

# Влияние параметров гетероструктур AlN/GaN/AlGaN и AlN/GaN/InAlN с двумерным электронным газом на их электрофизические свойства и характеристики транзисторов на их основе

© А.Ф. Цацуньников<sup>+,\*</sup>, В.В. Лундин<sup>\*</sup>, Е.Е. Заварин<sup>\*</sup>, М.А. Яговкина<sup>\*</sup>, А.В. Сахаров<sup>\*</sup>, С.О. Усов<sup>+,#</sup>, В.Е. Земляков<sup>‡</sup>, В.И. Егоркин<sup>‡</sup>, К.А. Булашевич<sup>\*</sup>, С.Ю. Карпов<sup>\*</sup>, В.М. Устинов<sup>+</sup>

<sup>+</sup> Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>‡</sup> Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

<sup>•</sup> ООО „Софт-Импакт“, 194156 Санкт-Петербург, Россия

<sup>#</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: andrew@beam.ioffe.ru

(Получена 12 апреля 2016 г. Принята к печати 12 апреля 2016 г.)

Экспериментально и теоретически изучено влияние толщин и составов слоев в транзисторных гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN с двумерным электронным газом на их электрофизические свойства и статические параметры тестовых транзисторов, изготовленных из таких гетероструктур. Показано, что при использовании барьера InAlN вместо AlGaN концентрация носителей в канале увеличивается более чем в 2 раза, что приводит к соответствующему увеличению тока насыщения. Нанесение диэлектрического покрытия на поверхность гетероструктур InAlN/AlN/GaN *in situ* в ростовом процессе позволило увеличить максимальный ток насыщения и пробивные напряжения при сохранении высокой крутизны передаточной характеристики.

## 1. Введение

Прогресс в области разработок полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе системы широкозонных материалов InAlGaN обусловлен необходимостью создания элементной базы для усилителей высокой мощности, работающих на высоких частотах в экстремальных условиях [1,2]. Гетероструктуры, формируемые в данной системе материалов, характеризуются большими значениями ширины запрещенной зоны, значительными разрывами зон проводимости на гетерогранице, высокими значениями дрейфовой скорости электронов и пробивных напряжений. Высокая концентрация электронов двумерного электронного газа в сочетании с большой дрейфовой скоростью и достаточно высокой подвижностью электронов дает возможность реализации большой плотности тока в канале транзистора, низких сопротивлений открытого канала и высокого коэффициента усиления. Большие напряжения пробоя позволяют использовать повышенные рабочие напряжения, что в сочетании с высокой плотностью тока обеспечивает удельную выходную мощность GaN-транзисторов, на порядок превышающую таковую для GaAs-транзисторов. На данный момент особенности системы материалов InAlGaN позволили создать HEMT с параметрами, превосходящими достижимые в материальных системах III–As или Si.

Для реализации преимуществ гетероструктур для СВЧ транзисторов на основе InAlGaN необходима оптимизация как параметров гетероструктур, так и технологии их получения. Проводящий канал в гетероструктурах (In,Al,Ga)N/GaN формируется за счет разницы как спонтанной, так и пьезоэлектрической поляризации, возникающей в отдельных слоях вследствие деформации, обусловленной различием постоянных кристаллической решетки составляющих гетероструктуру материалов, характерной для всех соединений InAlGaN. С точки зрения гетеропереходов, позволяющих одновременно реализовать как высокую плотность электронов в двумерном газе, так и приемлемое значение подвижности носителей, в настоящее время широко используются гетеропереходы Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN и In<sub>y</sub>Al<sub>1-y</sub>N/GaN. Увеличение подвижности и концентрации носителей заряда в HEMT-гетероструктурах Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN для получения максимальных выходных характеристик требует повышения содержания алюминия *x* и оптимизации толщины барьерного слоя. Увеличение содержания Al в слое AlGaN вызывает рост упругих напряжений, приводящих к снижению качества получаемого материала, что, в свою очередь, ухудшает параметры и уменьшает срок службы транзисторов. В гетероструктурах, в которых вместо AlGaN используется слой InAlN, можно создавать как решеточно-согласованные гетероструктуры со слоями In<sub>y</sub>Al<sub>1-y</sub>N при *y* ≈ 0.18, не содержащие упругих напряжений [3,4], так и гетероструктуры с

