

СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ И МИКРОСХЕМ НА ОСНОВЕ GaN

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.Алексеев, к.ф.-м.н.¹, С.Петров, к.ф.-м.н.²

УДК 621.382
БАК 05.27.06

Благодаря своим уникальным свойствам нитриды металлов третьей группы (III-N) являются одними из наиболее перспективных материалов для создания оптоэлектронных и электронных приборов. В частности, полевые транзисторы на основе нитридов III группы, например нитрида галлия (GaN), обеспечивают в СВЧ-режиме генерацию с плотностью мощности на порядок большей, чем приборы на основе арсенида галлия. Подобная электронная компонентная база (ЭКБ) может использоваться во многих устройствах как гражданского, так и двойного назначения, что делает ее разработку и производство чрезвычайно актуальными задачами.

Разработка современных приборов с последующей постановкой их серийного производства на отечественных предприятиях радиоэлектронного комплекса зачастую сдерживается из-за отсутствия современного специального технологического оборудования (далее – СТО), отвечающего необходимым требованиям. Импортное оборудование, получившее широкое распространение в последние 20 лет на отечественных предприятиях, далеко не всегда позволяет качественно решать специальные задачи по созданию перспективной ЭКБ. К числу недостатков импортного СТО можно, в частности, отнести следующие:

- не всегда достаточная гибкость в части изменения параметров технологических процессов;

- зачастую избыточная производительность для задач НИОКР и мелкосерийного производства;
- высокая стоимость покупки и регламентного обслуживания, в том числе с учетом валютных рисков;
- риски срыва сроков поставки, а также отсутствия последующей технической и технологической поддержки в условиях режима санкций, введенных против России.

Создание собственной перспективной ЭКБ – основа развития большинства высокотехнологичных отраслей промышленности, в том числе стратегически важной радиоэлектронной отрасли. Один из значимых аспектов данного развития, определяющий технологическую безопасность страны, – разработка конкурентоспособного отечественного СТО и внедрение его в технологические линии предприятий-производителей ЭКБ.

ЗАО "НТО" (г. Санкт-Петербург) уже на протяжении 15 лет под брендом SemiTEq развивает технологии раз-

¹ Генеральный директор, ЗАО "НТО", sales@semiteq.ru.

² Начальник прикладной лаборатории, ЗАО "НТО", sales@semiteq.ru.

работки специального технологического оборудования для молекулярно-лучевой эпитаксии и последующего формирования тонкопленочных структур на пластине. Сегодня предприятие представляет на рынке пять линеек оборудования: системы молекулярно-лучевой эпитаксии, установки электронно-лучевого напыления, установки магнетронного распыления, системы плазмохимического травления и осаждения, установки быстрого термического отжига. Основу всех систем составляют собственные разработки, ноу-хау и патенты специалистов компании. Все выпускаемое оборудование проходит технологическое тестирование не только в собственной прикладной лаборатории ЗАО "НТО", но и на предприятиях-партнерах. Отличительная особенность отечественного оборудования – возможность его адаптации под специальные задачи заказчика.

Один из традиционных партнеров и заказчиков ЗАО "НТО" – ЗАО "Светлана-Рост" (г. Санкт-Петербург). Эта компания – единственное в России предприятие полупроводниковой промышленности полного цикла – от производства полупроводниковых многослойных эпитаксиальных структур и наногетероструктур до производства пластин с кристаллами заказанных элементов – в области твердотельной СВЧ и фотоприемной элементной базы. Предприятия тесно сотрудничают уже много лет в различных областях. Так, ЗАО "НТО" разрабатывает уникальное оборудование для решения специальных производственных задач, совместно с технологами ЗАО "Светлана-Рост" создавая возможности для качественной реализации целевых техпроцессов. Многолетняя кооперация предприятий позволяет получать от технологов оперативные замечания по работе и эргономике оборудования.

ЗАО "Светлана-Рост" использует комплекс отечественного оборудования производства ЗАО "НТО" для обработки различных технологических маршрутов.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ТРАНЗИСТОРОВ

Методология проектирования и производства транзисторов S-, C- и X-диапазонов предусматривает следующие этапы:

- выращивание гетероструктур необходимого качества;
- проведение комплекса постростовых операций по созданию транзисторов и пассивных элементов;
- разработка правил проектирования (PDK, Process Design Kit) и библиотек стандартных элементов.

