида галлия [43] и с данными о вкладе шероховатости гетерограницы в рассеяние квазидвумерных носителей заряда [44].

Со стороны меньших температур “окно” низкого слоевого сопротивления (выделено заливкой на рисунке 3, б) ограничено ухудшением изоляционных свойств GaN буфера. Доказательством данному утверждению служат результаты измерений тока утечки через тестовую структуру, топология которой приведена на рис. 4, а. Тест имел встречно-штыревую геометрию с общей длиной мезаструктуры $\approx 0,7 \text{ мм}$. Изоляция “левой” и “правой” гребенок выполнялась путем плазмохимического травления поверхности ГС на глубину до 90 нм через маску из фоторезиста.

На рис. 4, б представлена экспериментальная зависимость среднего (по пластине) тока утечки через тест при напряжении 30 В от параметра $\langle T_s \rangle$. Увеличение проводимости буфера в низкотемпературной части графика обусловлено ростом концентрации собственных дефектов решетки GaN и сопровождается появлением у образцов фотолюминесценции в желто-оранжевой области спектра. Выход на плато при повышенных $\langle T_s \rangle$ вызван, по всей видимости, присутствием неконтролируемой фоновой примеси. В целом (по выборке) величина тока через тест для ГС №179 составила $8,8 \pm 3 \text{ мкА}$, что при длине мезаструктуры $\approx 0,7 \text{ мм}$ и напряжении питания 30 В приводит к удельному сопротивлению $\sim 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$. Тогда как у образца № 181 средняя величина тока утечки равна $4,7 \pm 2 \text{ нА}$, а удельное сопротивление изоляции ($\sim 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$) является достаточным [14] для практического применения.

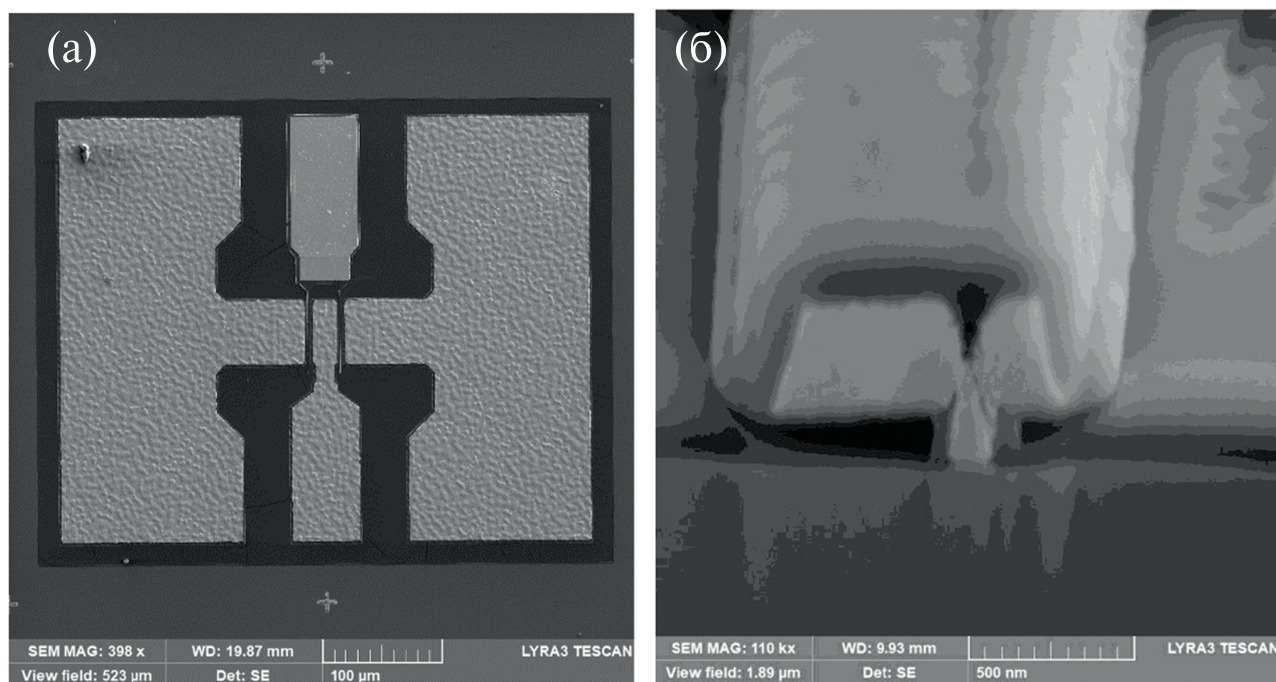


Рис. 5. (а) РЭМ изображение топологии тестового транзистора; (б) РЭМ изображение поперечного среза (ФИП) его затворной части (Т-образный затвор)

3. ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ НЕМТ-ТРАНЗИСТОРОВ С ЗАТВОРОМ ШОТТКИ

На основе экспериментальной ГС, обладающей наилучшими электрофизическими параметрами (ГС №163), были изготовлены тестовые *HEMT*-транзисторы с затвором Шоттки. Процесс

изготовления *HEMT*-транзисторов (постростовой процессинг) включал следующие основные технологические операции:

- формирование межприборной изоляции методом плазмохимического травления в среде BCl_3/Ar через предварительно нанесенную резистивную маску (*S1818*) на глубину 70–90 нм;

