

# Многослойные гетероструктуры AlN / AlGaN / GaN / AlGaN — основа новой компонентной базы твердотельной СВЧ-электроники

Алексей АЛЕКСЕЕВ  
alex@semiteq.ru  
Дмитрий КРАСОВИЦКИЙ  
krasovitsky@semiteq.ru  
Станислав ПЕТРОВ  
support@semiteq.ru  
Виктор ЧАЛЫЙ  
chaly@semiteq.ru

**В статье рассмотрены уникальные возможности широкозонных полупроводниковых нитридов III группы, позволяющие создавать мощные приемо-передающие устройства СВЧ-диапазона, а также пути преодоления основных проблем, возникающих при разработке технологии приборных нитридных гетероструктур. Комплексный подход, заключающийся в создании специализированного ростового оборудования и применении новаторских конструкций гетероструктур и режимов их роста, позволил достичь результатов мирового уровня и расширить перспективы дальнейшего улучшения этих полупроводников.**

## Введение

Полевые транзисторы на гетероструктурах (ГС) AlGaN/GaN, интерес к которым неуклонно растет на протяжении последнего десятилетия, по совокупности параметров уникальны в ряду СВЧ-приборов. Основной особенностью нитридных гетероструктур является образование за счет пьезолегирования на гетерогранице AlGaN/GaN двумерного электронного газа (ДЭГ) со слоевой концентрацией

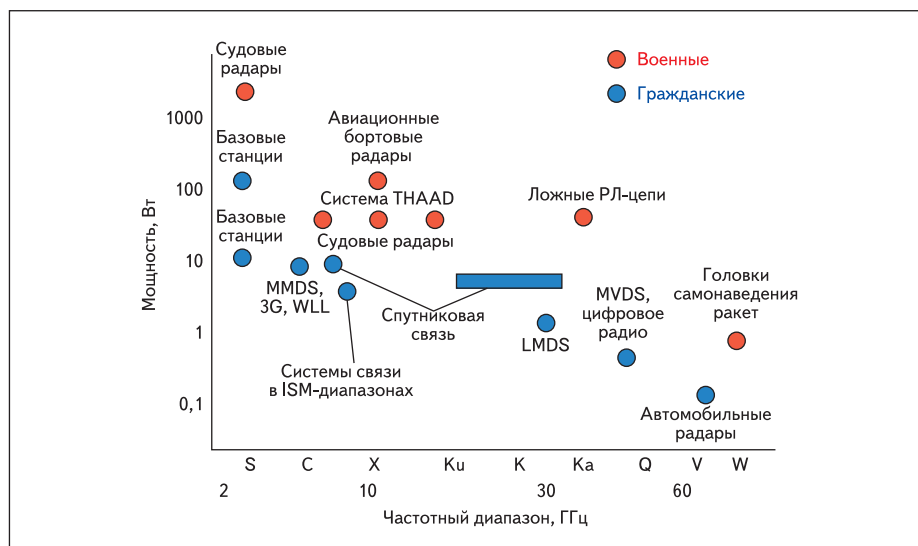
электронов порядка  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Подвижность электронов ДЭГ существенно зависит от степени совершенства ГС и может при 300 К достигать значений от 1000 до 2000 см<sup>2</sup>/(В·с) [1]. За счет столь высокой проводимости ДЭГ в полевых транзисторах на основе таких ГС получают плотности тока более 1,0 А/мм при внешней крутизне вольт-амперной характеристики (ВАХ) на уровне 120–200 мсм/мм. Подобные значения плотности тока в сочетании с высокими пробивными полями поз-

воляют достичь плотности мощности на порядок большей, чем в приборах на основе GaAs. Это послужило стимулом для активных разработок электронной компонентной базы для целого ряда гражданских и военных применений [2] (рис. 1). В мире уже созданы нитридные транзисторы, демонстрирующие на частотах 2–4 ГГц плотности мощности до 32 Вт/мм в виде дискретных приборов [3] и суммарные мощности свыше 150 Вт в составе усилителей [4].

