

06

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

© А.Н. Алексеев, С.Б. Александров, А.Э. Бырнав,
Л.Э. Великовский, И.Э. Великовский, А.В. Веретёха,
Д.М. Красовицкий, М.В. Павленко, С.И. Петров,
М.Ю. Погорельский, 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 24 апреля 2006 г.

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 и концентрации при уменьшении толщины слоя GaN по сравнению со структурами с одним гетеропереходом. Оптимизация конструкции структуры и условий роста позволила получить в многослойной гетероструктуре AlN/AlGaN/GaN/AlGaN с квантовой ямой подвижность $1100\text{--}1300\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ при слоевой концентрации электронов $(1.1\text{--}1.3)\cdot 10^{13}\text{ cm}^{-2}$. Тестовые полевые транзисторы, изготовленные из таких многослойных гетероструктур, демонстрируют в статическом режиме рабочие токи до 0.6 A/mm при внешней крутизне до 150 mS/mm и пробойные напряжения свыше 100 V .

PACS: 81.15.Hi, 81.07.St

Введение. Полевые транзисторы на основе гетероструктур (ГС) AlGaN/GaN по совокупности продемонстрированных рабочих парамет-

ров заметно выделяются в ряду аналогичных сверхвысокочастотных (СВЧ) приборов на основе традиционных полупроводников [1–3]. Основной их особенностью является образование на интерфейсе AlGaIn/GaN двумерного электронного газа (ДЭГ), слоевая плотность электронов в котором за счет пьезолегирования превышает 10^{13} cm^{-2} , а подвижность может достигать значений $1500\text{--}2000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при 300 К [1]. К настоящему времени созданы приборы на основе GaN, в СВЧ-режиме демонстрирующие плотности мощности до 32 W/mm в виде дискретных приборов [2] и суммарные мощности свыше 150 W в составе усилителей [3]. Ключевым аспектом при создании мощных приборов на основе нитридных гетероструктур является электронное ограничение, во многом определяющее утечки транзистора в закрытом состоянии [4]. Кроме того, из-за высокой слоевой концентрации при высоком напряжении затвор-сток происходит выброс горячих электронов из канала, что ограничивает максимально достижимые токи и плотности СВЧ-мощности. Этот эффект вносит значительный вклад в „коллапс“ тока в СВЧ-режиме вследствие захвата электронов из канала на ловушки в буферном и барьерном слоях.

Для минимизации утечек распространено компенсирующее легирование буферного слоя GaN примесями, создающими глубокие или акцепторные уровни, такими как Fe, C, Mg и др. [5]. Для уменьшения „коллапса“ тока, возникающего из-за захвата электронов на ловушки в приповерхностном барьерном слое, используется его пассивация слоем Si_3N_4 [6]. Однако это не предотвращает захвата электронов на ловушки в буферном слое GaN, причем проблема усугубляется тем, что при легировании буферного слоя компенсирующими примесями создаются дополнительные ловушки. Альтернативным вариантом обеспечения электронного ограничения являются двусторонние гетероструктуры (ДГС), хорошо зарекомендовавшие себя в традиционных полупроводниковых системах в так называемых псевдоморфных транзисторах с высокой подвижностью электронов (pHEMT). Полевые транзисторы на основе двойных гетероструктур GaN/InGaIn/AlGaIn продемонстрировали работоспособность в СВЧ-режиме без возникновения „коллапса“ тока [7]. Однако, несмотря на большие теоретические значения подвижности в InN по сравнению с GaN, в реальных слоях InGaIn подвижность, как правило, ниже из-за неоднородности состава. По этой причине более перспективными являются двойные гетероструктуры AlGaIn/GaN/AlGaIn. На сегодняшний день существует ряд публикаций о создании полевых транзисторов на основе двойных гетероструктур

