

На правах рукописи

РОМАНОВ Вячеслав Витальевич

**Создание и исследование наногетероструктур
в узкозонных системах на основе арсенида индия.**

(01.04.10 - Физика полупроводников)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель: д.ф.-м. н., вед. научн. сотр., Моисеев Константин Дмитриевич
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук)

Официальные оппоненты:
д.ф.-м.н., проф., Иванов - Омский Владимир Иванович,
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе
Российской академии наук)

д.ф.-м.н., проф., Сидоров Валерий Георгиевич,
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Санкт-Петербургский Государственный Политехнический университет")

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)"

Защита состоится 19 декабря 2013 г. в 11-30 на заседании диссертационного совета Д 002.205.02
при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте
имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук
по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан 18 ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
совета Д 002.205.02
д.ф.-м.н., проф.



Сорокин Л.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Наногетероструктуры в узкозонных полупроводниковых системах на основе соединений InAs привлекают пристальный интерес исследователей тем, что на их базе могут быть созданы как источники, так и приемники излучения для средней инфракрасной (ИК) области спектра 2-5 мкм. Данный спектральный диапазон актуален для задач лазерной диодной спектроскопии газов и молекул, систем лазерной дальнометрии, волоконных линий связи третьего поколения, медицинских применений, а также для систем обнаружения взрывоопасных материалов и задач экологического мониторинга, поскольку в области длин волн 2-5 мкм располагается большинство линий поглощений промышленных и природных газов: метан (2.3 мкм, 3.3 мкм), углекислый газ (2.65 мкм, 4.27 мкм), угарный газ (2.34 мкм, 4.67 мкм), аммиак (2.25 мкм, 2.94 мкм) и другие неорганические и органические вещества [1,2]. Как правило, гетероструктуры включают в себя эпитаксиальные слои различных полупроводниковых материалов, которые могут отличаться шириной запрещенной зоны, показателем преломления и т.д., что открывает новые возможности для улучшения характеристик оптоэлектронных приборов. Мировое признание ключевого вклада гетероструктур в прорывные технологии и в современное развитие науки и техники было отмечено присуждением Нобелевской премии академику Ж.И. Алферову в 2000 году [3].

Современное развитие технологий наращивания полупроводниковых соединений, таких как газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и молекулярно пучковая эпитаксия (МПЭ) расширило материальную базу для получения гетероструктур. Данные технологии позволяют создавать наногетероструктуры на основе рассогласованных по параметру кристаллической решетки эпитаксиальных слоев, что дает мощный импульс в создании оптоэлектронных приборов, содержащих множественные квантовые ямы и сверхрешетки. На примере источников когерентного излучения в диапазоне длин волн 1-2 мкм было показано [4], что применение квантовых ям и сверхрешеток, по сравнению с объемными слоями, обеспечивает улучшение характеристик лазера. Необходимость в создании высокоэффективных приборов среднего ИК-диапазона 3-5 мкм, работающих при комнатной температуре, стимулировала ряд новых физических подходов к конструкции активной области светоизлучающей структуры путем применения нанобъектов пониженной размерности таких, как квантовые нити, квантовые штрихи или квантовые точки. На сегодняшний день достигнуты значительные успехи в получении и исследовании гетероструктур с квантовыми точками в системах InAs/GaAs и InAsSb/InP [5,6]. На основе данных наногетероструктур были созданы лазеры, работающие в режиме непрерывной генерации в диапазоне длины волны 1.3–2 мкм с низким пороговым током при комнатной температуре.

Для продвижения в область спектра свыше 3 мкм необходимо использовать в качестве матричных слоев узкозонные полупроводниковые материалы такие, как GaSb и InAs. Однако до настоящего времени на основе наногетероструктур с квантовыми точками в узкозонных системах InSb/GaSb и InSb/InAs оптоэлектронные приборы не были созданы. Наиболее длинноволновой из упомянутых систем является система InSb/InAs, в которой квантовые точки InSb образуют с матричным слоем InAs гетеропереход II типа [7]. Поэтому, особый интерес представляет разработка технологии получения наногетероструктур с объектами

пониженной размерности (квантовыми точками, квантовыми штрихами и др.) в узкозонных системах на основе соединений InAs. Также, актуальным является изучение структурных, транспортных и люминесцентных свойств полученных наногетероструктур для создания светоизлучающих приборов среднего ИК-диапазона свыше 3 мкм.

Цель работы. Целью настоящей работы являлись разработка технологии эпитаксиального синтеза методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений наногетероструктур II типа в узкозонной системе твердых растворов на основе арсенида индия для возможного применения их в создании оптоэлектронных приборов спектрального диапазона 3-5 мкм.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- разработка технологии выращивания бинарных (InAs, GaSb), тройных (InAsSb, GaSbAs) и четверных (InAsSbP) твердых растворов методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и получение эпитаксиальных слоев GaSbAs и InAsSbP предельного состава, изопериодных с подложкой InAs;
- исследование структурных, гальваноманнитных и люминесцентных свойств полученных гетероструктур II типа GaSbAs/InAs и установление их зонных энергетических диаграмм;
- разработка технологии получения квантовых штрихов и квантовых точек InSb на поверхности матрицы бинарного InAs и многокомпонентного твердого раствора InAsSbP;
- исследование влияния технологических условий выращивания, химии поверхности матрицы на плотность, размеры и геометрию формы квантовых объектов;
- изучение электролюминесцентных свойств полученных гетероструктур на основе квантовых объектов в узкозонной матрице и создание прототипа светоизлучающего прибора, работающего в области свыше 3 мкм при комнатной температуре.

Научная новизна.

1. Впервые получены эпитаксиальные слои $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x$, изоморфные с подложкой InAs(001), в диапазоне составов $0.06 < x < 0.35$ методом МОГФЭ при атмосферном давлении.

2. Был предложен оригинальный качественный подход при расчете зависимостей положения потолка валентной зоны и дна зоны проводимости от состава тройного соединения с учетом прогибов в валентной зоне и зоне проводимости для тройного твердого раствора GaSbAs, определен коэффициент прогиба ($b=1.42$ eV) для зависимости ширины запрещенной зоны тройного твердого раствора $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x$ от состава при $T=17$ К и построена зонная энергетическая диаграмма гетероструктуры GaAsSb/InAs.

3. Определена область составов тройного твердого раствора $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x$ ($0 < x < 0.15$), при котором гетеропереход II типа $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x/\text{InAs}$ является разьединенным, и установлено существование на гетерогранице электронного канала с высокой подвижностью электронов ($\mu=2000$ см²/В·с при $T=77$ К).

4. Разработана технология получения эпитаксиальных слоев четверного твердого раствора InAsSbP, изоморфных с подложкой InAs(001), с максимальным содержанием фосфора в твердой фазе, которые могут выступать в качестве матричных слоев для квантовых точек и квантовых штрихов InSb.

5. Впервые получены квантовые точки и квантовые штрихи InSb на поверхности InAs(001) с плотностью до 7×10^9 см⁻² методом МОГФЭ в условиях атмосферного давления.

6. Исследовано влияние условий процесса эпитаксии (скорости осаждения, температуры подложки, и т.д.) на плотность, размеры и геометрию форм квантовых точек InSb.