Несмотря на очевидные успехи, технология роста гетероструктур на основе нитридов металлов III группы (III-N) и производства из них СВЧ-приборов имеет ряд «узких мест», к которым относятся, в первую очередь, комплекс проблем, связанных с отсутствием на данный момент «универсальной» подложки для эпитаксии гетероструктур, а также проблемы высокочастотной и долговременной нестабильности рабочих параметров транзисторов. В данной статье рассмотрены основные пути решения вопросов, возникающих при разработке технологии нитридных гетероструктур, и приведены результаты, открывающие ближайшие перспективы использования уникальных свойств широкозонных полупроводников группы III-N.

## Проблемы, связанные с выбором подложки для эпитаксии III-N гетероструктур

Технологические трудности получения объемных кристаллов III-N являются причиной того, что массовое производство подложек из этих материалов во всем мире на данный момент отсутствует. Практически все ранние



**Рис. 1.** Области применения СВЧ-электроники

Расшифровка аббревиатур:

THAAD (Theatre High Altitude Area Defense Missile System) — наземная система защиты войск от баллистических ракет

LMDS (Local Multipoint Distribution Service) — локальная многоточечная распределительная система, 27,5–29,5 ГГц

MMDS (Multichannel Multipoint Distribution Service) — многоканальная многоточечная распределительная система, 2–3 ГГц

WLL (Wireless Local Loop) — местная беспроводная связь

MVDS (Multipoint Video Distribution System) — многоканальная система распределения видео

прикладные разработки нитридных приборов основаны на использовании чужеродных подложек, в той или иной мере рассогласованных с III-N по параметру решетки и коэффициенту термического расширения. Наиболее распространенным и коммерчески оправданным для массового производства вариантом является использование подложек из сапфира, обеспечивающих приемлемое качество гетероструктур и приборов на их основе при относительно невысокой стоимости изготовления. Однако даже несмотря на применение специфических процедур на начальных стадиях роста, гетероструктуры III-N на сапфире имеют довольно высокое количество собственных дефектов (в первую очередь дислокаций). Основными методами выращивания приборных гетероструктур являются газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ). В слоях, выращиваемых при помощи МОГФЭ, плотность дислокаций в среднем на порядок-полтора меньше, чем в слоях, получаемых при помощи МПЭ. Уменьшение плотности дислокаций, скорее всего, связано с характерными для МОГФЭ более высокими температурами подложки, что выражается в лучшей, по сравнению с МПЭ, коалесценцией зародышевых блоков на начальном этапе роста. В методе МПЭ условие сохранения высокого вакуума для обеспечения режима баллистического пролета частиц не позволяет увеличить давление азотсодержащих реагентов до значений, сравнимых с МОГФЭ, и увеличение температуры роста ограничено термическим разложением материала. Таким образом, качество гетероструктур, выращиваемых на сапфире, находится на пределе, достаточном для их прикладного использования, и весьма чувствительно к методу получения. Использование подложек, обладающих большим кристаллическим сродством к материалам III-N (в первую очередь карбида кремния (SiC) и различных вариантов так называемых «квазиподложек» — сравнительно толстых слоев GaN или AlN, эпитаксиально нанесенных на сапфир или даже отделенных от него), дает более высокое качество гетероструктур III-N, однако на данный момент стоимость таких подложек несравненно выше, производство сосредоточено за рубежом, а импорт проблематичен из-за стратегического характера подобной продукции.

Другой, не менее важной проблемой в производстве мощных нитридных СВЧ-транзисторов является теплоотвод от приборов, рассеиваемая мощность которых составляет десятки ватт. Температура активной области транзисторов на сапфире, обладающем низкой теплопроводностью, может достигать 300 °C и выше [5]. Результаты, полученные с использованием технологии field-plate, расширяющей рабочие диапазоны приборов за счет колоссального снижения уровня утечек затвора, составляют на указанных выше ча-

