

Сверхвысокочастотные полевые транзисторы на основе нитридов III группы

© С.Б. Александров, Д.А. Баранов, А.П. Кайдаш, Д.М. Красовицкий, М.В. Павленко, С.И. Петров[†], Ю.В. Погорельский, И.А. Соколов, М.В. Степанов, В.П. Чалый, Н.Б. Гладышева*, А.А. Дорофеев*, Ю.А. Матвеев*, А.А. Чернявский*

ЗАО „Научное и технологическое оборудование“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

* Государственное унитарное предприятие „Пульсар“,
105187 Москва, Россия

(Получена 4 февраля 2004 г. Принята к печати 17 марта 2004 г.)

Обсуждаются концепция конструирования и основные свойства экспериментальных двойных гетероструктур AlGaIn/GaN/AlGaIn с двумерным электронным каналом, полученных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках сапфира. Разработаны основы постростовой технологии полевых сверхвысокочастотных транзисторов на основе нитридов III группы, включающие в себя формирование меза-изоляции и цикл изготовления омических контактов и барьера Шоттки. Первые полевые транзисторы, изготовленные из указанных гетероструктур, имеют полный набор статических характеристик и демонстрируют работоспособность в режиме малых сверхвысокочастотных сигналов на частоте 8.15 ГГц.

1. Введение

Нитриды III группы находят все более широкое применение в твердотельной электронике благодаря уникальному сочетанию физических характеристик (большие, по сравнению с другими соединениями A^{III}B^V, значения ширины запрещенной зоны, высокая теплопроводность, химическая и термическая устойчивость, наличие спонтанной и пьезо-поляризации и т. д.). Большие значения концентрации электронов в канале в сочетании с высокими пробивными полями позволяют обеспечить плотность СВЧ (сверхвысокочастотной) мощности в полевых транзисторах на основе GaN в 5–10 раз больше, чем в приборах на основе GaAs, что делает этот класс приборов перспективным для использования в бортовых радиолокаторах с активной фазированной антенной-решеткой (АФАР) и в СВЧ усилителях общего и специального назначения (системы радиоэлектронной борьбы, наземные и спутниковые системы телекоммуникаций и связи). Основными технологиями выращивания приборных нитридных гетероструктур являются эпитаксия из металлорганических соединений (МОСГФЭ) и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). С начала 90-х гг., когда были продемонстрированы первые так называемые пьезотранзисторы PEFET (Piezo-Electric Field Effect Transistor) в системе GaAs/InGaAs/AlGaAs [1,2] и первые транзисторы типа HFET (Heterostructure Field Effect Transistor) и HEMT (High Electron Mobility Transistor) на основе гетеропереходов AlGaIn/GaN [3,4], зарубежными фирмами к настоящему времени достигнут значительный прогресс в области изготовления высокочастотных мощных полевых транзисторов на основе GaN. В 2000 г. на подложке карбида кремния был изготовлен HFET, демонстрирующий выходную мощность 2.8 Вт/мм, $f_T = 43$ ГГц, крутизну 300 мС/мм и напряжение пробоя исток–сток 70 В [5]. Недавно японская фирма

Oki Electric Industry Co., Ltd. сообщила об изготовлении HEMT с углубленным T-образным затвором [6], имеющего рекордную крутизну 500 мС/мм и $f_T = 126$ ГГц.

В данной статье представлены принятая в ЗАО „Научное и технологическое оборудование“ концепция конструирования транзисторных двойных гетероструктур (ДГС) на основе нитридов III группы и основные свойства экспериментальных образцов, полученных в рамках данной концепции методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием аммиака в качестве источника азота. Также сообщается о первых полевых транзисторах, изготовленных из указанных гетероструктур на ФГУП НИИ „Пульсар“, имеющих полный набор статических характеристик и демонстрирующих работоспособность в режиме малых СВЧ сигналов.