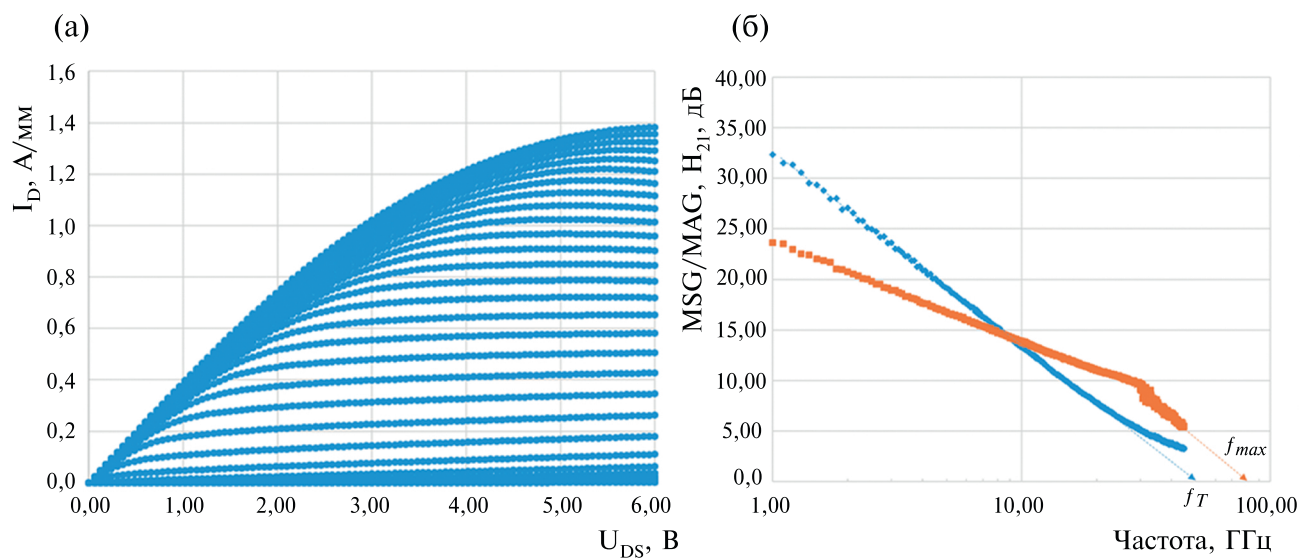


Рис. 6. Семейство выходных (*DC*) характеристик одного из тестовых транзисторов (при изменении напряжения на затворе U_{GS} от $-7,0$ до $+2,5$ В) (а); типичные частотные зависимости модуля коэффициента передачи по току ($|h_{21}|$) и максимально достижимого/стабильного коэффициента усиления по мощности (*MAG/MSG*) тестового транзистора (б).

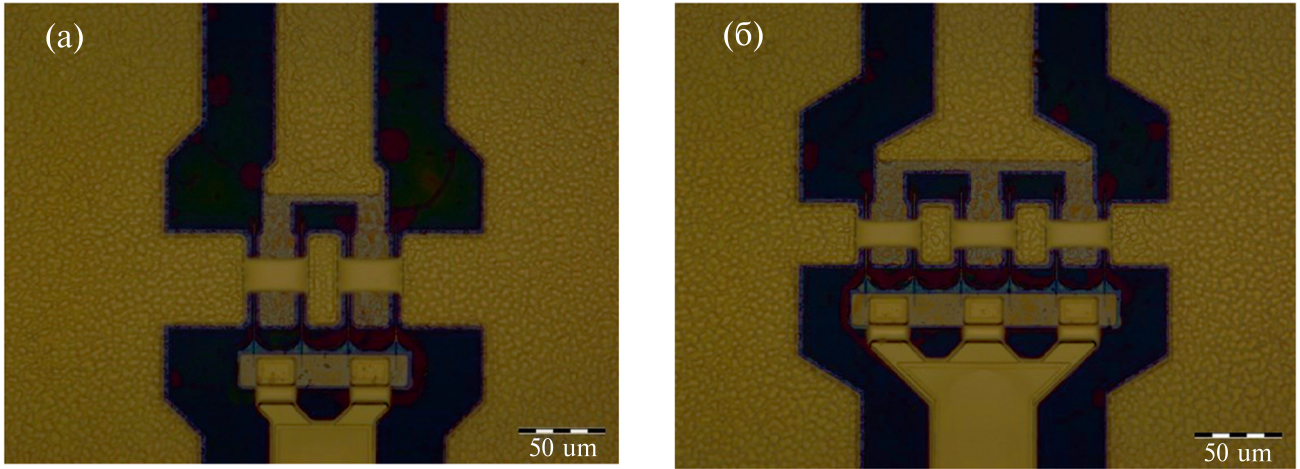


Рис. 7. Топология 4-х (а) и 6-секционного (б) транзисторов с межсоединениями в виде воздушных мостов (изображения получены с помощью оптической микроскопии).

- фотолитография омических контактов под “lift-off” процесс (LOR 5A);
- резистивное напыление омических контактов $Ti(30\text{ нм})/Al(90\text{ нм})/Ni(50\text{ нм})/Au(110\text{ нм})$, “взрыв”

- и вжигание металлизации при 750°C в течение 30 с (быстрый термический отжиг в среде N_2);
- электронно-лучевая литография грибообразных затворов с применением трехслойной

