

ТАНДЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЗАДАЧ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

А.Алексеев¹, к.ф.-м.н., С.Иванов², д.ф.-м.н. С.Сорокин³, к.ф.-м.н.

УДК 621.383
ВАК 05.27.03

Развитие электроники базируется на изучении свойств и разработке технологий получения новых материалов. В последние 10–15 лет активные исследования проводятся в области широкозонных полупроводниковых материалов, что связано с необходимостью развития оптоэлектроники для решения задач увеличения емкости оптических запоминающих устройств, повышения скорости обмена информацией, производства полноцветных дисплеев, развития аналитического приборостроения. Полученные результаты используются также в экологии, медицине и т.д.

Одной из основных технологий получения широкозонных материалов является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), которая обеспечивает уникальные возможности точного контроля параметров растущих слоев, в том числе на атомарном уровне, что необходимо при изготовлении квантово-размерных структур. Возможность роста при сравнительно низких температурах подложки, отсутствие водородного загрязнения выращенных слоев – преимущества МЛЭ по сравнению с другими технологиями на основе газофазной эпитаксии.

ФТИ им. А.Ф.Иоффе (Санкт-Петербург) – один из ведущих научных центров в России – занимается исследованием широкозонных полупроводниковых соединений A^2B^6 для создания оптоэлектронных приборов. В 2009 году в лаборатории квантово-размерных гетероструктур была завершена инсталляция двухреакторного комплекса молекулярно-лучевой эпитаксии STE3526 производства ЗАО "НТО" (рис.1). Сегодня ЗАО "НТО" – единственный отечественный производитель, серийно разрабатывающий и выпускающий системы МЛЭ мирового уровня. Предприятие, расположенное в Санкт-Петербурге, на протяжении 15 лет разрабатывает и производит под маркой SemiTEq® широкий спектр современных установок для молекулярно-лучевой эпитаксии

и формирования тонкопленочных структур на пластине в технологическом маршруте разработки и производства чипов дискретных приборов и микросхем. Двухреакторный комплекс STE3526 был сконфигурирован специалистами компании в тесном сотрудничестве с сотрудниками института для решения перспективных задач в ФТИ им. А.Ф.Иоффе и до сих пор считается наиболее технически сложной системой в продуктовой линейке компании. Особенностью комплекса является обеспечение ультрачистого сверхвысоковакуумного транспорта подложки из A^3B^5 -реактора в реактор для выращивания соединений A^2B^6 для предотвращения неконтролируемых загрязнений ростового интерфейса на поверхности буферного слоя GaAs.

Группа молекулярно-лучевой эпитаксии лаборатории квантово-размерных гетероструктур ФТИ им. А.Ф.Иоффе, которую возглавляет С.И.Иванов, на базе STE3526 занимается исследованиями фундаментальных физических свойств низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур (квантовых ям, сверхрешеток, квантовых точек) на основе широкозонных полупроводниковых соединений $A^2B^6 - (Zn, Cd, Mg, Mn) / (Se, S, Te)$. Наряду с этим проводятся фундаментальные исследования в области спинэлектроники с использованием разбавленных магнитных полупроводников.

Одна из наиболее перспективных задач лаборатории – создание оптоэлектронных приборов зеленого и зелено-желтого спектрального диапазонов на основе широкозонных соединений A^2B^6 . В связи с проблемой

¹ ЗАО "НТО", sales@semiteq.ru.

² ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ivan@beam.ioffe.ru.

³ ФТИ им. А.Ф.Иоффе, sorokin@beam.ioffe.rssi.ru.