2. Выбор конструкции для полевых транзисторов на основе нитридов III группы

Наиболее распространенная конструкция гетероструктуры AlGaIn/GaN, широко используемая в мире для изготовления СВЧ транзисторов типа HEMT, включает в себя относительно толстый (1–3 мкм) буферный слой GaN, прикрытый тонким (100–300 Å) слоем Al_xGa_{1-x}N (0.15 < x < 0.35). Благодаря большему, по сравнению с системой GaAs/AlGaAs, разрыву зон проводимости в сочетании с эффектом пьезолегирования на гетерогранице GaN/AlGaIn происходит образование двумерного электронного газа (2ДЭГ) со слоевой концентрацией порядка 10¹³ см⁻² и подвижностью порядка 1000 см²/В·с. Профиль дна зоны проводимости и распределение электронной плотности в подобной структуре схематически показаны на рис. 1, а. Указанная структура представляет собой базовую концепцию построения HEMT на основе нитридов III группы; на практике используют

[†] E-mail: support@semiteq.ru

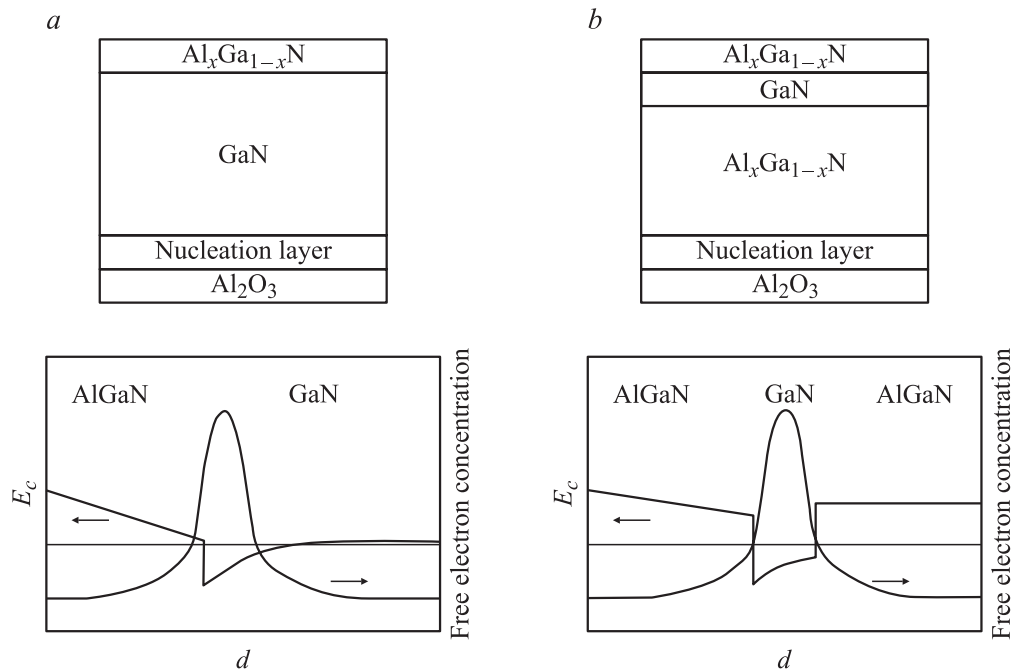


Рис. 1. Транзисторная структура: *a* — с одним гетеропереходом, *b* — с двумя гетеропереходами.

ся ее различные модификации, например модулированное легирование слоя AlGaN (спейсер–донорный слой–барьерный слой) для увеличения концентрации электронов в канале и уменьшения сопротивления омических контактов.

Одним из наиболее серьезных требований ко всем типам подобных гетероструктур является низкая, не более 10^{15} см^{-3} , концентрация носителей в буферном слое, необходимая для обеспечения межприборной изоляции и получения полной отсечки тока стока.

