

ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР InAlN/AlN/GaN

© С. О. Усов^{1,2}, А. В. Сахаров^{1,2}, А. Ф. Цацульников^{1,2}, Е. Е. Заварин^{1,2},
А. Е. Николаев^{1,2}, М. А. Яговкина², В. Е. Земляков³, В. И. Егоркин³, В. М. Устинов¹

¹ ФГБУН «Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН»,
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

² ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН», 194021,
г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

³ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, г. Москва,
г. Зеленоград, площадь Шокина, 1

Представлены результаты создания полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Рассмотрена возможность применения *in-situ* пассивации поверхности слоем Si₃N₄ для улучшения характеристик HEMT транзисторов. Продемонстрированы транзисторы с током насыщения 1600 мА/мм и крутизной более 200 мС/мм.

Ключевые слова: ГФЭ МОС, транзистор с высокой подвижностью электронов в канале, гетероструктура, нитрид галлия, пассивирующее покрытие

Сведения об авторах: Усов Сергей Олегович, к.ф.-м.н., s.usov@mail.ioffe.ru; Сахаров Алексей Валентинович, к.ф.-м.н., val@beam.ioffe.ru; Цацульников Андрей Федорович, к.ф.-м.н., andrew@beam.ioffe.ru; Заварин Евгений Евгеньевич, к.ф.-м.н., zavarin@yandex.ru; Николаев Андрей Евгеньевич, аен@mail.ioffe.ru; Яговкина Мария Александровна, к.ф.-м.н., Ymasha@mail.ioffe.ru; Земляков Валерий Евгеньевич, к.ф.-м.н., vzml@rambler.ru; Егоркин Владимир Ильич, к.т.н., pcfme@miee.ru; Устинов Виктор Михайлович, Член корр. РАН, д.ф.-м.н., vmust@beam.ioffe.ru

HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORS BASED ON InAlN/AlN/GaN HETEROSTRUCTURES

S. O. Usov^{1,2}, A.V. Sakharov^{1,2}, A. F. Tsatsulnikov^{1,2}, E. E. Zavarin^{1,2}, A. E. Nikolaev^{1,2},
M. A. Yagovkina², V. E. Zemlyakov³, V. I. Egorkin³, V. M. Ustinov¹

¹ Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research & Engineering Center, RAS, 194021,
St. Petersburg, Politekhnikeskaya street, 26

² Ioffe Institute, 194021, St. Petersburg, Politekhnikeskaya street, 26

³ National Research University of Electronic Technology «MIET», 124498, Moscow, Zelenograd, Shokina Square, 1

The results of development of high electron mobility transistors (HEMT) based on InAlN/AlN/GaN heterostructures, grown by metal-organic vapour phase epitaxy method, are presented. The possibility to improve the characteristics of HEMTs by using *in-situ* passivation by Si₃N₄ layer is considered. The transistors with saturation current of 1600 mA/mm and transconductance over 200 mS/mm are demonstrated.

Keywords: MOVPE, High electron mobility transistor, heterostructure, gallium nitride, passivation

Data of authors: Usov Sergey Olegovich, Ph.D., s.usov@mail.ioffe.ru; Sakharov Alexey Valentinovich, Ph.D., val@beam.ioffe.ru; Tsatsulnikov Andrey Fedorovich, Ph.D., andrew@beam.ioffe.ru; Zavarin Evgeny Evgenievich,

Ph.D., zavarin@yandex.ru; Nikolaev Andrey Evgenievich, aen@mail.ioffe.ru; Yagovkina Maria Alexandrovna, Ph.D., Ymasha@mail.ioffe.ru; Zemlyakov Valery Evgenievich, Ph.D., vzml@rambler.ru; Egorkin Vladimir Ilyich, Ph.D., pcfme@miee.ru; Ustinov Viktor Mihailovich, Corresponding Member, RAS, Ph.D., vmust@beam.ioffe.ru

Введение

В настоящее время полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе системы материалов InAlGaN крайне востребованы для создания элементной базы для усилителей высокой мощности, работающих на высоких частотах в экстремальных условиях (при высоких температурах, в условиях околоземного пространства и зоны воздействия ионизирующего излучения) [1, 2]. Высокие значения ширины запрещённой зоны, разрывов зон проводимости на гетерогранице AlGaN/GaN или InAlN/GaN, значения насыщенной скорости электронов, напряжений пробоя и ряд других особенностей системы материалов InAlGaN позволили создать HEMT-транзисторы с параметрами, превосходящими достижимые в материальных системах III-As или Si.

Традиционно для создания HEMT структур используется решёточно-несогласованные гетероструктуры AlGaIn/GaN, в которых канал формируется на интерфейсе барьерного AlGaIn и буферного GaN слоёв как за счёт разницы коэффициентов спонтанной поляризации, так и пьезоэлектрической поляризации, возникающей за счёт деформации. Увеличение подвижности и концентрации носителей заряда в HEMT гетероструктурах AlGaIn/GaN для получения максимальных выходных характеристик требует повышения содержания алюминия и изменения толщины барьерного слоя. Увеличение состава или толщины слоя AlGaIn приводит к росту упругих напряжений, что приводит к снижению качества получаемого материала, что в свою очередь, вызывает ухудшение параметров и срока службы транзисторов.

Использование слоя InAlN вместо AlGaIn в качестве барьерного слоя в HEMT структурах в теории позволяет создавать как решёточно-согласованные гетероструктуры

не содержащие упругих напряжений [3] (так как при содержании In около 18 % слой $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ является согласованным по постоянной решётки [4] со слоем GaN), так и гетероструктуры с управляемыми напряжениями. На рис. 1 приведены экспериментальные данные и расчётные зависимости ширины запрещённой зоны (E_g) $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ от состава по индию [5-14]. Видно, что даже небольшие изменения состава по индию могут значительно изменить E_g слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$, при этом область изменения E_g $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ лежит вблизи E_g GaN. При этом формирование двумерного канала на интерфейсе определяется не столько разницей в ширинах запрещённых зон $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ и GaN сколько электрическим полем, обусловленным разницей спонтанных поляризаций, а в случае решёточно-несогласованных структур ещё и пьезоэлектрическим полем. Изменение содержания индия ниже/выше 18 % позволяет получить слои имеющие растягивающую/сжимающую деформацию, что даёт возможность управления концентрацией носителей заряда.

