

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ УСТАНОВОК МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ

Метод молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) основан на выращивании полупроводниковых слоев из испаряемых в сверхвысоком вакууме (~10–11 мм.рт.ст.) эффузионными источниками компонентов, причем распространение потоков компонентов роста в объеме происходит в режиме молекулярного пролета. Для обеспечения необходимой чистоты процесса и сверхвысокого вакуума кроме внешней безмасляной откачной системы (турбомолекулярные, ионные, крионасосы) используются встроенные в ростовой реактор и заполненные жидким азотом криопанели.

Сильный разогрев источников и подложки, прецизионные встроенные методики исследования, необходимость механического перемещения подложек между камерами в условиях сверхвысокого вакуума приводят к заметной сложности оборудования. Как следствие, установки МПЭ производятся лишь несколькими фирмами в США и Европе. В России серийный выпуск таких установок, начатый в 1980-е годы, к середине 1990-х годов был прекращен, причем уровень продукции сравнимого с зарубежным качества так и не был достигнут.

В 2001 году за разработку и производство установок МПЭ (торговая марка "SemiTEq") (рис.1) взялось новое предприятие – ЗАО "Научное и технологическое оборудование" (Санкт-Петербург). Предприятие было основано технологами, имевшими большой опыт практической работы на отечественном и зарубежном оборудовании МПЭ в ФТИ им. Иоффе РАН. К работам были привлечены конструкторы из бывшего НПО "Аналитическое приборостроение" (Санкт-Петербург) и НИТИ (Рязань), участвовавшие в создании первых серийных отечественных установок МПЭ.

Предприятие начало свою деятельность с разработки специализированной установки МПЭ для выращивания структур на базе нитридов третьей группы*. Выяснилось, что росто-

вые условия для их создания заметно отличаются от условий для классических полупроводников A^3B^5 (например, AlGaAs). Попытки адаптации для этих целей традиционных установок МПЭ не дали желаемых результатов. Требовалось заметное повышение температуры подложки, существенное усиление откачной системы для удаления используемого в качестве источника азота значительного потока аммиака и др. (Применительно к нитридам это, в частности, привело в мире к временному отставанию технологии МПЭ по сравнению с газотранспортными методами).

Разработчикам ЗАО "Научное и технологическое оборудование" удалось решить вышеназванные проблемы. Созданные к 2005 году установки STE3N2 (рис.2), STE3N3 демонстрируют уровень технологических и приборных результатов, сравнимых с зарубежными, полученными с использованием газотранспортных методов и на специализированных МПЭ-установках иностранного производства.

Первая апробация созданного на предприятии оборудования МПЭ была проведена в ЗАО "Светлана-Рост" (Санкт-Петербург), которое специализируется на разработке и серийном выпуске полупроводниковых гетероструктур, СВЧ-транзисторов и МИС на их основе. Разработанные им нитридные гетероструктуры для СВЧ-микронэлектроники демонстрируют полное отсутствие эффекта коллапса (падение мощности в СВЧ-режиме по сравнению со статическими характери-

*В 1990–2000 годы нитридные полупроводники продемонстрировали исключительные приборные возможности в оптоэлектронике и СВЧ-микронэлектронике.