Существует несколько причин, по которым выполнение этого требования путем выращивания нелегированного GaN (даже высокого кристаллического качества) сопряжено со значительными трудностями. Во-первых, зародышевые слои, используемые на начальных стадиях роста нитридов на рассогласованных по параметру решетки подложки (Al_2O_3 , SiC, Si), могут образовывать области с дефектной проводимостью вблизи интерфейсов буферного и зародышевого слоев [7]. Во-вторых, в ряде работ сообщается о диффузии донорных примесей в GaN из подложки (в частности, кислорода [8–10] и кремния [11,12]), что может привести к образованию в приборе каналов шунтирующей проводимости. Кроме того, наличие спонтанной и пьезополяризации приводит к образованию наведенных как положительных, так и отрицательных зарядов вблизи дефектов, границ блоков мозаичной структуры, на гетероинтерфейсах, что в свою очередь может привести к усилению утечек по вертикальным каналам, вплоть до пробоя через буферный слой. Указанные обстоятельства в совокупности являются причиной того, что в реальных приборных гетероструктурах, работающих при высоких (более 50 В) напряжениях, необходимы специальные, дополни-

тельные меры для обеспечения нужного сопротивления буферного слоя.

Существует несколько подходов к созданию высокоомного буферного слоя в транзисторной структуре. Во-первых, это поиск и оптимизация условий роста нелегированного GaN; в частности, показано, что сопротивление слоев в зависимости от изменения отношения потоков V/III групп, процедуры отжига зародышевого слоя, температуры и скорости роста эпитаксиального слоя может меняться на несколько порядков [13]. Однако столь существенное изменение проводимости GaN, как правило, связано с изменением прочих его свойств, в частности структурного совершенства, морфологии поверхности и т.п., что вызывает определенные трудности при совмещении разных режимов роста слоев в рамках одной приборной гетероструктуры. Довольно распространено компенсирующее легирование GaN различными примесями [14–16]. Сопротивление буферного слоя в этих случаях, как правило, достаточно для предотвращения утечек и пробоев. В то же время указанная методика содержит в себе опасность диффузии введенных примесей в область канала транзистора, причем этот эффект может усиливаться высокими рабочими температурами (около 300–400°C) нитридных приборов. Кроме того, возможно использование в качестве буферного слоя более широкозонного материала, в частности и твердых растворов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ вплоть до чистого нитрида алюминия, являющегося прекрасным диэлектриком с шириной запрещенной зоны 6.2 эВ.

Последняя из указанных концепций, качественно отличаясь от перечисленных выше, подразумевает собой переход к двойным гетероструктурам, с присущими этому классу приборов дополнительными преимуществами.

Использование двойной гетероструктуры в первую очередь приводит к эффекту лучшей локализации носителей в канале (вплоть до перехода к квантовым ямам) по сравнению со структурой с одним гетеропереходом, что приводит к получению необходимой отсечки тока стока. Во-вторых, в отличие от структуры, показанной на рис. 1, *a* и имеющей растянутый напряженный слой AlGaN на толстом релаксированном GaN, в структуре, показанной на рис. 1, *b*, верхние слои будут сжаты. Это должно стать благоприятным фактором в преодолении проблемы релаксации верхнего барьерного слоя через образование микротрещин и связанным с этим ухудшением параметров канала с 2ДЭГ, нередко наблюдаемых в традиционных нитридных гетероструктурах [17]. Кроме того, использование двойной гетероструктуры предоставляет широкие возможности для управления механическими напряжениями в такой структуре, а как следствие, и эффектом пьезолегирования, за счет варьирования процента содержания алюминия в нижнем барьере и толщины канального слоя нитрида галлия. В-третьих, введение широкозонного материала в нижнюю часть гетероструктуры дает возможность осуществить дополнительное легирование канала, тем самым увеличивая плотность носителей в нем без опасения ухудшить затворные характеристики транзистора [18]. Более того, легирование может быть полностью перенесено в нижнюю часть структуры, что позволило бы уменьшить толщину подзатворного слоя AlGaN с целью увеличения усиления прибора.

Указанные выше преимущества успешно использованы в других системах $A^{III}B^V$, в частности AlGaAs/GaAs [19]. В то же время в нитридной системе необходимо учитывать влияние сильных поляризационных эффектов, которые существенно искажают зонную диаграмму (или профиль потенциала, задаваемый изменением состава). Отдельного исследования требует контроль механических напряжений в структуре, состоящей из рассогласованных (между собой и с подложкой) слоев. Несмотря на указанные трудности, далее представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие перспективность выбранного направления.

