

СТАНДАРТИЗОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВО ГЕТЕРОСТРУКТУР III-N ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ*

Д.Красовицкий¹, А.Алексеев², С.Петров², В.Чалый¹
kurnosova@semiteq.ru

Для получения двумерного электронного газа (ДЭС) с каналом GaN, имеющим двойное электронное ограничение и электрофизические параметры, сравнимые со структурой с "толстым" слоем GaN, необходимо создание оптимальной конструкции буферного слоя и определение толщины релаксации GaN для нее.

От требований технологии – к оборудованию

Исследование нитридных ГС было начато авторами в 1999 году. Анализ опыта ведущих мировых структур и возникших к тому времени технологических проблем показал, что подход, основанный на разработке специализированного ростового оборудования, учитывающего характерные особенности применяемых реагентов, создаваемых материалов и процессов роста, оптимален. Параллельно с накоплением экспериментальных данных проводилась модификация установок МПЭ с использованием в качестве источника азота аммиака, что обеспечило создание базовой конструкции STE3N2 (рис.1).

Уникальные особенности установки – расширенные диапазоны температур подложки и отношений потоков компонентов V и III групп. Благодаря



Рис.1. Установка МПЭ нитридов третьей группы для изготовления STE3N2 с использованием аммиака в качестве источника азота

криопанелям увеличенной площади и более мощной системе откачки в ростовой камере обеспечивается вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-3}$ Па при температурах подложки до 970°C и потоке аммиака $400 \text{ см}^3/\text{мин}$. Это позволяет достигать экстремальные для МПЭ режимы эпитаксии GaN.

В результате модернизации узла нагрева верхний предел температур подложки удалось увеличить до 1200°C , что позволило заметно улучшить свойства слоев AlN и многослойных

гетероструктур с высоким содержанием алюминия.

Простейшая конструкция ДГС (рис.2), реализованная в 2003 году на сапфире (0001), показала ухудшение подвижности электронов ДЭГ. Однако за счет их более высоких концентраций была достигнута сравнимая с классическими НЕМТ проводимость канала транзистора, причем пробойные напряжения в ГС этого типа составили более 100 В, что впервые в России обеспечило работоспособность приборов в СВЧ-режиме на 8,15 ГГц. Невысокие значения получаемых параметров свидетельствовали о необходимости оптимизации используемых ГС. В наибольшей степени это относилось к GaN, как правило сильно напряженному, поскольку эта структура находится в окружении относительно толстых слоев AlGaInN с высоким содержанием Al, а транспортные свойства носителей в ДЭГ определяются совершенством слоя материала и границы его раздела с барьерным слоем AlGaIn. Плотность

* Окончание. Начало в №4, 2001, с.16–20.

¹ "Светлана-Рост" (С.-Петербург).

² НТО (С.-Петербург).

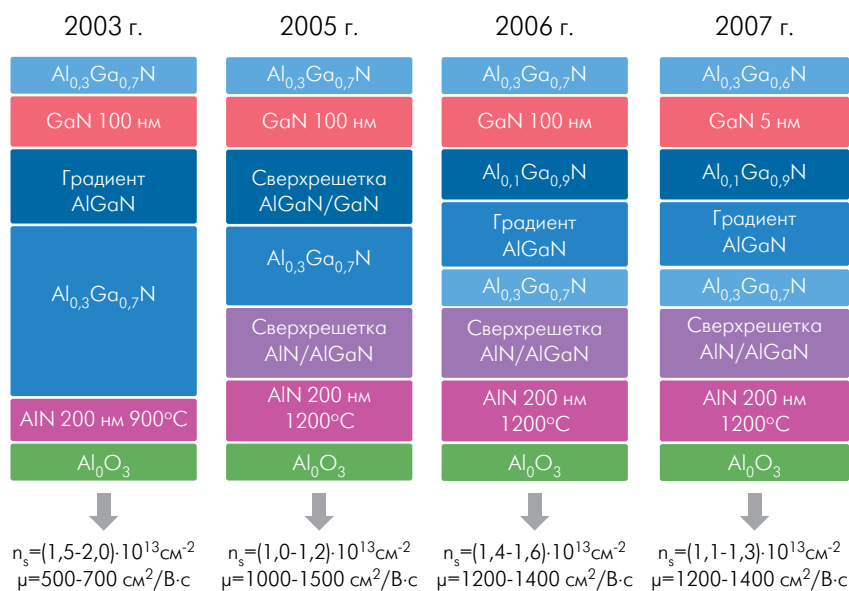


Рис.2. Оптимизация конструкции многослойной ГС

дислокаций GaN в соединении, выращенном МПЭ, достаточно высока. Кроме того, для него характерна развитая мозаичная структура с выраженной шероховатостью поверхности, нарастающей с увеличением толщины [1]. Наиболее вероятная причина этого – недостаточно высокая температура подложки, обусловленная термодинамическими ограничениями условий роста, реализуемых в МПЭ.