стотах 12 и 32 Вт/мм для подложек Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [6] и полуизолирующего SiC [7] соответственно. На подложках сапфира с использованием технологии переноса на теплопроводящую подложку flip-chip возможно трехкратное снижение теплового сопротивления [8], однако и в этом случае оно более чем в три раза превышает аналогичный показатель при использовании подложек полуизолирующего SiC. Так, на сапфире в транзисторах, демонстрирующих плотность мощности 4,6 Вт/мм при 8 ГГц для ширины затвора 100 мкм даже с использованием flip-chip технологии удалось получить в усилителе с общей периферией 4 Вт лишь 8 Вт суммарной мощности [9]. Потенциально перспективны подложки так называемого «отделенного GaN» (9,4 Вт/мм при 10 ГГц для периферии затвора 2×75 мкм) [10], промышленное производство которых в данный момент не налажено, а также различные варианты «квазиобъемных» AlN-подложек [11], приборных результатов на которых пока не получено. Динамично развивается в последние годы технология нитридов на кремнии, стимулированная, в первую очередь, перспективой массового применения относительно недорогих приборов в системах связи на частотах до 6 ГГц. Преодоление проблемы растрескивания гетероструктур и использование высокоомных подложек Si (>10<sup>4</sup> Ом·см) позволило достичь плотности мощности 7 Вт/мм при 10 ГГц [12] и 5,1 Вт/мм при 18 ГГц [13].

Таким образом, среди использовавшихся до последнего времени подложек для роста нитридных гетероструктур наилучшие по соотношению рабочих частот и мощностей результаты достигаются на подложках полуизолирующего SiC. Их основные недостатки — высокая стоимость и торговые ограничения по целому ряду параметров, обусловленные практически монопольным положением на рынке основных производителей. Альтернативным представляется подход, предложенный в 2004 году японской компанией Fujitsu и основанный на использовании относительно толстых переходных изолирующих слоев AlN на более дешевых подложках SiC *n*-типа проводимости, используемых в мире для производства светодиодов на основе GaN. Сочетание высокой теплопроводности, близкой к теплопроводности SiC, и пониженной плотности проникающих дислокаций делает возможным изготовление на таких полуизолирующих подложках SiC/AlN нитридных мощных высокочастотных транзисторов нового поколения, сочетающих более дешевые подложки большего диаметра (на данный момент — до 4 дюймов) и высокую плотность мощности. На таких подложках уже получены приборы с плотностью мощности до 7 Вт/мм, усилением до 22,2 дБ и PAE до 70% на частоте 2,14 ГГц [14].

Таким образом, проблема выбора адекватной подложки для нитридных транзисторов заключается в поиске компромисса между ка-

чеством получаемых на ней гетероструктур, возможностью организации эффективного теплоотвода и себестоимостью всего процесса в целом.

### Выбор конструкции гетероструктуры в свете проблем воспроизводимости СВЧ-параметров

Прогресс в технологиях получения нитридных гетероструктур и приборов на их основе был достигнут благодаря всплеску количества исследований в данной области с середины 1990-х годов, когда были продемонстрированы первые перспективные приборы. К началу XXI века достижения ведущих исследовательских и промышленных групп были таковы, что к 2002 году была анонсирована коммерциализация нитридных транзисторов, прогнозируемые объемы продаж которых увеличивались небывалыми для полупроводниковой индустрии темпами [15]. Однако одновременно с первыми успехами в середине 1990-х годов была отмечена и основная проблема нитридных транзисторов, решение которой оказалось весьма трудоемким и сдвинуло сроки коммерциализации на пять с лишним лет. Оказалось, что ДЭГ, высокая плотность которого в нитридных гетероструктурах обусловлена в большой мере особенностями зонной диаграммы и пьезополями, оказался весьма чувствителен к внешним воздействиям, что приводит к нестабильности СВЧ-характеристик приборов и их долговременной деградации [16].