7. Определены факторы влияющие (определена роль поверхностной диффузии адатомов) на эффект самоорганизации квантовых точек на поверхности InAs(001) и оценено влияние химии поверхности InAs(Sb,P) на характер формирования квантовых точек.

8. Впервые наногетероструктуры II типа на основе квантовых штрихов InSb, помещенных в матрицу InAs(Sb,P), были получены методом МОГФЭ.

Практическая ценность работы:

- Разработана методика получения тройного твердого раствора GaSbAs на подложке InAs методом МОГФЭ;
- Впервые разработана методика получения квантовых точек InSb на поверхности матрицы InAs(Sb,P) методом МОГФЭ;
- В наногетероструктуре с квантовыми штрихами InSb, помещенными в матрицу n-InAs, при комнатной температуре обнаружена электролюминесценция на длине волны 3.65 мкм, обусловленная излучательными переходами с участием локализованных состояний квантовых штрихов, что позволило использовать их для создания прототипа светоизлучающего прибора для среднего ИК-диапазона.

На защиту выносятся следующие **научные положения:**

1. Гетеропереход $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x/\text{InAs}$ является разьединенным II типа в области составов тройного твердого раствора $0 < x < 0.15$, где на одиночной гетерогранице p-GaSb_{1-x}As_x/p-InAs существует полуметаллический канал, в котором подвижность электронов, локализованных в самосогласованной квантовой яме на интерфейсе со стороны InAs, меняется с $2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ до $350 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ в зависимости от увеличения содержания мышьяка в тройном твердом растворе.
2. Эпитаксиальные слои в системе твердых растворов $\text{InAs}_{(1-y-x)}\text{Sb}_y\text{P}_x$, изоморфные с подложкой InAs, могут быть получены во всем интервале существования составов $0 < x < 0.7$ и $x/y=2.6$ при наращивании методом МОГФЭ при низких температурах (менее 510°C) с использованием третбутиларсина как источника мышьяка в газовой фазе.
3. Массивы квантовых точек InSb с поверхностной плотностью до $7 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$ и средними размерами 4 нм в высоту и 20 нм в основании образуются на поверхности узкозонной матрицы на основе соединений InAs при наращивании методом МОГФЭ при условии реализации эффекта самоорганизации согласно механизму Срански-Крастанова.
4. Состав узкозонной многокомпонентной матрицы на основе эпитаксиальных слоев InAsSbP, изоморфных с подложкой InAs, при заданной ориентации (001) наряду с условиями эпитаксиального роста определяет характер формирования объектов пониженной размерности InSb. Поверхностная плотность квантовых точек, изменение геометрии квантовых точек и трансформация квантовых штрихов в квантовые точки обусловлены доминирующим механизмом формирования данных объектов (Вольмера-Вебера или Странски-Крастанова).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих всероссийских и международных конференциях: The 14th International Conference of Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-14), (Metz, France 2008); 7th International Conference on Semiconductor Micro- and Nanoelectronics (ICSMN-2009), (Yerevan, Armenia, 2009); 14th International Conference on Narrow-Gap Semiconductors and Systems (NGS-14), (Sendai, Japan, 2009); The 16th International Conference on Crystal Growth (ICCG-16), (Beijing, China, 2010); The 10th International Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices (MIOMD-X), (Shanghai, China, 2010); Intern. Sci.-Tech. and Appl. Conf. on opto-nanoelectronics and renewable energy sources, (Varna, Bulgaria, 2010); 7th International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LDSD 2011), (Telchac, México, 2011); 4th International conference on NANO-structures SElf-Assembly (NanoSEA 2012), (S. Margherita di Pula, Italy, 2012); The 11th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging (XTOP 2012), (Saint-Petersburg, Russia, 2012); 9th International Conference on Semiconductor Micro- and Nanoelectronics (ICSMN-2013), (Yerevan, Armenia, 2013); 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS20) and 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS16), (Wroclaw, Poland, 2013), 21st Annual International Conference on Composites or Nano-Engineering (ICCE-21), (Tenerife, Spain, 2013), XI Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники-2013», (Санкт-Петербург, 2013).

Публикации. Основные результаты проведенных исследований опубликованы в 6-ти печатных работах в изданиях, рекомендованных ВАК, и 13-ти публикациях в материалах всероссийских и международных конференций, список которых приведен в конце диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Она состоит из 173 страниц текста, 70 рисунков, 10 таблиц список литературы из 142 работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, проведенных в данной работе, сформулирована ее цель, изложены основные результаты работы и представлены к защите научные положения.

Первая глава носит обзорный характер и посвящен литературным данным по достижениям в области создания наногетероструктур II типа в узкозонных системах на основе твердых растворов арсенида индия. Подчеркнута перспективность создания наноструктур с квантовыми точками в системе InSb/InAs. В **параграфе 1.1** рассмотрена возможность получения эпитаксиальных слоев твердых растворов в системах In-As-Sb-P и Ga-In-Sb-As, согласованных по параметру решетки с подложкой InAs, которые могут быть использованы в качестве матричных слоев для нанообъектов (квантовых нитей, квантовых штрихов, квантовых точек) на основе InSb. Далее, в **параграфе 1.2**, было уделено внимание механизмам формирования трехмерных островков в гетеросистемах, рассогласованных по параметру кристаллической решетки. На примере гетеросистем InAs/GaAs и Ge/Si рассмотрены закономерности зарождения островков, которые определяются балансом поверхностных энергий осаждаемой пленки и подложки на границе раздела пленка–

подложка, а также зависят от внутренней энергии объема островка и объема осаждаемого материала. Разрастание островков может происходить в направлении последовательного изменения формы кластера от простой пирамиды к сложной куполообразной с более высоким значением отношения высоты к размеру основания островка. Отмечено, что если рост протекает по механизму Странски-Крастанова, то роль упругих деформаций и их релаксация в островках становится доминирующей над тенденцией их коалесценции, вплоть до установления квазиравновесного состояния, в котором нанобъекты достигают определенных размеров и формы [8]. Более пристальное внимание эффекту самоорганизации при формировании объектов пониженной размерности было удалено в **параграфе 1.3**, где приведен обзор работ посвященных формированию nanoостровков InSb в матрице InAs. Показано, что при стандартном процессе наращивания узкозонных материалов на основе соединений InSb как методом МПЭ, так и методом МОГФЭ плотность массивов когерентных квантовых точек на поверхности InAs не превышало $6 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Только применение специальных методик выращивания, таких как усовершенствованная миграционная эпитаксия в методе МПЭ или попеременное осаждение InSb в методе МОГФЭ [9,10], позволяли получать массивы квантовых точек с большей плотностью (10^{10} - 10^{11} см^{-2}). В свою очередь использование достаточно простого и недорогого метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) дает возможность получать массивы квантовых точек InSb на подложке InAs с начальной плотностью 10^{10} см^{-2} [11]. В **параграфе 1.4** была рассмотрена возможность формирования гетеропереходов II типа в системах твердых растворов In-As-Sb-P и Ga-In-Sb-As, отличительной особенностью которых является пространственное разделение электронов и дырок и их локализация в самосогласованных квантовых ямах на гетерогранице. Установлено, что гетеропереход GaInAsSb/InAs в изопериодных гетероструктурах будет ступенчатым для составов четверного твердого раствора, близких к InAs, и разъединенным для составов, близких к GaSb. Однако до настоящего времени детальных исследований одиночных гетеропереходов GaSbAs/InAs на основе тройных твердых растворов, которые также могут быть разъединенными, не проводилось. Актуальность исследования соединения GaSbAs заключается в том, что он является предельным по составу для системы твердых растворов GaSb-InAs, изопериодных подложке InAs, с максимальным значением ширины запрещенной зоны, и образует гетероструктуру I типа в системе квантовых точек GaSbAs/InSb, близкую к зонной диаграмме системы GaSb/InSb. Также, показана актуальность использования в качестве матричного слоя четверного твердого раствора InAsSbP, так как применение данного соединения позволяет управлять энергетической диаграммой наногетероструктур на основе квантовых точек InSb.