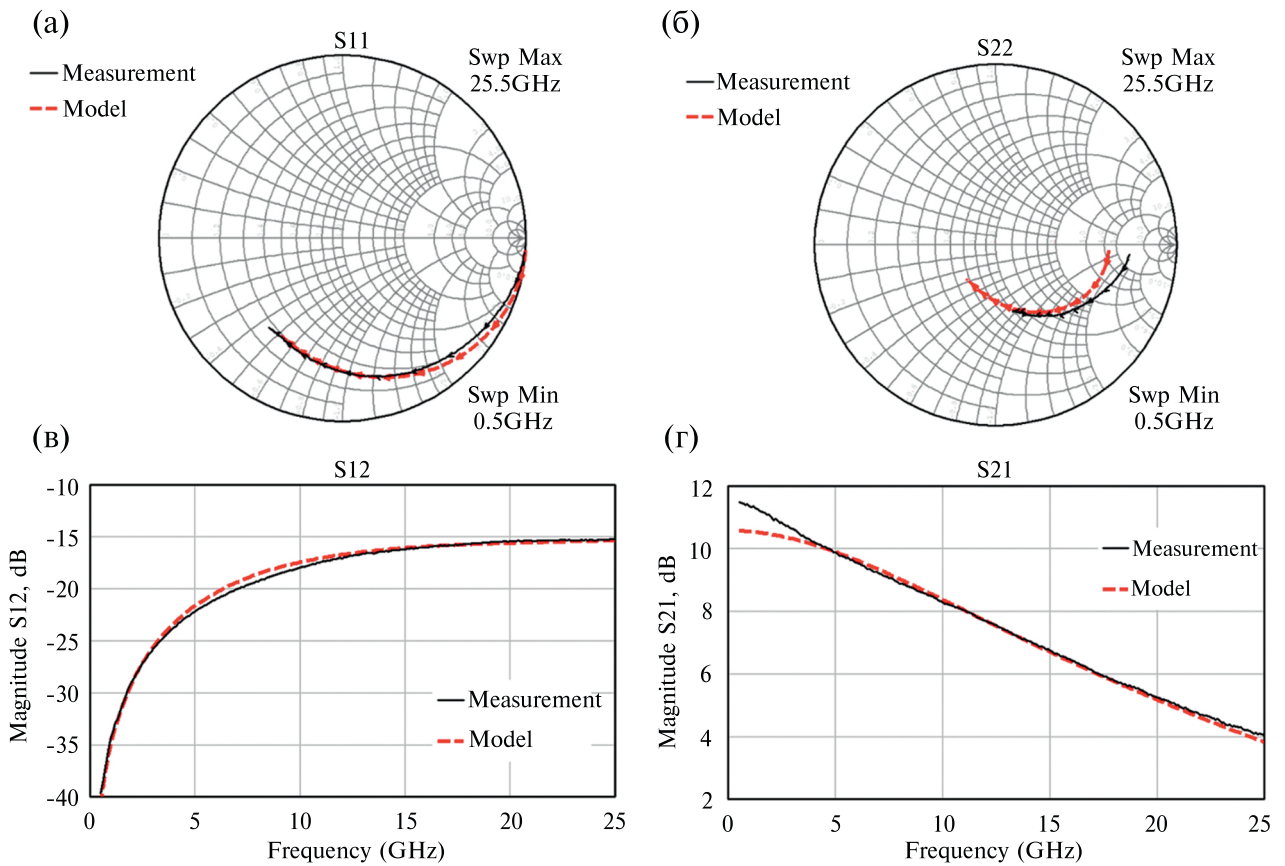


Рис. 8. S-параметры AlN/GaN НЕМТ в диапазоне частот 0,5–25,5 ГГц при $U_{GS} = -2,75\text{ В}$ и $U_{DS} = 5\text{ В}$ (сплошными линиями изображены измеренные характеристики, пунктирными – результаты моделирования).

системы резистов *PMMA/PMGI/PMMA*, последующее нанесение затворной металлизации *Ni(40 нм)/Au(350 нм)/Ti(15 нм)* посредством “*lift-off*” процесса;

– пассивация поверхности пластины путем плазмохимического осаждения слоя нитрида кремния толщиной около 100 нм, вскрытие окон в диэлектрике;

– формирование электрических межсоединений (для тестовых структур применялся один уровень металлизации *Ti(10 нм)/Au(400 нм)/Ti(10 нм)*).

Сформированные тестовые модули содержали как транзисторы упрощенной прямоугольной геометрии с шириной затвора $W_g = 50$ мкм для измерения статических ВАХ, так и секционированные структуры с $W_g = 2 \times 50$ мкм и топологией, обеспечивающей применение *GSG* зондовых головок для измерения *S*-параметров. Расстояние “исток-сток” в обоих случаях составляло 3 мкм. Параметр длины затвора L_g , обеспеченный использованием электронно-лучевой литографии, равен ≈ 150 нм (рис. 5).

Измерения статических ВАХ (входной, выходной и передаточной характеристик) осуществлялись с помощью анализатора полупроводниковых приборов В1500А (“*Agilent/Keysight*”) и зондовой станции ЕР6 (“*Cascade Microtech*”). Анализ статических ВАХ изготовленных приборов (рис. 6, а) показал, что они имеют максимальный ток насыщения стока до 1,4 А/мм (при $U_{GS} = +2,5$ В), крутизну характеристики G_m до 330 мСм/мм и сопротивление в открытом состоянии R_{on} до 2,6 Ом·мм. Средние значения рассматриваемых параметров для всей выборки тестовых модулей составили $1,27 \pm \pm 0,07$ А/мм, 306 ± 18 мСм/мм и $2,9$ Ом·мм $\pm 0,3$, соответственно. Пороговое напряжение $U_{th} \approx -3,2$ В (определено по точке максимальной крутизны).

Для анализа работоспособности транзисторов в СВЧ-диапазоне выполнялись измерения

$$I_{си} = I_{pk0} [1 + \tanh(\Psi)] \cdot \tanh(\alpha U_{си}) \cdot (1 + \lambda U_{си}),$$

где $U_{си}$ – напряжение сток-исток, Ψ – функция степенного ряда, содержащего варьируемые параметры, I_{pk0} , α , λ – параметры модели, описывающие поведение характеристики тока стока в области насыщения (табл. 4).

На рис. 8 представлены экспериментальные и рассчитанные значения *S*-параметров транзистора, измеренные в точке с наибольшей крутизной: при напряжении на затворе $U_{GS} = -2,75$ В и напряжении сток-исток $U_{DS} = 5$ В.

Как видно из рисунка 8, модель *AlN/GaN HEMT* позволяет охарактеризовать транзистор в высокочастотном диапазоне (*X*-диапазоне) с погрешностью около 3%, что находится в пределах допустимой ошибки измерений. Некоторые расхождения

S-параметров экспериментальных структур в двухсекционном исполнении с $W_g = 2 \times 50$ мкм. Измерения осуществлялись с помощью высокопрецизионного векторного анализатора цепей *PNA-X N5245A* (“*Agilent/Keysight*”) и зондовой станции *PM8* (“*Cascade Microtech*”) в импульсном режиме в частотном диапазоне 0,5–45 ГГц и при мощности СВЧ-сигнала – 10 дБм. Оценка предельных частот усиления по току f_T и мощности f_{max} приводит к значениям 50 и 80 ГГц, соответственно (рисунки 6, б). Максимальный стабильный коэффициент усиления на частоте 20 ГГц составил 11–12 дБ.

4. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ *HEMT* НА ОСНОВЕ *ALN/GaN* ГС

На следующем этапе технологического маршрута путем соединения контактов истока воздушными мостами формировались “многопальцевые” затворы секционированных транзисторов. Топология полученных 4-х и 6-секционных транзисторов приведена на рис. 7.