Наиболее распространенная конструкция гетероструктуры AlGaIn/GaN, широко используемая в мире для изготовления СВЧ-транзисторов с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor — НЕМТ), включает в себя относительно толстый (1–3 мкм) буферный слой GaN, прикрытый тонким (100–300 Å) слоем Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (0,15 < x < 0,35). Благодаря большему, чем в системе GaAs/AlGaAs, разрыву зон проводимости в сочетании с эффектом пьезолегирования, на гетерогранице GaN/AlGaIn происходит образование 2ДЭГ с указанными выше значениями слоевой концентрации и подвижности электронов. Указанная структура представляет собой простейшую, базовую концепцию построения НЕМТ на основе нитридов III группы; на практике используются ее различные модификации, например, модулированное легирование слоя AlGaIn (спейсер — донорный слой — барьерный слой) для увеличения концентрации электронов в канале и уменьшения сопротивления омических контактов.

Ключевым аспектом при создании полевых транзисторов является электронное ограничение, определяющее утечки в закрытом состоянии [17]. Кроме того, из-за высокой слоевой концентрации при больших напряжениях между затвором и стоком происхо-

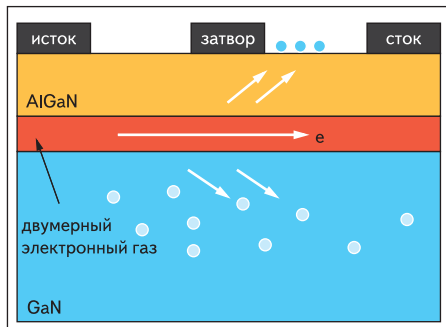


Рис. 2. Схематическое изображение механизма возникновения эффекта «коллапса тока» в транзисторах на основе гетероструктур AlGaN/GaN

дит «выброс» электронов из канала, что ограничивает максимально достижимые токи и плотности СВЧ-мощности. Этот эффект в значительной мере влияет на так называемый «коллапс тока» в СВЧ-режиме вследствие захвата электронов на ловушки в буферном и барьерном слоях (рис. 2).

Существует несколько причин, по которым решение этой проблемы 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 решетке подложках ( $Al_2O_3$ , SiC, Si), могут образовывать области с дефектной проводимостью вблизи интерфейсов буферного и зародышевого слоев [18]. Во-вторых, в ряде работ сообщается о диффузии донорных примесей в GaN из подложки (в частности, кислорода [19–21] и кремния [22, 23]), что может привести к образованию в приборе каналов шунтирующей проводимости. Кроме того, наличие спонтанной поляризации и пьезополяризации приводит к образованию наведенных положительных и отрицательных зарядов вблизи дефектов, границ блоков мозаичной структуры, на гетероинтерфейсах. Это 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 (порядка 50 В и выше) напряжениях, необходимы дополнительные 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, температуры отжига зародышевого слоя, температуры и скорости роста эпитаксиального слоя может меняться на несколько порядков [24]. Однако столь существенное изменение проводимости GaN, как правило, связано с изме-

нением 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. Токи утечки могут быть также минимизированы при помощи компенсирующего легирования буферного слоя GaN, Fe, C, Mg и др. [25]. Для уменьшения «коллапса тока», возникающего из-за захвата электронов в ловушки в приповерхностном барьерном слое, используется его пассивация, например слоем  $Si_3N_4$  [26]. Однако это не спасает от захвата электронов в ловушки в буферном слое GaN, причем проблема усугубляется тем, что при его легировании компенсирующими примесями создаются дополнительные ловушки.

