

06

Многослойные гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN для мощных полевых транзисторов, полученные аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксией

© А.Н. Алексеев, С.Б. Александров, А.Э. Бырнав,
Л.Э. Великовский, И.Э. Великовский,
Д.М. Красовицкий, М.В. Павленко, С.И. Петров,
Ю.В. Погорельский, И.А. Соколов, М.А. Соколов,
М.В. Степанов, А.Г. Ткаченко,
А.П. Шкурко, В.П. Чалый

ЗАО «Светлана–РОСТ», С.-Петербург
E-mail: support@semiteq.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2005 г.

Приводятся результаты оптимизации получения гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием аммиака в качестве источника азота для полевых СВЧ-транзисторов.

Создание технологических ростовых установок серии ЭПН для получения нитридов третьей группы методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии и разработка ростового и постростового процессов позволили получить выходные статические характеристики НЕМТ-транзистора на основе гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN на уровне мировых результатов.

Одним из основных применений структур на основе нитридов металлов третьей группы является изготовление мощных полевых СВЧ-транзисторов. В большинстве работ по этой теме упоминается классическая структура GaN/AlGaN с одним гетеропереходом. Альтернативный подход, основанный на использовании гетероструктур с двойным электронным ограничением, обладает рядом преимуществ, однако обычно в таких структурах наблюдается уменьшение подвижности по сравнению с одиночными гетероструктурами. Оптимизация конструкции структуры и условий роста позволила получить подвижность в канале 1450,

1350 и $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при слоевой концентрации электронов $1.3 \cdot 10^{13}$, $1.6 \cdot 10^{13}$ и $2.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ соответственно. Тестовые транзисторы с длиной затвора $1 \mu\text{m}$, изготовленные из многослойных ГС с легированным верхним барьерным слоем, устойчиво демонстрируют статические ВАХ с максимальными рабочими токами около 1 A/mm и внешней крутизной до 180 mS/mm .

Введение. Полевые транзисторы на основе гетероструктур (ГС) AlGaIn/GaN по совокупности рабочих параметров занимают исключительное место в ряду аналогичных сверхвысокочастотных приборов на основе традиционных полупроводников. К настоящему времени созданы приборы на основе GaN, в СВЧ-режиме демонстрирующие плотности мощности до 32 W/mm в виде дискретных приборов [1] и суммарные мощности свыше 150 W в составе усилителей [2]. В подавляющем большинстве работ по данной теме фигурируют „классические“ ГС с одним гетеропереходом AlGaIn/GaN, на котором образуется двумерный электронный газ (ДЭГ) со слоевой плотностью электронов порядка 10^{13} cm^{-2} . Подвижность электронов в ДЭГ существенно зависит от степени совершенства слоев ГС и может при 300 K достигать значений около $2000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ [3], хотя для большинства работ характерны цифры $1000\text{--}1500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. В полевых транзисторах на основе таких ГС, как правило, наблюдаются плотности тока $0.6\text{--}1.2 \text{ A/mm}$ при внешней крутизне вольт-амперной характеристики (ВАХ) на уровне $120\text{--}200 \text{ mS/mm}$. Недостатком классической конструкции ГС является ограниченный набор вариантов улучшения свойств приборов, заключающийся по сути лишь в кропотливой оптимизации технологии роста ГС и их постростовой обработки.

Альтернативный вариант представляют собой ГС с двойным электронным ограничением, широко используемые в традиционных полупроводниковых системах [4] и предоставляющие более широкие возможности управления свойствами приборов, в том числе возможность двустороннего легирования канала. Кроме того, применительно к нитридам III группы, использование слоев AlGaIn в буферной части ГС препятствует растрескиванию верхних барьерных слоев AlGaIn, нередко наблюдаемому в классических ГС под влиянием растягивающих напряжений [5], а также обеспечивает превосходные изолирующие свойства буферного слоя, что в случае классических ГС представляет собой отдельную и непростую задачу.