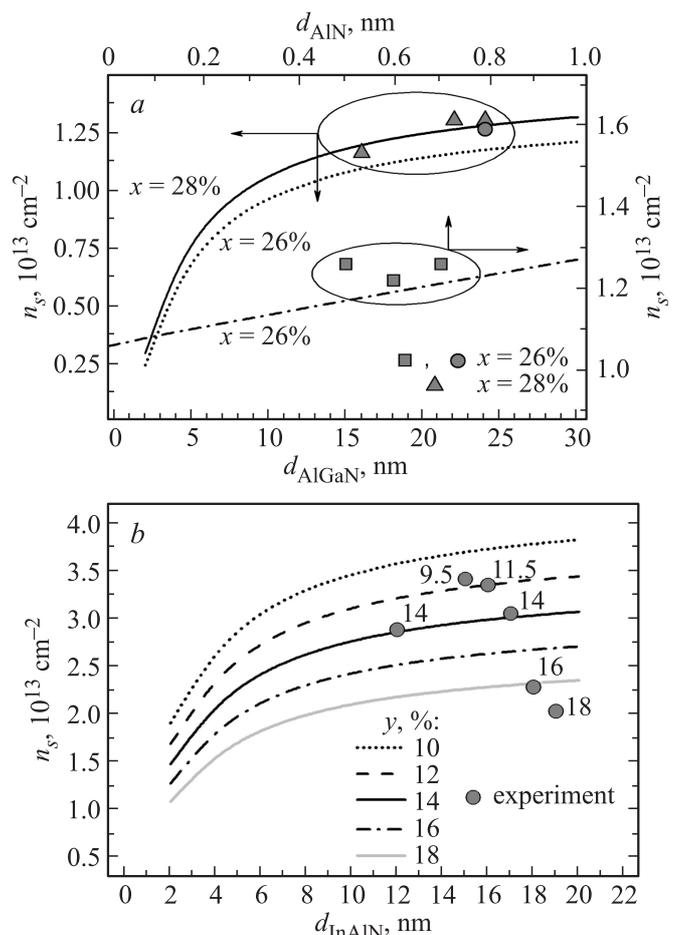
управляемыми напряжениями при отклонении содержания индия от данного значения. Изменение составов слоев AlGaN и InAlN позволяет получить слои, имеющие растягивающую/сжимающую деформацию, что дает возможность управления концентрацией носителей заряда. Для обоих используемых типов гетероструктур (AlGaN/GaN и InAlN/GaN) оптимизация их параметров, т.е. составов и толщин слоев гетероструктур, подразумевает не только и не столько реализацию максимальной подвижности и концентрации носителей в канале, сколько оптимизацию характеристик транзисторов. При этом, как будет показано далее, условия получения оптимальных характеристик транзисторов и оптимальных параметров гетероструктур не совпадают.

В представленной работе были проведены исследования влияния параметров гетероструктур GaN/AlN/AlGaN и GaN/AlN/InAlN, таких как толщины и составы слоев, на их электрофизические свойства и статические параметры изготовленных из этих структур тестовых транзисторов.

## 2. Эксперимент

Исследованные гетероструктуры были выращены методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) на установке Dragon-125 с горизонтальным реактором и индукционно-нагреваемым графитовым подложкодержателем [5]. Азот, водород и азот-водородные смеси использовались в качестве несущих газов, а аммиак, триметилгаллий (TMGa), триметилиндий (TMIn), триметилалюминий (TMAI) и моносилан ( $\text{SiH}_4$ ) — в качестве прекурсоров. Структуры состояли из номинально нелегированного слоя GaN толщиной 2 мкм, слоя AlN толщиной  $\sim 1$  нм и нелегированного барьерного слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  или  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}$  толщиной 12–25 нм и мольной долей AlN  $x = 24$ –28% в случае гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  или  $\text{InN}$   $y = 9$ –19% в случае  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ . Условия роста слоев GaN и AlN для всех структур были выбраны одинаковыми. Давление в реакторе при росте слоя AlGaN в гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN и InAlN в гетероструктурах InAlN/AlN/GaN составляло 100 и 200 мбар соответственно. Температуры роста слоев InAlN в исследованных структурах изменялись в интервале от 820 до 880 °C, обеспечивая желаемое содержание индия. Изменение состава в слоях AlGaN осуществлялось изменением потоков реагентов. Преднамеренное легирование слоев AlGaN и InAlN кремнием не применялось. Подробное описание условий эпитаксиального роста слоев InAlN и GaN при использовании метода ГФЭ МОС было ранее изложено в работах [6–8].

Структурные свойства выращенных образцов были исследованы методом рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра высокого разрешения



**Рис. 1.** Зависимости слоевой концентрации электронов от толщины барьерного слоя  $d_{\text{AlGaN}}$  при  $d_{\text{AlN}} = 0.5$  нм (нижняя/левая ось), от толщины слоя AlN при  $d_{\text{AlGaN}} = 24$  нм (верхняя/правая ось) в гетероструктуре  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  (a) и от толщины барьерного слоя  $d_{\text{InAlN}}$  при  $d_{\text{AlN}} = 0.5$  нм в гетероструктуре  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$  (b). Линии — результаты моделирования. b: числа около экспериментальных точек — содержание In в слоях  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}$ .