3. Экспериментальная часть

Гетероструктуры AlGaN/GaN (табл. 1) были выращены на подложках сапфира (0001) на установке МЛЭ ЭПН-2, специализированной для выращивания слоев нитридов III группы, в которой в качестве источника активного азота используется аммиак, а в качестве источника компонент III группы и легирующих примесей — стандартные эффузионные ячейки [20]. Отличительной конструктивной особенностью данного оборудования является расширенный, по сравнению с традиционными системами МЛЭ, диапазон технологических параметров, в первую очередь отношения потоков V/III групп (1–1000) и температуры подложки (до 1050°C).

Основным отличием используемых нами гетероструктур [21] от наиболее распространенной конструкции НЕМТ является наличие относительно толстого (0.6–1.0 мкм) буферного слоя, состоящего из слоев твердых растворов $Al_xGa_{1-x}N$ ($x > 0.5$), обеспечива-

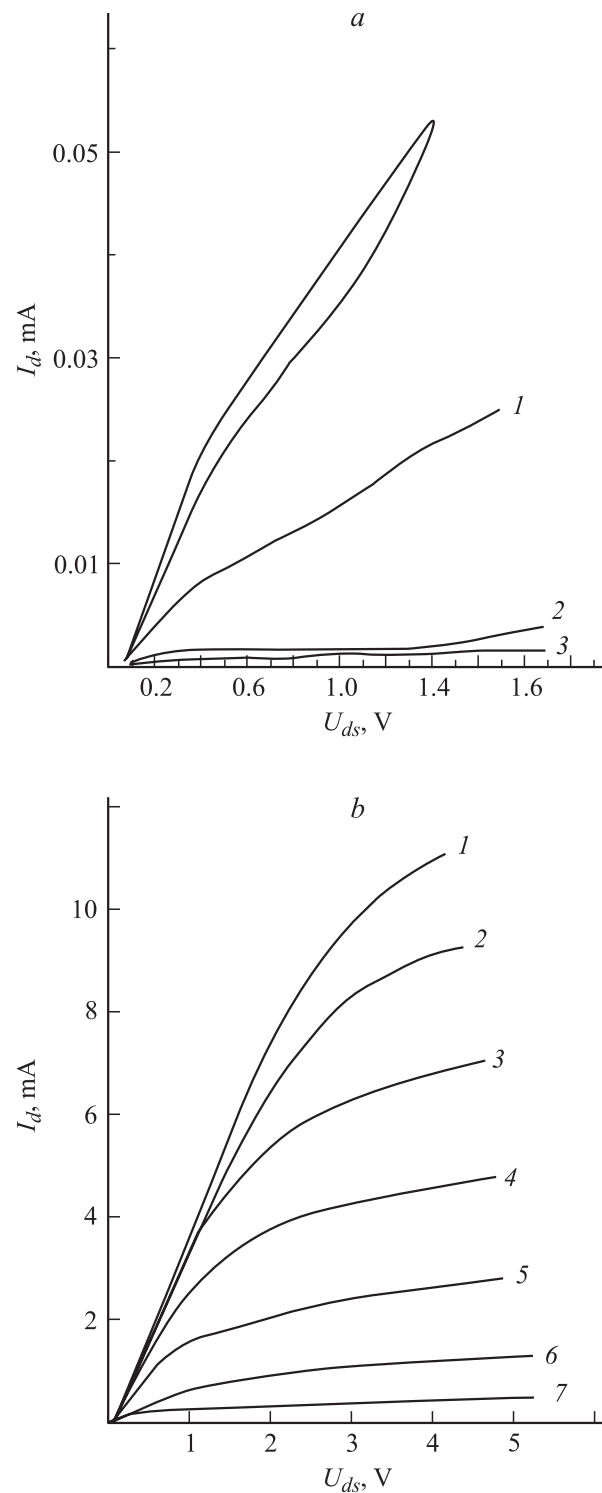


Рис. 2. Статические вольт-амперные характеристики транзисторов: *a* — типа pFET, $U_g, В$: 1 — -0.2 , 2 — -0.4 , 3 — -0.6 . *b* — типа nFET, $U_g, В$: 1 — -3.0 , 2 — -3.5 , 3 — -4.0 , 4 — -4.5 , 5 — -5.0 , 6 — -5.5 , 7 — -6.0 .