Сообщения о выращивании ГС с двойным электронным ограничением в системе Al–Ga–N пока немногочисленны, однако указанная концепция уже реализована в виде приборных результатов. Так, в работе [6] в ДГС, легированной с обеих сторон от канала GaN толщиной 250 Å, получены слоевые концентрации до $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ при подвижности $\approx 800 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Изготовленные из этих структур транзисторы с длиной затвора $1.5 \mu\text{m}$ показали значения максимального тока и крутизны 1.2 A/mm и 200 mSm/mm соответственно. В работе [7] показано, что подбором толщин и составов слоев AlGaN в ДГС с шириной канального слоя GaN 200 Å удастся получить подвижность электронов в 2ДЭГ до $1150 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при слоевой концентрации $\approx 1.1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Транзисторы с длиной затвора $1 \mu\text{m}$ продемонстрировали рабочие токи 0.6–0.8 A/mm, что сопоставимо с аналогичным показателем классических НЕМТ. Нами также сообщалось об изготовлении опытных образцов полевых транзисторов на основе двойных ГС AlGaN/GaN/AlGaN с модулированно-легированным верхним барьерным слоем, демонстрирующих в статическом режиме токи до 0.6 A/mm при крутизне ВАХ до 100 mSm/mm, а также работоспособность в режиме малых СВЧ-сигналов на 8.15 GHz [8]. Тестовые приборы, изготовленные на аналогичных, но нелегированных ДГС, демонстрировали максимальные токи порядка 0.35 A/mm [9].

В данной работе сообщается о результатах оптимизации конструкции и условий выращивания многослойных ГС на основе соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, нелегированных и с модулированно-легированным верхним барьером, позволившей получить подвижность электронов в ДЭГ на менее $1300 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при слоевой концентрации не менее $1.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Максимальные плотности тока тестовых транзисторов с длиной затвора $1 \mu\text{m}$, изготовленных из ГС с подвижностью порядка $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ и слоевой концентрацией $1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, составляют около 1.0 A/mm, а внешняя крутизна ВАХ 180 mSm/mm. Указанные характеристики сопоставимы с современными литературными данными, полученными на классических ГС с одним гетеропереходом.

Экспериментальная часть. Многослойные ГС были выращены на подложках сапфира (0001) на установках серии „ЭПН“, специализированных для молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) нитридов III группы с использованием аммиака в качестве источника азота. Конструктивные особенности указанных установок позволяют, в частности, задавать температуры подложки до 1100°C , что оказалось существенным для

выращивания качественных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с $x > 0.5$. Характерные скорости роста слоев составляли $0.5\text{--}1.0\ \mu\text{m/h}$. *In situ* контроль ростовой температуры, скорости роста и состояния ростовой поверхности осуществлялся посредством системы регистрирования дифракции отражения быстрых электронов (ДОБЭ) и универсального измерительного блока, совмещающего пирометр и He–Ne лазерный интерферометр.

Перед началом роста сапфировые подложки подвергались стандартному обезжириванию, отжигу в вакууме при 1100°C в течение 1 h и нитридации в потоке аммиака при 850°C в течение 10 min. Основным отличием используемых нами гетероструктур [10] от „классической“ транзисторной ГС является многослойный буфер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.3 < x < 1.0$) общей толщиной $0.8\ \mu\text{m}$, обеспечивающий пробивные напряжения межприборной изоляции свыше $200\ \text{V}$ [8,9]. Далее следовал нелегированный слой GaN толщиной $2500\ \text{Å}$, прикрытый сверху нелегированным или модулированно-легированным Si слоем $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.25 < x < 0.35$) общей толщиной $250\ \text{Å}$. В случае легирования верхних барьеров нами применялась схема спейсер AlGaN/легированный AlGaN/барьерный AlGaN с толщинами $30\ \text{Å}/100\ \text{Å}/120\ \text{Å}$ соответственно.