Bruker D8 Discover (Bruker AXS, Германия). Измерения электрофизических параметров — слоевой электропроводности  $\sigma = q\mu n_s$  ( $q$  — элементарный заряд), слоевой концентрации электронов  $n_s$  и их подвижности  $\mu$  в канале — были выполнены с помощью эффекта Холла методом Ван-дер-Пау. Тестовые НЕМТ-структуры были изготовлены методами оптической фотолитографии с затвором длиной 1 мкм и шириной 90 мкм. Расстояние между стоком и затвором (3.5 мкм) выбрано больше, чем расстояние между затвором и истоком (1.5 мкм) для увеличения тока насыщения, крутизны и пробивного напряжения в НЕМТ-структурах [9]. Для формирования омических контактов использовалась стандартная Ti/Al/Ni/Au-металлизация, барьерный контакт был выполнен из Ni/Au. Затворы транзисторов пассивировались слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , нанесенным методом плазмохимического осаждения.

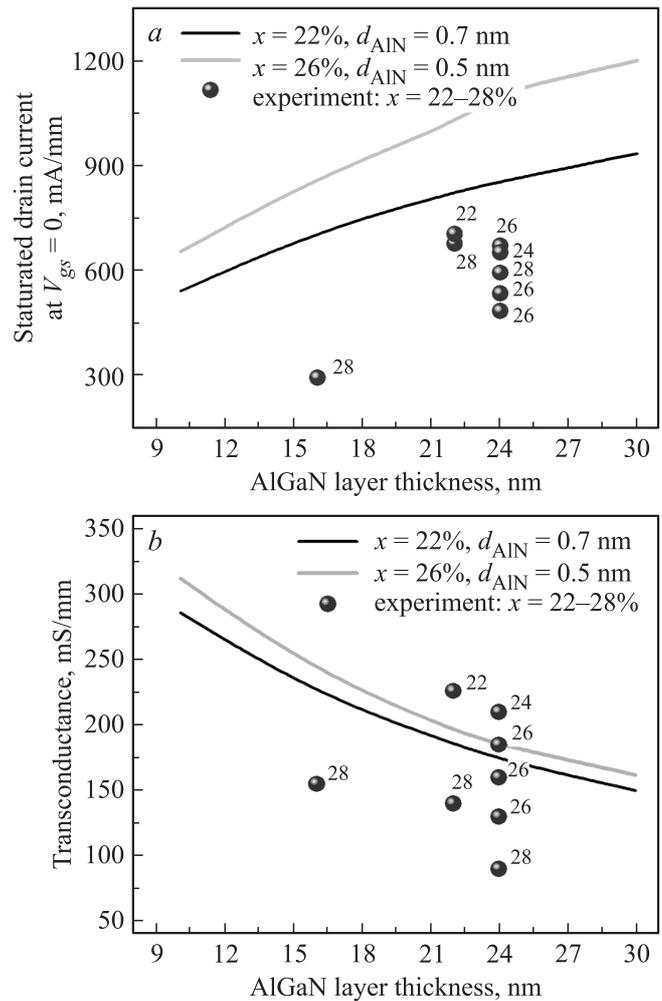
### 3. Результаты и обсуждение

Для оценки чувствительности слоевой концентрации электронов к изменению параметров гетероструктур предварительно было проведено численное моделирование с помощью коммерческого пакета FETIS [10]. На рис. 1, *a* линиями показаны рассчитанные зависимости  $n_s$  от толщины барьерного слоя AlGaN ( $d_{\text{AlGaN}}$ ) и от толщины слоя AlN ( $d_{\text{AlN}}$ ) при различном содержании Al в барьере  $x$ . Как видно, увеличение толщин обоих слоев приводит к медленному росту слоевой концентрации электронов. Результаты расчета хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными (точки на рис. 1, *a*). При этом наблюдаемые отклонения экспериментальных точек от теоретических предсказаний лежат в пределах разброса данных, связанного с погрешностью как определения состава и толщин слоев, так и холловских измерений слоевой концентрации.