Критическими точками производства для приборов, работающих на частоте до 8 ГГц, являются формирование многоуровневой металлизации (в т.ч. воздушных мостиков и дополнительных полевых электродов (field-plate)), сквозных металлизированных отверстий

и изготовление чипов. При этом PDK могут распространяться только на базовые ячейки усиления (масштабируемые СВЧ-транзисторы с длиной затвора $L_g = 0,5$ мкм), используемые в так называемых гибридных усилителях (с внешней цепью согласования). В то же время для приборов с частотой более 8 ГГц PDK включают в себя активные и пассивные элементы, в рамках одной "монокристаллической" СВЧ-микросхемы использующие все указанные конструктивные элементы. Необходимый и крайне важный этап разработки – верификация PDK путем изготовления тестовых монокристаллических интегральных схем (МИС) и сравнения их параметров с расчетным результатом.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ И БИБЛИОТЕКИ СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Гетероструктуры на основе GaN были выращены на подложках Al_2O_3 и SiC в ЗАО "Светлана-Рост" и прикладной лаборатории ЗАО "НТО" на установках молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) серии STE3N.

Ранее специалистами ЗАО "НТО" было показано, что использование высокотемпературных буферных слоев AlN/сверхрешетка/AlGaIn, выращенных методом аммиачной МЛЭ при экстремально высокой температуре подложки (до 1150 °C) позволяет кардинально улучшить структурное совершенство слоев GaN*. Плотность дислокаций в GaN была понижена до значений $9 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9$ см⁻² (рис.1)**.

В качестве базовой структуры выбрали гетероструктуру с содержанием алюминия в барьерном слое 25–27%, поскольку уменьшение содержания алюминия способствует значительному снижению концентрации электронов, а увеличение может привести к релаксации и возникновению утечек. Важным результатом оптимизации условий роста стало снижение прогиба гетероструктуры ниже исходного прогиба подложки карбида кремния диаметром три дюйма – до 15 мкм.

Травление межприборной изоляции производилось на установке плазмохимического травления STE ICP200E. Типичные значения сопротивления меза-изоляции превысили 50 МОм, напряжение пробоя – более 150 В.

Основной этап получения низкоомных контактов к AlGaIn включает процессы физического осаждения металлических слоев с последующим быстрым термическим отжигом на установке электронно-лучевого напыления ЗАО "НТО" STE EB71. Установка обеспечивает неоднородность по толщине $\pm 1\%$ на трех пластинах диа-

* Alexeev A.N. et al. Growth of high quality III-N heterostructures using specialized MBE system // Physica status solidi (c). 2012. Т. 9. №. 3–4. С. 562–563.

** Сведения о технологических процессах и изображения со сканирующего электронного микроскопа приведены с разрешения ЗАО "Светлана-Рост".

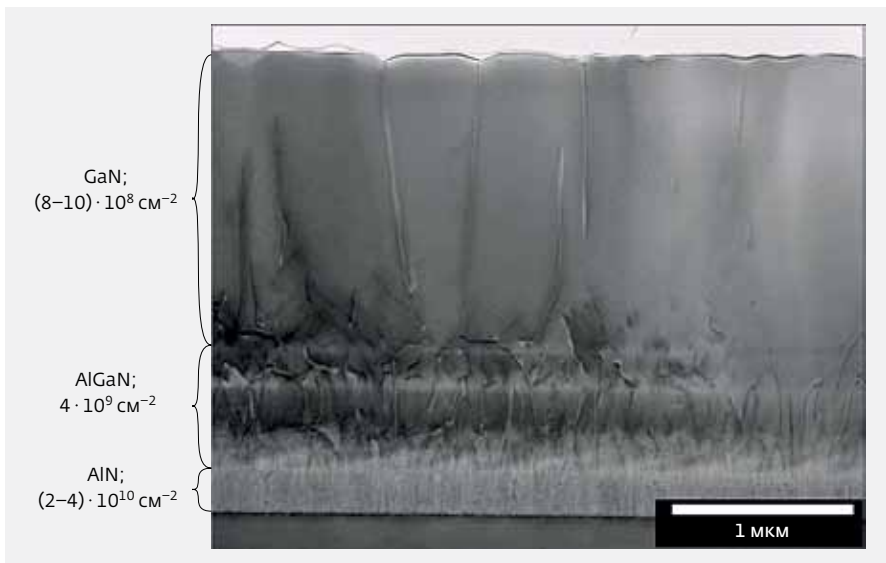


Рис.1. Изображение скола многослойной гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа; указаны слои и полные плотности дислокаций

метром три дюйма с применением выравнивающей "маски". В качестве слоев металлизации была выбрана традиционная контактная система – Ti/Al/Ni/Au.