AlGaN/GaN/AlGaN с характеристиками, не уступающими приборам на основе „классических“ структур GaN/AlGaN [8,9]. Нами также сообщалось о получении подвижности от 1000 до $1350 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при концентрации от $1.0 \cdot 10^{13}$ до $1.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ в многослойных гетероструктурах (МГС) AlN/AlGaN/GaN/AlGaN с толщиной слоя GaN 140 nm. Полевые транзисторы на основе таких гетероструктур демонстрируют ток в канале до 1.2 A/mm [10]. Для увеличения электронного ограничения и улучшения приборных характеристик необходимо уменьшать толщину слоя GaN. Кроме того, уменьшение толщины слоя GaN целесообразно из технологических соображений: за счет приближения изолирующего слоя AlGaN к поверхности уменьшается глубина травления межприборной изоляции, что значительно упрощает и делает более воспроизводимым процесс нанесения затвора. Однако уменьшение толщины слоя GaN существенно влияет на характеристики ДЭГ, особенно при заметных ($x_{\text{Al}} > 0.1$) концентрациях Al в буферном слое ДГС [11].

В данной работе сообщаются результаты исследования влияния толщины слоя GaN и состава буферных слоев AlGaN на подвижность и концентрацию электронов в двумерном канале, образующемся на верхней гетерогранице двусторонних гетероструктур AlGaN/GaN/AlGaN. Полевые транзисторы с напряженным канальным слоем GaN квантово-размерной толщины реализованы, насколько нам известно, впервые.

Экспериментальная часть. Многослойные гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN выращивались на подложках сапфира (0001) в специализированных установках молекулярно-лучевой эпитакции нитридов серии EPN (SemiTEq), с использованием аммиака в качестве источника азота. Одной из основных особенностей гетероструктур является наличие относительно „толстого“ ($0.2 \mu\text{m}$) „темплита“ AlN, выращиваемого при 1150°C непосредственно перед гетероструктурой в том же эпитаксиальном процессе. Детали роста опубликованы ранее [10]. Свойства выращенных образцов исследовались при помощи атомно-силовой микроскопии (AFM), рентгеновской дифрактометрии (XRD), вольт-емкостных (300 K) и температурно-зависимых холловских измерений.

Тестовые транзисторы с расстоянием исток-сток $4 \mu\text{m}$ и затворами $1 \times 20 \mu\text{m}$ изготавливались на указанных МГС по стандартному планарному циклу, включающему в себя оптическую фотолитографию, электронно-лучевое напыление металлов, быстрый термический отжиг Ом-контактов, реактивное ионное травление мезаизоляции и т. п. [10].

Результаты и обсуждение. Прямое уменьшение толщины канала GaN в МГС AlGaN/GaN/AlGaN без изменения остальных элементов конструкции должно приводить к ухудшению проводимости ДЭГ, как минимум, по двум основным причинам. Во-первых, релаксация слоя GaN при превышении критической толщины (зависящей от состава буферного слоя AlGaN) может сопровождаться образованием различных дефектов, вносящих вклад в рассеяние носителей вблизи дефектной области, и соответственно вести к ухудшению подвижности. Во-вторых, из-за наличия пьезополей зонная диаграмма в области канала значительно искажается, что приводит к уменьшению глубины ямы для электронов вплоть до образования в ряде случаев области дырочной проводимости на нижней гетерогранице AlGaN/GaN (аналогично образованию ДЭГ на верхней гетерогранице GaN/AlGaN). Влияние обоих эффектов увеличивается при увеличении состава Al в нижнем слое AlGaN. Таким образом, для получения квантовой ямы для электронов в МГС необходимо найти зависимость толщин релаксации GaN в разных вариантах конструкции „буферной“ части структуры, а также отработать способы управления зонной диаграммой путем профилирования состава и легирования.

В первую очередь было исследовано влияние толщины слоя GaN на свойства двумерного газа в МГС AlN/Al_{0,3}Ga_{0,7}N/GaN/Al_{0,3}Ga_{0,7}N без значительных изменений их конструкции по сравнению с [10] (см. таблицу).