На рис. 1, *b* линиями показаны аналогичные зависимости  $n_s$  от толщины InAlN барьерного слоя ( $d_{\text{InAlN}}$ ), рассчитанные для различного содержания In в барьере. Расчеты выполнены в предположении о когерентном росте слоя InAlN на расположенном ниже GaN. При хорошем согласии расчетов с экспериментальными данными для содержания In в барьере до 14% точки, соответствующие составам с большим содержанием In, заметно отклоняются от теоретических предсказаний. Последний факт можно объяснить поверхностной сегрегацией индия в процессе роста [11], приводящей к формированию неоднородного по толщине слоя InAlN, обогащенного Al на начальном этапе роста. В этом случае суммарная толщина AlN и обогащенного алюминием слоя InAlN может превысить критическую толщину, что приводит к частичной релаксации упругих напряжений. В результате электрическое поле на границах AlN/GaN и InAlN/AlN уменьшается, что приводит к снижению слоевой концентрации электронов. Нельзя также исключать и влияние на  $n_s$  неоднородностей состава и толщины слоя InAlN, который по сравнению с AlGaN обычно обладает повышенной дефектностью.

На следующем этапе были проведены комплексные исследования электрофизических свойств выращенных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN, а также характеристик изготовленных из них тестовых транзисторов. Основные результаты этих исследований приведены в таблице.

В первой серии экспериментов содержание Al в слое AlGaN составляло 28%, толщина AlN составляла 0.5 нм (калибровка толщины данного слоя была выполнена с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения [12]), а толщина слоя AlGaN изменялась в диапазоне 16–24 нм (образцы Al\_1, Al\_2 и Al\_3). Видно, что данные изменения параметров гетероструктуры привели к монотонному падению крутизны передаточной характеристики от  $g_m = 155$  мС/мм (образец Al\_1) до 90 мС/мм (образец Al\_3) при практически неизменной слоевой электропроводности ка-



**Рис. 2.** Зависимости тока насыщения при нулевом смещении на затворе (*a*) и крутизны передаточной характеристики (*b*) транзисторов, изготовленных из гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , от толщины барьерного слоя  $d_{\text{AlGaN}}$ . Линии — результаты моделирования для содержания Al в барьерах 22 и 26%, точки — экспериментальные данные.

нала. При этом ток насыщения  $I_{dss}$  достигал максимального значения при толщине слоя AlGaN, равной 22 нм. Уменьшение содержания Al до 26% при толщине слоя AlGaN 24 нм позволило одновременно увеличить ток насыщения и крутизну до 672 мА/мм и 185 мС/мм соответственно (образец Al\_4). Дополнительная оптимизация параметров была нацелена на определение оптимального значения толщины слоя AlN. Увеличение толщины от 0.5 нм (образец Al\_4) до 0.6 нм (образец Al\_5,  $d_{\text{AlGaN}} = 24$  нм,  $x = 26\%$ ) вызвало падение тока насыщения и крутизны, но последующее увеличение толщины AlN до 0.7 нм (образцы Al\_6 и Al\_7) привело к некоторому росту данных параметров. Последовательное уменьшение толщины слоя AlGaN до 22 нм и содержания Al в нем 22% при толщине AlN 0.7 нм позволило реализовать максимальные в данной серии экспериментов значения тока насыщения и кру-

Параметры исследованных гетероструктур и тестовых транзисторов

Тип гетероструктуры	Образец	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N, In <sub>y</sub> Al <sub>1-y</sub> N		AlN, нм	σ, мСм	μ, см <sup>2</sup> /В·с	n <sub>s</sub> , 10 <sup>13</sup> см <sup>-2</sup>	I <sub>dss</sub> , мА/мм	g <sub>m</sub> , мСм/мм
		d <sub>AlGaN</sub> или d <sub>InGaN</sub> , нм	x или y, %						
Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N/AlN/GaN	Al_1	16	28	0.5	3.35	1800	1.16	296	155
	Al_2	22	28	0.5	3.34	1600	1.30	678	140
	Al_3	24	28	0.5	3.45	1600	1.30	595	90
	Al_4	24	26	0.5	3.37	1670	1.26	672	185
	Al_5	24	26	0.6	3.35	1715	1.22	486	130
	Al_6	24	26	0.7	3.26	1615	1.26	536	160
	Al_7	24	24	0.7	3.62	1670	1.35	653	210
	Al_8	22	22	0.7	3.05	1730	1.10	706	226
In <sub>y</sub> Al <sub>1-y</sub> N/AlN/GaN	In_1	18	16	0.7	3.06	840	2.28	1350	100
	In_2	12	14	0.7	3.66	790	2.88	1200	230
	In_3*	12	14	0.7	3.80	840	2.82	1600	217

Примечание. \* В структуре In\_3 на поверхность был *in situ* нанесен слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 5 нм.

тизны передаточной характеристики, которые составили 706 мА/мм и 226 мС/мм (образец Al\_8). При этом слоевая электропроводность структуры была заметно меньшей, чем в предыдущих структурах (см. таблицу). Таким образом, данная серия экспериментов показала, что при использовании относительно толстого слоя AlN оптимальные значения толщин барьерных слоев AlGaN и содержания Al лежат в диапазонах 22–24 нм и 22–24% соответственно и минимальные отклонения (~ 10%) в их значениях ведут к значительным изменениям транзисторных характеристик.