Таблица 1. Характеристики исходных гетероструктур и типы изготавливаемых приборов

Тип транзистора	Холловская подвижность 300 К, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	Холловская концентрация 300 К, см^{-2}	Конструкция структуры (сверху вниз)
PEFET	360	$9 \cdot 10^{12}$	250 Å $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 500 Å GaN Буфер $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N} / \text{AlN}$
HFET	340	$2 \cdot 10^{13}$	80 Å $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}^*$ 100 Å $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \text{ Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}(\text{Si})$ 40 Å $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}^*$ 350 Å GaN Буфер $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N} / \text{AlN}$

Примечание. * Нелегированный слой.

ющего высокие значения (свыше 200 В) пробивных напряжений межприборной изоляции. Далее следует намеренно не легированный слой GaN (350–500 Å), прикрытый сверху слоем $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$, не легированным (PEFET) или модулированно легированным Si (HFET).

По результатам измерений эффекта Холла, при 77 К наблюдается увеличение подвижности носителей до 800–1500 $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, при сохранении их слоевой концентрации, наблюдаемой при комнатной температуре, что является признаком образования двумерного электронного газа на гетерогранице AlGaN/GaN. По данным атомно-силовой микроскопии, транзисторные гетероструктуры имеют шероховатость поверхности 0.9–3.3 нм (RMS по площади 5×5 мкм). Для тестового образца GaN толщиной 1 мкм, выращенного в условиях роста транзисторной гетероструктуры, полуширины рентгенодифракционных кривых θ - и θ -2 θ -сканирования для симметричного брэгговского отражения составили 276'' и 55''. Общее количество дефектов на всех структурах специально не оценивалось, но составляет, по косвенным данным, не менее $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Для увеличения однородности слоев и уменьшения плотности дефектов конструкция гетероструктур и технология их выращивания находятся в стадии оптимизации, результаты которой будут опубликованы дополнительно.

На данных гетероструктурах (табл. 1) были изготовлены транзисторы с длиной затвора $L_g = 0.5$ – 0.6 мкм, расстоянием сток–исток 3 мкм и ширинами затвора W_g , равными 60, 150 и 250 мкм. Организация меза-изоляции осуществлялась методом плазмохимического травления с маской из фоторезиста. Омические контакты Ti/Al/Pt изготавливались с помощью контактной „взрывной“ фотолитографии с последующим отжигом в атмосфере азота при температуре 700°C. На представленных структурах удельное сопротивление омических контактов составляло порядка 2 – $3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Затвор Ni/Au формировался методом контактной взрывной фотолитографии с использованием коротковолнового УФ излучения. Статические параметры изготовленных приборов представлены в табл. 2, а вольт-амперные характеристики — на рис. 2.

Полученные приборы демонстрируют полный набор статических характеристик. Необходимые изолирующие

свойства нижней части гетероструктуры обеспечивают выраженное насыщение характеристик и полную отсечку тока стока. Вместе с тем низкие токи исток–сток в PEFET не согласуются со значениями, ожидаемыми исходя из измеренной холловской концентрации. Это, по-видимому, связано с недостаточной отработанностью процедуры вжигания омических контактов применительно к гетероструктуре с сильными встроенными полями, и как следствие, уменьшением концентрации носителей, образующихся в результате пьезоэффекта на границе AlGaN/GaN. Транзисторы типа HFET с модулированно легированным тройным раствором $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ делают структуру более устойчивой к воздействиям, стабилизируя концентрацию в канале, однако легирование тройного раствора ухудшает напряжения пробоя затвора. Для согласования требований, предъявляемых к гетероструктурам и технологии создания контактной металлизации, требуется дополнительная оптимизация.

