

Федеральное агентство научных организаций России
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
**Южный научный центр
Российской академии наук
(ЮНЦ РАН)**



пр. Чехова, 41 г. Ростов-на-Дону, 344006
тел. (863) 266-64-26
тел./факс (863) 266-56-77
e-mail: ssc-ras@ssc-ras.ru

ОГРН 1036168007105 ИНН/КПП 6168053099/616301001
29.07.2016 № 17 900 2115-798

№ №

ОТЗЫВ

ведущей организации Южного научного центра Российской академии наук на диссертацию **Левина Романа Викторовича** на тему: «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.

Актуальность работы

Полупроводниковые материалы, содержащие сурьму, являются перспективными материалами для оптоэлектронных приборов ближней и средней ИК-области спектра. На подложках GaSb возможно изготавливать твёрдые растворы согласованные по постоянной кристаллической решетки с подложкой в широком диапазоне составов с $E_g \sim 0.28-1.6$ эВ. На основе полупроводниковых материалы, содержащие сурьму возможно изготавливать различные гетероструктуры I и II типа с необходимыми энергетическими барьерами. Квантоворазмерные гетероструктуры в системе материалов AlGaInAsSb/GaSb существенно расширяют диапазон ИК-области спектра до 15 мкм и позволяют изготавливать как селективные, так и широкополосные фотоприемники.

Во всем мире для массового производства оптоэлектронных приборов используется газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (ГФЭМОС). В России для производства антимонидных материалов используется в основном жидкофазная эпитаксия, которая обладает рядом недостатков: площадь подложек не более 6 см^2 , воспроизводимость параметров по площади не более 50%, сложно получить наноструктуры с толщиной слоев менее 100 нм. ГФЭМОС лишена этих недостатков. Однако для широкого использования этого метода при выращивании материалов на основе антимонида галлия необходимо было проведение комплекса физических и технологических исследований.

Диссертационная работа Левина Р.В., включающая как разработку технологии изготовления антимонидных материалов, так и исследования свойств изготовленного материала, приборных структур и приборов на их основе. В связи с этим актуальность работы не подлежит сомнению, как с научной, так и с практической точки зрения.

Новизна исследований и полученных результатов

Как показал анализ диссертационной работы Левина Р.В., наибольшую значимость и научную новизну имеют следующие результаты:

1. Разработана технология изготовления методом ГФЭМОС и проведены исследования параметров слоев GaSb, изготовленных в широком интервале соотношения молярных потоков элементов V и III групп 1-50. Как показано в работах, при больших потоках Sb в газовой фазе изменяется характер кристаллических дефектов, уменьшается концентрация вакансий Sb и концентрация носителей тока.

2. Показано, что в эпитаксиальных слоях GaSb легированных кремнием (уровень легирующей примеси в газовой фазе постоянен $5.55 \cdot 10^{-8}$ моль/мин) концентрация дырок снижается с ростом соотношения V/III с $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при V/III=1 до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при V/III=20, увеличение соотношения V/III более 30

приводит к изменению типа проводимости с дырочного на электронный, при этом концентрация электронов возрастает с $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $V/III=30$ до $1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $V/III=50$.

3. Были изготовлены нелегированные и легированные Si эпитаксиальные слои GaSb с удельным электрическим сопротивлением более $400 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

4. Разработана технология изготовления изопериодных твердых растворов с непрерывным изменением состава ($E_g \sim 0.43-1.3 \text{ эВ}$, 300К) с различным градиентом изменения E_g от 0.1 эВ/мкм до 0.85 эВ/мкм который обеспечивает градиент тянущего электрического поля в эпитаксиальном слое в диапазоне $0.1-0.85 \text{ В/мкм}$ и изготовлен макет ФЭП на основе таких структур.

5. Экспериментально показана возможность изготовления методом ГФЭМОС квантоворазмерных слоев и изготовлены наногетероструктуры с глубокой квантовой ямой и напряженные свехрешётки InAs/GaSb, в такого рода материалах могут быть снижены потери связанные с Оже-рекомбинацией, вследствие изменения зонной структуры.