На рис. 2 линиями показаны для структур AlGaN/AlN/GaN теоретические зависимости тока насыщения (рис. 2, a) и крутизны передаточной характеристики (рис. 2, b), рассчитанные в приближении плавного канала для подвижности электронов 1670 см<sup>2</sup>/В·с и типичного для GaN значения дрейфовой скорости 1 · 10<sup>7</sup> см/с. Как видно из рисунка, предсказываемый ток насыщения растет с увеличением толщины барьерного слоя AlGaN и содержания Al в барьере в соответствии с ростом слоевой концентрации электронов (см. рис. 1). В то же время теоретическая крутизна достаточно слабо зависит как от состава барьера AlGaN, так и от толщины слоя AlN, но при этом достаточно сильно изменяется с толщиной барьерного слоя. Экспериментальные значения тока насыщения лежат заметно ниже теоретических значений, в то время как лучшие значения крутизны, полученные в экспериментах, хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями. Хотя в целом экспериментальные данные и ведут себя согласно предсказанным теоретически тенденциям, они характеризуются весьма сильным разбросом от структуры к структуре. Поскольку такие сильные изменения характеристик транзисторов в зависимости от параметров гетероструктуры не предсказываются теоретически, а экспериментально определенная слоевая электропроводность выращенных

структур мало меняется при изменении толщин и составов эпитаксиальных слоев, наблюдаемый разброс данных может быть связан с неоптимизированной технологией формирования контактов к стоку и истоку, вносящей в приборы дополнительные высокоомные области, влияющие в конечном счете на характеристики транзисторов.

В серии экспериментов по эпитаксиальному росту гетероструктур InAlN/AlN/GaN изменение содержания индия в барьере InAlN достигалось изменением температуры роста в диапазоне 820–880°С. Исследования зависимости содержания In от температуры роста и сопоставление полученных результатов с данными измерений электрофизических параметров показали, что наибольшие значения проводимости и подвижности носителей заряда наблюдаются в структурах с барьерным слоем InAlN с содержанием индия ~ (14–16)% и толщиной ~ 12 нм (рис. 3). Несмотря на то что

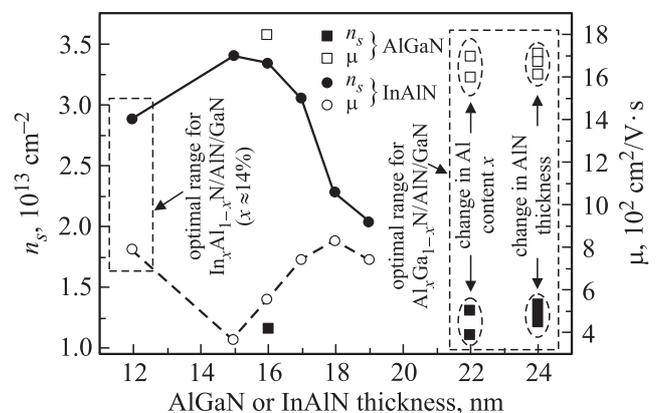
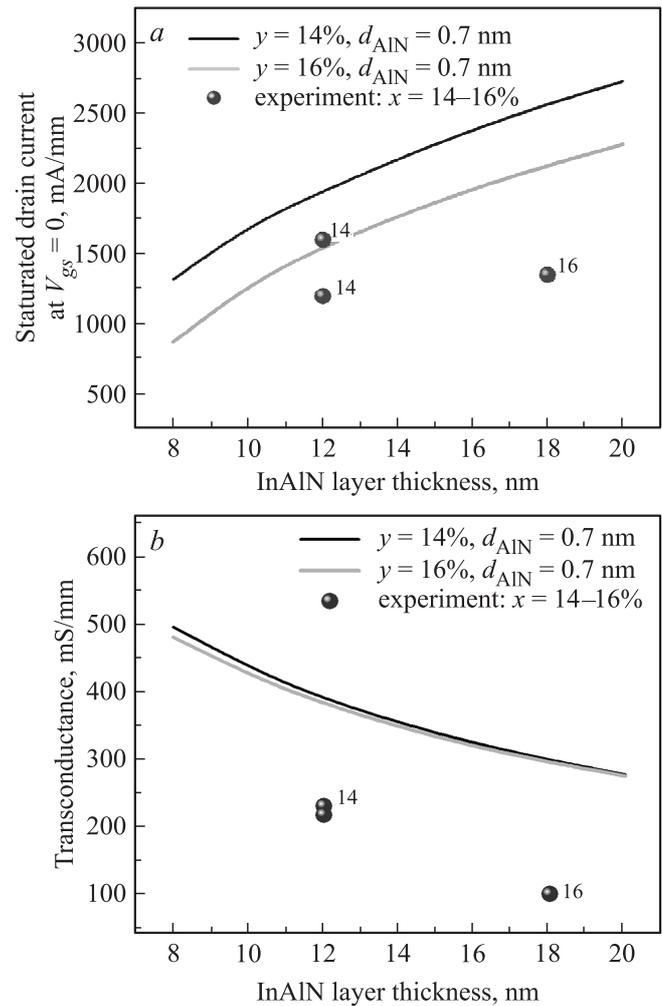