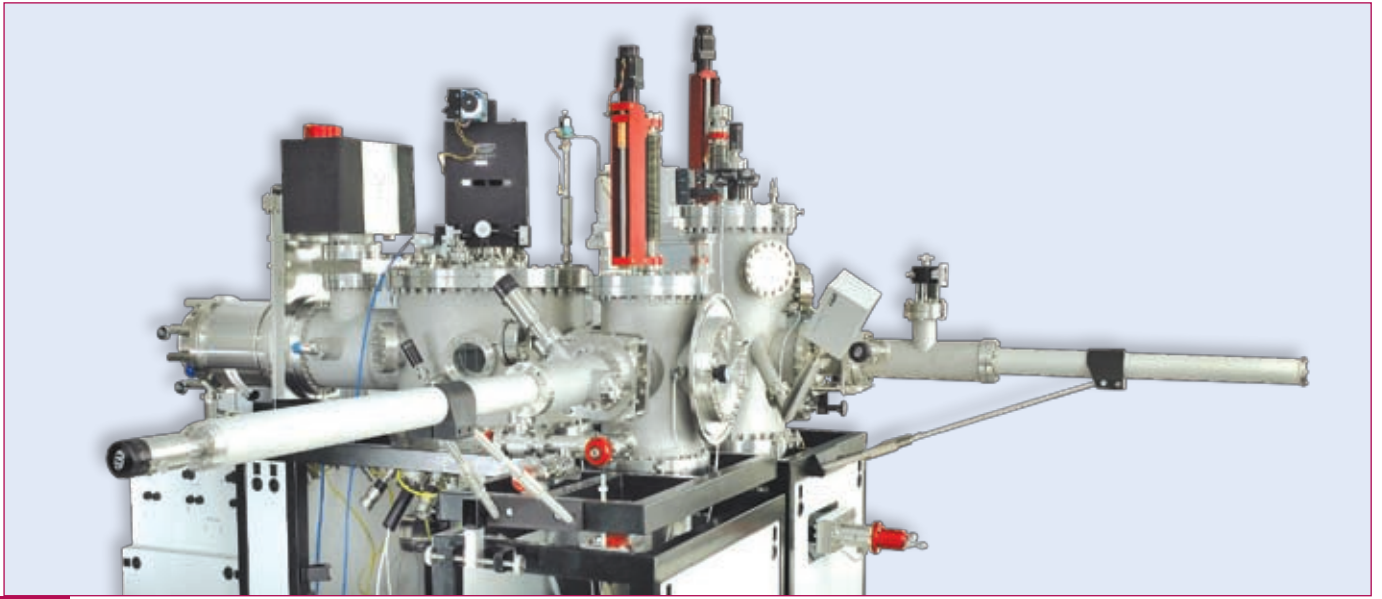


Рис.1 Установка МПЭ STE3N3

ками), что характерно для нитридных транзисторов. Подвижность в двумерном канале на гетерогранице GaN/AlGaN составляет $\sim 1500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при концентрации $\sim 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. (Отметим, что концентрация носителей почти на порядок превышает максимальные значения для структур на основе AlGaAs).

Разброс удельного слоевого сопротивления R_s по пластине – не более $\pm 1,5\%$, что определяет высокий выход годных при производстве транзисторов (рис.3).

Совместно с ФГУП "Исток" на созданных гетероструктурах были изготовлены транзисторы с удельной мощностью



Рис.2 Установка МПЭ STE3N2

3,8 Вт/мм при 10 ГГц, что близко к предельным значениям для структур, выращенных на сапфире. Достижение указанных результатов в значительной степени обусловлено возможностями ростового оборудования. Установки STE3N2 и STE3N3 обеспечивают максимальное значение температуры образца не ниже 1200°C, что, по меньшей мере, на 200°C выше, чем у GaN-ориентированной установки Compact-21 производства фирмы Riber (Франция) – одного из мировых лидеров в этой области.

Возможность проведения процесса при ~1200°C позволяет растить гетероструктуры с переходного слоя AlN, имеющего высокое кристаллическое совершенство. Выращенный на таком слое объемный нитрид галлия демонстрирует рекордные значения подвижности свободных носителей (рис.4). Эта базовая характеристика материала для газотранспортной технологии оказывается, как правило, выше, чем для МПЭ. Результат, полученный на STE3N2, превышает опубликованные в литературе данные как для традиционного МПЭ оборудо-

вания, так и для газотранспортной эпитаксии (при росте на сапфире).

Важный приборный аспект включающего переходной слой AlN ростового процесса – возможность его легкой адаптации к различным видам подложек: сапфир, кремний, карбид кремния. Высокая теплопроводность подложек Si и, в особенности, SiC позволяет существенно снизить влияние теплового разогрева на работу мощного транзистора.

Особенности созданного оборудования обеспечивают эти результаты.

Ростовой реактор диаметром ~600 мм включает в себя:

- манипулятор, обеспечивающий нагрев и вращение подложки диаметром до 100 мм, закрепленной в держателе запатентованной конструкции;
- две криопанели с жидким азотом;
- семь портов для эффузионных источников с заслонками и один, центральный, для инжектора аммиака;
- систему дифракции быстрых электронов, оптический

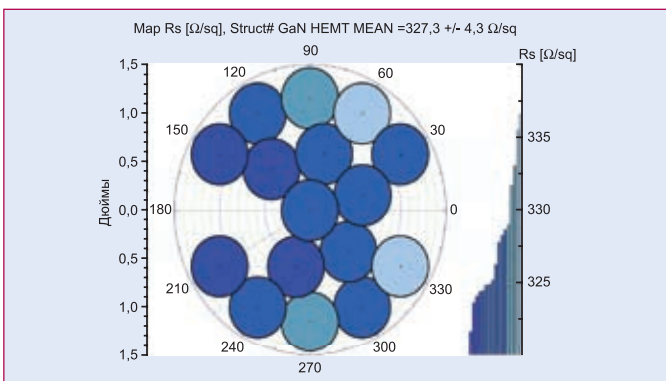


Рис.3 Однородность слоевого сопротивления транзисторной нитридной гетероструктуры (Ø76 мм)