Вторая глава является методической и содержит описание технологии получения методом МОГФЭ бинарных (InAs, GaSb), тройных (InAsSb, GaSbAs) и четверных (InAsSbP) твердых растворов [A1,A14]. В **параграфе 2.1** приведено описание экспериментальной установки МОГФЭ. Основные особенности осаждения полупроводниковых соединений из газовой фазы с металлоорганическими соединениями в горизонтальном реакторе при условии атмосферного давления представлены в **параграфе 2.2**. Рассмотрено влияние динамики газового потока в реакторе на процесс кристаллизации полупроводникового соединения. Предварительно проведена оценка влияния температуры в реакторе на процесс эпитаксиального роста. В **параграфе 2.3** представлены материалы для эпитаксиального

наращивания методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, используемые в данной работе. Традиционными источниками третьей группы для роста эпитаксиальных слоев на основе GaSb и InAs являются триметилгаллий (TMGa), триэтилгаллий (TEGa), триметилиндий (TMIn) и триэтилиндий (TEIn). В нашей работе мы применяли в качестве источника галлия TEGa, так как парциальное давление паров триэтилгаллия меньше по сравнению с TMGa и слабо зависит от температуры источника, что облегчает контроль количества TEGa, поступающего в реактор. В качестве источника индия применялся TMIn, поскольку по сравнению с TEIn триметилиндий менее склонен к образованию паразитных реакций с гидридными газами в реакторе МОГФЭ атмосферного давления.

В **параграфе 2.4** приведены основные результаты по наращиванию GaSb и InAs, где оценивалась влияние температуры эпитаксии и состав газовой фазы (соотношение реагентов пятой к третьей группе), напускаемых в реактор, на скорость роста и морфологию поверхности бинарных соединений. Были определены оптимальные условия роста данных бинарных соединений. Исследования зависимости скорости роста InAs от температуры показали, что применение третбутиларсина (tBAs) в качестве источника мышьяка позволяет эффективно осаждать бинарное соединение при более низких температурах эпитаксии ($T < 500$ °C), чем в случае, когда в качестве источника пятой группы используется арсина (AsH_3). Надо заметить, что при наращивании наноразмерных объектов (квантовых точек, квантовых штрихов и др.), обогащенных InSb, для предотвращения их деформации необходимы низкие температуры осаждения матричного слоя. В **параграфе 2.5** экспериментально оценено влияние состава газовой фазы, соотношения реагентов пятой к третьей группе, напускаемых в реактор, и температуры эпитаксии на скорость роста и состав тройных твердых растворов GaAsSb и InAsSb. Было показано, что расчеты, выполненные на основе термодинамической модели, позволяют предсказать состав твердых растворов $InAs_{1-x}Sb_x$ и $GaSb_{1-x}As_x$, полученных при температурах роста, близких к 600 °C при условиях значительного преобладания концентрации компонентов пятой группы над третьей ($V/III > 10$). Определены условия ввода поправок, учитывающие неполное разложение источников роста при низких температурах осаждения, а также особенности геометрии реактора в случае, когда отношение V/III в газовой фазе близко к единице.

В **параграфе 2.6** показана возможность получения эпитаксиальных слоев в системе твердых растворов $InAs_{1-y-x}Sb_yP_x$, изоморфных с подложкой InAs, во всем интервале существования составов $0 < x < 0.7$. Изучено влияние состава газовой фазы, содержащей TMIn, TMSb, PH_3 , AsH_3 или tBAs, и температуры эпитаксии на состав эпитаксиального слоя InAsSbP. Отмечено, что содержанием фосфора в твердой фазе можно эффективно управлять путем изменения количества tBAs в газовой фазе при фиксированных потоках TMSb и PH_3 , при этом соотношение Sb/P в твердой фазе оставалась практически постоянным, то есть параметр кристаллической решетки четверного твердого раствора менялся не значительно за счет эффекта самоорганизации соединения, изоморфного с подложкой InAs. Контролируемое дозирование мышьяка при его достаточно низкой концентрации в твердой фазе объясняется отсутствием паразитных реакций с участием tBAs и эффективным разложением данного металлоорганического соединения при низких температурах эпитаксии по сравнению с гидридными соединениями мышьяка (AsH_3). В результате, эпитаксиальные слои твердого

раствора InAsSbP с высоким содержанием фосфора ($x > 0.5$) были получены в режиме планарном 2D-роста.

Третья глава посвящена исследованию структурных и люминесцентных свойств эпитаксиальных слоев GaSbAs, выращенных на подложке InAs, определению зависимости ширины запрещенной зоны полученного тройного твердого раствора от состава, а также, исследованию гальваномагнитных свойств гетероструктур II типа p-GaSbAs/p-InAs и установлению зонной энергетической диаграммы гетероперехода GaSbAs/InAs [A2,A3]. В **параграфе 3.1** представлены результаты анализа структурного качества твердых растворов GaSb_{1-x}As_x ($x < 0.35$), полученных методом МОГФЭ. Было показано, что кристаллическое совершенство эпитаксиальных слоев GaSb_{1-x}As_x сохранялось для составов в интервале $0.04 < x < 0.15$. Достаточно хорошее качество данных тройных твердых растворов GaSbAs было подтверждено результатами исследований фотолюминесцентных свойств (**параграф 3.2**). Спектры фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных слоев GaSb_{1-x}As_x для составов $x < 0.15$ ($\Delta a/a < 0.5\%$) при T=17 K содержали одиночную узкую (FWHM=16 мэВ) полосу излучения в

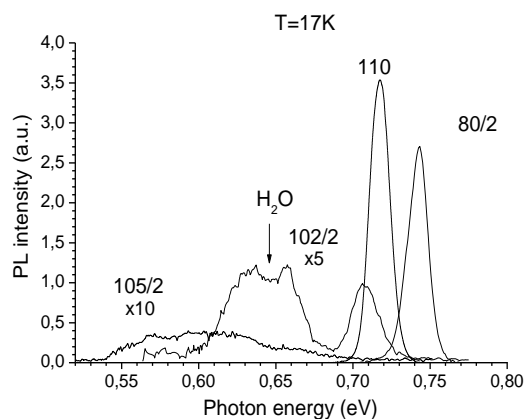


Рис.1 Фотолюминесцентные спектры эпитаксиальных слоев GaSb_{1-x}As_x

интервале энергий фотона 0.5-0.8 эВ, максимум которой смещался в сторону меньших энергий с увеличением содержания мышьяка в твердом растворе, что отвечало уменьшению энергии ширины запрещенной зоны эпитаксиального слоя (рис.1). С возрастанием рассогласования более 0.5% в диапазоне значений $0.5\% < \Delta a/a < 1\%$, в спектре ФЛ появляется вторая полоса излучения, которая может быть приписана рекомбинационным переходам на глубокие акцепторные состояния $V_{Ga}GaSb$, что обусловлено наличием большого количества структурных дефектов, возникающих в результате сильного напряжения в