Установлено, что повышение температуры до 970°C при потоках аммиака 400 см³/мин дает заметное увеличение размера зерна мозаичной структуры и некоторый рост подвижности электронов [1]. Однако этого еще недостаточно для достижения параметров слоев, характерных для МОГФЭ (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений). На начальной стадии роста ГС проведена замена традиционных, относительно тонких зародышевых слоев на достаточно толстые (более 100 нм) буферные слои AlN, выращиваемые при температуре подложки до 1200°C, что мало характерно для МПЭ. Такой подход позволил обеспечить необходимую для коалесценции зародышей поверхностную подвижность атомов без разложения материала, поскольку AlN значительно более термически устойчив, чем GaN. Причем ше-

роховатость его выращенных слоев и исходной сапфировой подложки со ступенями роста атомарной высоты сравнимы.

Выращивание подобного "теплайта" AlN на начальных стадиях создания многослойных ГС в сочетании с переходными слоями с постепенным понижением содержания алюминия (2005) кардинально улучшает структурные свойства и шероховатость входящих в них слоев GaN. Это обеспечивает повышение качества интерфейса GaN/AlGaN и, в конечном итоге, заметное улучшение подвижности ДЭГ (см. рис.2). Несмотря на довольно большой разброс электрофизических параметров, обусловленный, по видимому, несовершенством ГС с точки зрения баланса механических напряжений, 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) [2]. Таким образом, электрофизические параметры ГС практически соответствуют мировому уровню и благодаря двойному электронному ограничению в транзисторах минимизирован "токовый коллапс". В результате указанные выше значения мощности близки к предельно возможным для сапфира без оптимизации теплоотвода.

Проведенная в 2006 году финальная оптимизация МГС (см. рис.2) обеспечила возмож-

ность сбалансировать электрофизические параметры ГС и существенно повысила их однородность. Оптимизация нижних слоев и режимов их выращивания (2007) позволила реализовать наиболее сложный тип МГС – с каналом квантово-размерной толщины (см. рис.2) для увеличения электронного ограничения и улучшения морфологии. Уменьшение толщины канала целесообразно и из технологических соображений: снижается глубина травления мезы для межприборной изоляции, что значительно упрощает последующее нанесение затвора.

Важно отметить, что на вольт-амперных характеристиках ГС отсутствует гистерезис, часто наблюдающийся в "классических" НЕМТ-структурах. Улучшение электронного ограничения с уменьшением толщины слоя GaN подтверждается результатами C-V-измерений. Наконец, разработанная конструкция МГС, благодаря достаточно толстому слою AlN в ее нижней части и сбалансированной относительно него по остаточным механическим напряжениям совокупности последующих слоев, исключительно удобна для переноса на другие типы подложек. В частности, успешно реализованы ГС на теплопроводящих подложках Si и AlN/SiC. При этом получены электрофизические параметры ДЭГ, сравнимые с получаемыми на подложках сапфира.

На подложках полуизолирующего SiC, наиболее часто используемых при производстве ЭКБ для критических применений, также реализованы ГС с превосходными характеристиками.

Стабилизация приборно-ориентированных параметров ГС, введение статистически обоснованных критериев оценки "настроенности" технологических процессов позволили перейти к следующему этапу производства материалов и ЭКБ на основе нитридов – стандартизации технологических процессов и использованию современных методов проектирования.

Стандартизованные технологии III-нитридов в компании "Светлана-Рост"
 Помимо проблемы выбора теплопроводящей подложки для эпитаксиального роста нитридных ГС и деградации параметров транзисторов важными факторами, сдерживающими массовое применение этих материалов, являются методология проектирования МИС и архитектура систем на их основе. Примечательно, что разработки технологии нитридной ЭКБ за рубежом с самого начала проводились на принципах "foundry", в соответствии с которыми использование стандартных конструкций и технологий позволяет, не изменяя техпроцесса, изготавливать не конкретную МИС, а целый класс изделий. Поэтому создание такой МИС превращается в разработку топологии на основе библиотеки стандартных элементов, параметры которых находятся в прямой связи с применяемым техпроцессом.