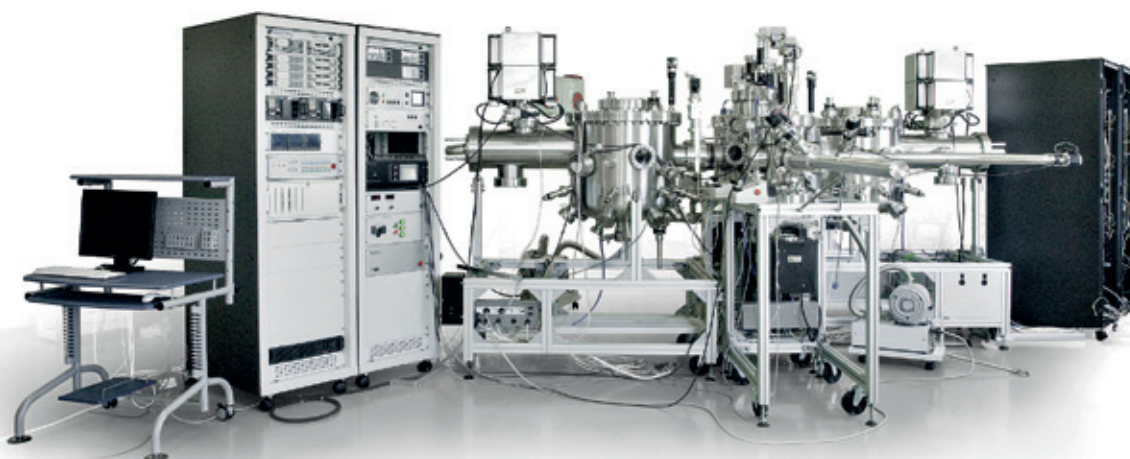


Рис.1.
Двухреакторный
комплекс
МЛЭ STE3526

деградации лазерных диодов (ЛД) на основе ZnSe, во многом обусловленной нестабильностью азотного акцептора, исследования лаборатории квантово-размерных гетероструктур были сфокусированы на разработке альтернативных путей получения лазерной генерации: создании сине-зеленых полупроводниковых лазерных конвертеров A^2B^6/A^3N (эффективность конверсии до $\eta=25,4\%$) и полупроводниковых лазеров A^2B^6 с электронно-лучевой накачкой (ПЛЭН). В частности, при создании лазеров была получена генерация при рекордно низких значениях пороговой плотности тока пучка – около $0,5 \text{ A/cm}^2$ при температуре 300К, а также продемонстрирована возможность получения импульсной выходной мощности более 600 Вт для 26-элементной лазерной сборки на основе гетероструктуры (ГС) с десятью квантовыми ямами (КЯ) в расширенном ($\sim 2 \text{ мкм}$) волноводе.

Значительный прогресс в 2013–2015 годах был достигнут и при разработке компактных лазерных конвертеров A^3N/A^2B^6 . Несмотря на прорыв в области создания прямоизлучающих ЛД зеленого диапазона на соединении A^3N , в частности, совместными усилиями Sumitomo SEI & Sony AML в 2012 году, были продемонстрированы непрерывные InGaN ЛД, выращенные на полуполярных GaN-подложках (11–22) с $\lambda=525\text{--}530 \text{ нм}$ (время жизненного цикла в непрерывном режиме – до 5000 ч). "Истинный" зеленый (540–550 нм), а также желто-зеленый и особенно желтый диапазоны видимого спектра (560–590 нм) на данном этапе развития остаются "нишей" для полупроводниковых лазеров на основе широкозонных соединений A^2B^6 .

Реализация мощных импульсных ПЛЭН, а также необходимость дальнейшего снижения пороговой плотности мощности до уровня менее 1 кВт/см^2 в лазерных гетероструктурах с оптической накачкой, используемых при создании компактных сине-зеленых A^3N/A^2B^6 лазерных конвертеров, предъявляют высокие требования к технологии их выращивания методом МЛЭ. В частности, немаловажными факторами в получении

ГС с низкой плотностью структурных дефектов и повышенной деградационной стойкостью являются использование оптимизированной процедуры начальной стадии роста и применение метода компенсации напряжений при конструировании ГС.

Лазерные ГС $Cd(Zn)Se/ZnMgSSe$ были выращены методом МЛЭ псевдоморфно на подложках GaAs (001) с использованием буферного слоя GaAs в двухреакторном комплексе МЛЭ STE3526 при температуре эпитаксии $T_5 \approx 265\text{--}270^\circ\text{C}$. В качестве материалов источников молекулярных пучков применялись стандартные эффузионные ячейки для Zn, Mg, Cd и ZnS (последний является

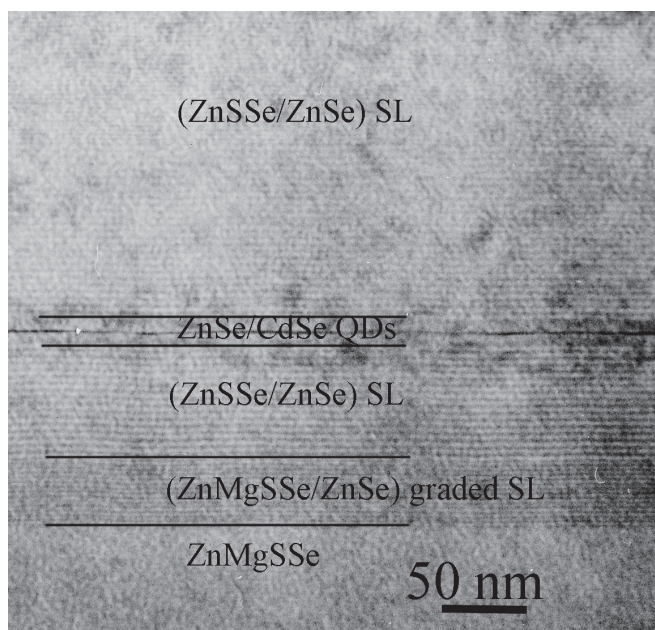


Рис.2. Изображение волноводной и активной области A^2B^6 лазерной ГС с одиночной плоскостью CdSe/ZnSe КТ. Изображение получено методом ПЭМ в геометрии поперечного сечения. Слои CdSe КТ и ZnSe КЯ выращены в режиме ЭПМ