С другой стороны, в так называемых двойных гетероструктурах (ДГС) может быть обеспечено двустороннее электронное ограничение и предотвращен захват электронов в ловушки в буферном слое. Подобный подход, ранее реализованный в полупроводниковой системе In-Al-Ga-As, применительно к нитридам несет и ряд других преимуществ [27]. Полевые транзисторы на основе ДГС GaN/InGaN/AlGaN продемонстрировали работоспособность в СВЧ-режиме без возникновения «коллапса тока» [28]. Однако несмотря на большие теоретические значения подвижности в InN по сравнению с GaN, подвижность в InGaN, как правило, меньше из-за неоднородности состава. На сегодняшний день существует ряд публикаций о создании полевых транзисторов на основе ДГС AlGaN/GaN/AlGaN с характеристиками, сравнимыми с полученными в приборах на основе «классических» однопереходных структур GaN/AlGaN [29, 30]. Полноценная реализация всех потенциальных преимуществ ДГС затруднена теми же характеристиками для данного материала обстоятельствами — механическими напряжениями из-за несоответствия параметров решеток GaN и AlN, а также связанными с этим пьезополями, существенно искажающими зонную диаграмму. Введение широкозонного материала с нижней стороны канала GaN без дополнительных изменений конструкции ДГС AlGaN/GaN/AlGaN приводит к уменьшению проводимости по двум основным причинам. Во-первых, релаксация механических напряжений в слое GaN при превышении некоторой критической толщины сопровождается формированием дополнительных дефектов, и приближение двумерного электронного газа к этой дефектной области приводит к уменьшению подвижности электронов в канале. Во-вторых, при уменьшении толщины GaN возрастает влияние искривления зонной диаграммы, вызванного поляризационными эффектами. При высоких значениях содержания алюминия  $x$  в буферном слое  $Al_xGa_{1-x}N$  на нижней гетерогранице AlGaN/GaN может образоваться слой с дырочной проводимостью (аналогич-

но формированию двумерного электронного газа на верхней гетерогранице GaN/AlGaN).

Таким образом, для получения ДГС с каналом GaN, имеющим двойное электронное ограничение и электрофизические параметры, сравнимые со структурой с «толстым» слоем GaN, необходимо определить оптимальную конструкцию буферного слоя и найти толщину релаксации GaN для этой конструкции.

## От требований технологии — к возможностям оборудования

Исследования нитридных гетероструктур были начаты нами в 1999 году. Анализ опыта ведущих мировых групп и уже возникших к тому времени технологических проблем показал, что наиболее целесообразен путь развития, основанный на разработке специализированного ростового оборудования, учитывающего характерные особенности применяемых реагентов, получаемых материалов и собственно ростового процесса. Одновременно с накоплением экспериментальных данных в ходе ростовых экспериментов проводилась серьезная модификация установок МПЭ с использованием аммиака в качестве источника азота, приведшая к созданию базовой конструкции STE3N2 (рис. 3). Уникальными особенностями данной установки являются расширенный диапазон температур подложки и отношений потоков компонентов V и III групп. В частности, благодаря криопанелям увеличенной площади и усиленной системе откачки в ростовой камере обеспечивается вакуум не хуже  $5 \cdot 10^{-3}$  Па при температурах подложки до 970 °С и потоке аммиака 400 см<sup>3</sup>/мин, что позволяет достигать экстремальных для МПЭ режимов эпитаксии GaN. В результате дополнительной модернизации узла нагрева образца диапазон температур подложки был увеличен до 1200 °С, что позволило заметно улучшить свойства слоев AlN и многослойных гетероструктур с высоким содержанием алюминия.

Простейшая конструкция ДГС (рис. 4), реализованная нами в 2003 году на подложках сапфира (0001), показала ухудшение подвижности электронов ДЭГ, однако за счет их более высоких концентраций обеспечивала проводимость канала транзистора, сравнимую с наблюдаемой в классических НЕМТ. В то же время, пробойные напряжения в гетероструктурах этого типа составили более 100 В. Это позволило впервые в России продемонстрировать работоспособность приборов в СВЧ-режиме на 8,15 ГГц [27]. Однако невысокие значения полученных при этом параметров указывали на необходимость оптимизации гетероструктур. В наибольшей степени это относилось к GaN, так как этот материал всегда сильно напряжен в окружении относительно толстых слоев  $Al_xGa_{1-x}N$  с высоким содержанием Al, а транспортные свойства носителей в ДЭГ определяются со-



Рис. 3. Установка МПЭ нитридов третьей группы с использованием аммиака в качестве источника азота STE3N2