В России производство материалов и ЭКБ, основанное на использовании стандартных конструкций и технологий, называется "производством пластин с кристаллами заказных элементов" и узаконено согласованными с заинтересованными ведомствами нормативными документами, выпущенными в 2009 году 22 ЦНИИ МО РФ.

В компании "Светлана-Рост" стандартизованы конструкция и техпроцесс изготовления ГС на основе имеющих электрофизические параметры мирового уровня AlGaIn с двойным электронным ограничением методом аммиачной МПЭ (рис.3).

При апробации ГС в изделиях сторонних производителей СВЧ ЭКБ в зависимости от примененной топологии получены плотность мощности в постоянном режиме не менее 4 Вт/мм на 4 ГГц (длина затвора 0,5 мкм, field-plate) и предельные частоты более 60 ГГц при длине затвора 0,15 мкм.

Создан также стандартный техпроцесс AlGaIn DHFET 05 DL (рис.4), на основе которого в сжа-

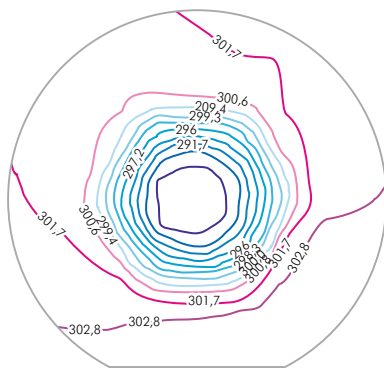


Рис.3. Карта слоевого сопротивления стандартной ГС AlGaIn с двойным электронным ограничением

тые сроки проведен ряд разработок ЭКБ, в частности, широкополосного усилителя (2 Вт, 17–25 дБ в полосе 0,1–4 ГГц) следующего поколения и усилителя мощности С-диапазона (7 Вт, 10 дБ на 4–6 ГГц) [3].

Уровень расчетных параметров ЭКБ, созданной на основе данного процесса, конкурентоспособен на рабочих частотах до 8 ГГц. Как следствие, вместе с рядом отечественных производителей начаты разработки пластин с заказными элементами по правилам проектирования на основе техпроцесса AlGaIn DHFET 05 DL.

В целом следует отметить:

1. Нитридные широкозонные полупроводники, обладающие уникальными свойствами, от-

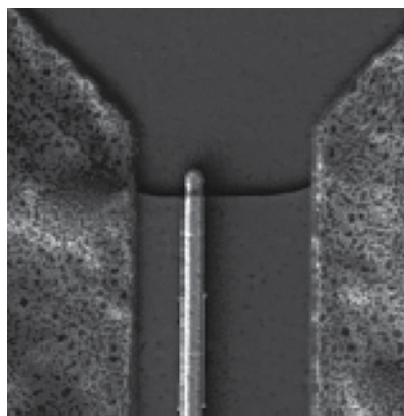


Рис.4. РЭМ-изображение затвора, изготовленного по стандартному техпроцессу "AlGaIn DHFET 05 DL"

крывают широкие возможности проектирования и изготовления новых СВЧ-устройств. Наиболее перспективна конструкция ГС с двойным электронным ограничением, позволяющая минимизировать основную проблему нитридных полевых транзисторов – высокочастотный "токовый коллапс".

2. Проблемы технологии роста ГС с двойным электронным ограничением на чужеродных подложках успешно решены с использованием комплексного подхода, включающего разработку специализированного ротового оборудования, применение новаторских конструкций и режимов получения ГС.

3. Стандартизованы конструкция и техпроцесс изготовления методом аммиачной МПЭ на различных подложках, имеющих электрофизические параметры мирового уровня ГС на основе AlGaIn с двойным электронным ограничением. В зависимости от примененной топологии, при приборной апробации ГС в изделиях производителей ЭКБ для СВЧ продемонстрированы плотность мощности не менее 4 Вт/мм на 4 ГГц и предельные частоты более 60 ГГц. Это свидетельствует о высоком потенциале продукции, причем уровень стандартизации достаточен для проведения в сжатые сроки разработки перспективной ЭКБ различного применения для СВЧ.

Работа проводилась при поддержке Минобрнауки России в рамках ГК №02.523.11.3019.

Литература

1. S. Vezian et al. Phys. – Rev. (b), 2004, v.69, p.125329-1.
2. Алексеев А.Н. и др. – ФТП, 2007, т.41, с.1025–1030.
3. 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", М.: 2007, с.4.