Следует отметить, что среди нитридов III группы InAlN является самым технологически сложным материалом, однако проведённая нами оптимизация режимов эпитаксиального роста слоёв позволила определить параметры эпитаксии, при которых возможно создание качественных слоёв InAlN [16, 17]. На основе развитой технологии были созданы распределённые брэгговские отражатели InAlN/GaN с коэффициентом отражения более 99 % в широком интервале длин волн от синего (460 нм) до красного (610 нм) диапазонов [18]. Использование слоёв InAlN для модификации свойств активной области на основе InGaIn квантовых ям позволило расширить диапазон излучения светоизлучающих диодов [19].

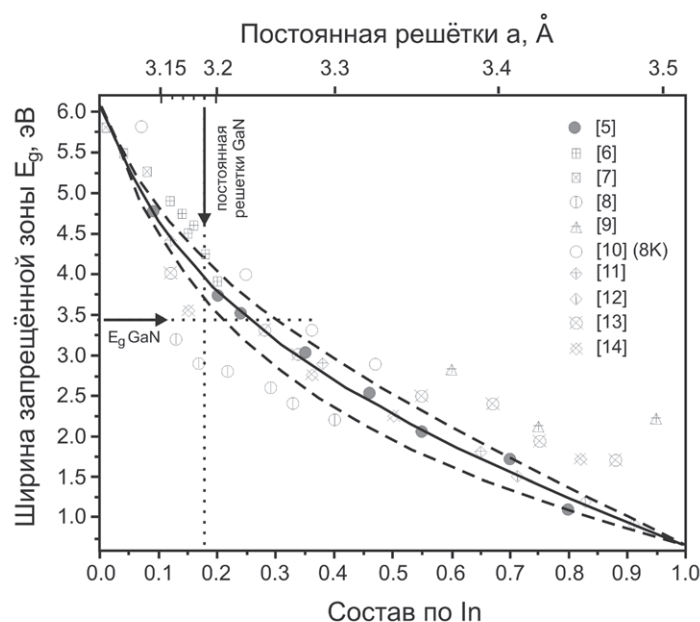


Рис. 1

Зависимость ширины запрещённой зоны $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ от состава по индию и постоянной кристаллической решётки (соотношение между постоянной кристаллической решётки и составом по индию взято из работы [15])

Гетероструктуры InAlN/GaN (как впрочем, и AlGaN/GaN) обычно имеют не очень высокую подвижность носителей, что связано с рассеянием электронов в канале на неоднородностях твёрдого раствора и заряженных дефектах. Стандартным решением является использование нанометрового слоя AlN на интерфейсе с барьерным слоем, что позволяет повысить подвижность электронов в канале за счёт улучшения качества интерфейса, увеличения локализации волновой функции носителей заряда в канале и смещения её в сторону слоя GaN [20, 21]. В работе [21] показано, что для получения максимальной подвижности носителей заряда в канале оптимальная толщина слоя AlN в гетероструктуре InAlN/AlN/GaN должна быть около 1 нм.

Эпитаксиальные структуры

Гетероструктуры InAlN/AlN/GaN были выращены на сапфировых подложках ориентации (0001) методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (ГФЭ МOC) на установке Dragon-125 с горизонтальным реактором и индукционно-нагреваемым графитовым подложкодержателем [22].

Азот, водород и азот-водородные смеси использовались в качестве несущих газов, а аммиак, триметилгаллий, триметилиндий, триметилалюминий и моносилан (SiH_4) – в качестве прекурсоров.

Гетероструктуры (таблица 1) состояли из зародышевого слоя GaN, буферного изолирующего слоя GaN толщиной 2 мкм, слоя AlN толщиной ~1 нм и нелегированного барьерного слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ толщиной около 10-20 нм и мольной долей InN 9-19 %. Условия роста слоёв GaN и AlN для всех структур были выбраны одинаковыми, а температуры роста слоёв InAlN изменялись в интервале от 820 °C (структура H1) до 880 °C (структура H5). Рост слоёв InAlN проводился при пониженном давлении в реакторе равном 200 мбар, преднамеренное легирование слоёв $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ кремнием не применялось. Основные условия роста и параметры исследуемых гетероструктур приведены в таблице 1. Подробное описание условий эпитаксиального роста слоёв InAlN и GaN методом ГФЭ МOC было ранее изложено в работах [18, 19, 23-25].

Исследования структурных свойств выращенных образцов были проведены методом рентгеновской дифрактометрии (РД) на дифрактометре высокого разрешения Bruker D8 Discover (Bruker AXS, Германия). Анализировались кривые качания $\omega-2\theta$ для симметричного брэгговского отражения (0002) [26]. Аппроксимация экспериментальных данных проводилась с помощью программного обеспечения LEPTOS [27]. Измерения электрических параметров удельной проводимости σ , концентрации n_s и дрейфовой подвижности носителей заряда μ (электронов) в канале были выполнены с помощью измерения эффекта Холла методом Вандер-Пау. Для измерения поверхностного сопротивления и карт распределения сопротивления по пластине использовался бесконтактный измеритель LEI 1510A SA (Leighton Electronics). В таблице 1 приведены структурные и электрофизические параметры выращенных гетероструктур в зависимости от температуры роста (T_{gr}) $In_xAl_{1-x}N$ при сохранении времени роста.