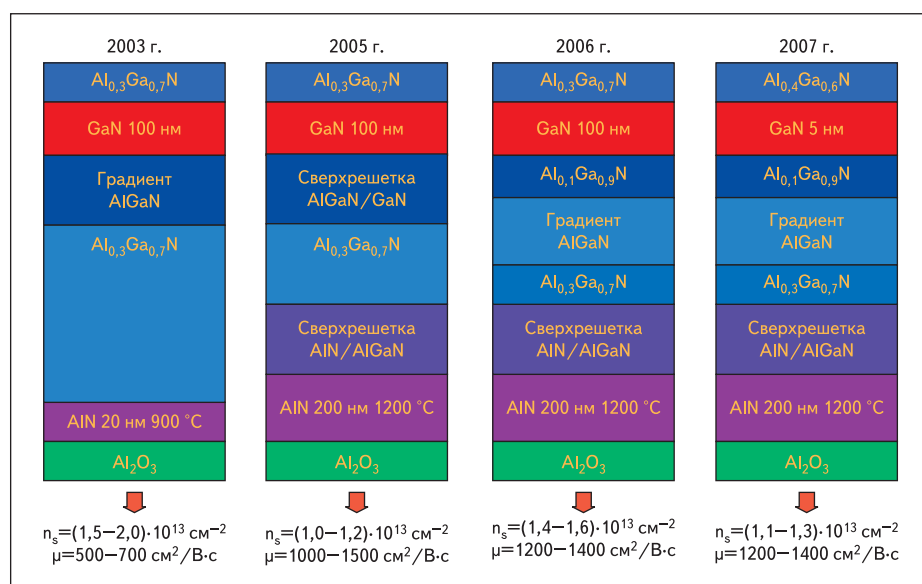


Рис. 4. Оптимизация конструкции многослойной гетероструктуры

вершением слоя GaN и его границы раздела с барьерным слоем AlGaIn. Как уже указывалось, плотность дислокаций в выращенном МПЭ GaN достаточно высока, кроме того, для него характерна развитая мозаичная структура с выраженной шероховатостью поверхности, нарастающей с увеличением толщины [31]. Наиболее вероятной причиной является недостаточно высокая температура подложки, которая обусловлена термодинамическими ограничениями в условиях роста, реализуемых в МПЭ. Было установлено, что повышение температуры до 970 °C, обеспечиваемое нашей установкой при потоках аммиака 400 см<sup>3</sup>/мин, дает заметное увеличение размера зерна мозаичной структуры и некоторое увеличение подвижности электронов [32], однако этого все еще недостаточно для достижения уровня харак-

теристик слоев, характерного для метода МОГФЭ. Учитывая это, на начальной стадии роста ГС мы заменили традиционные, относительно тонкие зародышевые слои на достаточно толстые (более 100 нм) буферные слои AlN, выращиваемые при необычно высокой для метода МПЭ температуре подложки — до 1200 °C. Такой подход позволяет обеспечить необходимую для коалесценции зародышей поверхность подвижность атомов без угрозы разложения материала, поскольку AlN термически значительно более устойчив по сравнению с GaN. Выращенные в этих условиях слои AlN имеют шероховатость, сравнимую с шероховатостью исходной сапфировой подложки со ступенями роста атомарной высоты.

Выращивание подобного «темплейта» AlN на начальных стадиях роста многослойных

ГС, в сочетании с переходными слоями с постепенным понижением содержания алюминия кардинально улучшает структурные свойства и шероховатость входящих в них слоев GaN, что приводит к улучшению качества интерфейса GaN/AlGaIn и, в конечном счете, к заметному улучшению подвижности ДЭГ [33] (рис. 4, 2005 г.). Несмотря на довольно большой разброс электрофизических параметров, по-видимому, обусловленный несовершенством ГС с точки зрения баланса механических напряжений, на структурах этого типа были получены транзисторы с затвором 0,5 мкм×0,48 мм, имеющие мощность 1,8 Вт при 10 ГГц (плотность мощности 3,8 Вт/мм) [34]. Несмотря на то, что электрофизические параметры гетероструктур практически соответствуют мировому уровню, и в транзисторах благодаря двойному электронному ограничению минимизирован «токовый коллапс», указанные выше значения мощности близки к предельно возможным для сапфира без оптимизации теплоотвода.