Уменьшение толщины слоя GaN от 1000 до 140 nm не приводит к какому-либо заметному изменению подвижности и концентрации электронов ДЭГ. Дальнейшее уменьшение толщины GaN сопровождается нарастающим ухудшением подвижности, составляющей уже лишь $650 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при толщине канала 70 nm. Вместе с тем значение концентрации электронов остается неизменным, что указывает на первый из указанных выше механизмов уменьшения проводимости канала. Уменьшение толщины слоя GaN до 20 nm приводит к переходу из *n*-типа в *p*-тип проводимости на отдельных образцах. Такое изменение свойств связано со значительным влиянием области с дырочной проводимостью на нижней гетерогранице AlGaN/GaN, концентрация дырок в которой зависит от состава слоя AlGaN.

Действительно, уменьшение содержания Al в нижнем слое до 20% позволяет несколько увеличить проводимость двумерного электронного газа в слое GaN толщиной 20 nm (см. таблицу). Вместе с тем дальнейшее уменьшение толщины слоя GaN возможно только при условии

Параметры ДЭГ в МГС различной конструкции

Конструкция структуры	Толщина слоя GaN, nm	Концентрация электронов, $\text{cm}^{-2} \cdot 10^{13}$	Подвижность, $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
AlN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	1000	1.0–1.3	1100–1300
AlN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	140	1.0–1.3	1100–1300
AlN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	100	1.0–1.3	1000–1200
AlN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	70	1.0–1.3	600–700
AlN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	20	<i>p</i> -тип	
AlN/Al _{0.2} Ga _{0.8} N(back doped)/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	20	0.9–1.1	200–300
AlN/Al _{0.2} Ga _{0.8} N(back doped)/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	10	0.7–0.8	500–700
AlN/Al _{0.2} Ga _{0.8} N(back doped)/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	5	0.4–0.5	500–700
AlN/Al _{0.2} Ga _{0.8} N/(back doped)GaN/Al _{0.4} Ga _{0.6} N	5	1.1–1.5	500–700
AlN/Al _{0.1} Ga _{0.9} N/GaN/Al _{0.3} Ga _{0.7} N	5	0.9–1.0	1100–1300

введения компенсирующего „обратного“ легирования части буферного слоя AlGaN, прилегающей к каналу. Используя схему легирования, аналогичную применяемой в верхнем барьере (100 Å AlGaN(Si)/10 Å спейсер), нам удалось получить МГС с толщиной канала 10 nm на буферном слое Al_{0.2}Ga_{0.8}N с несколько меньшей концентрацией электронов $0.7–0.8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, однако подвижность при этом увеличивается до $500–700 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Очевидно, толщина релаксации GaN при выращивании на тройном растворе с $x_{\text{Al}} \approx 0.2$ находится в пределах 10–20 nm, что в целом согласуется с данными работы [12]. Интересно отметить, что дальнейшее сужение канала GaN до 5 nm приводит к еще большему уменьшению концентрации электронов до $(0.4–0.5) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ при сохранении подвижности на уровне $500–700 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. Указанные значения подвижности остаются стабильными и при увеличении концентрации электронов до $(0.9–1.1) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ путем увеличения x_{Al} до 40% в верхнем барьерном слое AlGaN (см. таблицу). Увеличение