Увеличение температуры роста $In_xAl_{1-x}N$ от 820 до 880 °С (структуры Н1-Н5) приводит к уменьшению толщины слоя и снижению содержания индия почти в два раза. Наибольшие значения удельной проводимости наблюдаются в структурах Н2 и Н3, выращенных при температуре 835-850 °С. Увеличение температуры роста барьерного слоя $In_xAl_{1-x}N$ до 880 °С приводит к значительному увеличению концентрации носителей в канале, однако при этом подвижность снижается более чем в 2 раза,

приводя к уменьшению удельной проводимости. Наибольшие значения удельной проводимости и подвижности носителей заряда, наблюдаются в структурах с барьерным слоем $In_xAl_{1-x}N$ с содержанием индия около 14-16 %. Хотя слои $In_xAl_{1-x}N$ в таких структурах и являются напряжёнными при комнатной температуре, но в них, по-видимому, возникает меньше дефектов при эпитаксии (из-за более высокой температуры) и при охлаждении (из-за различия коэффициентов термического расширения $In_xAl_{1-x}N$, AlN и GaN). Поэтому барьерные слои $In_xAl_{1-x}N$ с таким содержанием индия, по-видимому, являются оптимальными для создания на их основе HEMT гетероструктур InAlN/AlN/GaN. Ранее в работе [28] упоминалось, что изменение толщины барьерного слоя InAlN в гетероструктуре InAlN/AlN/GaN в интервале от 10 до 33 нм приводит к незначительному изменению подвижности и концентрации электронов в канале, и характеристик HEMT транзисторов, в то время как уменьшение толщины InAlN ниже 10 нм приводит к резкому снижению концентрации носителей. Поэтому при оптимальной по результатам предыдущих исследований температуре роста $T_{gr} = 850$ °С, была выращена структура (Н6) с меньшей толщиной слоя InAlN (12 нм), которая показала характеристики очень близкие к структуре Н3. Таким образом, можно сделать вывод, что изменение толщины барьерного слоя InAlN в интервале от 12 до 20 нм не оказывает существенного влияния на характеристики HEMT гетероструктур.

Таблица 1

Параметры гетероструктур $In_xAl_{1-x}N/AlN/GaN$

| Структура | $T_{gr}, ^\circ C$ | d, nm | $x, \%$ | $T = 300 K$ | | |
|-----------|--------------------|---------|---------|---------------------|-------------------|----------------------|
| | | | | $\sigma, 1/(Om*cm)$ | $\mu, cm^2/(B*c)$ | n_s, cm^{-2} |
| Н1 | 820 | 19 | 18,5 | 24,3 | 746 | $2,03 \cdot 10^{13}$ |
| Н2 | 835 | 18 | 16 | 30,6 | 837 | $2,28 \cdot 10^{13}$ |
| Н3 | 850 | 17 | 13,7 | 36,5 | 747 | $3,05 \cdot 10^{13}$ |
| Н4 | 865 | 16 | 11,3 | 30 | 559 | $3,35 \cdot 10^{13}$ |
| Н5 | 880 | 15 | 9,3 | 20,3 | 372 | $3,41 \cdot 10^{13}$ |
| Н6 | 850 | 12 | 13,7 | 36,6 | 795 | $2,88 \cdot 10^{13}$ |
| Н7 | 850 | 12 | 13,7 | 38 | 840 | $2,82 \cdot 10^{13}$ |

Для исследования влияния пассивирующих слоёв Si_3N_4 на характеристики гетероструктур были выращены полностью идентичные структуры без (Н6) и с пассивирующим слоем Si_3N_4 толщиной 5 нм (Н7). Нанесение пассивирующих защитных слоёв Si_3N_4 проводилось in-situ, в том же технологическом процессе, с использованием аммиака и SiH_4 после завершения роста барьерного слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ в конце процесса эпитаксии [29, 30]. Разница в значениях концентрации носителей заряда для структур Н6 и Н7 оказалась незначительной и может объясняться как дополнительными напряжениями вносимыми слоем Si_3N_4 , так и возможной модификацией (подтравом) поверхности слоя InAlN при завершении процесса эпитаксии.

Для проверки возможности перехода на подложки большего размера в существующей установке была выращена структура в режимах роста полностью аналогичных гетероструктуре Н7, но на сапфировой подложке ориентации (0001) диаметром 100 мм и было измерено распределение поверхностного сопротивления R_s по площади пластины (рис. 2). Распределение R_s на различных участках пластины оказалось достаточно однородным, значения R_s изменялись в интервале от 211 до 216 Ом/квadrat, а среднее значение составляло $213 \pm 1,5$ Ом/квadrat.

Исследование тестовых транзисторов

Тестовые структуры НЕМТ транзисторов были изготовлены методами фотолитографии с затвором длиной (L) 1 мкм и шириной (W) 90 мкм (рис. 3). Расстояние между стоком и затвором выбрано больше, чем расстояние между затвором и истоком для увеличения тока насыщения стока, крутизны и напряжения пробоя в НЕМТ структурах [31].

Для изготовления тестовых транзисторов Т1, Т2 и Т3 (таблица 2) были выбраны гетероструктуры InAlN/AlN/GaN, которые показывали наиболее высокие подвижность и концентрацию носителей заряда в канале. При формировании омических контактов была использована стандартная металлизация из Ti/Al/Ni/Au, а для барьерного контакта – Ni/Au. Затворы транзисторов были пассивированы слоем Si_3N_4 , нанесённым методом плазмохимического осаждения.

Выходные характеристики тестовых структур НЕМТ Т1 (рис. 4а), Т2 (рис. 4б) и Т3 (рис. 4в) на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN приведены на рис. 4. В таблице 2 приведены значения соответствующих параметров, определённых из анализа вольт-амперных характеристик. Структуры являются открытыми при $V_{gs} = 0$ В, ток сток-исток I_{ds} уменьшается при подаче отрицательного

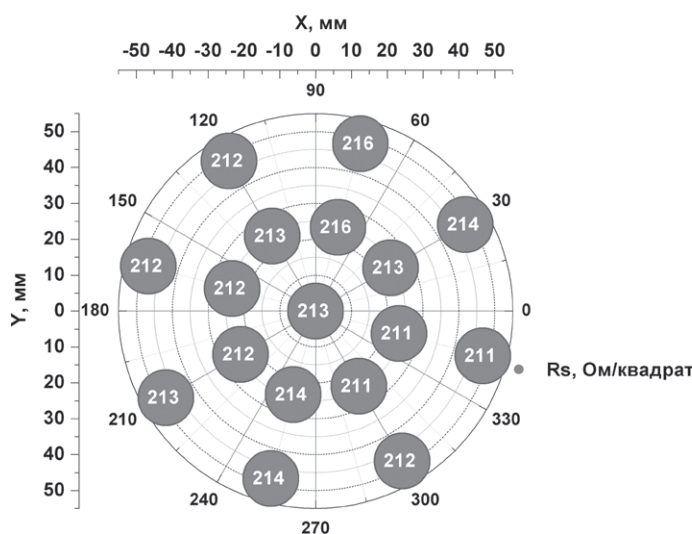


Рис. 2

Карта поверхностного сопротивления R_s гетероструктуры НЕМТ на основе InAlN/AlN/GaN, выращенной на сапфировой подложке диаметром 100 мм