Финишная оптимизация МГС, проведенная нами (рис. 4, 2006 г.), позволила сбалансировать электрофизические параметры гетероструктур, существенно повысив их однородность (рис. 5). Оптимизация нижних слоев и режимов их выращивания позволила реализовать наиболее сложный тип МГС — с каналом квантоворазмерной толщины (рис. 4, 2007 г.) для увеличения электронного ограничения и улучшения морфологии. Уменьшение толщины канала целесообразно и из технологических соображений: уменьшается глубина травления мезы для межприборной изоляции, что значительно упрощает процесс последующего нанесения затвора. Важно отметить, что на ВАХ гетероструктур отсутствует гистерезис, часто наблюдающийся в «классических» НЕМТ-структурах. Улучшение электронного ограничения с уменьшением толщины слоя GaN подтверждается также и данными C-V измерений [35]. И, наконец, разработанная конструкция МГС, благодаря наличию достаточно толстого слоя AlN в ее нижней части и сбалансированной относительно него по остаточным механическим напряжениям совокупности последующих слоев, оказалась исключительно удобной для переноса на другие типы подложек. В частности, нами успешно реализованы гетероструктуры на теплопроводящих подложках Si [36] и AlN/SiC [37], при этом получены электрофизические параметры ДЭГ, сравнимые с получаемыми на подложках из сапфира. Важно отметить, что на ВАХ в статическом режиме ток тестовых транзисторов практически не уменьшается в области больших рабочих напряжений вследствие теплового рассеяния, как это наблюдалось в случае использования сапфировых подложек. Полученные результаты позволяют с уверенностью ожидать в ближайшем будущем улучшения приборных характеристик в СВЧ-режиме и прогнозиро-

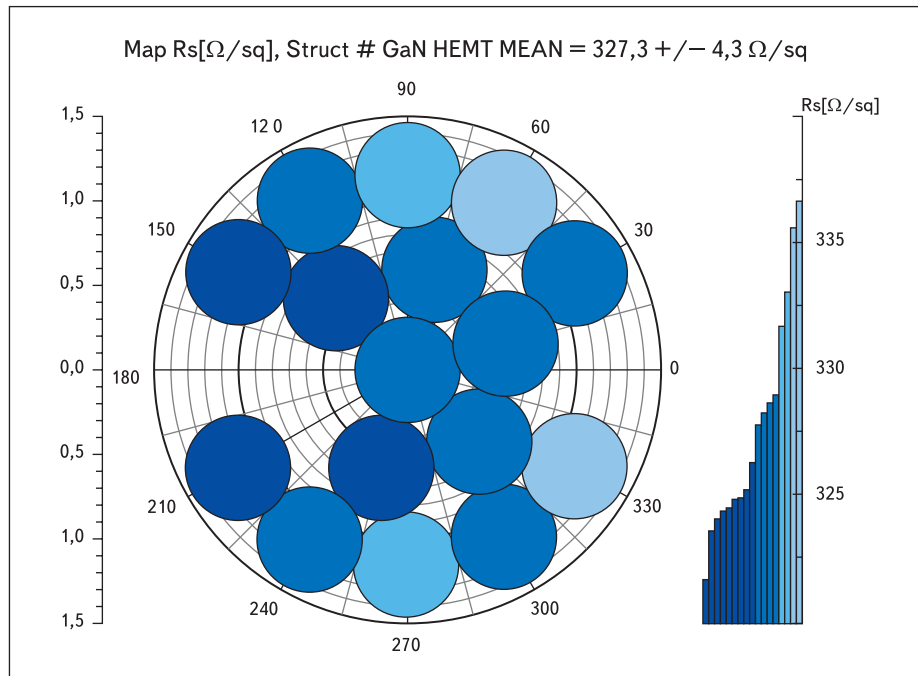


Рис. 5. Распределение слоевого сопротивления в нитридной транзисторной гетероструктуре, выращенной на трехдюймовой сапфировой подложке

вать появление полноценных нитридных приборов со столь ожидаемыми уникальными возможностями.