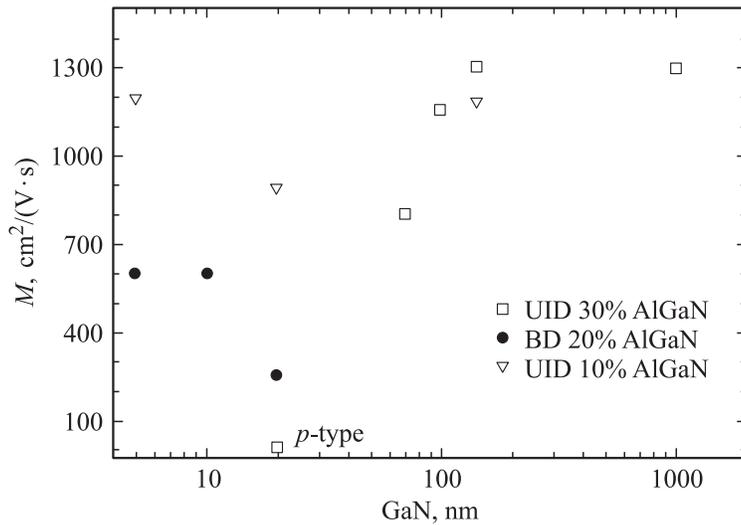


Рис. 1. Зависимость подвижности электронов M в двумерном электронном газе на верхней гетерогранице GaN/AlGaN в многослойной гетероструктуре AlN/AlGaN/GaN/AlGaN от толщины слоя GaN, а также конструкции и состава нижнего буферного слоя AlGaN (UID — преднамеренно нелегированный буферный слой, BD — „обратное“ легирование части буферного слоя AlGaN).

концентрации, очевидно, происходит за счет увеличения глубины ямы у верхней гетерограницы, однако подвижность остается на прежнем уровне, по всей видимости вследствие вклада области „обратного“ легирования тройного раствора AlGaN.

Подтвердить сделанные выше предположения удалось на МГС с $x_{\text{Al}} \approx 0.1$ в буферном слое, в которых образование области дырочной проводимости на нижнем гетеропереходе имеет меньшую вероятность [11]: подвижность и концентрация в МГС AlN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N увеличивается до уровня 700–800 при концентрации $(1.2–1.5) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ при толщинах канального слоя GaN 5–10 nm. Путем оптимизации условий выращивания и конструкции верхнего барьерного селективно-легированного слоя AlGaN удалось достигнуть подвижности 1100–1300 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при концентрации $(0.9–1.0) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ в гетероструктуре AlN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N с толщиной слоя

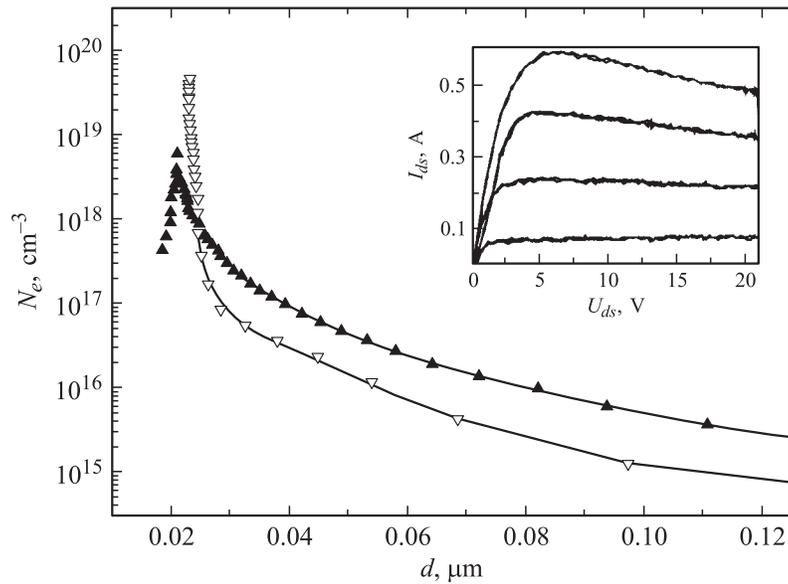


Рис. 2. Вольт-емкостные характеристики многослойных гетероструктур AlN/AlGaN/GaN/AlGaN с различной толщиной слоя GaN (треугольники с черной заливкой относятся к гетероструктуре с шириной слоя GaN 140 nm, перевернутые треугольники — к гетероструктуре с шириной слоя GaN 5 nm). На вставке изображена вольт-амперная характеристика полевого транзистора, полученного на основе многослойной гетероструктуры AlN/AlGaN/GaN/AlGaN с шириной слоя GaN 5 nm.