Рис.3. Обновленная система молекулярно-лучевой эпитаксии STE35

источником одновременно S и Zn), а также источник Se с высокотемпературным разложителем и клапаном. Использовался прямой радиационный нагрев подложки. Гетероэпитаксиальный рост GaAs/ZnSe инициировался в режиме низкотемпературной ($T_s \approx 210^\circ\text{C}$) эпитаксии с повышенной миграцией атомов (ЭПМ). Для защиты поверхности буферного слоя GaAs от загрязнений элементами VI группы и сохранения реконструкции поверхности (2×4) As до начала МЛЭ-роста температура подложки повышалась до рабочего значения (т.е. до 210°C при ЭПМ) при закрытой главной заслонке и пониженной на 200°C относительно рабочего значения температуре источника ZnS. Описанная процедура начальной стадии гетероэпитаксии продемонстрировала возможность снижения плотности дефектов упаковки (ДУ) в лазерных ГС A^2B^6 на GaAs до уровня $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$.

В работах группы из ФТИ им. А.Ф.Иоффе представлены основные подходы к конструированию и выращиванию по методу МЛЭ волноводной и активной областей лазерных гетероструктур в системе ZnMgSSe с множественными плоскостями квантовых точек (КТ) CdSe или КЯ ZnCdSe. В частности, разработан метод прецизионной компенсации напряжений, вводимых в структуру несколькими активными областями КТ, за счет изменения среднего рассогласования по периоду решетки волноводных сверхрешеток ZnSSe/ZnSe с подложкой GaAs. Также был предложен способ уменьшения плотности неравновесных точечных дефектов в активной области лазерных структур A^2B^6 , который заключается в использовании режима ЭПМ при выращивании КЯ ZnSe, ограничивающей плоскостью КТ CdSe. Это привело к 20% снижению пороговой плотности мощности лазерной гетероструктуры с одиночной плоскостью КТ CdSe и асимметричным градиентным сверхрешеточным волноводом до рекордного значения $\sim 0,8 \text{ кВт/см}^2$ (300К).

Изображение активной области такой лазерной ГС, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в геометрии поперечного сечения, представлено на рис.2. На изображении хорошо различимы переменнотензионные волноводные сверхрешетки Zn(Mg)SSe с варьируемым периодом и толщиной и активная область на основе одиночной плоскости КТ CdSe в расширенной КЯ ZnSe. В качестве дальнейших шагов снижения пороговой плотности мощности лазерных гетероструктур A^2B^6 с КТ специалистам ФТИ им. А.Ф.Иоффе представляется перспективным

изменение режимов эпитаксиального роста ограничивающих и волноводных слоев лазерной ГС.

Сотрудники ФТИ им. А.Ф.Иоффе находятся в постоянной и тесной кооперации с инженерами-технологами производителя специального технологического оборудования ЗАО "НТО". Совместная работа дает возможность компании продолжать совершенствовать свое оборудование. Именно результаты длительной эксплуатации сложных систем позволяют специалистам оценивать необходимые изменения в конструкции, что обеспечивает непрерывное улучшение продуктов компании. В 2015 году ЗАО "НТО" модернизировало систему STE35 для роста материалов A^3B^5 (рис.3). Применение принципиально новой модернизированной ростовой камеры позволило решить сразу несколько ключевых задач:

- уменьшить количество портов для подачи азота. Для удобства обслуживания теперь все они расположены на крышке камеры;
- объединить две криопанели в одну для повышения эффективности потребления жидкого азота;
- увеличить количество портов для установки источников материалов;
- реализовать возможность полного визуального контроля за источниками материалов и заслонками за счет увеличения количества смотровых окон.

Тесная кооперация производителей и научных центров благоприятно сказывается на разработке отечественного оборудования для перспективных задач создания ЭКБ, а значит, будет способствовать реализации стратегии импортозамещения в России.

ЗАО "НТО"
194156, г. Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27 к.5 лит. А
www.semiteq.ru
sales@semiteq.ru
Тел.: +7 812 601 06 05