Рис. 3. Зависимости слоевой концентрации и подвижности носителей от толщин слоев AlGaN и InAlN в выращенных гетероструктурах. Показаны оптимальные диапазоны данных параметров для реализации максимальных значений тока насыщения и крутизны передаточной характеристики.

слои InAlN в таких транзисторных структурах являются напряженными, в них, по-видимому, из-за меньшего содержания индия и меньшей толщины количество дефектов оказывается ниже, что делает их оптимальными для создания приборов. Поэтому для изготовления транзисторов были выращены структуры (In\_1, In\_2 в таблице), в которых толщина слоя InAlN и содержание в нем индия изменялись от 18 до 12 нм и от 16 до 14% соответственно. В структуре In\_3 на поверхность *in situ* (без прерывания эпитаксиального процесса) был также нанесен слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 5 нм, позволяющий защитить поверхность при выходе из эпитаксиального процесса и снизить плотность поверхностных состояний. Видно, что уменьшение толщины и содержания In в образце In\_2 привело к незначительному уменьшению тока насыщения, от 1350 до 1200 мА/мм, но при этом наблюдалось двукратное увеличение крутизны передаточной характеристики. Нанесение слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> на поверхность гетероструктуры позволило увеличить ток насыщения до 1600 мА/мм, почти не изменив значение крутизны. Физические причины последнего эффекта требуют дополнительных детальных исследований влияния осаждения Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> на свойства поверхности транзисторной гетероструктуры.

На рис. 4 линиями показаны для структур InAlN/AlN/GaN теоретические зависимости тока насыщения (рис. 4, *a*) и крутизны передаточной характеристики (рис. 4, *b*), полученные с помощью моделирования для подвижности электронов 1600 см<sup>2</sup>/В·с и дрейфовой скорости  $1 \cdot 10^7$  см/с. Расчеты показывают, что при изменении параметров гетероструктуры в выбранных пределах зависимости как тока насыщения, так и крутизны от толщины барьерного слоя меняются незначительно. При этом лучшие значения тока насыщения, полученные в транзисторах на основе структур с нанесенным Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> *in situ*, хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями, в то время как экспериментальные значения крутизны лежат заметно ниже теоретических значений. Такое поведение может быть интерпретировано с позиции большей дефектности и большей неоднородности барьера InAlN по сравнению с барьерами из AlGaN. Сегрегация In в InAlN, возможно, способствует уменьшению контактного сопротивления стока и истока, а неоднородность состава InAlN как в вертикальном, так и в боковом направлениях приводит к меньшему перекрытию канала под затвором.

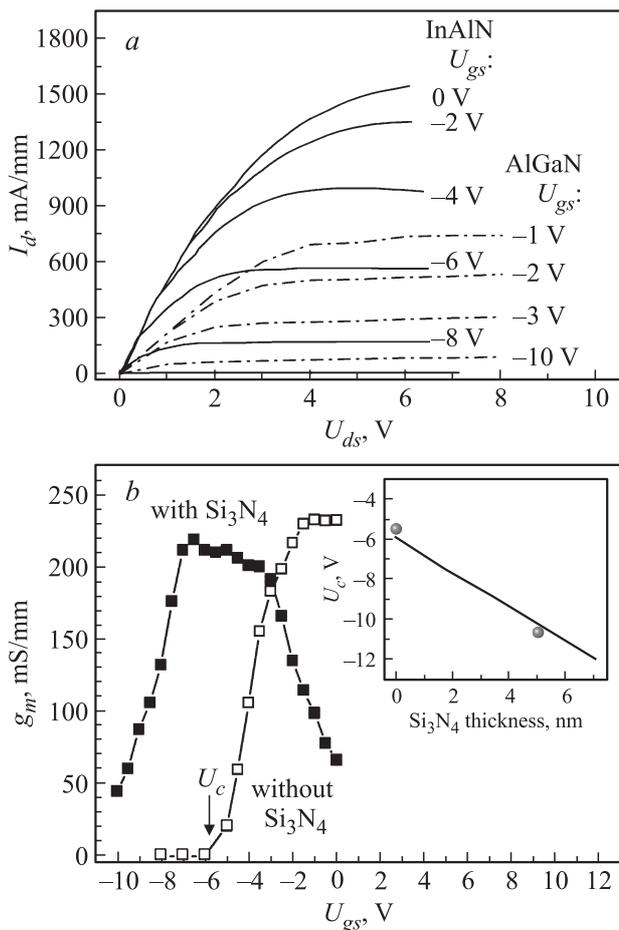
Сравнение статических параметров тестовых транзисторов, изготовленных из гетероструктур AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN, приведенных в таблице, показывает, что токи насыщения в транзисторах на основе InAlN-гетероструктур примерно в 2 раза выше, чем в транзисторах на основе AlGaN-гетероструктур. Данный эффект обусловлен более чем двукратным увеличением плотности электронов в канале в гетероструктурах InAlN/AlN/GaN в соответствии с результатами моделирования и измерения параметров гетероструктур. На рис. 5, *a* приведены вольт-амперные характеристики