Для характеристики экспериментальных образцов были проведены измерения ВАХ и *S*-параметров тестового транзистора с шестью затворными секциями шириной 50 мкм. Исследования проводились в частотном диапазоне от 0,5 до 25,5 ГГц. В процессе работы были рассмотрены модели *Angelov2*, *Fujii* и *EEHEMT*, успешно применяемые для параметризации *HEMT* [45, 46]. Ключевые величины модели определялись путем экстракции внешних и внутренних параметров аналогично методике, представленной в работе [47]. Наилучшую сходимость продемонстрировала модель *Angelov2*. Процедура ее оптимизации позволила минимизировать расхождения с экспериментальными данными и достичь совпадения характеристик на уровне не менее 92%. В частности, зависимость величины тока стока для модели *Angelov2* определяется следующим выражением:

в низкочастотной области (менее 4 ГГц) связаны с особенностями настройки измерительного стенда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии с плазменной активацией азота получены *AlN/GaN HEMT* гетероструктуры (ГС), содержащие ультратонкий барьер *AlN* (5 нм). Исследовано влияние режимов нуклеации и роста буферного слоя на кристаллическое качество, морфологию поверхности и электрофизические свойства экспериментальных ГС. Слоевое сопротивление оптимизированной ГС составило менее 230 Ом/□. Сопротивление

мезаизоляции, характеризующее изоляционные свойства буфера $\sim 10^9$ Ом·мм.

На основе оптимизированных ГС были изготовлены тестовые СВЧ транзисторы с затвором Шоттки ($L_g \approx 150$ нм). Анализ характеристик тестовых приборов показал, что они имеют максимальный ток насыщения стока до 1,4 А/мм (при $U_{GS} = +2,5$ В), крутизну характеристики G_m до 330 мСм/мм и сопротивление в открытом состоянии до $R_{on} = 2,6$ Ом·мм. Предельные частоты усиления по току f_t и по мощности f_{max} достигают 50 и 80 ГГц, соответственно.

Предложена параметрическая модель *HEMT* на основе *AlN/GaN* ГС, позволяющая описать поведение транзистора в *X*-диапазоне частот с погрешностью около 3%. Модель может быть использована в коммерческих САПР при проектировании СВЧ МИС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с применением оборудования центра коллективного пользования “Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников” НИЯУ МИФИ в рамках государственного задания (код проекта FSWU-2023-0088).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *I.P. Smorchkova, S. Keller, S. Heikman et al.* Two-dimensional electron-gas *AlN/GaN* heterostructures with extremely thin *AlN* barriers // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – V. 77. – I. 24. – pp. 3998–4000. <https://doi.org/10.1063/1.1332408>
2. *Yu Cao and Debdeep Jena*, High-mobility window for two-dimensional electron gases at ultrathin *AlN/GaN* heterojunctions // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V. 90. – I. 18. – article ID 182112. <https://doi.org/10.1063/1.2736207>
3. *D.J. Meyer et al.*, High electron velocity submicrometer *AlN/GaN* MOS-HEMTs on freestanding *GaN* substrates // in *IEEE Electron Device Letters*. – 2013. – V. 34. – № 2. – pp. 199 – 201. doi: 10.1109/LED.2012.2228463.
4. *J.S. Xue, J.C. Zhang, Y. Hao*, Ultrathin barrier *AlN/GaN* high electron mobility transistors grown at a dramatically reduced growth temperature by pulsed metal organic chemical vapor deposition // *Appl. Phys. Lett.* – 2015. – V. 107. – I. 4. – article ID 043503. <https://doi.org/10.1063/1.4927743>
5. *O. Ambacher, J. Smart, J.R. Shealy et al.* Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in *N*- and *Ga*-face *AlGaIn/GaN* heterostructures // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 85. – pp. 3222–3233. <https://doi.org/10.1063/1.369664>
6. *Y. Cao, K. Wang, G. Li et al.* MBE growth of high conductivity single and multiple *AlN/GaN* heterojunctions // *Journal of Crystal Growth*. – 2011. – V. 323. – I. 1. – pp. 529–533. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.12.047>
7. *X. Luo et al.* Scaling and high-frequency performance of *AlN/GaN* HEMTs // in *IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology*. – 2011. – pp. 209–212. doi: 10.1109/RFIT.2011.6141776.
8. *K. Harrouche, R. Kabouche, E. Okada et al.* High performance and highly robust *AlN/GaN* HEMTs for millimeter-wave operation // in *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. – 2019. – V. 7. – pp. 1145–1150. doi: 10.1109/JEDS.2019.2952314
9. *I.P. Smorchkova et al.* *AlN/GaN* and *(Al, Ga)N/AlN/GaN* two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – V. 90. – № 10 – pp. 5196–5201. <https://doi.org/10.1063/1.1412273>
10. *T. Zimmermann et al.* *AlN/GaN* Insulated-gate HEMTs with 2,3 A/mm output current and 480 mS/mm transconductance // *IEEE Electron Device Letters*. – 2008. – V. 29. – № 7. – pp. 661–664. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4558119>
11. *C.Y. Chang et al.* Very low sheet resistance *AlN/GaN* high electron mobility transistors // *Proc. CS MAN-TECH Conference*. – 2009. – pp. 18–21.
12. *Д.Ю. Протасов, Т.В. Малин, А.В. Тихонов и др.* Рассеяние электронов в гетероструктурах *AlGaIn/GaN* с двумерным электронным газом // *Физика и техника полупроводников*, 2013, том 47, вып. 1, стр. 36–47.
13. *S. Mukhopadhyay, C. Liu, J. Chen et al.* Crack-free high-composition (> 35%) thick-barrier (>30 nm) *AlGaIn/AlN/GaN* high-electron-mobility transistor on sapphire with low sheet resistance (< 250 Ω/\square) // *Crystals*. – 2023. – V. 13(10). – Article ID 1456. <https://doi.org/10.3390/cryst13101456>
14. *S. Müller, K. Köhler, R. Kiefer et al.* Growth of *AlGaIn/GaN* based electronic device structures with semi-insulating *GaN* buffer and *AlN* interlayer // *Phys. Stat. Sol. (C)*. – 2005. – V. 2. – № 7. – pp. 2639–2642. <https://doi.org/10.1002/pssc.200461288>
15. *R.K. Kaneriya, C. Karmakar, G. Rastogi et al.* Influence of *AlN* spacer and *GaN* cap layer in *GaN* heterostructure for *RF* HEMT applications // *Microelectronic engineering*. – 2022. – V. 255. – Article ID 111724. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2022.111724>