Таблица 2

Параметры НЕМТ транзисторов на основе $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$

| Тестовый транзистор | Структура | x, % | d_{InAlN} , нм | $d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$, нм | Φ_b , эВ | I_{dss} , А/мм | g_m , мС/мм | V_{br} , В |
|---------------------|-----------|------|-------------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------------|
| T1 | H2 | 18 | 16 | - | 1,7 | 1,35 | 100 | 10 |
| T2 | H6 | 13,7 | 12 | - | 1,5 | 1,2 | 230 | 40 |
| T3 | H7 | 13,7 | 12 | 5 | 2,5 | 1,6 | 217 | 80 |

напряжения V_{gs} до полного перекрытия канала транзистора. Значения высоты барьера Φ_b были определены из вольт-амперных характеристик ток затвора (I_{gs}) от напряжения затвор-исток (V_{gs}). Для структур T1, T2 и T3 барьер Φ_b составляет 1,7, 1,5 и 2,5 эВ. Для определения напряжения пробоя (V_{br}) измерялись прямая ветвь диода исток-затвор и обратная ветвь диода затвор-сток. Структура T1 имеет напряжение пробоя около 10 В и управляется затворным напряжением, но при увеличении напряжения $V_{\text{gs}} < 0$ В не перекрывает канал транзистора полностью (рис. 4а). Несмотря на то, что для структуры T3 барьер составляет 2,5 эВ, тем не менее, эта структура демонстрирует наилучшие выходные вольт-амперные характеристики (рис. 4в) и максимальное значение тока насыщения стока I_{dss} .

Значения крутизны (g_m) и тока насыщения стока (I_{dss}) для транзисторной структуры

T1 составляют 100 мС/мм и 1,35 А/мм, соответственно. Значения крутизны для структур T2 и T3 выше, чем для структуры T1 и составляют 230 и 217 мС/мм, соответственно. Сравнение НЕМТ структур T2 и T3 показало, что подвижность носителей заряда в структуре с in-situ пассивирующим слоем Si_3N_4 выше, чем в структуре без слоя Si_3N_4 при сопоставимых значениях удельной проводимости и концентрации носителей заряда.

Заключение

В работе проведено исследование зависимости свойств гетероструктур $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$ от условий роста и определены оптимальные значения толщины и содержания индия в барьерном слое $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ для получения высоких значений подвижности и концентрации электронов в канале. На основе отобранных структур созданы тестовые по-

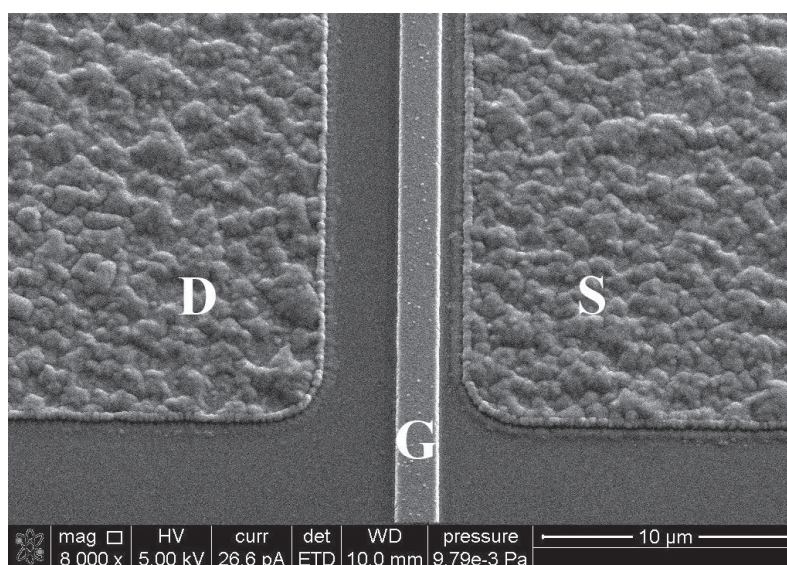


Рис. 3

Изображение, полученное методом растровой электронной микроскопии поверхности гетероструктуры НЕМТ на основе $\text{InAlN}/\text{AlN}/\text{GaN}$. Показаны области сток (D), затвор (G) и исток (S)