Термический отжиг металлических контактов выполнялся на установке быстрого термического отжига STE RTA100. Система обеспечивает скорость нагрева порядка 30–40°C/с при максимальной температуре в диапазоне 800–900°C и неоднородность нагрева не выше 5% для образца диаметром 100 мм. Подобные параметры обязательны для создания указанной контактной металлизации. В этой системе металлов относительно низкая температура плавления алюминия диктует необходимость в высокой скорости нагрева образца, чтобы исключить влияние расплавленного алюминия на фазовую структуру контакта во избежание его деградации. Вжигание контактов проводилось при непрерывной продувке азотом и атмосферном давлении в течение 30 с. Полученные значения контактного сопротивления по окончании процесса составили 0,35–0,6 Ом · мм.

Затворы были сформированы методом электронно-лучевого

отработали техпроцесс DHFET05 для проектирования и производства элементной базы (усилителей мощности и широкополосных усилителей) с рабочими частото-

напыления на установке STE EB71 с использованием электронной и оптической литографии.

Для защиты поверхности и уменьшения влияния эффекта захвата электронов на ловушки в приповерхностных состояниях была произведена пассивация поверхности слоем Si₃N₄ на установке STE ICP200D.

На основе разработанных блоков (многослойной металлизации, сквозных металлизированных отверстий и др.) (рис.2) была сформирована библиотека активных и пассивных элементов: масштабируемых СВЧ-транзисторов (L_g=0,5 мкм и L_g=0,25 мкм), тонкопленочных резисторов, емкостей и МДМ-конденсаторов.

Специалисты ЗАО "Светлана-Рост" на базе указанных выше операций

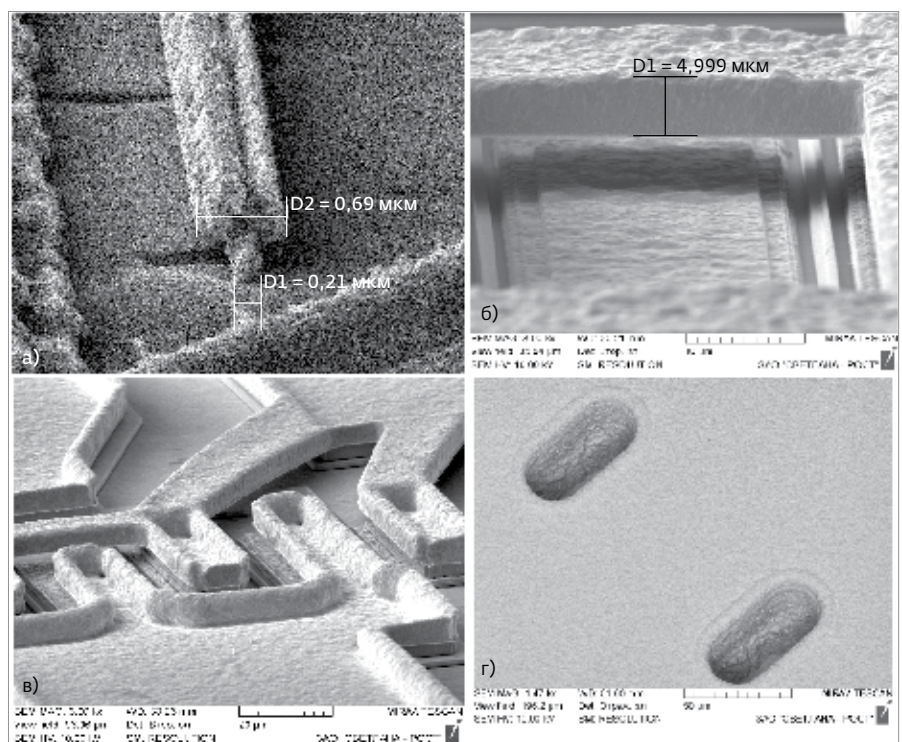


Рис.2. Технологические блоки: а) субмикронный затвор с характерными размерами D1, D2; б), в) многослойная металлизация; г) металлизированные отверстия