Свойства выращенных слоев и многослойных ГС исследовались с помощью измерения эффекта Холла, атомно-силовой микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. На ряде выращенных ГС были сформированы тестовые модули общим размером $6 \times 6\ \text{mm}$, включающие в себя участки для измерения эффекта Холла, удельного сопротивления омических контактов по методу длинной линии, пробивных напряжений межприборной изоляции (буферного слоя), а также тестовые транзисторы с расстоянием исток-сток $4\ \mu\text{m}$ и длиной затвора $1\ \mu\text{m}$ для первичной оценки ВАХ двумерного канала. Межприборная изоляция формировалась реактивным ионным травлением в SiCl_4 через маску фоторезиста. Омические контакты, состоящие из последовательных слоев Ti/Al/Ni/Au, подвергались быстрому термическому отжигу при 820°C в течение 40 s. Ni/Au металлизация затвора изготавливалась взрывной фотолитографией.

Обсуждение результатов. В наибольшей степени проблемы оптимизации многослойных ГС в системе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ относятся к выращиванию GaN, так как этот материал всегда сильно напряжен в окружении относительно толстых слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ с высоким содержа-

нием Al, а транспортные свойства носителей в двумерном электронном газе (ДЭГ) определяются совершенством слоя GaN и его границы раздела с барьерным слоем AlGaN.

Для слоев GaN, выращенных методом МЛЭ, как правило, характерна развитая мозаичная структура с выраженной шероховатостью поверхности, нарастающей с увеличением толщины [11]. Плотность дислокаций в выращенном МЛЭ GaN в среднем также на порядок-полтора превосходит аналогичный показатель для слоев, выращиваемых, например, газофазной эпитаксией из металлорганических соединений (МОГФЭ). К числу наиболее вероятных причин этого относится недостаточная для коалесценции зародышевых блоков поверхностная подвижность атомов при температурах выращивания, характерных для метода МЛЭ. В частности, в работе указано, что характер поверхностной морфологии выращенных МЛЭ слоев GaN существенно меняется даже в ходе их постростового отжига в условиях, характерных для МОГФЭ (температура подложки 1000°C, давление аммиака 100 Torr). Показательно также, что конкурентоспособные оптоэлектронные приборы, эффективность которых непосредственно зависит от плотности дислокаций в нитридном материале, могут быть выращены методом МЛЭ исключительно на коммерчески доступных квазиподложках („темплейтах“) GaN, изготовленных методом МОГФЭ [12–14]. С другой стороны, в литературе встречаются указания на улучшение свойств приборных гетероструктур при использовании „темплейтов“ AlN [15].

Учитывая указанные обстоятельства, мы обратили особое внимание на начальные стадии выращивания нитридных ГС. В отличие от традиционных, относительно тонких (порядка 20 nm) зародышевых слоев, широко применяемых в мире для инициации роста на сапфировой подложке, нами использованы достаточно толстые (более 100 nm) буферные слои AlN, выращиваемые при необычно высокой для метода МЛЭ температуре подложки — более 1000°C. Такой подход позволяет обеспечить необходимую для коалесценции зародышей поверхностную подвижность атомов без угрозы разложения материала, поскольку AlN значительно более термически устойчив по сравнению с GaN. Кроме того, использование относительно толстых слоев AlN выгодно с точки зрения последующего выращивания слоев $Al_xGa_{1-x}N$ с высокими концентрациями Al. В результате проведенного поиска условий выращивания оптимальными были признаны температура подложки 1070°C, поток аммиака 3 sccm и скорость роста AlN 0.5 $\mu\text{m/h}$.