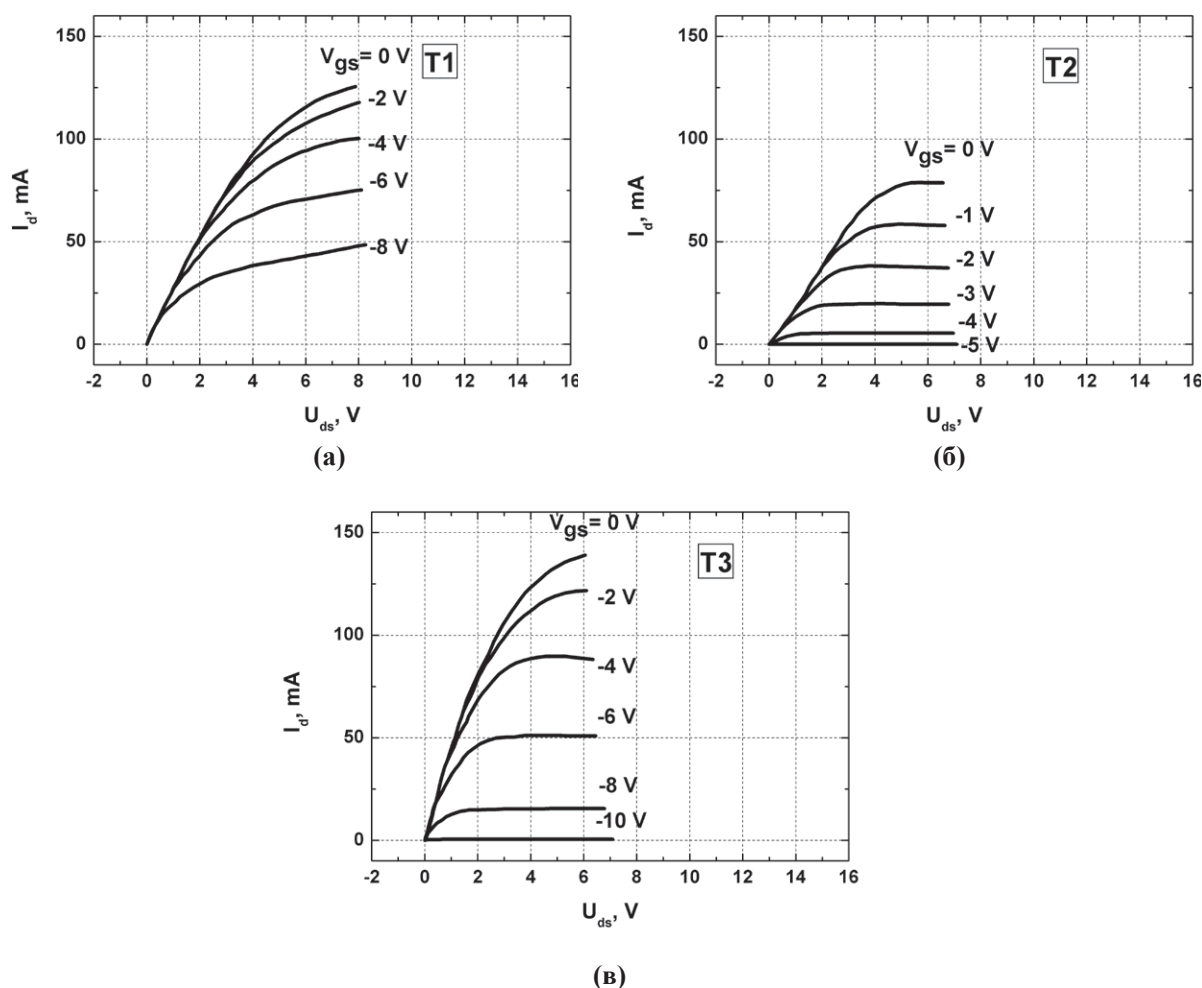


Рис. 4

Выходные характеристики транзисторных структур Т1 (а), Т2 (б) и Т3 (в)

левые транзисторы, обладающие высокими токами насыщения 1600 мА/мм и крутизной более 200 мС/мм. Показано, что использование in-situ пассивации слоем Si₃N₄ позволяет улучшить параметры приборов.

Литература

1. Мальцев П. П., Федоров Ю. В. Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России // Интеграл. – 2013. – Т. 3, № 71. – С. 25-29.
2. Jan Kuzmik Power Electronics on InAlN/(In)GaN: Prospect for a Record Performance // Electron Device Letters, 2001, vol. 22, № 11, pp. 510-512. DOI: 10.1109/55.962646.
3. Neuburger M., Zimmermann T., Kohn E., Dadgar A., Schulze F., Krtschil A., Gunther M., Witte H., Blasing J., Krost A., Daumiller I., Kunze M. Unstrained

- InAlN/GaN HEMT Structure // Int. J. Hi. Spe. Ele. Syst., 2004, vol. 14, № 3, pp. 785-790. DOI: 10.1142/S0129156404002831.
4. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // Journal of Applied Physics, 2001, vol. 89, № 11, pp. 5815-5875. DOI: 10.1063/1.1368156.
5. Iliopoulos E., Adikimenakis A., Giesen C., Heuken M., Georgakilas A. Energy bandgap bowing of InAlN alloys studied by spectroscopic ellipsometry // Applied Physics Letters, 2008, vol. 92, p. 191907. DOI: 10.1063/1.2921783.
6. Butté R., Feltin E., Dorsaz J., Christmann G., Carlin J. F., Grandjean N., Ilegems M. Recent Progress in the Growth of Highly Reflective Nitride-Based Distributed Bragg Reflectors and Their Use in Microcavities // Japanese Journal of Applied Physics, 2005, vol. 44, Part 1, № 10, pp. 7207-7216. DOI: 10.1143/JJAP.44.7207.