16. *D.F. Storm, D.S. Katzer, S.C. Binari et al.* Room temperature Hall mobilities above $1900 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ in MBE-grown *AlGaN/GaN HEMT* structures // *Electronics letters*. – 2004. – V. 40. – I. 19. – pp. 1226–1227. DOI: 10.1049/el:20045859
17. *D.F. Storm, D.S. Katzer, J.A. Mittereder et al.* Growth and characterization of plasma-assisted molecular beam epitaxial-grown *AlGaN/GaN* heterostructures on free-standing hydride vapor phase epitaxy *GaN* substrates // *Journal of vacuum science & technology B*. – 2005. – V. 23. – № 3. – pp. 1190–1193. <https://doi.org/10.1116/1.1885013>
18. *Y.-K. Noh, S.-T. Lee, M.-D. Kim et al.* High electron mobility transistors with Fe-doped semi-insulating *GaN* buffers on (110) *Si* substrates grown by ammonia molecular beam epitaxy // *Journal of crystal growth*. – 2019. – V. 509. – pp. 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.07.016>
19. *S. Wu, X. Ma, L. Yang et al.* A millimeter-wave *AlGaN/GaN HEMT* fabricated with transitional-recessed-gate technology for high-gain and high-linearity applications // *IEEE Electron device letters*. – 2019. – V. 40. – № 6. – pp. 846–849. DOI: 10.1109/LED.2019.2909770
20. *Y. Cordier, M. Portail, S. Chenot et al.* *AlGaN/GaN* high electron mobility transistors grown on *3C-SiC/Si(111)* // *Journal of crystal growth*. – 2008. – V. 310. – I. 20. – pp. 4417–4423. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.07.063>
21. *Y. Cordier, J.-C. Moreno, N. Baron et al.* Demonstration of *AlGaN/GaN* high-electron-mobility transistors grown by molecular beam epitaxy on *Si(110)* // *IEEE Electron device letters*. – 2008. – V. 29. – № 11. – pp. 1187–1189. DOI: 10.1109/LED.2008.2005211.
22. *Z. Chen, Y. Pei, S. Newman et al.* Growth of *AlGaN/GaN* heterojunction field effect transistors on semi-insulating *GaN* using an *AlGaN* interlayer // *Appl. phys. lett.* – 2009. – V. 94. – article ID 112108. <https://doi.org/10.1063/1.3103210>
23. *L. Guo, X. Wang, C. Wang et al.* The influence of 1 nm *AlN* interlayer on properties of the *Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN HEMT* structure // *Microelectronics journal*. – 2008. – V. 39. – I. 5. – pp. 777–781. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.12.005>
24. *C. Wang, H.-T. Hsu, T.-J. Huang et al.* Effect of *AlN* Spacer on the *AlGaN/GaN HEMT* Device Performance at Millimeter-Wave Frequencies // *2018 Asia-Pacific microwave conference (APMC)*. – 2018. – pp. 1208–1210. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617568
25. *X. Wang, G. Hu, Z. Ma et al.* *AlGaN/AlN/GaN/SiC HEMT* structure with high mobility *GaN* thin layer as channel grown by MOCVD // *Journal of crystal growth*. – 2007. – V. 298. – pp. 835–839. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.10.219>
26. *R.S. Balmer, K.P. Hilton, K.J. Nash et al.* Analysis of thin *AlN* carrier exclusion layers in *AlGaN/GaN* microwave heterojunction field-effect transistors // *Semiconductor science and technology*. – 2004. – V. 19. – № 6. – pp. L65–L67. DOI 10.1088/0268-1242/19/6/L02
27. *Ma Zhi-Yong, Wang Xiao-Liang, Hu Guo-Xin et al.* Growth and Characterization of *AlGaN/AlN/GaN HEMT* structures with a compositionally step-graded *AlGaN* barrier layer // *Chinese physics letters*. – 2007. – V. 24. – № 6. – pp. 1705–1708.
28. *W. Xiaoliang, H. Guoxin, M. Zhiyong et al.* MOCVD-grown *AlGaN/AlN/GaN HEMT* structure with high mobility *GaN* thin layer as channel on *SiC* // *Chin. J. semicond.* – 2006. – V. 27. – I. 9. – pp. 1521–1525.
29. *M. Gonschorek, J.-F. Carlin, E. Feltrin et al.* High electron mobility lattice-matched *AlInN/GaN* field-effect transistor heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – V. 89. – article ID 062106. <https://doi.org/10.1063/1.2335390>
30. *M. Hiroki, N. Maeda, T. Kobayashi*, Fabrication of an *InAlN/AlGaN/AlN/GaN* heterostructure with a flat surface and high electron mobility // *Applied Physics Express*. – 2008. – V. 1. – № 11. – article ID 111102. <https://doi.org/10.1143/APEX.1.111102>
31. *J. Kuzmik, G. Pozzovivo, S. Abermann et al.* Technology and performance of *InAlN/AlN/GaN HEMTs* with gate insulation and current collapse suppression using *ZrO₂* or *HfO₂* // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2008. – V. 55. – № 3. – pp. 937–941. doi: 10.1109/TED.2007.915089.
32. *J. Guo, Y. Cao, C. Lian et al.* Metal-face *InAlN/AlN/GaN* high electron mobility transistors with regrown ohmic contacts by molecular beam epitaxy // *Phys. Status Solidi (A)*. – 2011. – V. 208. – № 7. – pp. 1617–1619. <https://doi.org/10.1002/pssa.201001177>
33. *Y. Yue, Z. Hu, J. Guo et al.* Ultrascaled *InAlN/GaN* high electron mobility transistors with cutoff frequency of 400 GHz // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2013. – V. 52. – № 8S. – article ID 08JN14. <https://doi.org/10.7567/JJAP.52.08JN14>
34. *T. Han, S. Dun Y. Lu et al.* 70-nm-gated *InAlN/GaN HEMTs* grown on *SiC* substrate with $f_T/f_{max} > 160$ GHz // *Journal of Semiconductors*. – 2016. – V. 37. – № 2. – article number 024007. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/37/2/024007>
35. *A. Malmros, J.-T. Chen, H. Hjelmgren et al.* Enhanced mobility in *InAlN/AlN/GaN HEMTs* using a *GaN* interlayer // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2019. – V. 66. – I.7. – pp. 2910–2915. DOI: 10.1109/TED.2019.2914674
36. *F. Medjdoub, R. Kabouche, A. Linge et al.* High electron mobility in high-polarization sub-10 nm barrier thickness *InAlGaN/GaN* heterostructure // *Applied*