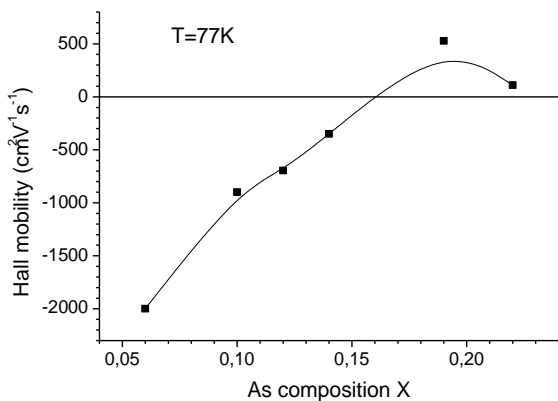


Рис.2 Изменение холловской подвижности от состава тройного твердого раствора в гетеропереходе p-GaAs_{1-x}Sb_x/p-InAs.

эпитаксиальном слое GaSbAs. Основываясь на результатах исследований ФЛ, при математическом описании зависимости ширины запрещенной зоны от состава твердого раствора GaSb_{1-y}As_y (**параграф 3.3**) был определен коэффициент прогиба зависимости $b=1.42$ eV при низких температурах $T < 20$ K, что хорошо согласуется с данными (1.43 eV), полученным другими авторами [12].

Параграф 3.4 посвящен исследованию транспортных свойств одиночных изотипных гетероструктур p-GaSb_{1-x}As_x/p-InAs. На рисунке 2 представлена зависимость холловской подвижности от содержания мольной доли мышьяка в тройном твердом растворе GaSb_{1-x}As_x.

Из рисунка видно, что для составов $x < 0.15$ наблюдались отрицательные значения холловской подвижности до $2000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что было обусловлено существованием электронного канала на гетерогранице $p\text{-GaSb}_{1-x}\text{As}_x/p\text{-InAs}$. Ранее электронный канал в структурах на основе материалов с дырочным типом проводимости наблюдался в разъединенных гетеропереходах II типа $p\text{-GaInSbAs}/p\text{-InAs}$ [13]. При этом он был частью полуметаллического канала, который возникал благодаря пространственному разделению электронов и дырок и их локализации в самосогласованных потенциальных ямах по обе стороны одиночной гетерограницы. С возрастанием количества мышьяка в тройном твердом растворе $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x$ величина холловской подвижности по абсолютному значению падала и при значениях $x > 0.15$ в гетероструктуре $p\text{-GaSb}_{1-x}\text{As}_x/p\text{-InAs}$ начинала преобладать дырочная проводимость. Наблюдаемая смена знака холловской подвижности происходит за счет исчезновения полуметаллического канала на гетерогранице, вследствие трансформации гетероперехода II типа от разъединенного к ступенчатому.

В параграфе 3.5 был предложен новый подход к расчету зонного спектра тройного твердого раствора GaAsSb с учетом прогибов на зависимостях энергетических зон от состава. Было показано, что зависимость положения дна зоны проводимости тройного твердого раствора отлична от линейной зависимости и имеет прогиб с параметром $b_c = 0.85$, а величина прогиба для потолка валентной зоны $b_v = 0.58 \text{ эВ}$ была почти в полтора раза меньше. Полученная величина соотношения b_c/b_v хорошо согласуется с результатами расчетов, выполненных с использованием аппроксимации локальных плотностей. На основании выполненного моделирования была продемонстрирована

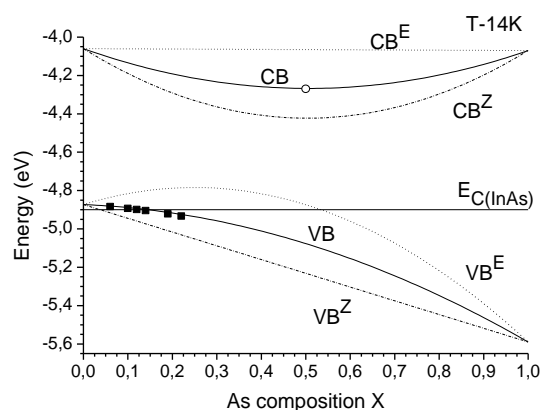


Рис.3 Расчетные зависимости положения дна зоны проводимости и потолка валентной зоны тройного твердого раствора $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x$ от состава

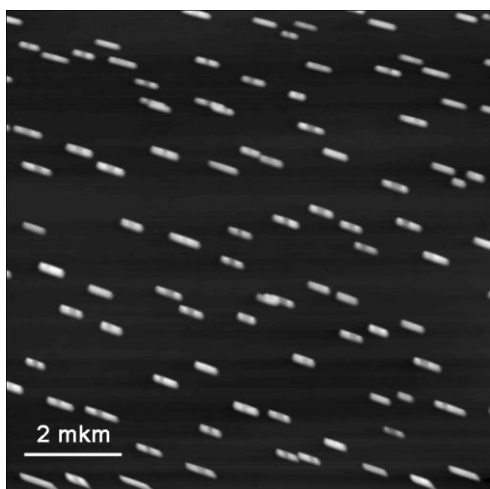


Рис. 4 АСМ изображения $10 \times 10 \text{ мкм}$ полученных nanoостровков InSb при температуре $440 \text{ }^\circ\text{C}$ и скорости подачи TMIIn реактор 8 мкмоль/мин .

трансформация гетероперехода $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x/\text{InAs}$ (рис.3). Было установлено, что одиночные гетероструктуры $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x/\text{InAs}$ в интервале составов $x < 0.15$ представляют собой разъединенные гетеропереходы II типа.

Четвертая глава посвящена изучению гетероструктур, содержащих наноразмерные объекты (квантовые точки и квантовые штрихи) InSb как наращенные на поверхности матрицы, так и помещенные в матрицу на основе соединений, обогащенных арсенидом индия [А4-А19]. В начале данной главы основное внимание было уделено исследованию влияния технологических условий роста (состава газовой фазы, температуры эпитаксии, времени напуска реагентов TMIIn и TMSb в реактор)

на формирование квантовых точек и квантовых штрихов InSb как непосредственно на поверхности открытой подложки InAs (001), так и на заранее наращенных эпитаксиальных слоях InAs (**параграф 4.1**) и InAsSbP (**параграф 4.2**). Исследование форм, размеров и плотности массивов квантовых штрихов InSb осажденных на бинарной поверхности InAs методом МОГФЭ показало, что в узкозонной системе InSb/InAs поверхностные кинетические процессы, играющие основную роль в эпитаксиальном росте квантовых штрихов InSb, зависят от качества поверхности данной матрицы. Если осаждение идет непосредственно на открытую подложку, то в качестве центров кристаллизации в основном выступают дефекты решетки, распределенные на поверхности подложки. При осаждении InSb на предварительно наращенный слой центрами кристаллизации выступали упорядочено расположенные моноатомные ступеньки эпитаксиального слоя. Квантовые штрихи формировались в условиях, когда диффузия адатомов по поверхности матричного слоя доминировала, над скоростью объемной диффузии через приповерхностный слой (рис.4). Средние линейные размеры штрихов составляли 500 нм в длину, 150 нм в ширину и 50 нм в высоту. При этом наблюдалась ориентация их в плоскости матрицы в одном из направлений [110], которое могло не совпадать с направлением потока газовой фазы.