7. Kim K. S., Saxler A., Kung P., Razeghi M., Lim K. Y. Determination of the band-gap energy of $Al_{1-x}In_xN$ grown by metal-organic chemical-vapor deposition // *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 71, pp. 800-802.
8. Yamaguchi S., Kariya M., Nitta S., Kato H., Takeuchi T., Wetzel C., Amano H., Akasaki I. Structural and optical properties of $AlInN$ and $AlGaInN$ on GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy // *Journal of Crystal Growth*, 1998, vol. 195, pp. 309-313. DOI: 10.1016/S0022-0248(98)00629-0.
9. Guo Q., Tanaka T., Nishio M., Ogawa H. Optical Bandgap Energy of Wurtzite In-Rich $AlInN$ Alloys // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 42, Part 2, № 2B, pp. L141-L143. DOI: 10.1143/JJAP.42.L141.
10. Onuma T., Chichibu S. F., Uchinuma Y., Sota T., Yamaguchi Y., Kamiyama S., Amano H., Akasaki I. Recombination dynamics of localized excitons in $Al_{1-x}In_xN$ epitaxial films on GaN templates grown by metalorganic vapor phase epitaxy // *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, pp. 2449-2453. DOI: 10.1063/1.1592868.
11. Androulidaki M., Pelekanos N. T., Tsagaraki K., Dimakis E., Iliopoulos E., Adikimenakis A., Bellet-Amalric E., Jalabert D., Georgakilas A. Energy gaps and bowing parameters of $InAlGaN$ ternary and quaternary alloys // *Phys. Status Solidi C*, 2006, vol. 3, pp. 1866-1869. DOI: 10.1002/pssc.200565280.
12. Goldhahn R., Schley P., Winzer A. T., Gobsch G., Cimalla V., Ambacher O., Rakel M., Cobet C., Esser N., Lu H., Scaff W. J. Detailed analysis of the dielectric function for wurtzite InN and In-rich $InAlN$ alloys // *Phys. Status Solidi A*, 2006, vol. 203, № 1, pp. 42-49. DOI: 10.1002/pssa.200563507.
13. Lukitsch M. J., Danylyuk Y. V., Naik V. M., Huang C., Auner G. W., Rimai L., Naik R. Optical and electrical properties of $Al_{1-x}In_xN$ films grown by plasma source molecular-beam epitaxy // *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, pp. 632-634. DOI: 10.1063/1.1388883.
14. Peng T., Piprek J., Qiu G., Olowolafe J. O., Unruh K. M., Swann C. P., Schubert E. F. Band gap bowing and refractive index spectra of polycrystalline $Al_xIn_{1-x}N$ films deposited by sputtering // *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 71, № 17, pp. 2439-2441. DOI: 10.1063/1.120112.
15. Dridi Z., Bouhafs B., Ruterana P. First-principles investigation of lattice constants and bowing parameters in wurtzite $Al_xGa_{1-x}N$, $In_xGa_{1-x}N$ and $In_xAl_{1-x}N$ alloys // *Semiconductor Science and Technology*, 2003, vol. 18, № 9, pp. 850-856. DOI: 10.1088/0268-1242/18/9/307.
16. Lundin W. V., Sakharov A. V., Tsatsulnikov A. F., Ustinov V. M. MOVPE of device-oriented wide-band-gap III-N heterostructures // *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 26, № 1, pp. 014039/1-8. DOI: 10.1088/0268-1242/26/1/014039.
17. Создание распределённых брэгговских отражателей на основе гетероструктур $InAlN/GaN$ и исследование их свойств / Заварин Е. Е., Лундин В. В., Синицын М. А., Сахаров А. В., Усов С. О., Николаев А. Е., Трошков С. И., Яговкина М. А., Яковлев Е. В., Талалаев Р. А., Давыдов Д. В., Лобанова А. В., Черкашин Н. А., Нутч М. J., Брунков П. Н., Цацульников А. Ф. // Тезисы докладов 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 1-3 февраля 2010 г.). – Санкт-Петербург, 2010. – С. 139-140.
18. Усов С. О., Заварин Е. Е., Цацульников А. Ф., Лундин В. В., Сахаров А. В., Николаев А. Е., Синицын М. А., Трошков С. И., Леденцов Н. Н. Структурные и оптические свойства $InAlN/GaN$ распределённых брэгговских отражателей // *Физика и техника полупроводников*. – 2010. – Т. 44, № 7. – С. 981-985.
19. Цацульников А. Ф., Лундин В. В., Заварин Е. Е., Николаев А. Е., Сахаров А. В., Рожавская М. М., Усов С. О., Брунков П. Н., Синицын М. А., Давыдов Д. В., Мизеров М. Н., Черкашин Н. А. Композитные $InGaN/GaN/InAlN$ -гетероструктуры, излучающие в жёлто-красной области спектра // *Физика и техника полупроводников*. – 2012. – Т. 46, № 10. – С. 1304-1308.
20. Лундин В. В., Николаев А. Е., Сахаров А. В., Брунков П. Н., Заварин Е. Е., Цацульников А. Ф. Эпитаксия слоёв AlN с высокой скоростью роста в планетарном МОС-гидридном реакторе // *Письма в Журнал технической физики*. – 2010. – Т. 36, № 24. – С. 33-39.
21. The alloy scattering in $InAlN/AlN/GaN$ structure / Fang T., Tshy K., Jena D. // EE 87024 – Wide Bandgap Device Physics (Notre Dame, ND) // *Electrical Engineering*, 2009. – pp. 1-3.
22. Лундин В. В., Давыдов Д. В., Заварин Е. Е., Попов М. Г., Сахаров А. В., Яковлев Е. В., Базаревский Д. С., Талалаев Р. А., Цацульников А. Ф., Мизеров М. Н., Устинов В. М. МОС-гидридная эпитаксия III-N светодиодных гетероструктур с малой длительностью технологического процесса // *Письма в Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 41, № 5. – С. 9-17.
23. Гетероструктуры $InGaAlN$ для НЕМТ-транзисторов / Сахаров А. В., Лундин В. В., Заварин Е. Е., Сини-

- цин М. А., Цацульников А. Ф. // Тезисы докладов 5-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 31 января – 2 февраля 2007 г.). – Санкт-Петербург, 2007. – С. 46-47.
24. InAlN/GaN и (AlN/GaN)/GaN гетероструктуры с двумерным электронным газом / А. В. Сахаров, В. В. Лундин, А. Е. Николаев, Е. Е. Заварин, М. А. Сеницын, М. А. Яговкина, А. Ф. Цацульников // Тезисы докладов 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 1-3 февраля 2010 г.). – Санкт-Петербург, 2010. – С. 117-118.
 25. Контроль поверхностных процессов в оптимизации роста III-N материалов / Лундин В. В., Заварин Е. Е., Сеницын М. А., Николаев А. Е., Сахаров А. В., Цацульников А. Ф., Яковлев Е. В., Талалаев Р. А., Лобанова А. В., Сегаль А. С. // Тезисы докладов 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 1-3 февраля 2010 г.). – Санкт-Петербург, 2010. – С. 15-18.
 26. Bruker Corporation D8 DISCOVER – Overview, X-ray Diffractometer // Bruker. [2016]. – Режим доступа: <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/d8-discover/overview.html> (дата обращения: 10.03.2016).
 27. Bruker Corporation LEPTOS R – XRD Software // Bruker. [2016]. – Режим доступа: <https://www.bruker.com/ru/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/xrd-software/overview/leptos/leptos-r.html> (дата обращения: 10.03.2016).
 28. Medjdoub F., Alomari M., Carlin J.-F., Gonschorek M., Feltn E., Py M. A., Grandjean N., Kohn E. Barrier-Layer Scaling of InAlN/GaN HEMTs // Electron Device Letters, 2008, vol. 29, № 5, pp. 422-425. DOI: 10.1109/LED.2008.919377.
 29. Derluyn J., Boeykens S., Cheng K., Vandersmissen R., Das J., Ruythooren W., Degroote S., Leys M. R., Germain M., Borghs G. Improvement of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor structures by in situ deposition of a Si₃N₄ surface layer // Journal of Applied Physics, 2005, vol. 98, p. 054501/1-5. DOI: 10.1063/1.2008388.
 30. Юнин П. А., Дроздов Ю. Н., Дроздов М. Н., Королёв С. А., Охапкин А. И., Хрыкин О. И., Шашкин В. И. Слои Si₃N₄ для in-situ пассивации транзисторных структур на основе GaN // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, № 11. – С. 1469-1472.
 31. Russo S., Di Carlo A. Scaling Issues for AlGaIn/GaN HEMTs: Performance Optimization via Devices Geometry Modelling // arXiv:cond-mat/0510049, 2005, pp. 1-3.