- Physics Express. – 2015. – V. 8. – № 10. – article ID 101001.
<https://doi.org/10.7567/APEX.8.101001>
37. G. Zhu, K. Zhang, Y. Kong et al. High electron mobility in high-polarization sub-10 nm barrier thickness *InAlGa*N/*GaN* heterostructure // Applied Physics Express. – 2017. – V. 10. – № 11. – article ID 114101. <https://doi.org/10.7567/APEX.10.114101>
 38. J. Kotani, A. Yamada, T. Ohki et al. Recent advancement of *GaN* HEMT with *InAlGa*N barrier layer and future prospects of *AlN*-based electron devices // IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). – 2018. – pp. 30.4.1–30.4.4. DOI: 10.1109/IEDM.2018.8614519
 39. I. Sanyal, Y.-C. Lee, Y.-C. Chen et al. Achieving high electron mobility in *AlInGa*N/*GaN* heterostructures: the correlation between thermodynamic stability and electron transport properties // Appl. Phys. Lett. – 2019. – V. 114. – article ID 222103. <https://doi.org/10.1063/1.5090874>
 40. S. Burnham, W. Doolittle, *In situ* growth regime characterization of *AlN* using reflection high energy electron diffraction // Journal of vacuum science & technology B. – 2006. – V. 24. – pp. 2100–2104.
 41. S. Burnham, G. Namkoong, K. Lee et al. Reproducible reflection high energy electron diffraction signatures for improvement of *AlN* using *in situ* growth regime characterization // Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2007. – V. 25. – pp. 1009–1013.
 42. A.R. Smith, R.M. Feenstra, D.W. Greve et al. Determination of wurtzite *GaN* lattice polarity based on surface reconstruction // Appl. Phys. Lett. – 1998. – V. 72. – I.17 – pp. 2114–2116. <https://doi.org/10.1063/1.121293>
 43. S. Fernández-Garrido, G. Koblmüller, E. Calleja et al. *In situ* *GaN* decomposition analysis by quadrupole mass spectrometry and reflection high-energy electron diffraction // Journal of applied physics. – 2008. – V. 104. – article ID 033541 <https://doi.org/10.1063/1.2968442>
 44. A.S. Gusev, A.O. Sultanov, A.V. Katkov et al. Analysis of carrier scattering mechanisms in *AlN/GaN* HEMT heterostructures with an ultrathin *AlN* barrier // Russian Microelectronics. – 2024. – V. 53. – № 3. – pp. 252–259.
 45. I. Angelov, H. Zirath, N. Rosman, A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1992. – V. 40. – № 12. – pp. 2258–2266
 46. K. Fujii, Y. Hara, F.M. Ghannouchi et al. A nonlinear GaAs FET model suitable for active and passive mm-wave applications. – 2000. – IEICE Trans. – V. E83-A. – № 2. – p. 228.
 47. D. Tsunvaza, R.V. Ryzhuk, I.S. Vasil'evskii et al. The design of nonlinear model of pseudomorphic 0,15 μm pHEMT *AlGaAs/InGaAs/GaAs* transistor // Russian microelectronics. – 2023. – V. 52. – № 3. pp. 160–166.

III-nitride HEMT Heterostructures with an Ultrathin *AlN* Barrier: Fabrication and Experimental Application

A. S. Gusev*, A. O. Sultanov, R. V. Ryzhuk, T. N. Nevolina,
D. Tsunvaza, G. K. Safaraliev, N. I. Kargin

National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

*e-mail: ASGusev@mephi.ru

Using molecular beam epitaxy (MBE) with plasma-activated nitrogen, III-nitride HEMT heterostructures with an ultrathin *AlN* barrier were obtained. The effects of nucleation and buffer layer growth conditions on the crystalline quality, surface morphology, and electrophysical properties of the experimental heterostructures were studied. The sheet resistance of the optimized heterostructure was less than 230 Ω/\square . Test microwave transistor samples with Schottky gates were fabricated. A parametric model of the HEMT based on the *AlN/GaN* heterostructure was proposed.