Понижение температуры осаждения InSb на 20 °С приводило к уменьшению вклада миграции адатомов по поверхности матрицы InAs при формировании квантовых штрихов, и плотность штрихов возрастала на порядок (до 4×10^9 см⁻²).

Уменьшение диффузионной длины реагентов по поверхности приводило к уменьшению длины штрихов и появлению объектов с малыми размерами. В результате

наблюдалась трансформация квантовых штрихов в квантовые точки (рис.5,а). Гистограммы распределений по размерам квантовых точек InSb, осажденных на поверхности подложки InAs(001), показали, что нет четко выделенного среднего размера островков (рис.6,а). Размеры варьировались от 1 до 35 нм по высоте и от 5 до 100 нм в диаметре основания, а зависимость распределения экспоненциально спадала в направлении максимальных значений. Управляя составом поверхности матричного материала путем добавления к арсениду индия атомов сурьмы и фосфора и, тем самым, изменяя поверхностную энергию матрицы, были получены массивы квантовых точек с поверхностной плотностью 7×10^9 см⁻². При этом наблюдалась бимодальность в распределении по размерам: малые и большие точки InSb присутствовали одновременно на поверхности матрицы (рис.5,б). Из гистограмм были определены средние размеры малых квантовых точек: 4 нм по высоте и 20 нм в диаметре (рис.6,б). Наличие четко выраженного распределения для малых квантовых точек InSb

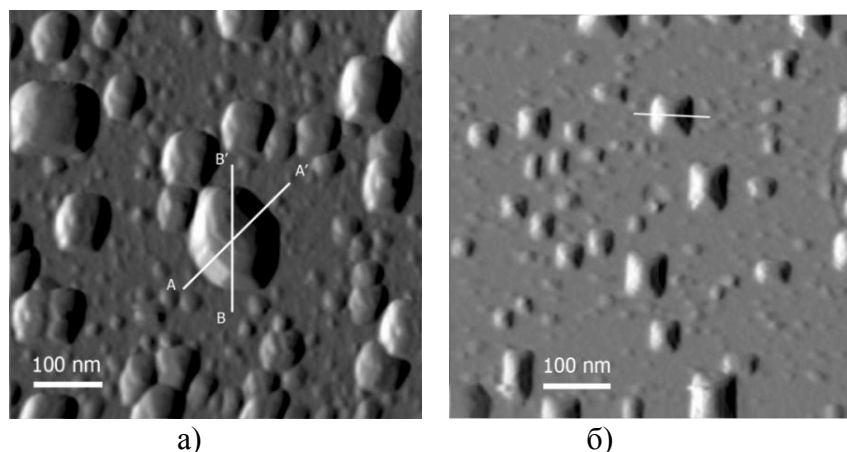


Рис.5 АСМ изображения поверхности и профили больших квантовых точек, осажденных на поверхностях InAs а) и InAsSbP б), с поверхностной ориентацией (001).

свидетельствовало о том, что формирование нанобъектов преимущественно протекало по механизму Странски-Крастанова.

В параграфе 4.3 отмечено различие в геометрических формах больших квантовых точек в зависимости от матричного слоя (см.рис.5). Непосредственно на поверхности InAs формируются квантовые точки с восьмиугольником в основании и с боковыми гранями $\{111\}$ и $\{201\}$. С увеличением высоты островка, верхние части боковых граней начинают формироваться в плоскостях $\{113\}$ и $\{307\}$, соответственно. Отношение высоты к диаметру составляет 1:3. Когда осаждение InSb производилось на поверхность четверного твердого раствора InAsSbP,

квантовые точки имели форму усеченной пирамиды с четырехугольником в основании, с боковыми гранями $\{201\}$ и верхним плато (001). В этом случае отношение высоты к диаметру составило 2:3. Аналогичное поведение

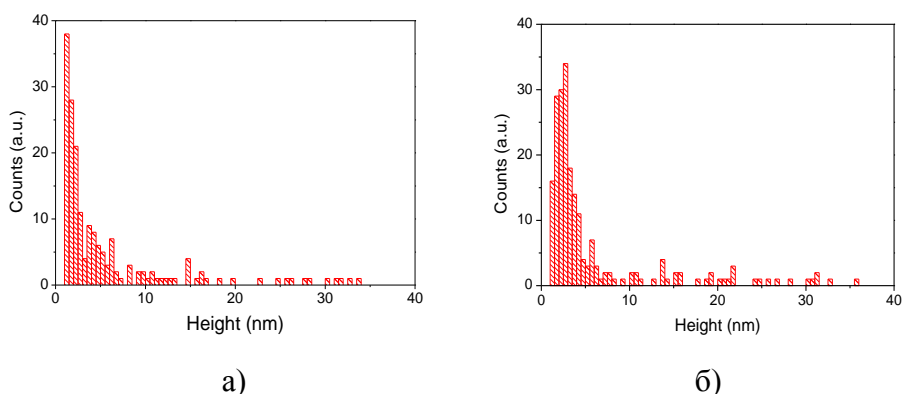


Рис.6 Распределения по высоте квантовых точек InSb осажденных на поверхности InAs (001) а) и InAsSbP (001) б).

в формировании квантовых точек ранее наблюдалось в хорошо изученных системах InAs/GaAs, InAs/InP, Ge/Si [14,15], что подтверждает общность физических подходов при формировании нанобъектов.

В параграфе 4.4 представлены результаты исследований электрических и электролюминесцентных свойств наногетероструктур II типа с квантовыми штрихами InSb, помещенными в матрицу n-InAs. Для изучения была выбрана гетероструктура с квантовыми штрихами, осажденными на эпитаксиальный слой InAs и зарощенными покрывающим слоем InAs толщиной порядка 0.4 мкм. Эпитаксиальные слои арсенида индия преднамеренно не легировались. На примере поведения вольтамперных характеристик было показано, что введение квантовых штрихов InSb в объем матрицы n-InAs вносит существенный вклад в транспортные свойства всей гетероструктуры. Впервые была предложена зонная энергетическая диаграмма наногетероструктуры II рода с квантовыми штрихами InSb, помещенными в матрицу InAs. Возрастание токов утечки было объяснено наличием локализованного уровня дырок квантовых штрихов InSb, который располагался в запрещенной зоне матричного слоя вблизи дна зоны проводимости InAs. На рисунке 7 штриховой линией изображено предполагаемое расположение уровня размерного квантования для дырок в квантовом штрихе InSb.

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) гетероструктуры SN-34/2.2 (см. табл.1), полученные при $T=77$ К, при прямом смещении содержали одиночную полосу излучения асимметричной формы с резким высокоэнергетическим краем и затянутым спадом в области низких энергий фотона (рис.8,а). Излучение появлялось при токе накачки 20 мА вблизи $\lambda=3.34$ мкм (0.371 эВ). При увеличении приложенного напряжения максимум полосы

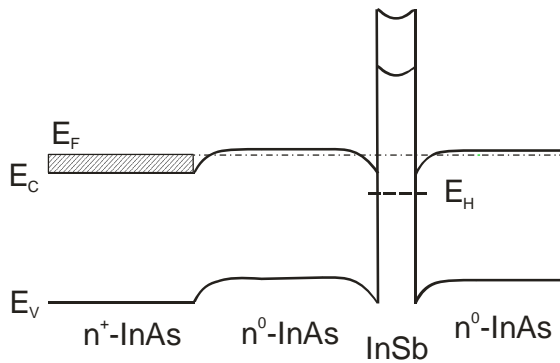


Рис.7 Схематическая зонная энергетическая диаграмма наногетероструктуры II рода с квантовыми штрихами InSb, помещенными в матрицу InAs, в термодинамическом равновесии.