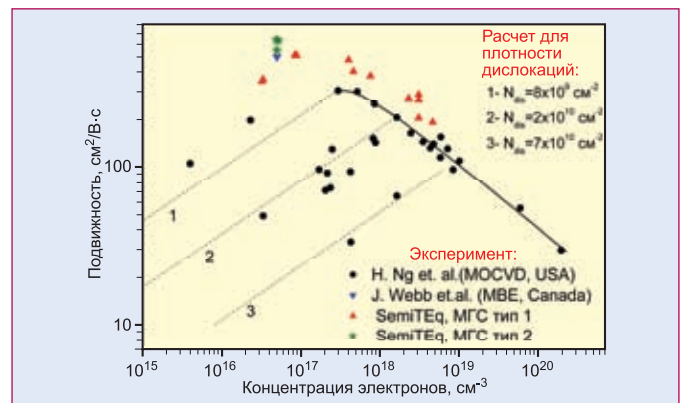


Рис.4 STE3N: объемно легированный GaN – результаты



Рис.5 Установка МПЭ STE3532 для материалов системы A^3B^5

пирометр, специализированный лазерный интерферометр, масс-спектрометр.

Система откачки реактора состоит из коррозионно-стойкого турбомолекулярного и ионного насосов и безмасляной системы форвакуумной откачки.

Обслуживающие камеры (одна в STE3N2, две в STE3N3): шлюзовая камера с накопителем на восемь образцов; дополнительная камера подготовки для прогрева и обезгаживания подложек перед ростом. Камеры имеют индивидуальную систему откачки; объединяются линейными манипуляторами, которые переносят образцы из одной камеры в другую.

При проведении ростового процесса реализуются следующие функции управления:

- температура источников задается с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$;
- осуществляется манипулирование заслонками источников;
- подача аммиака проводится с точностью не менее 2%;
- температура подложки поддерживается с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Процесс полностью автоматизирован, но может проводиться и вручную (от персонального компьютера).

Следует также отметить использование оригинальной конструкции эффузионных источников галлия и алюминия собственной разработки, позволяющей учитывать специфику их эксплуатации в атмосфере аммиака и обеспечивать длительную работоспособность в сочетании с высокими скоростями роста AlN и GaN (>1 мкм/ч).

Конструкция источников, как и ряд принципиально важных технических решений по установкам в целом, запатентованы.

Апробация головного экземпляра установки STE3N2 в ЗАО "Светлана-Рост" имела целью не только проведение технологических работ, но и испытания надежности всей конструкции. После годичной эксплуатации, в ходе которой было вы-

полнено более трехсот эпитаксиальных процессов, был начат серийный выпуск установок STE3N2 и STE3N3.

К настоящему времени осуществлены поставки:

- STE3N2 в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН;
- трех модулей установки STE3N3 в состав роботизированного кластера производства ЗАО "НТ-МДТ" в МИЭТ (Зеленоград);
- произведен предварительный запуск и подготовлена поставка включающего STE3N3 многокамерного комплекса для Курчатовского Научного Центра – совместная разработка с ЗАО "Сигма-Скан" (Москва);
- завершается поставка STE3N3 в ЗАО "Светлана-Рост".

Начато изготовление такой же установки по заказу Института физики микроструктур РАН (Нижний Новгород).

Инсталляция установок в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН и МИЭТ сопровождалась выращиванием тестовых структур с объемным слоем GaN и двойных гетероструктур транзисторного типа. Параметры тестовых образцов совпали с приведенными выше характеристиками для структур, выращенных на головном экземпляре STE3N2 ЗАО "Светлана-Рост".

ЗАО "Научное и технологическое оборудование" кроме нитридных МПЭ-установок, освоило производство оборудования МПЭ для классических полупроводников A^3B^5/A^2B^6 (рис.5), установок электронно-лучевого напыления, плазмо-химических установок травления и нанесения диэлектриков, оборудования для термической обработки полупроводниковых пластин.

Приобретенный опыт поставок и технического обслуживания позволяет планировать проведение активной рекламной кампании на начало 2009 года для выхода предприятия со своей продукцией на внешний рынок. С этой целью в ЗАО "Научное и технологическое оборудование" уже организовано европейское представительство (SemiTEq GmbH).