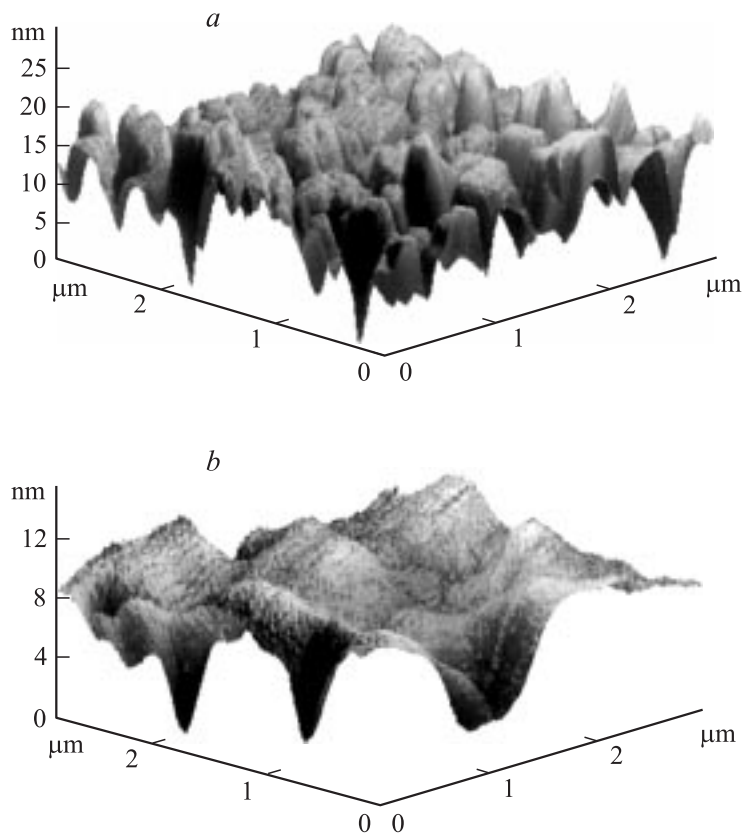


Рис. 1. Изображение атомно-силовой микроскопии при площади сканирования $3 \times 3 \mu\text{m}$. *a* — гетероструктуры AlGaN/GaN/AlGaN, rms 34 \AA , *b* — гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN, rms 17 \AA .

Выращенные в этих условиях слои AlN толщиной $0.2 \mu\text{m}$ имеют шероховатость, сравнимую с шероховатостью исходной сапфировой подложки (rms $\approx 4.7 \text{ \AA}$) и демонстрируют четкую картину ДОБЭ 2×2 , характерную для металлической полярности [16].

Установлено, что выращивание подобного „темплейта“ AlN на начальных стадиях роста многослойных ГС кардинально улучшает

Параметры ДЭГ исходных и оптимизированных многослойных ГС

№	Буферный слой	Легирование барьерного слоя	Концентрация электронов, $\text{cm}^{-2} \cdot 10^{13}$ 300 К/77 К	Подвижность, $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 300 К/77 К
1	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	Нет	1.3/1.2	500/1200
2	$\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	Нет	1.3/1.3	1450/4650
3	$\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	Есть	1.6/1.6	1350/3980
4	$\text{AlN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	Есть	2.0/2.0	1000/2200

структурные свойства и шероховатость входящих в них слоев GaN, что приводит к улучшению качества интерфейса GaN/AlGaN и, в конечном счете, к заметному улучшению подвижности ДЭГ. В частности, ширина на полувысоте рефлексов (0002), соответствующих GaN, в ω -скане уменьшилась с ≈ 800 arcsec до 350 и 500 arcsec (для толщин GaN $1 \mu\text{m}$ и 2000 \AA соответственно). Общая шероховатость ГС также уменьшилась практически вдвое при одновременном увеличении латеральных размеров отдельных „холмов“ (рис. 1). В таблице приведены параметры ДЭГ оптимизированных многослойных ГС в сравнении с аналогичными параметрами исходных двойных гетероструктур (ДГС) на тонком зародышевом слое.

Во всех многослойных ГС наблюдалось заметное увеличение подвижности при изменении температуры измерения от 300 до 77 К, при сохранении слоевой концентрации практически неизменной, что говорит о локализации всех электронов проводимости в двумерном канале.

Уже при подвижности порядка $\approx 1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ и слоевой концентрации $\approx 1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ в исходных МГС, тестовые транзисторы длиной затвора $1 \mu\text{m}$ демонстрируют максимальный ток насыщения около 1 A/mm (смещение на затворе $+1 \text{ V}$) и внешнюю крутизну $\approx 180 \text{ mSm/mm}$ (рис. 2).