сдвигался в сторону высоких энергий фотона до $\lambda=3.20$ мкм (0.388 эВ) при токе накачки свыше 100 мА, т.е. наблюдался так называемый «голубой» сдвиг. При обратном смещении (см. рис.8,б) «голубой» сдвиг максимума полосы ЭЛ был значительно меньше: с $\lambda=3.18$ мкм (0.390 эВ) до $\lambda=3.15$ мкм (0.394 эВ). При обоих смещениях электролюминесценция была положительная, а энергия фотона регистрируемого излучения была меньше ширины запрещенной зоны матрицы ($E_G(\text{InAs})=0.408$ эВ при $T=77$ К).

Табл.1. Послойный состав экспериментальных структур для исследований электрических и электролюминесцентных свойств.

	Подложка	Слой 1	Слой 2	Слой 3
SUB-2	n+-InAs(100):S	n ⁰ -InAs	-	-
SN-34/2.02	n+-InAs(100):S	-	InSb QDh	n ⁰ -InAs
SN-34/2.2	n+-InAs(100):S	n ⁰ -InAs	InSb QDh	n ⁰ -InAs

Наблюдаемые особенности электролюминесцентных свойств образца SN-34/2.2 указывают на тот факт, что мы имеем дело с излучательной рекомбинацией на гетерогранице II типа. В данном случае интерфейсные излучательные переходы между электронами из самосогласованной потенциальной ямы на гетерогранице II типа InSb/InAs и локализованными дырочными состояниями в квантовых штрихах InSb. Различие в ЭЛ при прямом и обратном смещении является следствием неравнозначности слоев матрицы n⁰-InAs. Следовательно, условия локализации электронов в самосогласованных потенциальных ямах различаются в зависимости от матричного слоя. В буферном (нижнем) слое изгиб в зоне проводимости арсенида индия вблизи гетерограницы InSb/InAs может быть меньше, чем в накрывающем (верхнем), в силу специфики формирования интерфейсных деформаций (рис.7). В этом случае, интерфейсная люминесценция при прямом смещении возникает при энергиях фотона меньших, чем при обратном смещении. Сильнолегированная подложка n⁺-InAs, которая может выступать в качестве дополнительного инжектора электронов, обеспечивает значительный приток носителей заряда в область рекомбинации, и интенсивность ЭЛ при прямом смещении больше, чем при обратном смещении, что и наблюдалось в эксперименте. Однако при больших уровнях накачки наблюдается насыщение на токовой зависимости интенсивности ЭЛ при прямом смещении, что может быть объяснено существованием дополнительного барьера на пути протекания тока в виде гомоперехода n⁺-n⁰, тогда как интерфейсная люминесценция при обратном смещении демонстрировала суперлинейную зависимость.

Наиболее поразительным фактом было наблюдение ЭЛ в гетероструктуре с квантовыми штрихами InSb, помещенными в изотипную матрицу n-InAs, при комнатной

температуре (рис.9). Сравнение спектров ЭЛ образцов полученных в режиме прямого

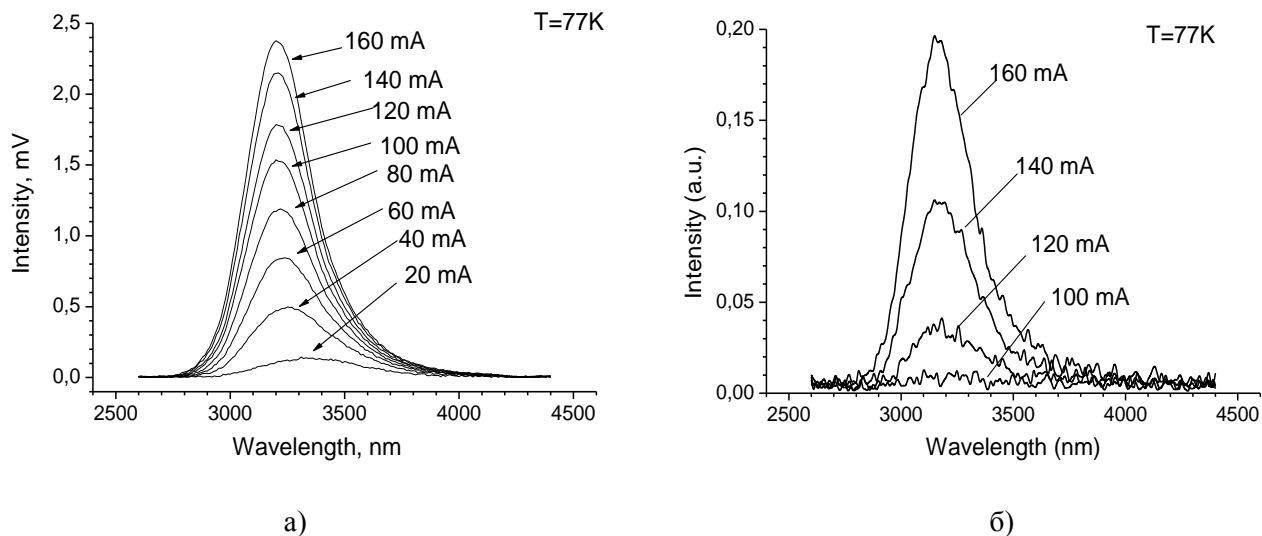


Рис. 8. Спектры электролюминесценции наногетероструктур II типа с квантовыми штрихами InSb сформированные в матрице n-InAs при а) - прямом и б) – обратном смещении.

смещения показало, что в одиночной n^+ - n структуре (SUB-2) излучение наблюдалось вблизи $\lambda=3.46$ мкм, которая соответствует межзонной излучательной рекомбинации в объеме нелегированного эпитаксиального слоя InAs с энергией перехода 0.358 эВ. Осаждение квантовых штрихов InSb непосредственно на гетерогранице n^+ -InAs/ n^0 -InAs (SN-34/2.02) приводило к подавлению люминесценции, тогда как в спектрах электролюминесценции наногетероструктур с нанобъектами сформированными в преднамеренно нелегированной матрице n-InAs (SN-34/2.2) было обнаружено излучение в области длин волн 3.62 мкм (0.3420 эВ).

