

06;12

Полевые транзисторы на основе гетероструктур AlGaIn/GaN, полученных методом аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии

© В.В. Волков, В.П. Иванова, Ю.С. Кузьмичев, С.А. Лермонтов,
Ю.В. Соловьев, Д.А. Баранов, А.П. Кайдаш, Д.М. Красовицкий,
М.В. Павленко, С.И. Петров, Ю.В. Погорельский, И.А. Соколов,
М.А. Соколов, М.В. Степанов, В.П. Чалый

ЗАО „Светлана–Электронприбор“, С.-Петербург
ЗАО „Научное и технологическое оборудование“, С.-Петербург
E-mail: support@semiteq.ru

Поступило в Редакцию 18 ноября 2003 г.

Введение. Нитрид галлия и тройные соединения на его основе, обладающие уникальной совокупностью электрофизических свойств, стали за последнее десятилетие одной из наиболее перспективных систем полупроводниковых материалов. Наряду с высоким и в значительной мере реализованным потенциалом в области изготовления оптоэлектронных приборов ультрафиолетового и видимого диапазона нитриды III группы характеризуются большими разрывами зон на гетерограницах, выраженными поляризационными эффектами, большими значениями дрейфовой скорости электронов ($1.5-3 \cdot 10^7$ см/с при электрическом поле порядка 100 кВ/см) и пробивных полей, сравнительно высокой теплопроводностью и др. Полученные мощностные характеристики экспериментальных нитридных СВЧ-приборов благодаря указанным свойствам базового материала существенно (иногда на порядок) превышают аналогичные характеристики GaAs- и SiC-приборов, причем особенно ярко упомянутые преимущества проявляются при повышенных рабочих температурах (вплоть до 400° С). Это открывает новые возможности для решения ряда специальных задач оборонной техники, с их высокими требованиями к характеристикам приборов и компонентов, а также для дальнейшего развития систем контроля воз-

душных сообщений, спутниковой теле- и радиокommunikации, контроля окружающей среды и т.д.

К настоящему времени в мире реализованы различные типы нитридных СВЧ-транзисторов (HEMT, MESFET и т.д.), в целом подтверждающие перспективность этого класса приборов [1–3]. Наиболее распространенными методами получения приборных нитридных гетероструктур являются газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). При этом основными требованиями к гетероструктурам для транзисторных приложений являются высокое структурное совершенство слоев AlGaN, GaN и их гетерограниц, а также высокое сопротивление буферного слоя, в совокупности обеспечивающие формирование проводящего канала (в т.ч. двумерного) со слоевой плотностью электронов порядка 10^{13} cm^{-2} и подвижностью более $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Основными стадиями процесса изготовления приборов являются формирование межприборной изоляции, низкоомных омических контактов к истоку и стоку, а также устойчивого барьера Шоттки на затворе.

В данной работе представлены экспериментальная технология изготовления и выходные статические характеристики HEMT-транзистора на основе гетероструктур AlGaN/GaN, выращенных на сапфировой подложке методом МЛЭ. Полученные результаты на текущий момент являются одними из первых в России и демонстрируют высокий потенциал дальнейших разработок данной тематики.

Экспериментальная часть. Транзисторные гетероструктуры AlGaN/GaN (рис. 1) были выращены на подложках сапфира (0001) на установке ЭПН-2, специализированной для МЛЭ нитридов III группы с использованием аммиака в качестве источника активного азота [4]. Основным отличием используемых нами гетероструктур [5] от наиболее распространенной конструкции HEMT является наличие относительно толстого буферного слоя AlGaN толщиной $0.6 \mu\text{m}$, обеспечивающего высокие (свыше 150 V) пробивные напряжения нижней части гетероструктуры. Далее следует полуизолирующий слой GaN толщиной 500 \AA , прикрытый сверху модулированно-легированным слоем $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ общей толщиной 200 \AA . Толщины спейсера, донорного и барьерного подслоев составляли 40, 80 и 80 \AA соответственно.

Перед напылением омических контактов проводилась химическая обработка структуры в растворе соляной кислоты, перекисно-аммиачных растворах, с последующей промывкой и сушкой в парах

$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ 80 Å
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}:\text{Si}$ 80 Å
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ 40 Å
GaN 500 Å
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 600 nm $0.3 < x < 0.8$
AlN 200 Å
Al_2O_3

Рис. 1. Схема транзисторной гетероструктуры.

ацетона. Омические контакты формировали взрывной фотолитографией. В качестве металлизации использовалась композиция Ti/Al общей толщиной $0.2\ \mu\text{m}$. После напыления омических контактов проводился отжиг в среде N_2 при температуре 830°C в течение 50 s и контроль электрофизических параметров контактов методом длинной линии. Электрическая изоляция между элементами на пластине осуществлялась с помощью ионно-плазменного травления на глубину $0.3\ \mu\text{m}$ с использованием реагента-травителя SiCl_4 . Формирование затвора проводили методом взрывной фотолитографии, в качестве металлизации использовали Ni/Au толщиной $0.15\ \mu\text{m}$, длина затвора составляла $1\ \mu\text{m}$.

