

Ушанов Виталий Игоревич

**Оптические свойства метаматериалов и структур на основе
AlGaAs/AsSb**

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в лаборатории физики аморфных полупроводников отделения твердотельной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской Академии Наук»

Научный руководитель:

Чалдышев Владимир Викторович, доктор физико-математических наук. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской Академии Наук», ведущий научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Вартанян Тигран Арменакович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (г. Санкт-Петербург), старший научный сотрудник

Тиходеев Сергей Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (г. Москва), профессор

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «__» _____ 2019 г. в ____ на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.02 при ФГБУН ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу: 194201, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН и на сайте <http://www.ioffe.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета ФТИ 34.01.02.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
ФТИ 34.01.02,
д.ф.-м.н.

Л. М. Сорокин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Наноплазмоника, представляющая одно из основных направлений нанофотоники, исследует оптические свойства металлических наноструктур и наночастиц, характеризующихся собственными возбуждениями электронной плазмы. При этом взаимодействие света с наноразмерными объектами приводит к возникновению ряда интересных явлений, к примеру, локализации и усилению оптических полей на субволновых масштабах, которые оказываются возможны за счет взаимодействия световой волны с поверхностными электромагнитными модами на металло-диэлектрических интерфейсах (поверхностными плазмонами) [1].

Развитие наноплазмоники сопряжено с разработкой новых метаматериалов – композиционных материалов, свойства которых обусловлены коллективными эффектами и взаимодействием света с составляющими их элементами, размеры которых существенно меньше длины волны излучения. Примером метаматериала может служить полупроводниковая или диэлектрическая среда, содержащая нановключения металлической фазы, которые существенно модифицируют ее диэлектрические и оптические свойства. Наночастицы могут располагаться в окружающей матрице хаотически или образовывать пространственно-упорядоченные структуры. В качестве основы для таких композитных плазмонных наноструктур могут применяться полупроводниковые твердые растворы GaAs или AlGaAs, широко используемые в современных оптоэлектронных приложениях. Непосредственное формирование композитной среды, при этом, оказывается возможным за счет применения промышленной технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Использование данной технологии при низких температурах (200 – 300 °С) в условиях высокого избытка атомов As являлось предметом интенсивных исследований [2] и показало, что выращенные таким образом материалы LTG-GaAs (LTG – low temperature grown) обладают рядом интересных свойств. Данные эпитаксиальные слои содержат сверхстехиометрический (избыточный) мышьяк [2], который захватывается в растущий слой, образуя антиструктурные дефекты, преимущественно в виде атомов замещения As_{Ga} , концентрация которых значительно превосходит равновесные значения и составляет ~ 1 ат. % [2]. Послеростовая термообработка при высокой температуре приводит к существенному понижению степени нестехиометричности материала, и за счет термоактивационных процессов диффузии и самоорганизации в метастабильной среде происходит формирование преципитатов полуметаллического As нанометровых размеров [2, 3]. При этом полупроводниковая матрица приобретает высокое кристаллическое качество, соответствующее стандартным режимам роста и формирования эпитаксиальной наноструктуры. Дополнительное легирование растущего слоя изовалентными примесями V группы, например, Sb и P позволяет модифицировать атомную структуру и размеры формирующихся нановключений [Аб, А7], позволяя, соответственно, управлять оптическими свойствами композиционной среды. Пространственное конфигурирование распределения наночастиц может быть достигнуто

при использовании модулированного легирования эпитаксиальной пленки, которое заключается в формировании тонких δ -слоев, служащих прекурсорами для преципитации металлических нановключений в процессе высокотемпературного отжига [4].

Одной из ключевых и перспективных особенностей наноструктур на основе LTG-GaAs являются ультракороткие времена рекомбинации фотовозбужденных носителей заряда (< 1 пс) [5]. При этом в нестехиометрическом случае в отсутствие металлических нановключений и дополнительного легирования донорами и акцепторами, основными центрами рекомбинации выступают антиструктурные дефекты As_{Ga}^+ и V_{Ga}^{3-} , эффективно захватывающие неравновесные электроны и дырки, соответственно. В процессе отжига концентрация данных дефектов значительно уменьшается, однако, время жизни носителей сохраняется по-прежнему малым вследствие смены доминирующего механизма рекомбинации [5]. Вероятными центрами рекомбинации в отожженном материале выступают металлические нановключения. Ультракороткие времена релаксации оптических свойств делают метаматериалы на основе LTG-GaAs и LTG-AlGaAs привлекательными для использования в быстродействующей опто- и наноэлектронике для создания приемников инфракрасного излучения, оптических переключателей и других устройств, работающих в терагерцовом диапазоне частот.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы являлось исследование взаимодействия света с новыми металло-полупроводниковыми метаматериалами и структурами на основе полупроводниковой матрицы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, содержащей массивы металлических нановключений As и AsSb, а также системами квантовых ям $GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}$ с металлическими нановключениями AsSbP.