**Рис. 4.** Зависимости тока насыщения при нулевом смещении на затворе (*a*) и крутизны передаточной характеристики (*b*) транзисторов, изготовленных из гетероструктур  $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ , от толщины барьерного слоя  $d_{\text{AlN}}$ . Линии — результаты моделирования для содержания In в барьерах 14 и 16%, точки — экспериментальные данные.

обоих типов исследованных транзисторов. Транзисторы являются нормально открытыми, практически не открываются при напряжении  $V_{gs} > 0$  В и закрываются при увеличении отрицательного напряжения  $V_{gs} < 0$  В.

Осаждение слоя Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> *in situ* приводит к нескольким эффектам. Во-первых, значительно увеличивается пробивное напряжение, с  $\sim 40$  до  $\sim 80$  В. Во-вторых, максимальное значение крутизны немного уменьшается, а рабочая область напряжений исток–затвор, в которой значение крутизны максимально, сдвигается в область отрицательных значений  $V_{gs}$  (рис. 5, *b*). В-третьих, увеличивается максимальный ток насыщения. Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены следующим. В гетероструктурах InAlN/AlN/GaN слой InAlN относительно тонкий (в 1.5–2 раза тоньше, чем слой AlGaN в гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN), что приводит к сильному влиянию на параметры транзисторов поверхности гете-



**Рис. 5.** *a* — вольт-амперные характеристики  $I_d(U_{ds})$  тестовых транзисторов при разных управляющих смещениях  $U_{gs}$ : сплошные линии — транзисторы InAlN/AlN/GaN, штрихпунктирные линии — транзисторы AlGaIn/AlN/GaN. *b* — зависимости крутизны передаточных характеристик для транзисторов InAlN/AlN/GaN без и со слоем  $Si_3N_4$ ; на вставке — расчетная зависимость напряжения отсечки  $U_c$  от толщины слоя  $Si_3N_4$  (линия) и данные эксперимента (точки).

рооструктуры. В структурах без нанесения  $Si_3N_4$  *in situ* — это гетерограница InAlN/внешний диэлектрик, который в этом случае осаждается в постростовых операциях. Нанесение  $Si_3N_4$  *in situ* толщиной  $\sim 5$  нм приводит, во-первых, к увеличению расстояния между двумерным каналом и металлом затвора, во-вторых, к пассивации поверхности гетероструктуры, что, по-видимому, уменьшает плотность поверхностных состояний. На вставке к рис. 5, *b* приведена расчетная зависимость напряжения отсечки  $U_c$ , при котором происходит закрытие транзистора, от толщины слоя  $Si_3N_4$ . Моделирование показало, что напряжение отсечки линейно сдвигается в область отрицательных значений с ростом толщины слоя  $Si_3N_4$ , что хорошо согласуется с экспериментом. Таким образом, пассивация поверхности *in situ* оказывается эффективным методом управления характеристиками транзисторов.