GaN 5 nm, таким образом, практически достигнув уровня проводимости на более „толстых“, релаксированных каналах GaN (рис. 1). Очевидно, что для реализации гетероструктур с квантовой ямой на буферных слоях с содержанием Al более 10%, перспективных с точки зрения дальнейшего увеличения мощности и пробойных напряжений СВЧ-приборов, необходима дополнительная оптимизация схемы „двустороннего“ легирования.

На гетероструктурах AlN/Al_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN/Al_{0.3}Ga_{0.7}N с толщиной слоя GaN 5 nm реализованы тестовые транзисторы с длиной затвора 1 μm, демонстрирующие в статическом режиме плотности тока

до 0.6 A/mm крутизну более 150 мС/мм и пробойные напряжения свыше 100 V. Положительным фактом является отсутствие гистерезисных эффектов на ветвях ВАХ (вставка рис. 2), зачастую имевших место в гетероструктурах с большей толщиной канала [10]. Вольтамперные характеристики гетероструктур с квантовой ямой также свидетельствуют о более выраженном электронном ограничении канала (рис. 2).

Детали дальнейшей оптимизации гетероструктур с квантовой ямой и результаты СВЧ-испытаний транзисторов на их основе будут опубликованы в ближайшее время.

Заключение. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии впервые получены гетероструктуры AlGaN/GaN/AlGaN с двойным электронным ограничением и напряженным каналом GaN квантово-размерной толщины. Показано, что при содержании Al в буферном слое менее „критического“ ($x_{Al} < 0.15$) подвижность электронов ДЭГ определяется главным образом соотношением толщины канала и длины релаксации GaN на данном составе AlGaN и может достигать значений, характерных для структур с большей толщиной канала ($1100\text{--}1300\text{ см}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при $n_s > 10^{13}\text{ см}^{-2}$). Тестовые полевые транзисторы на основе двойных гетероструктур с квантовой ямой продемонстрировали статические параметры (плотности тока до 0.6 A/mm, крутизна более 150 мС/мм и пробойные напряжения свыше 100 V), сравнимые с получаемыми на однопереходных структурах. При критических и более составах электрофизические свойства канала могут быть модифицированы обратным легированием нижнего барьера AlGaN.

Список литературы

- [1] *Gaska R., Shur M.S., Bykhovski A.D.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. P. 287–289.
- [2] *Wu Y.F.* et al. // IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25. P. 117–119.
- [3] *Kikkawa T., Mitani E., K. Joshin K.* et al. // An Over 100 W CW Output Power Amplifier Using AlGaN/GaN HEMTs. GaAs MANTECH. New Orleans, 2004. (<http://www.gaasmantech.org/Digests/2004/2004Papers/6.1.pdf>)
- [4] *Su Y.K., Chang S.J., Kuan T.M.* et al. // Materials Science and Engineering B. 2004. V. 110 P. 172–176.
- [5] *Tang H., Webb J.B., Bardwell J.A.* et al. // Solid-State Electronics. 2000. V. 44. P. 2177–2182.

- [6] *Vertiatchikh A.V., Eastman L.F., Schaff W.J.* et al. // *Elec. Lett.* 2002. V. 38. P. 388.
- [7] *Simin G., Hu X., Tarakji A.* et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001. V. 40. P. L1142-L1144.
- [8] *Chen C.Q., Zhang J.P., Adivarahan V.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 4593–4595.
- [9] *Cordier Y., Semond F., Hugues M.* et al. // *J. Crystal Growth.* 2005. V. 278. P. 393–396.
- [10] *Алексеев А.Н., Александров С.Б., Бырнав А.Э.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 2005. Т. 31. В. С. 19–27.
- [11] *Aleksandrov S.B., Baranov D.A., Chaly V.P.* et al. // *Phys. Stat. Sol. (c).* 2005. V. 2. P. 2688–2691.
- [12] *Kim C., Robinson I.K., Myoung J.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. P. 2358–2360.