Для этого были решены следующие **задачи**:

1. исследование особенностей отражения и экстинкции света в неупорядоченных системах наночастиц As и AsSb в окне прозрачности полупроводниковой матрицы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$;
2. изучение оптического отражения от брэгговской системы слоев нановключений AsSb в $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ в условиях формирования резонансной оптической моды, связывающей индивидуальные электронные возбуждения в нановключениях AsSb;
3. исследование оптического отклика экситонных состояний в квантовых ямах $GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}$, δ -легированных примесями Sb и P, в нестехиометрическом случае, а также после формирования нановключений AsSbP. Анализ влияния легирования эпитаксиального слоя элементами V группы на диффузионное размытие квантовых ям в процессе высокотемпературных отжигов.

Научная новизна

Научная новизна полученных результатов обусловлена тем, что в ходе работы впервые:

1. показано, что неупорядоченная система нановключений AsSb вызывает экстинкцию света в окне оптической прозрачности матрицы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, обусловленную

поглощением и рассеянием света плазмонными возбуждениями в AsSb, тогда как система наночастиц As не оказывает существенного влияния на оптические свойства композитной среды;

2. показано, что периодическая последовательность слоев металлических наночастиц AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ вызывает резонансное оптическое отражение за счет брэгговской дифракции света в системе плазмонных слоев;
3. исследованы и проанализированы особенности оптического отклика экситонных состояний в периодической системе квантовых ям $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025}$ в нестехиометрическом случае, а также после формирования систем нановключений AsSbP;
4. показано, что δ -легирование изовалентными примесями Sb и P упорядоченной системы квантовых ям $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025}$ обеспечивает подавление процессов взаимодиффузии в катионной подрешетке GaAs, ответственных за нарушение морфологии эпитаксиальных интерфейсов и деградацию экситонного отклика в системе квантовых ям.

Практическая значимость работы

Исследуемые металло-полупроводниковые метаматериалы на основе GaAs и AlGaAs представляют большой интерес для приборных приложений, поскольку демонстрируют усиленное взаимодействие света с веществом за счет собственных электронных возбуждений в системе металлических наночастиц. Технология роста таких композитных наноструктур полностью совместима с промышленной технологией молекулярно-лучевой эпитаксии, но дополнительно обеспечивает ультракороткие времена релаксации оптических характеристик, что делает такие метаматериалы перспективными для быстродействующих приборных приложений. Режимы легирования, используемые в процессе низкотемпературного роста, обеспечивают подавление процессов диффузионной деградации оптических свойств при последующих термообработках и позволяют сформировать класс температурно-стабильных наноструктур с квантовыми ямами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Неупорядоченная система металлических нановключений AsSb вызывает экстинкцию света в окне оптической прозрачности полупроводниковой матрицы $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Эта экстинкция согласуется с расчетной для плазмонного резонанса Фрелиха в системе нановключений AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. При объемной доле нановключений 0.5% коэффициент оптической экстинкции достигает $0.7 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$. Спектр оптической экстинкции соответствует резонансу Фрелиха с энергией 2.26 эВ и полной шириной на половине высоты 1.58 эВ
2. В периодической системе квазидвумерных слоев плазмонных нановключений AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ при выполнении условия брэгговской дифракции света в области резонанса Фрелиха возникает резонансная оптическая мода. В спектре нормального оптического отражения от системы 24 слоев AsSb с периодом 110 нм наблюдается

резонансный пик с энергией 1.60 эВ и амплитудой, достигающей 31% при объемной доле нановключений AsSb 0.5%.

3. Стабильность экситонного отклика в системе нестехиометрических квантовых ям $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025}$ при термообработках свидетельствует о подавлении взаимодиффузии атомов Al-Ga в процессе формирования нановключений AsSbP и сохранении морфологии эпитаксиальных интерфейсов. Эффективный коэффициент взаимодиффузии атомов Al-Ga составляет $(8.9 \pm 1) \times 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ для квантовых ям, выращенных при температуре 200 °С и отожженных при 750 °С.
4. Экситонный резонанс в нестехиометрических квантовых ямах $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025}$ до отжига является преимущественно однородно уширенным (2.49 мэВ при 6 К) вследствие ультракороткого времени рекомбинации носителей заряда (~ 264 фс). Формирование системы нановключений AsSbP вызывает увеличение ширины экситонной линии за счет появления неоднородного вклада вследствие локальных флуктуаций ширины квантовых ям вблизи преципитатов AsSbP.

