

Отзыв на автореферат диссертации Левина Романа Викторовича “Исследования и разработка технологии изготовления гетероструктур на основе антимонида галлия методом ГФЭМОС”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Диссертация Левина Р.В. посвящена разработке технологии изготовления эпитаксиальных полупроводниковых гетеро структур сложного состава на основе бинарного соединения GaSb и твердых растворов AlGaAsSb, GaInAsSb, анализу влияния условий роста на качество слоев, управлению легированием и шириной запрещенной зоны слоев, анализу новых соединительных p-n переходов для каскадных приборов.

Актуальность данного направления исследований обусловлена динамичным развитием нанотехнологий, направленных на создание целого ряда селективных и широкополосных оптоэлектронных приборов работающих в инфракрасном спектральном диапазоне. Актуальность темы в автореферате хорошо обоснована.

Цель работы сформулирована в названии диссертации и дополнена формулировкой трех основных решаемых задач, направленных на управление свойствами слоев и возможностью их использования в оптоэлектронных приборах.

К **научной новизне** отнесены 6 основных результатов. Четыре новых технологических, которые показывают возможности разработанной технологии и два важных практических результата подтвержденных патентами (одиночные глубокие квантовые ямы, напряженные сверхрешетки с пониженной Оже-рекомбинаций, соединительные низкоомные p-n с квантовыми точками).

Практическая значимость изложена в 6 формулировках. Из них наиболее значимыми является возможность создания высокоомных слоев GaSb с сопротивлением $> 400 \text{ ом.см}$ и создание технологии роста слоев $A^{III}B^V$ с управляемыми свойствами.

На защиту вынесены 4 **научных положения**, которые убедительно обоснованы в содержании работы.

В **первой главе** приведен обзор литературы в которой описаны основные характеристики GaSb и твердых растворов на его основе, свойства легирующих примесей, приведены основные методы эпитаксиального роста и свойства полупроводниковых слоев твердых растворов, сформулированы основные задачи диссертации.

Во **второй главе** изложены особенности технологии роста полупроводниковых слоев GaSb, обоснован выбор источников, режимов роста и легирования слоев. Высокое качество слоев подтверждено наличием узкого максимума рентгенодифракционных кривых качания (рис.1) вблизи рефлекса (004). Показаны области роста высокоомного и низкоомного слоев электронного и дырочного типов GaSb (рис.2,3).

В третьей главе описаны особенности технологии и свойства слоев твердых растворов изопериодных к GaSb. Это слои AlGaAsSb с шириной запрещенной зоны от 0,72 до 1,3 эВ и GaInAsSb с шириной запрещенной зоны от 0,3 до 0,72 эВ. Приведены количественные данные о концентрации и подвижности носителей заряда в слоях при разных соотношениях молекулярных потоков. Данные хорошо иллюстрированы, интересны данные о профилях распределения ширины запрещенной зоны по толщине для образцов с изменяющейся шириной запрещенной зоны (рис.7). Состав и характеристики нелегированных твердых растворов собраны в таблице 1. Приведены данные по интенсивности ФЛ и найдена оптимальная величина несоответствия постоянных решетки эпитаксиальных слоев и подложки, составляющая величине $\sim 0,1\%$, что является важным результатом.

Четвертая глава представляет результаты проведенных разработок фотопреобразователей на основе GaSb и его твердых растворов. В спектральном диапазоне 700 – 1600 нм приведены характеристики диодов. Приведены параметры новых соединительных p-n переходов с микрокристаллическими включениями в области пространственного заряда в которых отсутствует потенциальный барьер. По этой причине ВАХ таких структур аналогичны резисторам до токов величиной ~ 50 А/см², что в несколько раз больше чем в туннельных p⁺⁺-n⁺⁺ переходах. Впервые методом ГФЭМОС выращена гетероструктура n-GaSb/n-InAs/p-GaSb с одиночной квантовой ямой и измерены спектры электролюминесценции структур. Обсуждаются две характерных полосы излучения в меза-диодах. Определены условия выращивания и измерены спектры ФЛ слоев с чередующимися парами слоев InAs/GaSb разной толщины.

Сформулированы 10 основных результатов, которые логично вытекают из представленных глав диссертации. Отмечу, что в диссертации подробно прослеживается управляемость, гибкость технологии и связь технологических параметров с электрофизическими параметрами структур. Выявлены условия роста приводящие к возможности выращивания высокоомных слоев GaSb, легированных слоев с заданной концентрацией примеси, конверсии типа проводимости, четырех компонентных эпитаксиальных слоев твердых растворов на основе GaSb со встроенными тянущими полями в базовой области для увеличения квантовой эффективности светодиодов, варизонных слоев разного состава.

Технологические работы проведены на достаточно современной ростовой установке типа AIX200. Свойства выращенных структур исследованы современными физическими методами исследований, такими как дифракция рентгеновского излучения, рентгеноспектральным анализом, ФЛ, методом Холла.

Разработанная технология роста полупроводниковых структур полезна при изготовлении целого ряда оптоэлектронных приборов.

Основные результаты работы **опубликованы** в периодических научных изданиях и патентах РФ входящих в перечень ВАК (12 публикаций), **изложены в тезисах докладов и трудах конференций** (24 ссылки) и хорошо известны специалистам.

Автореферат дает достаточно полное представление о содержании диссертации.

В качестве замечаний по автореферату диссертации отмечу следующие:

1. На рис.2а в области соотношения молярных потоков от 0 до 20 показаны зависимости концентрации дырок в слоях от величины потока при двух температурах. При соотношении потоков $\sim 2,5$ можно видеть группу точек с концентрацией $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Не понятно, почему эти точки выпадают из приведенных выше зависимостей.

2. На рис.3 при соотношении потоков ~ 15 показана выпавшая из представленных зависимостей точка с концентрацией на порядок меньше. Что это? Случайный выброс, или важная закономерность.

3. На рис.9а несколько смущает подпись на оси ординат. Мне кажется, что в подписи нужно убрать %.

4. На стр.6 в разделе **структура и объем диссертационной работы** ошибочно приведено 5 глав вместо описанных четырех.

5. Отсутствуют данные о плотности ростовых дефектов в слоях и однородности электрических характеристик по площади выращенных слоев.

Отмеченные недостатки, не умаляют достоинств диссертационной работы. Диссертация является законченным научным исследованием, содержащим существенное продвижение в решении **важной и современной проблемы** физики полупроводников. Считаю, что **диссертация удовлетворяет** требованиям, ВАК РФ, предъявляемым к работам, представляемым на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, а ее автор, **Левин Роман Викторович** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Д.ф.м.н., внс

А.П.Ковчавцев

Подпись А.П.К

Ученый секретарь

полупроводник

С.А. Аржанникова