Keywords: molecular beam epitaxy, *GaN*, ultrathin *AlN* barrier, HEMT

REFERENCES

1. *I.P. Smorchkova, S. Keller, S. Heikman et al.* Two-dimensional electron-gas *AlN/GaN* heterostructures with extremely thin *AlN* barriers // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – V. 77. – I. 24. – pp. 3998–4000. <https://doi.org/10.1063/1.1332408>
2. *Yu Cao and Debdeep Jena.* High-mobility window for two-dimensional electron gases at ultrathin *AlN/GaN* heterojunctions // *Appl. Phys. Lett.* – 2007. – V. 90. – I. 18. – article ID 182112. <https://doi.org/10.1063/1.2736207>
3. *D.J. Meyer et al.,* High electron velocity submicrometer *AlN/GaN* MOS-HEMTs on freestanding GaN substrates // in *IEEE Electron Device Letters.* – 2013. – V. 34. – № 2. – pp. 199–201. doi: 10.1109/LED.2012.2228463.
4. *J.S. Xue, J.C. Zhang, Y. Hao,* Ultrathin barrier *AlN/GaN* high electron mobility transistors grown at a dramatically reduced growth temperature by pulsed metal organic chemical vapor deposition // *Appl. Phys. Lett.* – 2015. – V. 107. – I. 4. – article ID 043503. <https://doi.org/10.1063/1.4927743>
5. *O. Ambacher, J. Smart, J.R. Shealy et al.* Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in N- and Ga-face *AlGaIn/GaN* heterostructures // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 85. – pp. 3222–3233. <https://doi.org/10.1063/1.369664>
6. *Y. Cao, K. Wang, G. Li et al.* MBE growth of high conductivity single and multiple *AlN/GaN* heterojunctions // *Journal of Crystal Growth.* – 2011. – V. 323. – I. 1. – pp. 529–533. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.12.047>
7. *X. Luo et al.* Scaling and high-frequency performance of *AlN/GaN* HEMTs // in *IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology.* – 2011. – pp. 209–212. doi: 10.1109/RFIT.2011.6141776.
8. *K. Harrouche, R. Kabouche, E. Okada et al.* High performance and highly robust *AlN/GaN* HEMTs for millimeter-wave operation // in *IEEE Journal of the Electron Devices Society.* – 2019. – V. 7. – pp. 1145–1150. doi: 10.1109/JEDS.2019.2952314
9. *I.P. Smorchkova et al.* *AlN/GaN* and (Al, Ga)*N/AlN/GaN* two-dimensional electron gas structures grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy // *Journal of Applied Physics.* – 2001. – V. 90. – № 10 – pp. 5196–5201. <https://doi.org/10.1063/1.1412273>
10. *T. Zimmermann et al.* *AlN/GaN* Insulated-gate HEMTs with 2,3 A/mm output current and 480 mS/mm transconductance // *IEEE Electron Device Letters.* – 2008. – V. 29. – № 7. – pp. 661–664. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4558119>
11. *C.Y. Chang et al.* Very low sheet resistance *AlN/GaN* high electron mobility transistors // *Proc. CS MANTECH Conference.* – 2009. – pp. 18–21.
12. *D. Yu. Protasov, T.V. Malin, A.V. Tikhonov et al.* Scattering of 2DEG electrons in *AlGaIn/GaN* heterostructures // *Fizika I Tehnika Poluprovodnikov (Phys. and Tech. of Semicon.)*. – 2013. – V. 47(1), – pp. 36–47
13. *S. Mukhopadhyay, C. Liu, J. Chen et al.* Crack-free high-composition (> 35%) thick-barrier (>30 nm) *AlGaIn/AlN/GaN* high-electron-mobility transistor on sapphire with low sheet resistance (< 250 Ω/\square) // *Crystals.* – 2023. – V. 13(10). – Article ID 1456. <https://doi.org/10.3390/cryst13101456>
14. *S. Müller, K. Köhler, R. Kiefer et al.* Growth of *AlGaIn/GaN* based electronic device structures with semi-insulating GaN buffer and *AlN* interlayer // *Phys. Stat. Sol. (C).* – 2005. – V. 2. – № 7. – pp. 2639–2642. <https://doi.org/10.1002/pssc.200461288>
15. *R.K. Kaneriyaa, C. Karmakar, G. Rastogi et al.* Influence of *AlN* spacer and GaN cap layer in GaN heterostructure for RF HEMT applications // *Microelectronic engineering.* – 2022. – V. 255. – Article ID 111724. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2022.111724>
16. *D.F. Storm, D.S. Katzer, S.C. Binari et al.* Room temperature Hall mobilities above 1900 cm²/(V·s) in MBE-grown *AlGaIn/GaN* HEMT structures // *Electronics letters.* – 2004. – V. 40. – I. 19. – pp. 1226 – 1227. DOI: 10.1049/el:20045859
17. *D.F. Storm, D.S. Katzer, J.A. Mittereder et al.* Growth and characterization of plasma-assisted molecular beam epitaxial-grown *AlGaIn/GaN* heterostructures on free-standing hydride vapor phase epitaxy GaN substrates // *Journal of vacuum science & technology B.* – 2005. – V. 23. – № 3. – pp. 1190–1193. <https://doi.org/10.1116/1.1885013>
18. *Y.-K. Noh, S.-T. Lee, M.-D. Kim et al.* High electron mobility transistors with Fe-doped semi-insulating GaN buffers on (110) Si substrates grown by ammonia molecular beam epitaxy // *Journal of crystal growth.* – 2019. – V. 509. – pp. 141–145. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2018.07.016>
19. *S. Wu, X. Ma, L. Yang et al.* A millimeter-wave *AlGaIn/GaN* HEMT fabricated with transitional-recessed-gate technology for high-gain and high-linearity applications // *IEEE Electron device letters.* – 2019. – V. 40. – № 6. – pp. 846–849. DOI: 10.1109/LED.2019.2909770
20. *Y. Cordier, M. Portail, S. Chenot et al.* *AlGaIn/GaN* high electron mobility transistors grown on 3C-SiC/Si(111) // *Journal of crystal growth.* – 2008. – V. 310. – I. 20. – pp. 4417–4423. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2008.07.063>
21. *Y. Cordier, J.-C. Moreno, N. Baron et al.* Demonstration of *AlGaIn/GaN* high-electron-mobility transistors grown by molecular beam epitaxy on Si(110) // *IEEE*