Степень достоверности полученных результатов обусловлена использованием квалифицированными специалистами отработанной промышленной технологии роста исследуемых наноструктур, применением современных экспериментальных и расчетных методов исследования, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также сопоставлением результатов исследований с соответствующими данными из работ других авторов.

Личный вклад автора в работу заключался в участии в постановке целей и задач; проектировании и сборке экспериментальных установок и проведении исследований в рамках спектроскопии оптического отражения и пропускания, фотолюминесценции, модуляционного электроотражения света; анализе, интерпретации и моделировании полученных данных; написании статей и тезисов к конференциям; выступлении с устными и стендовыми докладами на конференциях.

Апробация работы

По основным результатам текущего диссертационного исследования были сделаны доклады на всероссийских и международных конференциях: 2012 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium CC: Optically Active Nanostructures (Boston, USA, 2012), XI Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013), Российская молодёжная конференция по физике и астрономии "Физика.СПб" (Санкт-Петербург, 2013), 15-ая всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2013), XLII научно-практическая конференция с международным участием «НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2013), 2013 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium L: Photonic and Plasmonic Materials for Enhanced Optoelectronic Performance (Boston, USA, 2013), VIII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики 2014» (Санкт-Петербург, 2014), Российская молодёжная конференция

по физике и астрономии "Физика.СПб" (Санкт-Петербург, 2014), 2014 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium L: Optical Metamaterials and Novel Optical Phenomena Based on Nanofabricated Structures (Boston, USA, 2014), Школа-конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN 2015" (Санкт-Петербург, 2015), XII Российская конференция по физике полупроводников (Звенигород, 2015), XI Международная конференция молодых учёных и специалистов «Оптика 2015» (Санкт-Петербург, 2015), 17-ая Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2015), XIX Symposium "Nanophysics & Nanoelectronics" (Nizhny Novgorod, Russia, 2015), 2015 Materials Research Society Fall Meeting. Symposium HH: Optical Metamaterials—From New Plasmonic Materials to Metasurface (Boston, USA, 2015), 23rd International symposium "Nanostructures. Physics and Technology" (Saint-Petersburg, Russia, 2015), XX Symposium "Nanophysics & Nanoelectronics", (Nizhny Novgorod, Russia, 2016), 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), (Saint-Petersburg, Russia, 2017), 25th International Symposium "Nanostructures physics and technology", (Saint-Petersburg, Russia, 2017), XIII Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 2017), X международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики-2018» (Санкт-Петербург, 2018), International conference "Frontiers of 21st century physics and Ioffe Institute", (Saint-Petersburg, Russia, 2018), XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2019).

Публикации

По результатам диссертационного исследования опубликовано 7 работ в рецензируемых журналах, индексируемых Scopus и Web of Science и входящих в перечень ВАК, а также 22 тезиса докладов, представленных на российских и международных конференциях. Полный список публикаций представлен в конце работы.

Объем и структура работы

Диссертационное исследование состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы с 51 рисунком и 3 таблицами. Список литературы содержит 218 наименований.

Основное содержание работы

Во введении диссертационной работы приведено обоснование актуальности темы исследования, поставлены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и значимость, обоснованы достоверность результатов и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения об апробации работы.

В первой главе представлен обзор литературы по тематике оптических свойств полупроводниковых и композиционных металло-полупроводниковых наноструктур. Изложены особенности оптического отклика объемных материалов GaAs и AlGaAs, а также экситонных возбуждений в квантовых ямах (КЯ) GaAs; кратко рассмотрено взаимодействие света с резонансными брэгговскими структурами в условиях экситон-поляритонного резонанса. Приведены общие сведения об оптических свойствах композиционных метаматериалов, содержащих массивы металлических нановключений As и AsSb в полупроводниковой матрице GaAs, и представлены способы их формализации в рамках приближения эффективной среды и в модели Максвелла Гарнетта. Дополнительно рассмотрены особенности получения таких композиционных наноструктур с помощью метода LTG-МЛЭ с учетом послеростовых термообработок. Представлены способы управления распределением металлических нановключений в объеме эпитаксиальной пленки, а также возможности модификации их микроструктуры.