Заключение. Таким образом, оптимизацией конструкции и условий выращивания многослойных ГС в системе $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 1$) существенно улучшено кристаллическое совершенство и снижена шероховатость слоев GaN, заключенных между нижним и верхним Al-содержащими барьерными слоями. В нелегированных ГС с содержанием Al в верхнем барьерном слое $x_{\text{Al}} \approx 0.3 \div 0.35$ при 300 К

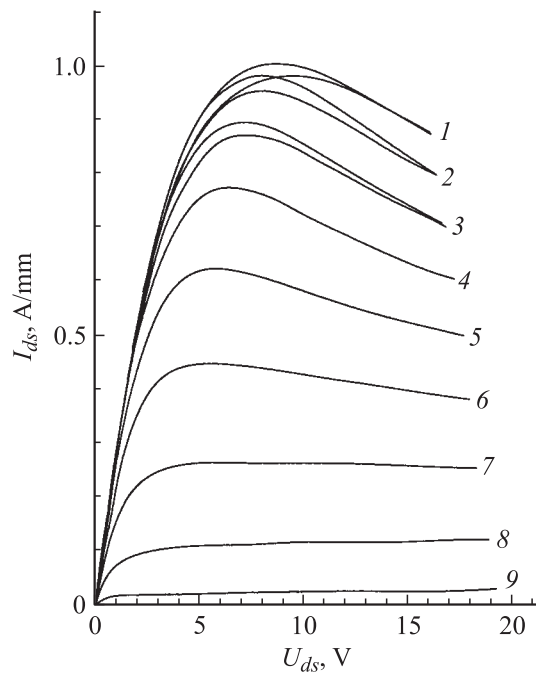


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики тестового транзистора на основе гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn, U_g , V: 1 — +1, 2 — 0, 3 — -1, 4 — -2, 5 — -3, 6 — -4, 7 — -5, 8 — -6, 9 — -7.

получена подвижность электронов в ДЭГ до $1450 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при слоевой концентрации $1.3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. В ГС с модулированно-легированным верхним барьерным слоем того же состава подвижность уменьшается до значений 1350 и $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ для слоевых концентраций $1.6 \cdot 10^{13}$ и $2.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ соответственно. Тестовые транзисторы с длиной затвора $1 \mu\text{m}$, изготовленные из многослойных ГС с легированным верхним барьерным слоем, устойчиво демонстрируют статические ВАХ с максимальными рабочими токами около 1 A/mm и внешней крутизной до 180 mSm/mm . Указанные параметры ДЭГ и тестовых транзисторов сопоставимы с современными литературными данными, полученными на классических ГС с одним гетеропереходом GaN/AlGaIn.

Список литературы

- [1] *Wu Y.F.* et al. // IEEE Electron. Dev. Lett. 2004. V. 25. P. 117–119.
- [2] *Kikkawa T., Mitani E., Joshin K.* et al. // An Over 100 W CW Output Power Amplifier Using AlGaN/GaN HEMTs. GaAs MANTECH. New Orleans, 2004.
- [3] *Gaska R., Shur M.S., Bykhovski A.D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 287–289.
- [4] *Kiehl R.A., Solomon P.M., Frank D.J.* // IBM J. Res. Develop. 1990. V. 34. N 4. P. 506–529.
- [5] *Bougrioua Z., Moerman I., Nistor L.* et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 2003. V. 195 (1). P. 93–100.
- [6] *Maeda N., Tsubaki K., Saitoh T.* et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2003. V. 743. P. L9.3.1–L9.3.6.
- [7] *Chen C.Q., Zhang J.P., Adivarahan V.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 4593–4595.
- [8] *Александров С.Б.* и др. // ФТП. 2004. Т. 38. С. 1275–1279.
- [9] *Волков В.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. С. 63–67.
- [10] *Патент РФ № 2222845 от 01.04.03.*
- [11] *Veizian S., Natali F., Semond F.* et al. // Phys. Rev. (b). 2004. V. 69. P. 125329-1–125329-7.
- [12] *Storm D.F., Katzer D.S., Binari S.C.* et al. // Electron. Lett. 2005. (in press).
- [13] *Waltereit P., Sato H., Poblenz C.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. N 15. P. 2748–2750.
- [14] *Hooper S.E., Kauer M., Bousquet V.* et al. // Electron. Lett. 2004. V. 40 (1). P. 33–34.
- [15] *Arulkumaran S., Sakai M., Egawa T.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. N 6. P. 1131–1133.
- [16] *Smith A.R., Feenstra R.M., Greve D.W.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. N 17. P. 2114–2116.