- Electron device letters. – 2008. – V. 29. – № 11. – pp. 1187–1189.
DOI: 10.1109/LED.2008.2005211.
22. Z. Chen, Y. Pei, S. Newman et al. Growth of *AlGaIn/GaN* heterojunction field effect transistors on semi-insulating *GaN* using an *AlGaIn* interlayer // *Appl. phys. lett.* – 2009. – V. 94. – article ID 112108.
<https://doi.org/10.1063/1.3103210>
 23. L. Guo, X. Wang, C. Wang et al. The influence of 1 nm *AlN* interlayer on properties of the *Al_{0.3}Ga_{0.7}N/AlN/GaN* HEMT structure // *Microelectronics journal.* – 2008. – V. 39. – I. 5. – pp. 777–781.
<https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.12.005>.
 24. C. Wang, H.-T. Hsu, T.-J. Huang et al. Effect of *AlN* Spacer on the *AlGaIn/GaN* HEMT Device Performance at Millimeter-Wave Frequencies // *2018 Asia-Pacific microwave conference (APMC).* – 2018. – pp. 1208–1210.
DOI: 10.23919/APMC.2018.8617568
 25. X. Wang, G. Hu, Z. Ma et al. *AlGaIn/AlN/GaN/SiC* HEMT structure with high mobility *GaN* thin layer as channel grown by *MOCVD* // *Journal of crystal growth.* – 2007. – V. 298. – pp. 835–839.
<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.10.219>.
 26. R.S. Balmer, K.P. Hilton, K.J. Nash et al. Analysis of thin *AlN* carrier exclusion layers in *AlGaIn/GaN* microwave heterojunction field-effect transistors // *Semiconductor science and technology.* – 2004. – V. 19. – № 6. – pp. L65–L67.
DOI 10.1088/0268-1242/19/6/L02
 27. Ma Zhi-Yong, Wang Xiao-Liang, Hu Guo-Xin et al. Growth and Characterization of *AlGaIn/AlN/GaN* HEMT structures with a compositionally step-graded *AlGaIn* barrier layer // *Chinese physics letters.* – 2007. – V. 24. – № 6. – pp. 1705–1708.
 28. W. Xiaoliang, H. Guoxin, M. Zhiyong et al. *MOCVD*-grown *AlGaIn/AlN/GaN* HEMT structure with high mobility *GaN* thin layer as channel on *SiC* // *Chin. J. semicond.* – 2006. – V. 27. – I. 9. – pp. 1521–1525.
 29. M. Gonschorek, J.-F. Carlin, E. Feltrin et al. High electron mobility lattice-matched *AlInN/GaN* field-effect transistor heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – V. 89. – article ID 062106.
<https://doi.org/10.1063/1.2335390>
 30. M. Hiroki, N. Maeda, T. Kobayashi, Fabrication of an *InAlN/AlGaIn/AlN/GaN* heterostructure with a flat surface and high electron mobility // *Applied Physics Express.* – 2008. – V. 1. – № 11. – article ID 111102.
<https://doi.org/10.1143/APEX.1.111102>
 31. J. Kuzmik, G. Pozzovivo, S. Abermann et al. Technology and performance of *InAlN/AlN/GaN* HEMTs with gate insulation and current collapse suppression using *ZrO₂* or *HfO₂* // *IEEE Transactions on Electron Devices.* – 2008. – V. 55. – №3. – pp. 937–941.
doi: 10.1109/TED.2007.915089.
 32. J. Guo, Y. Cao, C. Lian et al. Metal-face *InAlN/AlN/GaN* high electron mobility transistors with regrown ohmic contacts by molecular beam epitaxy // *Phys. Status Solidi (A).* – 2011. – V. 208. – № 7. – pp. 1617–1619.
<https://doi.org/10.1002/pssa.201001177>
 33. Y. Yue, Z. Hu, J. Guo et al. Ultrascaled *InAlN/GaN* high electron mobility transistors with cutoff frequency of 400 GHz // *Japanese Journal of Applied Physics.* – 2013. – V. 52. – № 8S. – article ID 08JN14.
<https://doi.org/10.7567/JJAP.52.08JN14>
 34. T. Han, S. Dun Y. Lu et al. 70-nm-gated *InAlN/GaN* HEMTs grown on *SiC* substrate with $f_p/f_{max} > 160$ GHz // *Journal of Semiconductors.* – 2016. – V.37. – № 2. – article number 024007.
<https://doi.org/10.1088/1674-4926/37/2/024007>
 35. A. Malmros, J.-T. Chen, H. Hjelmgren et al. Enhanced mobility in *InAlN/AlN/GaN* HEMTs using a *GaN* interlayer // *IEEE Transactions on Electron Devices.* – 2019. – V. 66. – I.7. – pp. 2910–2915.
DOI: 10.1109/TED.2019.2914674
 36. F. Medjdoub, R. Kabouche, A. Linge et al. High electron mobility in high-polarization sub-10 nm barrier thickness *InAlGaIn/GaN* heterostructure // *Applied Physics Express.* – 2015. – V. 8. – № 10. – article ID 101001.
<https://doi.org/10.7567/APEX.8.101001>
 37. G. Zhu, K. Zhang, Y. Kong et al. High electron mobility in high-polarization sub-10 nm barrier thickness *InAlGaIn/GaN* heterostructure // *Applied Physics Express.* – 2017. – V. 10. – № 11. – article ID 114101.
<https://doi.org/10.7567/APEX.10.114101>
 38. J. Kotani, A. Yamada, T. Ohki et al. Recent advancement of *GaN* HEMT with *InAlGaIn* barrier layer and future prospects of *AlN*-based electron devices // *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM).* – 2018. – pp. 30.4.1–30.4.4.
DOI: 10.1109/IEDM.2018.8614519
 39. I. Sanyal, Y.-C. Lee, Y.-C. Chen et al. Achieving high electron mobility in *AlInGaIn/GaN* heterostructures: the correlation between thermodynamic stability and electron transport properties // *Appl. Phys. Lett.* – 2019. – V. 114. – article ID 222103.
<https://doi.org/10.1063/1.5090874>
 40. S. Burnham, W. Doolittle, *In situ* growth regime characterization of *AlN* using reflection high energy electron diffraction // *Journal of vacuum science & technology B.* – 2006. – V. 24. – pp. 2100–2104.
 41. S. Burnham, G. Namkoong, K. Lee et al. Reproducible reflection high energy electron diffraction signatures for improvement of *AlN* using *in situ* growth regime characterization // *Journal of Vacuum Science & Technology B.* – 2007. – V. 25. – pp. 1009–1013.
 42. A.R. Smith, R.M. Feenstra, D.W. Greve et al. Determination of wurtzite *GaN* lattice polarity based on surface reconstruction // *Appl. Phys. Lett.* – 1998. – V. 72. – I.17 – pp. 2114 – 2116.
<https://doi.org/10.1063/1.121293>
 43. S. Fernández-Garrido, G. Koblmüller, E. Calleja et al. *In situ* *GaN* decomposition analysis by quadrupole mass

- spectrometry and reflection high-energy electron diffraction // *Journal of applied physics*. – 2008. – V. 104. – article ID 033541
<https://doi.org/10.1063/1.2968442>
44. *A.S. Gusev, A.O. Sultanov, A.V. Katkov et al.* Analysis of carrier scattering mechanisms in *AlN/GaN HEMT* heterostructures with an ultrathin AlN barrier // *Russian Microelectronics*. – 2024. – V. 53. – № 3. – pp. 252–259.
45. *I. Angelov, H. Zirath, N. Rosman,* A new empirical nonlinear model for *HEMT* and *MESFET* devices // *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*. – 1992. – V. 40. – № 12. – pp. 2258–2266
46. *K. Fujii, Y. Hara, F.M. Ghannouchi et al.* A nonlinear GaAs FET model suitable for active and passive mm-wave applications. – 2000. – *IEICE Trans.* – V. E83-A. – № 2. – p. 228.
47. *D. Tsunvaza, R.V. Ryzhuk, I.S. Vasil'evskii et al.* The design of nonlinear model of pseudomorphic 0,15 μm pHEMT *AlGaAs/InGaAs/GaAs* transistor // *Russian microelectronics*. – 2023. – V. 52. – №3. pp. 160–166.
<https://doi.org/10.1134/S1063739723700415>