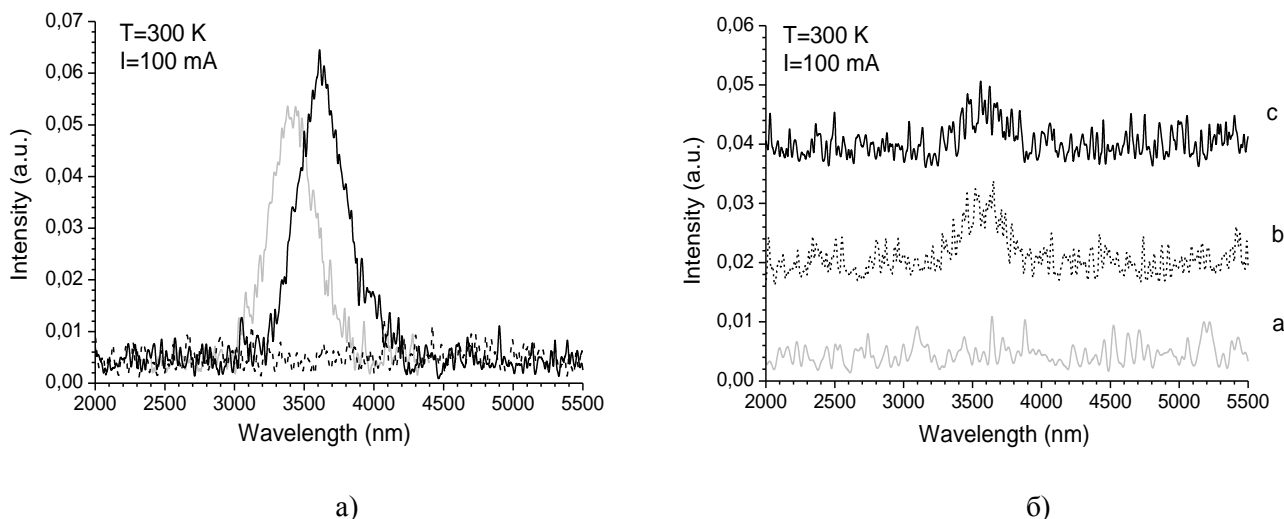


Рис. 9 Спектры электролюминесценции образцов SUB-2 (серая линия), SN-34/2.02 (штрихпунктирная линия), SN-34/2.2 (черная линия) при а) - прямом смещении и б)- обратном смещении.

Интерфейсная природа излучательной рекомбинации в гетероструктурах с нанобъектами InSb в матрице n-InAs подтверждается измерениями ЭЛ при обратном смещении, когда на подложку подается положительный потенциал. Появление

положительной люминесценции в образце SN-34/2.02 с максимумом излучения вблизи $\lambda=3.58$ мкм (0.346 эВ) обусловлено асимметрией n^+ -InAs/InSb/ n^0 -InAs гетероструктуры. При данной полярности прикладываемого внешнего электрического поля к разъединенной гетероструктуре II типа n^+ -InAs/InSb/ n^0 -InAs потенциальная яма для электронов со стороны нелегированного InAs заполняется инжектируемыми носителями, которые успешно рекомбинируют на дырочные состояния квантовых штрихов InSb. В наногетероструктуре с квантовыми штрихами InSb, помещенными в нелегированной матрице n^0 -InAs (SN-34/2.2), также наблюдается положительная люминесценция вблизи $\lambda=3.58$ мкм, которая совпадает с длиной волны излучения для гетероструктуры SN-34/2.02, но отличается от положения пика ЭЛ при прямом смещении. Надо отметить, что для образца SN-34/2.02 разница в положениях пиков ЭЛ наблюдалась также при температуре $T=77$ К. Следовательно, природа излучательных переходов для данной наногетероструктуры инвариантна относительно направления потока инжектируемых носителей. Наблюдаемая полоса излучения с энергией 0.342 eV при температуре 300 К демонстрирует возможность создания светоизлучающих приборов среднего ИК-диапазона ($\lambda>3.5$ мкм) на основе наногетероструктур с квантовыми штрихами InSb, где в качестве матрицы используются узкозонные твердые растворы на основе InAs.

В общем заключении к работе сформулированы наиболее важные результаты проведенных исследований, которые состоят в следующем:

- Разработана технология выращивания бинарных (InAs, GaSb), тройных (InAsSb, GaSbAs) и четверных (InAsSbP) твердых растворов, изопериодного с подложкой InAs, методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений.
- Получены эпитаксиальные слои тройного твердого раствора $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x$ в интервале составов $0.04 < x < 0.30$. Исследованы структурные, гальваномагнитные и люминесцентные свойства полученных гетероструктур II типа GaSbAs/InAs. Установлено, что твердый раствор GaSbAs, согласованный по параметру кристаллической решетки с подложкой InAs, образует разъединенный гетеропереход II типа $\text{GaSb}_{1-x}\text{As}_x/\text{InAs}$ для составов $x < 0.15$, который становится ступенчатым при $x > 0.15$.
- Получены эпитаксиальные слои $\text{InAs}_{(1-y-x)}\text{Sb}_y\text{P}_x$, изоморфные с подложкой InAs, во всем интервале существования составов $0 < x < 0.7$ и $x/y=2.6$ при температуре осаждения 510°C с использованием третбутиларсина как источника мышьяка в газовой фазе.
- Разработана технология получения квантовых точек InSb на поверхности матрицы бинарного InAs и многокомпонентного твердого раствора InAsSbP.
- Получены квантовые штрихи (до $4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) и квантовые точки ($7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) InSb на поверхности InAs (001) стандартным методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений в интервале температур $420\text{--}440^\circ\text{C}$.
- Исследовано влияние технологических условий выращивания, химии поверхности матрицы на плотность, размеры и геометрию формы квантовых объектов. Обнаружено, что повышение скорости осаждения InSb приводит к трансформации формы и размеров квантовых штрихов, в результате на поверхности матричного слоя

формируются квантовые точки. Установлено, что поверхностные кинетические процессы, играют основную роль в формировании данных нанобъектов.

- Получены квантовые точки, формирования которых протекало по механизму Странски-Крастанова на поверхности матрицы InAs(SbP). Обнаружено, что форма полученных квантовых точек зависит от состава матричного слоя.
- Созданы наногетероструктуры на основе квантовых штрихов, помещенных в матрицу n-InAs. Исследование электрических и электролюминесцентных свойств показало, что основной вклад в люминесцентные свойства гетероструктуры определяется излучательными рекомбинационными переходами электронов из матрицы InAs через разъединенную гетерограницу II типа на дырочные состояния в квантовых штрихах InSb.
- Создан прототип светоизлучающего прибора, работающего в диапазоне длин волн выше 3 мкм при комнатной температуре.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- A1. K Moiseev, V Romanov, T Voronina, T Lagunova, M Mikhailova, Yu Yakovlev “Type II GaAs_xSb_{1-x}/InAs ($x < 0.35$) heterojunction grown by MOVPE near a miscibility gap of the ternary solid solution“ The 14th International Conference of Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-14), 1-6 June 2008, Metz, France, pp. 245-246
- A2. В.В. Романов, К.Д. Моисеев, Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, Ю.П. Яковлев, “Разъединенный гетеропереход II-типа GaSb_{1-x}As_x/InAs ($x < 0.15$): эволюция зонной энергетической диаграммы тройного твердого раствора” ФТП, 2008, т.42, в.12, с.1434-1438.
- A3. K.D. Moiseev, V.V. Romanov, T.I. Voronina, T.S. Lagunova, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev “Type II GaAs_xSb_{1-x}/InAs ($x < 0.35$) heterojunction grown by MOVPE near a miscibility gap of the ternary solid solution” // Journal of Crystal Growth 310 (2008) 4846–4849
- A4. K.D. Moiseev, V.V. Romanov, M.P. Mikhailova, P.A. Dement’ev, A.N. Titkov, Yu.P. Yakovlev “InSb Quantum dots and quantum dashes grown on InAs-based matrix by MOVPE” // 7th International Conference on Semiconductor Micro- and Nanoelectronics (ICSMN-2009), July 3-5, 2009, Yerevan, Armenia, pp. 172-175
- A5. K. Moiseev, E. Ivanov, V. Romanov, M. Mikhailova, Yu. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodková, J. Pangrác, T. Šimeček “Intense interface luminescence in narrow-gap InAs-based type II heterostructures at room-temperature” // 14th International Conference on Narrow-Gap Semiconductors and Systems (NGS-14), 13-17 July 2009, Sendai, Japan, pp. 24-25
- A6. K.D. Moiseev, E. Ivanov, V. Romanov, M. Mikhailova, Yu. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodková, J. Pangrác, T. Šimeček “Intense interface luminescence in narrow-gap InAs-based type II heterostructures at room-temperature” // Physics Procedia, 3, 1189-1193 (2010)
- A7. M. Grigoryev, V. Romanov, E. Ivanov, M. Mikhailova, K. Moiseev, “Interface luminescence in InAs-based type II heterostructures” // Annual Proc. of Technical University of Varna, pp.83-87 (2010)
- A8. K. Moiseev, Ya. Parkhomenko, V. Romanov, P. Dement’ev, E. Ivanov, M. Mikhailova, “Quantum dots and quantum dashes in narrow-gap InSb/InAs(Sb,P) system”, The 16th International Conference on Crystal Growth (ICCG-16), 8-13 August 2010, Beijing, China, p. 103