Одной из проблем, возникших при обработке технологии изготовления данных транзисторов, является разделение пластин на отдельные кристаллы. Технологии резки, применяемые при изготовлении других полупроводниковых приборов, приводят к появлению недо-

Таблица 2. Статические характеристики изготовленных транзисторов ($W_g = 60$ мкм)

Тип транзистора	Ток насыщения исток–сток при $U_g = 0$, мА	Крутизна, мС/мм	Напряжение отсечки, В	Напряжение насыщения исток–сток, В
PEFET	0.1–0.05	40–50	0.6	2
HFET	30–40	92–96	6	10–12

Таблица 3. СВЧ параметры HFET на основе ДГС AlGaN/i-GaN/n-AlGaN ($W_g = 250$ мкм)

F_{meas} , ГГц	К, дБ	U_{ds} , В	U_{gs} , В	I_{ds} , мА
8.15	4.46–4.53	12	–(3.38–3.86)	30

пустимых изменений свойств рассматриваемых гетероструктур вследствие возникновения механических напряжений (резка алмазными дисками) или термического удара (лазерная резка). Эта проблема не была решена на начальном этапе и требует дальнейшей проработки. Поэтому измерение СВЧ характеристик полученных транзисторов проводилось непосредственно на пластине. Для исследования были выбраны приборы типа HFET с $W_g = 250$ мкм, исходя из параметров измерительного стенда на основе измерителя коэффициента шума X5-36 и СВЧ зондового контактного устройства разработки ФГУП НИИ „Пульсар“. Результаты измерений (для значений K и U_{gs} приведены их диапазоны на трех образцах) в режиме малых входных сигналов приведены в табл. 3. При увеличении U_{ds} до 20 В K практически не менялся, значения I_{ds} соответствуют максимуму K . Насколько нам известно, работоспособность в СВЧ режиме транзисторных структур на основе нитридов III группы, произведенных в России, продемонстрирована впервые.

4. Заключение

1) На двух типах двойных гетероструктур разработаны основы технологии изготовления полевых транзисторов на основе нитридов III группы, включающие в себя травление меза-изоляции, а также цикл изготовления омических контактов (исток и сток) и барьеров Шоттки (затвор).

2) Изготовлены полевые транзисторы, демонстрирующие полный набор статических характеристик. Приборы типа HFET на двойной гетероструктуре AlGaIn/*i*-GaIn/*n*-AlGaIn продемонстрировали работоспособность в режиме малых СВЧ сигналов на частоте 8.15 ГГц.