Результаты и обсуждение. По результатам холловских измерений гетероструктуры имеют слоевую концентрацию электронов в канале порядка $1 \cdot 10^{13}\ \text{cm}^{-2}$ и подвижность в канале $\mu = 400\text{--}600\ \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при комнатной температуре. В азоте подвижность изменялась до $1000\text{--}2000\ \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ при сохранении концентрации основных носителей, наблюдаемой при комнатной температуре, что свидетельствует об образовании двумерного электронного газа на границе AlGaN/GaN. По данным атомно-силовой микроскопии транзисторные гетероструктуры имеют шероховатость $0.9\text{--}3.3\ \text{nm}$. Кристаллическое совершенство материала оценивалось рентгеновской дифрактометрией. Для тестового образца нитрида галлия толщиной $1\ \mu\text{m}$, выращенного в условиях роста

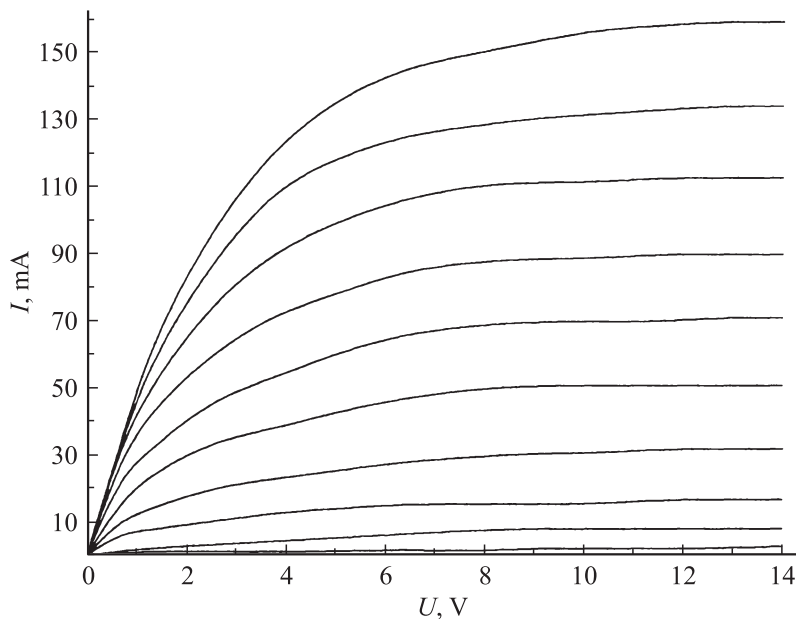


Рис. 2. ВАХ ПТШ на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN. Шаг смещения на затворе $U = 0.5 \text{ V}$.

транзисторной гетероструктуры, полуширины рентгенодифракционных кривых Θ - и Θ - 2Θ -сканирования для симметричного брегговского отражения составили $276''$ и $55''$. Общее количество дефектов во всех структурах специально не оценивалось, но составляет не менее $5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$.

После формирования на гетероструктурах приборной топологии сопротивление омических контактов исток–сток составило $2.5\text{--}3 \Omega \cdot \text{mm}$, а удельное контактное сопротивление $\rho_c = (6\text{--}8) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Токи утечки через буфер после травления меза-изоляции были пренебрежимо малы и составили $I = 2\text{--}3 \text{ nA}$ на 50 V (проверка осуществлялась на свету и в темноте). Коэффициент неидеальности затвор–исток составил 1.18 V , а пробивное напряжение исток–затвор $> 25 \text{ V}$, высота барьера Шоттки определялась по $C\text{--}V$ измерениям и составила $0.93\text{--}1.02 \text{ eV}$.

На рис. 2 представлены статические выходные ВАХ НЕМТ-транзистора, сформированного на гетероструктуре AlGaIn/GaN, показанной

на рис. 1. Приборы демонстрируют устойчивые насыщение и управляемость, при этом напряжение отсечки составляет 4 В, крутизна равна 65–80 мС/мм, ток насыщения 165–180 мА/мм, напряжение пробоя исток–сток 50 В.

Основными недостатками полученных приборов являются сравнительно невысокие значения рабочих токов и крутизны, по-видимому, связанные с относительно высоким проходным сопротивлением прибора и величиной подвижности в канале соответственно.

Полученные характеристики могут быть улучшены путем дальнейшего совершенствования технологии роста гетероструктуры, в первую очередь, за счет улучшения структурного качества материала как всей структуры, так и материала канала. Кроме того, улучшение характеристик возможно за счет уменьшения шероховатости гетерограниц и оптимизации легирования верхнего слоя AlGaIn, а также путем дополнительной обработки технологии формирования приборной топологии, в частности режимов вжигания омических контактов и перехода на затворы меньшей длины.

Таким образом, в рамках данной работы экспериментально апробирована технология изготовления полевого транзистора с барьером Шоттки (БШ) на основе эпитаксиальных структур AlGaIn/GaN. Выходные статические характеристики НЕМТ-транзисторов с барьером Шоттки позволяет в будущем рассчитывать на успешное использование предложенной технологии изготовления транзисторных гетероструктур AlGaIn/GaN, выращенных методом МЛЭ на сапфире для реализации различных типов НЕМТ-транзисторов.

Список литературы

- [1] *Behtash R., Tobler H., Neuburger M.* et al. // *Electronics Letter.* 2003. V. 39. N 7. P. 626–629.
- [2] *Shen L., Heikman S., Moran B.* et al. // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2001. V. 48. N 3. P. 586–590.
- [3] *Wu Y.-F., Kapolnek D., Ibbetson J.P., Parikh P.* et al. // *IEEE Electron Device Letters.* 2001. V. 22. P. 457–459.
- [4] *Алексеев А.В., Волков А.Н., Красовицкий Д.М.* и др. // *Изв. вузов. Материалы электрон. техники.* 2001. № 1. С. 32–37.
- [5] *Полевой транзистор.* Заявка на Патент № 2003109501/28(010201). Приоритет от 01.04.03. Решение о выдаче от 28.08.03.