References

1. Maltsev P. P., Fedorov Yu. V. Modern state and perspectives of millimeter range nitride-based microwave devices abroad and in Russia. Integral, 2013, vol. 3, № 71, pp. 25-29.
2. Jan Kuzmik Power Electronics on InAlN/(In)GaN: Prospect for a Record Performance // Electron Device Letters, 2001, vol. 22, № 11, pp. 510-512. DOI: 10.1109/55.962646.
3. Neuburger M., Zimmermann T., Kohn E., Dadgar A., Schulze F., Krtschil A., Gunther M., Witte H., Blasing J., Krost A., Daumiller I., Kunze M. Unstrained InAlN/GaNHEMT Structure // Int. J. Hi. Spe. Ele. Syst., 2004, vol. 14, № 3, pp. 785-790. DOI: 10.1142/S0129156404002831.
4. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // Journal of Applied Physics, 2001, vol. 89, № 11, pp. 5815-5875. DOI: 10.1063/1.1368156.
5. Iliopoulos E., Adikimenakis A., Giesen C., Heuken M., Georgakilas A. Energy bandgap bowing of InAlN alloys studied by spectroscopic ellipsometry // Applied Physics Letters, 2008, vol. 92, p. 191907. DOI: 10.1063/1.2921783.
6. Butté R., Feltn E., Dorsaz J., Christmann G., Carlin J. F., Grandjean N., Ilegems M. Recent Progress in the Growth of Highly Reflective Nitride-Based Distributed Bragg Reflectors and Their Use in Microcavities // Japanese Journal of Applied Physics, 2005, vol. 44, Part 1, № 10, pp. 7207-7216. DOI: 10.1143/JJAP.44.7207.
7. Kim K. S., Saxler A., Kung P., Razeghi M., Lim K. Y. Determination of the band-gap energy of Al_{1-x}In_xN grown by metal-organic chemical-vapor deposition // Applied Physics Letters, 1997, vol. 71, pp. 800-802.
8. Yamaguchi S., Kariya M., Nitta S., Kato H., Takeuchi T., Wetzel C., Amano H., Akasaki I. Structural and optical properties of AlInN and AlGaInN on GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy // Journal of Crystal Growth, 1998, vol. 195, pp. 309-313. DOI: 10.1016/S0022-0248(98)00629-0.
9. Guo Q., Tanaka T., Nishio M., Ogawa H. Optical Bandgap Energy of Wurtzite In-Rich AlInN Alloys // Japanese Journal of Applied Physics, 2003, vol. 42, Part 2, № 2B, pp. L141-L143. DOI: 10.1143/JJAP.42.L141.
10. Onuma T., Chichibu S. F., Uchinuma Y., Sota T., Yamaguchi Y., Kamiyama S., Amano H., Akasaki I.