6. Впервые предложены и экспериментально изготовлены методом ГФЭМОС новые соединительные p-n переходы для каскадных приборов с микрокристаллическими включениями в области пространственного заряда с сопротивлением $\sim 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ вплоть до плотностей тока $\sim 50 \text{ А/см}^2$.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты работы могут быть использованы при синтезе GaSb твердых растворов на их основе методом ГФЭМОС оптоэлектронных приборов в ОАО «Светлана» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Сатурн» (г. Краснодар), ФГУП НИИ «Полюс» (г. Москва), ОАО «НПП «Квант» (г. Москва), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), так как оборудование

этих предприятий позволяет перепрофилирование на изготовление оптоэлектронных приборов на основе антимоноидных материалов.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов, базирующихся на применении методов теоретического моделирования и сопоставления их с экспериментальными данными, не вызывает сомнения и подтверждается их апробацией в научных статьях и докладах на конференциях.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Работа является законченным научным исследованием и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне. Проведенные исследования можно охарактеризовать как обоснованные научно-технические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач в области создания оптоэлектронных приборов ИК-области спектра.

По теме диссертации имеется 6 печатных работ в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 3 патента РФ, 3 заявки на изобретение РФ и 24 докладов на международных и отечественных конференциях.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация изложена доходчивым языком, оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций, содержит достаточное количество рисунков и таблиц, текст сопровождается ссылками на публикации.

Однако по диссертационной работе можно сделать следующие замечания, касающиеся полноты и четкости изложения материала по отдельным вопросам.

- В работе исследовались структурные характеристики слоев GaSb полученных в широком диапазоне соотношений молярных потоков. Построена зависимость FWHM рентгенодифракционной кривой качания от

соотношения молярных потоков V/III , которая имеет параболический вид с характерным максимумом при $V/III=20$. Но в работе нигде не говорится о зависимости морфологии поверхности слоев GaSb полученных в широком диапазоне соотношений молярных потоков, как изменяется морфология с изменением соотношения;

- В работе были получены нелегированные и легированные Si эпитаксиальные слои GaSb с удельным электрическим сопротивлением более 400 Ом·см, но нет упоминания о приборах на их основе;

- В работе получены новые соединительные p-n переходы для каскадных приборов с микрокристаллическими включениями в области пространственного заряда. Возможно ли их применение для каскадных солнечных элементов;

- Кроме того, текст диссертации и автореферата содержат опечатки, а так же орфографические и синтаксические ошибки.

Однако перечисленные замечания не снижают новизну и качество проведенной работы, а диссертационная работа Левина Р.В. в целом оставляет благоприятное впечатление.

Автореферат диссертации и публикации соискателя достаточно полно и правильно отражают основное содержание работы.

Таким образом, диссертация Левина Р.В. является завершённой научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важных прикладных задач в области разработки технологии изготовления методом GaSb материалов для оптоэлектронных приборов ИК-области спектра. Диссертация соответствует требованиям П.9 положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 21.04.2016), а её автор Левин Роман Викторович, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертация и отзыв рассмотрены и обсуждены на заседании комплексного отдела механики, химии, физики и нанотехнологий Южного научного центра Российской академии наук 28 июля 2016 года протокол №3.

Заведующий комплексным отделом
механики, химии, физики
и нанотехнологий ЮНЦ РАН,
доктор физико-математических наук

В.В. Калинин

Заведующий отделом
нанотехнологии,
солнечной энергетики
и энергосберегающих
технологий ЮНЦ РАН,
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор

Л.С. Лукин

Ведущий научный сотрудник
отдела нанотехнологий,
солнечной энергетики
и энергосберегающих
технологий ЮНЦ РАН,
доктор физико-математических наук

С.Н. Чеботарев

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южный
научный центр Российской академии наук»,
тел: 8(8635) 255 459; e-mail: ls@matn.ru