Список литературы

- [1] X. Li, K.F. Logenbach, W.I. Wang. Appl. Phys. Lett., **60**, 1513 (1992).
- [2] S.S. Lu, C.L. Huang. IEE Electron. Lett., **30**, 823 (1994).
- [3] M. Asif Khan, J.N. Kuznia, D.T. Olson, W.J. Schaff, J.W. Burm, M.S. Shur. Appl. Phys. Lett., **65**, 1121 (1994).
- [4] M. Asif Khan, A. Bhattarai, J.N. Kuznia, D.T. Olson. Appl. Phys. Lett., **63**, 1214 (1993).
- [5] A. Wieszt, R. Dietrich, J.-S. Lee, A. Vescan, H. Leier, E.L. Piner, J.M. Redwing, H. Sledzik. *Europ. Gallium Arsenide and Related III–V Compounds Appl. Symp. Proc.* (Paris, France, 2000) p. 260.
- [6] „Oki Electric Power Transistor for Wireless Communications Achieves World's-Best Amplification Characteristics“ <http://www.oki.com/en/press/2003/z02123e.html>
- [7] M.G. Cheong, K.S. Kim, C.S. Oh, N.W. Namgung, G.M. Yang, C.-H. Hong, K.Y. Lim, E.-K. Suh, K.S. Nahm, H.J. Lee, D.H. Lim, A. Yoshikawa. Appl. Phys. Lett., **77**, 2557 (2000).
- [8] X.L. Sun, S.H. Goss, L.J. Brillson, D.C. Look, R.J. Molnar. J. Appl. Phys., **91**, 6729 (2002).
- [9] X.L. Sun, S.H. Goss, L.J. Brillson, D.C. Look, R.J. Molnar. Phys. Status Solidi B, **228**, 441 (2001).
- [10] S.H. Goss, X.L. Sun, A.P. Young, L.J. Brillson, D.C. Look, R.J. Molnar. Appl. Phys. Lett., **78**, 3630 (2001).
- [11] R. Armitage, Qing Yang, H. Feick, J. Gebauer, E.R. Weber, Satoko Shinkai, Katsutaka Sasaki. Appl. Phys. Lett., **81**, 1450 (2002).
- [12] S.N. Basu, T. Lei, T.D. Moustakas. J. Mater. Res., **9**, 2370 (1994).
- [13] Z. Bougrioua, I. Moerman, N. Sharma, R.H. Wallis, J. Cheyys, K. Jacobs, E.J. Thrush, L. Considine, R. Beanland, J.-L. Farvacque, C. Humphreys. J. Cryst. Growth, **230**, 573 (2001).
- [14] N.I. Kuznetsov, A.E. Nikolaev, A.S. Zubrilov, Yu.V. Melnik, V.A. Dmitriev. Appl. Phys. Lett., **75**, 3138 (1999).
- [15] H. Tang, J.B. Webb, J.A. Bardwell, S. Rolfé, T. MacElwee. Sol. St. Electron., **44**, 2177 (2002).
- [16] R.P. Vaudo, X. Xu, A. Salant, J. Malcarne, G.R. Brandes. Phys. Status Solidi A, **200** (1), 18 (2003).
- [17] Z. Bougrioua, I. Moerman, L. Nistor, B. Van Daele, E. Monroy, T. Palacios, F. Calle, M. Leroux. Phys. Status Solidi A, **195** (1), 93 (2003).
- [18] Narihiko Maeda, Tadashi Saitoh, Kotaro Tsubaki, Takehiko Tawara, Naoki Kobayashi. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **743**, L9.3.1 (2003).
- [19] R.A. Keihl, P.M. Solomon, D.J. Frank. IBM J. Res. Develop., **34**, 506 (1990).
- [20] A.В. Алексеев, А.Н. Волков, Д.М. Красовицкий, Ю.В. Погорельский, И.А. Соколов, М.В. Степанов, В.П. Чалый, А.П. Шкурко, С.П. Яковлев. Изв. вузов. Матер. электрон. техн., **1**, 32 (2001).
- [21] „Полевой транзистор“. Заявка на Патент N2003109501/28/(010201), Приоритет от 01.04.03. Решение о выдаче от 28.08.03.

Редактор Л.В. Беляков

Group-III nitride based microwave field effect transistors

S.B. Aleksandrov, D.A. Baranov, A.P. Kaydash, D.M. Krasovitsky, M.V. Pavlenko, S.I. Petrov, Yu.V. Pogorelsky, I.A. Sokolov, M.V. Stepanov, V.P. Chaly, N.B. Gladysheva*, A.A. Dorofeev*, Yu.A. Matveev*, A.A. Chernyavsky*

ATC „Semiconductor Technologies and Equipment“, 194156, box 29, St. Petersburg, Russia

* State Unitary Enterprise „Pulsar“, 105187 Moscow, Russia

Abstract The paper reports a principal design and main properties of double-heterostructures AlGaIn/GaN/AlGaIn with two-dimensional electron gas, the heterostructures being grown on sapphire substrates by molecular beam epitaxy using ammonia as a nitrogen precursor. Fundamentals of post-growth processing of group-III nitride heterostructures for field-effect transistors are also reported, including results of mesa-isolation etching and formation of Ohmic contacts and Schottky barriers. The first field-effect transistors fabricated from mentioned double-heterostructures demonstrate the full set of DC-characteristics as well as the reliability in RF-mode at 8.15 GHz.