- Recombination dynamics of localized excitons in $\text{Al}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ epitaxial films on GaN templates grown by metalorganic vapor phase epitaxy // *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, pp. 2449-2453. DOI: 10.1063/1.1592868.
11. Androulidaki M., Pelekanos N. T., Tsagaraki K., Dimakis E., Iliopoulos E., Adikimenakis A., Bellet-Amalric E., Jalabert D., Georgakilas A. Energy gaps and bowing parameters of InAlGaN ternary and quaternary alloys // *Phys. Status Solidi C*, 2006, vol. 3, pp. 1866-1869. DOI: 10.1002/pscc.200565280.
 12. Goldhahn R., Schley P., Winzer A. T., Gobsch G., Cimalla V., Ambacher O., Rakel M., Cobet C., Esser N., Lu H., Scaff W. J. Detailed analysis of the dielectric function for wurtzite InN and In-rich InAlN alloys // *Phys. Status Solidi A*, 2006, vol. 203, № 1, pp. 42-49. DOI: 10.1002/pssa.200563507.
 13. Lukitsch M. J., Danylyuk Y. V., Naik V. M., Huang C., Auner G. W., Rimai L., Naik R. Optical and electrical properties of $\text{Al}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ films grown by plasma source molecular-beam epitaxy // *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, pp. 632-634. DOI: 10.1063/1.1388883.
 14. Peng T., Piprek J., Qiu G., Olowolafe J. O., Unruh K. M., Swann C. P., Schubert E. F. Band gap bowing and refractive index spectra of polycrystalline $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$ films deposited by sputtering // *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 71, № 17, pp. 2439-2441. DOI: 10.1063/1.120112.
 15. Dridi Z., Bouhafs B., Ruterana P. First-principles investigation of lattice constants and bowing parameters in wurtzite $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ alloys // *Semiconductor Science and Technology*, 2003, vol. 18, № 9, pp. 850-856. DOI: 10.1088/0268-1242/18/9/307.
 16. Lundin W. V., Sakharov A. V., Tsatsulnikov A. F., Ustinov V. M. MOVPE of device-oriented wide-band-gap III-N heterostructures // *Semicond. Sci. Technol.*, 2011, vol. 26, № 1, pp. 014039/1-8. DOI: 10.1088/0268-1242/26/1/014039.
 17. Growth and advances characterization of InAlN/GaN distributed Bragg reflectors // E. E. Zavarin, W. V. Lundin, M. A. Sinitsyn, A. V. Sakharov, S. O. Usov, A. E. Nikolaev, S. I. Troshkov, M. A. Yagovkina, E. V. Yakovlev, R. A. Talalaev, D. V. Davydov, A. V. Lobanova, N. A. Cherkashin, M. J. Hytch, P. N. Brunkov, A. F. Tsatsulnikov *Tezisy dokladov 7 Vserossiyskoy konferentsii «Nitridy galliya, indiya i alyuminiya – struktury i pribory»* [Proceedings of the 7th All-Russian Conference «Nitrides of gallium, indium and aluminum: structures and devices»], St. Petersburg, 2010, pp. 139-140.
 18. Usov S. O., Zavarin E. E., Tsatsulnikov A. F., Lundin W. V., Sakharov A. V., Nikolaev A. E., Sinitsyn M. A., Troshkov S. I., Ledentsov N. N. Structural and optical properties of InAlN/GaN distributed Bragg reflectors // *Semiconductors*, 2010, vol. 44, №7, pp. 949-953. DOI: 10.1134/S1063782610070201.
 19. Tsatsulnikov A. F., Lundin W. V., Zavarin E. E., Nikolaev A. E., Sakharov A. V., Rozhavskaya M. M., Usov S. O., Brunkov P. N., Synitsin M. A., Davydov D. V., Mizerov M. N., Cherkashin N. A., Composite InGaN/GaN/InAlN heterostructures emitting in the yellow-red spectral region // *Semiconductors*, 2012, vol. 46, №10, pp. 1281-1285. DOI: 10.1134/S1063782612100168.
 20. Lundin W. V., Nikolaev A. E., Sakharov A. V., Brunkov P. N., Zavarin E. E., Tsatsulnikov A. F. High Growth Rate of AlN in a Planetary MOVPE Reactor // *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, №12, pp. 1133-1135. DOI: 10.1134/S1063785010120205.
 21. The alloy scattering in InAlN/AlN/GaN structure / Fang T., Tahy K., Jena D. // EE 87024 – Wide Bandgap Device Physics (Notre Dame, ND) // *Electrical Engineering* 2009. – pp. 1-3.
 22. Lundin W. V., Davydov D. V., Zavarin E. E., Popov M. G., Sakharov A. V., Yakovlev E. V., Bazarevskiy D. S., Talalaev R. A., Tsatsulnikov A. F., Mizerov M. N., Ustinov V. M. III-N heterostructure LED MOS-hydride short duration epitaxy. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 41, № 5, pp. 9-17.
 23. InGaAlN heterostructures for HEMTs // A. V. Sakharov, W. V. Lundin, E. E. Zavarin, M. A. Sinitsyn, A. F. Tsatsulnikov *Tezisy dokladov 5 Vserossiyskoy konferentsii «Nitridy galliya, indiya i alyuminiya – struktury i pribory»* [Proceedings of the 5th All-Russian Conference «Nitrides of gallium, indium and aluminum: structures and devices»], St. Petersburg, 2007, pp. 46-47.
 24. InAlN/GaN and (AlN/GaN)/GaN heterostructures with 2-D electron gas // A. V. Sakharov, W. V. Lundin, A. E. Nikolaev, E. E. Zavarin, M. A. Sinitsyn, M. A. Yagovkina, A. F. Tsatsulnikov *Tezisy dokladov 7 Vserossiyskoy konferentsii «Nitridy galliya, indiya i alyuminiya – struktury i pribory»* [Proceedings of the 7th All-Russian Conference «Nitrides of gallium, indium and aluminum: structures and devices»], St. Petersburg, 2010, pp. 117-118.
 25. Optimization of III-N heterostructures growth by MOVPE via surface process control // W. V. Lundin, E. E. Zavarin, M. A. Sinitsyn, A. E. Nikolaev, A. V. Sakharov, A. F. Tsatsulnikov, E. V. Yakovlev, R. A. Talalaev, A. V. Lobanova, A. S. Segal *Tezisy dokladov*

- 7 Vserossiyskoy konferentsii «Nitridy galliya, indiya i alyuminiya – struktury i pribory» [Proceedings of the 7th All-Russian Conference «Nitrides of gallium, indium and aluminum: structures and devices»], St. Petersburg, 2010, pp. 15-18.
26. Bruker Corporation D8 DISCOVER – Overview, X-ray Diffractometer // Bruker. [2016]. – URL: <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/d8-discover/overview.html> (accessed 10 March 2016).
27. Bruker Corporation LEPTOS R – XRD Software // Bruker. [2016]. – URL: <https://www.bruker.com/ru/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/x-ray-diffraction/xrd-software/overview/leptos/leptos-r.html> (accessed 10 March 2016).
28. Medjdoub F., Alomari M., Carlin J.-F., Gonschorek M., Feltin E., Py M. A., Grandjean N., Kohn E. Barrier Layer Scaling of InAlN/GaN HEMTs // *Electron Device Letters*, 2008, vol. 29, № 5, pp. 422-425. DOI: 10.1109/LED.2008.919377.
29. Derluyn J., Boeykens S., Cheng K., Vandersmissen R., Das J., Ruythooren W., Degroote S., Leys M. R., Germain M., Borghs G. Improvement of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor structures by in situ deposition of a Si₃N₄ surface layer // *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, p. 054501/1-5. DOI: 10.1063/1.2008388.
30. Yunin P. A., Drozdov Yu. N., Drozdov M. N., Korolev S. A., Okhapkin A. I., Khrykin O. I., Shashkin V. I. Si₃N₄ layers for the in-situ passivation of GaN-based HEMT structures // *Semiconductors*, 2015, vol. 49, №11, pp. 1421-1424. DOI: 10.1134/S1063782615110251.
31. Russo S., Di Carlo A. Scaling Issues for AlGaIn/GaN HEMTs: Performance Optimization via Devices Geometry Modelling // *arXiv:cond-mat/0510049*, 2005, pp. 1-3.