## 4. Заключение

Проведенное исследование показало, что транзисторные гетероструктуры InAlN/AlN/GaN имеют существенные преимущества по сравнению со структурами AlGaIn/AlN/GaN с точки зрения предельно достижимых значений тока насыщения и крутизны передаточной характеристики. Для практической реализации этих преимуществ требуется тщательная оптимизация топологии транзистора и технологии формирования контактов стока и истока, а также дальнейшее уменьшение дефектности и повышение однородности твердых растворов InAlN. При оптимизации гетероструктур InAlN/AlN/GaN отдельное внимание следует уделять вопросам релаксации упругих напряжений, во многом определяющих уровень дефектности используемых материалов. С позиции влияния параметров гетероструктуры на характеристики транзисторов, такие как напряжение отсечки, ток насыщения и крутизна передаточной характеристики, было найдено, что помимо состава определяющую роль играет толщина барьерного слоя, которую следует выбирать исходя из требуемых параметров прибора. Проведенное моделирование свойств транзисторных гетероструктур и характеристик приборов позволило провести оптимизацию структур и выявить факторы, лимитирующие приборные характеристики. Использование осаждения слоя  $Si_3N_4$  *in situ* на поверхность барьерного слоя позволило улучшить характеристики как гетероструктур, так и изготавливаемых из них транзисторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение о субсидии № 14.607.21.0003 от 05.06.2014, уникальный код проекта: RFMEFI60714X0003) с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

## Список литературы

- [1] П.П. Мальцев, Ю.В. Федоров. Нанотехнологии и наноматериалы (Интеграл), **3**, 25 (2013).
- [2] Jan Kuzmik. Electron Dev. Lett., **22**, 510 (2001).
- [3] M. Neuburger, T. Zimmermann, E. Kohn, A. Dadgar, F. Schulze, A. Krtschil, M. Gunther, H. Witte, J. Blasing, A. Krost, I. Daumiller, M. Kunze. Int. J. High Speed Electron. Syst., **14**, 785 (2004).
- [4] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan. J. Appl. Phys., **89**, 5815 (2001).
- [5] В.В. Лундин, Д.В. Давыдов, Е.Е. Заварин, М.Г. Попов, А.В. Сахаров, Е.В. Яковлев, Д.С. Базаревский, Р.А. Талалаев, А.Ф. Цацульников, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. Письма ЖТФ, **41**, 9 (2015).
- [6] С.О. Усов, Е.Е. Заварин, А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, А.Е. Николаев, М.А. Сеницын, С.И. Трошков, Н.Н. Леденцов. ФТП, **44**, 981 (2010).
- [7] А.В. Сахаров, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, М.А. Сеницын, А.Ф. Цацульников. Тез. докл. 5-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“, Москва, 2007 (Санкт-Петербург, 2007) с. 46.

- [8] А.В. Сахаров, В.В. Лундин, А.Е. Николаев, Е.Е. Заварин, М.А. Синецын, М.А. Яговкина, А.Ф. Цацульников. *Тез. докл. 7-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“*, Москва, 2010 (Санкт-Петербург, 2010) с. 117.
- [9] S. Russo, A. Di Carlo. arXiv:cond-mat/0510049 (2005).
- [10] <http://www.str-soft.com/products/FETIS/index.htm>
- [11] R.A. Talalaev, S.Yu. Karpov, I.Yu. Evstratov, Yu.N. Makarov. *Phys. Status Solidi C*, **0**, 311 (2002).
- [12] В.Г. Тихомиров, В.Е. Земляков, В.В. Волков, Я.М. Парнес, В.Н. Вьюгинов, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин, А.Ф. Цацульников, Н.А. Черкашин, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. *ФТП*, **50**, 245 (2016).

Редактор Л.В. Шаронова

## The effect of design of GaN/AlN/AlGaN and GaN/AlN/InAlN heterostructures with two-dimensional electron gas on electrophysical properties and characteristics of transistors based on the heterostructures

A.F. Tsatsulnikov<sup>+,\*</sup>, V.W. Lundin<sup>\*</sup>, E.E. Zavarin<sup>\*</sup>, M.A. Yagovkina<sup>\*</sup>, A.V. Sakharov<sup>\*</sup>, S.O. Usov<sup>+#</sup>, V.E. Zemlyakov<sup>‡</sup>, V.I. Egorkin<sup>‡</sup>, K.A. Bulashevich<sup>•</sup>, S.Yu. Karpov<sup>•</sup>, V.M. Ustinov<sup>+</sup>

<sup>+</sup>Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>\*</sup>Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>‡</sup>National Research University of Electronic Technology — MIET, 124498 Zelenograd, Moscow, Russia

<sup>•</sup>„Soft-Impact“, Ltd., 194156 St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 197101 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The effect of the layers thickness and composition in AlGaN/AlN/GaN and InAlN/AlN/GaN HEMT heterostructures with two-dimensional electron gas on its electrical properties and static parameters of the test transistors based on the heterostructures was studied. It was shown that the use of the InAlN barrier layer instead of AlGaN leads to more than twice increase of the charge carrier concentration in the channel which results in corresponding increase of the saturation current. *In situ* deposition of the dielectric coating on the surface of the InAlN/AlN/GaN heterostructures allows to increase saturation current and breakdown voltages keeping the high values of transconductance.