## Выводы

1. Нитридные широкозонные полупроводники, обладающие уникальными свойствами, открывают широкие возможности проектирования и изготовления новых типов СВЧ-устройств. Наиболее перспективна конструкция гетероструктур с двойным электронным ограничением, позволяющая минимизировать основную проблему нитридных полевых транзисторов — высокочастотный «токовый коллапс».
2. Проблемы технологии роста гетероструктур с двойным электронным ограничением на чужеродных подложках успешно решены с использованием комплексного подхода, включающего разработку специ-

ализированного ростового оборудования и применение новаторских конструкций гетероструктур и режимов их получения.

3. На разработанных конструкциях гетероструктур реализованы тестовые транзисторы с параметрами мирового уровня, тем самым создана технологическая база для создания полноценных нитридных СВЧ-приборов нового поколения. ■

## Литература

1. Gaska R. et. al. Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78.
2. Mishra U. K. et. al. Proceedings of the IEEE. 2002. V. 90, No. 6
3. Wu Y. F. et. al. IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25.
4. T. Kikkawa et. al. [www.gaasmantech.org/Digests/2004/2004Papers/6.1.pdf](http://www.gaasmantech.org/Digests/2004/2004Papers/6.1.pdf)
5. J. Kuzmik et. al. IEEE Trans. Electron Dev. 2002. V.49.
6. A. Chini et. al. Elec. Lett. 2004. V. 40.

7. Wu Y. F. et. al. IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25.
8. Sun J. et. al. IEEE Electron Dev. Lett. 2003. V. 24.
9. Xu J. J. et. al. IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 2000. V. 48.
10. Chu K. K. et. al. IEEE Electron Dev. Lett. 2004. V. 25.
11. Hu X. et. al. Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82.
12. Bove Ph. et. al. Manufacturing Engineered wafers for GaN RF power applications. GaAs MANTECH, New Orleans. 2005. (<http://gaasmantech.org/Digests/2005/2005Papers/4.3.pdf>)
13. Ducatteau D. et. al. IEEE Electron Dev. Lett. 2006. V. 27.
14. Kikkawa T. et. al. Recent Progress of Highly Reliable GaN-HEMT for Mass Production. GaAs MANTECH, Princeton. 2006. (<http://gaasmantech.org/Digests/2006/2006%20Digests/12A.pdf>)
15. Gallium Nitride & Related Wide Bandgap Materials & Devices. A Market and Technology overview 1998–2003. // Sec. ed. by Roy Swzeda. Elsevier Advanced Technology, 2001.
16. Khan M. A. et. al. Electron. Lett. 1994. V. 30 (25).
17. Su Y. K. et. al. Mat. Sci. Eng. 2004. B110.
18. Cheong M. G. et. al. Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77.
19. Sun X. L. et. al. Journal of Applied Physics. 2002. V. 91.
20. Sun X. L. et. al. Phys. Stat. Sol. (b). 2001. V. 228.
21. Goss S. H. et. al. Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78.
22. Armitage R. et. al. Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81.
23. Basu S. N. et. al. J. Mater. Res. 1994. V. 9.
24. Bougrioua Z. et. al. J. Cryst. Growth. 2001. V. 230.
25. Tang H. et. al. Sol. State El. 2002. V. 44.
26. Vertiatichikh A. E. et. al. Elec. Lett. 2002. V. 38.
27. Александров С. Б. и др. ФТП. 2004. том 38.
28. Simin G. et. al. Jpn. J. Appl. Phys. 2001. V. 40.
29. Chen C. Q. et. al. Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82.
30. Cordier Y. et. al. J. Crystal Growth. 2005. V. 278.
31. Veziar S. et. al. Phys. Rev. (b). 2004. V. 69.
32. Алексеев А. Н. и др. ФТП. 2007. Т. 41.
33. Алексеев А. Н. и др. Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31.
34. Алексеев А. Н. и др. Мощный полевой СВЧ-транзистор на многослойной гетероструктуре AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn. Тезисы докладов пятой Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы». Москва, 2007.
35. Алексеев А. Н. и др. Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32.
36. Алексеев А. Н. и др. Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34.
37. Алексеев А. Н. и др. Принято к публикации в «Письма в ЖТФ». 2008