- A9. K. Moiseev, Ya. Parkhomenko, V. Romanov, P. Dement'ev, E. Ivanov, I. Andreev, N. Bert, M. Mikhailova, Yu. Yakovlev, "InSb/InAs(Sb,P) quantum dot and quantum dash heterostructures for mid-infrared spectral range 3-5 μm ", The 10th International Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices (MIOMD-X), 5-9 September 2010, Shanghai, China, p. 96
- A10. M. Grigoryev, V. Romanov, E. Ivanov, M. Mikhailova, K. Moiseev, "Interface luminescence in InAs-based type II heterostructures", Intern. Sci.-Tech. and Appl. Conf. on opto-nanoelectronics and renewable energy sources, 22-23 September 2010, Varna, Bulgaria, pp. 83-87)
- A11. K. Moiseev, V. Romanov, P. Dement'ev, M. Mikhailova, "Quantum dots and quantum dashes in narrow-gap InSb/InAs(Sb,P) system" // J. Cryst. Growth **318**, 379-384 (2011)
- A12. Ya. Parkhomenko, V. Romanov, P. Dement'ev, E. Ivanov, V. Nevedomsky, M. Mikhailova, K. Moiseev "High-density InSb quantum dots in narrow-gap InAsSbP matrix", 7th International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LDS2011), May 22 - 27, Telchac – Nuevo Yucatán – México, p. 164
- A13. K. Moiseev, Ya. Parkhomenko, M. Grigoryev, V. Romanov, P. Dement'ev, E. Ivanov, V. Nevedomsky, N. Bert, M. Mikhailova, "High-density uniform InSb quantum dots in narrow-gap InAs(Sb,P) matrix", 4th International conference on NANO-structures SELF-Assembly (NanoSEA 2012), 2012, June 25-29, S. Margherita di Pula, Sardinia, Italy, p. 233
- A14. V.V. Romanov, E.V. Verkhovtceva, M.V. Baidakova, M.A. Yagovkina, K.D. Moiseev, "Structure study of InAsSbP epilayers with high phosphorus content grown on InAs substrate", The 11th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging (XTOP 2012), 15-20 September 2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 253
- A15. В.В. Романов, П.А. Дементьев, К.Д. Моисеев, "Особенности формирования наноразмерных объектов в системе InSb/InAs методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений" // ФТП, 2013, т. 47, в. 3, с. 420-425
- A16. K.D. Moiseev, V.V. Romanov, P.A. Dement'ev, E.V. Ivanov, "Narrow-gap nanoheterostructures in InSb/InAs(Sb,P) quantum dot system grown by MOVPE", 9th International Conference on Semiconductor Micro- and Nanoelectronics (ICSMN-2013), May 3-5, 2013, Yerevan, Armenia, pp. 113-116
- A17. Ya. Parkhomenko, V. Romanov, P. Dement'ev, N. Nevedomsky, N. Bert, E. Ivanov, K. Moiseev, "Type II InSb quantum dots in narrow-gap InAs(Sb,P) matrix: structural, electrical and luminescent properties", 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS20) and 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS16), 2013, July 1–5, Wroclaw, Poland, p. 367
- A18. K.D. Moiseev, Ya.A. Parkhomenko, V.V. Romanov, P.A. Dement'ev, V.N. Nevedomsky, E.V. Ivanov, "Self-assembled type II quantum dots in narrow-gap system InSb/InAs(Sb,P) for mid-infrared optoelectronics", 21st Annual International Conference on Composites or Nano Engineering (ICCE-21), 2013, July 21-27, Tenerife, Spain, pp. 178-179
- A19. К.Д. Моисеев, Я.А. Пархоменко, В.В. Романов, П.А. Дементьев, В.Н. Неvedомский, Н.А. Берт, Э.В. Иванов, «Особенности формирования квантовых точек InSb в узкозонной матрице InAs(Sb,P)», XI Российская конференция по физике полупроводников «Полупроводники-2013», Санкт-Петербург, 2013, 16-20 сентября, с. 287

Цитируемая литература.

1. A.I. Nadezhdinsky, A.M. Prokhorov // Proc. SPIE, 1992, v.1724, p.2
2. R.H. Pierson, A.N. Fletcher, E.S.C. Gantz. // Anal. Chem., 1956, v.28, p.1218-1239.
3. Алферов Ж.И. // Физика и жизнь, Изд.2-е, М.; СПб.: Наука, 2001
4. Алферов Ж.И. // ФТП, 1998, т.32, №1, с.3-18.
5. Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д. // ФТП, 1998, т.32, 385-410.
6. Y. Qiu, D. Uhl, S. Keo // Appl. Phys. Lett., v.84, (2004), 263-265
7. M.-E. Pistol, C. E. Pryor // J. Phys. Chem. C, 2011, v.115, 10931–10939
8. D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. (Chichester, John Wiley & Sons, 1999)
9. F. Hatami, S.M. Kim, H.B. Yuen, J.S. Harris // Appl. Phys. Lett., 2006, v.89, 133115.
10. S. Shusterman, Y. Paltiel, A. Sher, V. Ezersky, Y. Rosenwaks, // J. Cryst. Growth, 2006, v.291, 363-369.
11. A. Krier, X.L. Huang, A. Hammiche // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001, v.34, p. (874-878)
12. I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan // J. Appl. Phys., 2001, v.89, No.11, p. 5815-5875.
13. M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev, // Semicond. Sci. Technol., **19**, R109-R128 (2004).
14. G. Costantini, A. Rastelli, C. Manzano, P. Acosta-Diaz, G. Katsaros, R. Songmuang, O.G. Schmidt, H. v. Känel, K. Kern // J. Cryst. Growth, 278 (2005) 38-45
15. V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop.ev, D. Bimberg, // Phys. Rev. Lett., 75, 2968 (1995).