Во второй главе в разделе 2.1 изложены детали используемой технологии МЛЭ, спецификации образцов, а также результаты исследования их микроструктуры методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновской дифракции (РД). Образцы представляли собой сильно нестехиометрический эпитаксиальный слой LTG- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, выращенный при низкой температуре (200 °С), обеспечивающей захват избыточного количества мышьяка в концентрации $\sim 1\%$ [2]. В процессе роста эпитаксиальная пленка подвергалась опциональному однородному или периодическому легированию изовалентной примесью Sb. Послеростовой отжиг при температурах 400 – 750 °С обеспечивал формирование неупорядоченных массивов металлических нановключений As (образец ВР2441) и AsSb (образец ВР2442) или периодической решетки слоев наночастиц AsSb в объеме $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Период расположения слоев $\delta\text{-Sb}$ в случае модулированного легирования составлял 110 нм; количество периодов равнялось 12 и 24 (образцы ВР2444 и ST1279, соответственно). Дополнительно были выращены образцы, представляющие периодические системы из 5 КЯ LTG- $(\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025})$ шириной 11.7 нм, подвергнутые однородному и δ -легированию примесями Sb и P. Цель сложного профиля легирования заключалась в подавлении взаимодиффузии в катионной подрешетке и сохранении резких экситонных особенностей при отжигах при 400 – 750 °С. ПЭМ-изображения исследуемых образцов приведены на рисунке 1 (исследование микроструктуры выращенных образцов методом ПЭМ было выполнено Н. А. Бертом и В. Н. Неведомским)

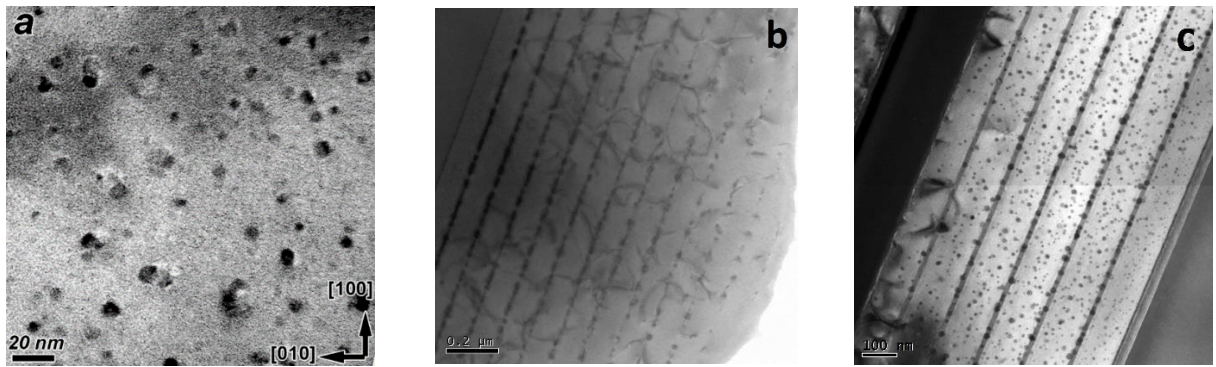


Рисунок 1. Изображения микроструктуры образцов в поперечном сечении, полученные методом ПЭМ, с неупорядоченной (а) и периодической (б) системами наночастиц AsSb в $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ (температура отжига $600\text{ }^{\circ}C$), а также периодической системы КЯ $GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}$ с наночастицами AsSbP, термообработанной при $750\text{ }^{\circ}C$.

В разделе 2.2 представлены детальные описания экспериментальных методик спектроскопии оптического отражения и пропускания, модуляционной спектроскопии электроотражения света, использованных для исследования взаимодействия света с выращенными наноструктурами. Дополнительно приведен формализм анализа спектральных линий электроотражения. В разделе 2.3 представлен формализм численного моделирования оптических констант полупроводниковой матрицы AlGaAs, используемый при расчете спектров оптического отражения и поглощения в композиционных системах As- и AsSb- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. Кратко изложен метод матриц переноса для моделирования спектров оптического отражения периодических слоистых наноструктур AsSb- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$.

В третьей главе представлены результаты исследования взаимодействия света с композиционными системами As- и AsSb- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ в спектральном диапазоне, соответствующем окну ее оптической прозрачности.

Детальное рассмотрение взаимодействия света с неупорядоченными массивами нановключений As и AsSb в $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ в рамках спектроскопии оптического отражения приведено в разделе 3.1. На рисунке 2 представлены спектры нормального отражения в данных наноструктурах. Экспериментально показано слабое влияние формирования системы нановключений As на спектры оптического отражения матрицы $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, приводящее к незначительной модификации картины интерференции Фабри-Перо в окне оптической прозрачности. Система нановключений AsSb демонстрирует существенное взаимодействие с электромагнитным излучением, обеспечивающее снижение амплитуды интерференционных особенностей более чем в два раза вследствие поглощения и рассеяния света. Наблюдаемые особенности в спектрах оптического отражения для данных образцов позволяют сделать предположение о близости резонансной энергии плазмонных возбуждений в AsSb к окну прозрачности полупроводникового материала $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. Следует отметить, что в референтном образце (BP2443), выращенном методом МЛЭ при стандартных условиях, и не содержащем систем нановключений металлической фазы, эффектов, деструктивно влияющих на картину интерференции света в окне прозрачности матрицы, не наблюдалось.

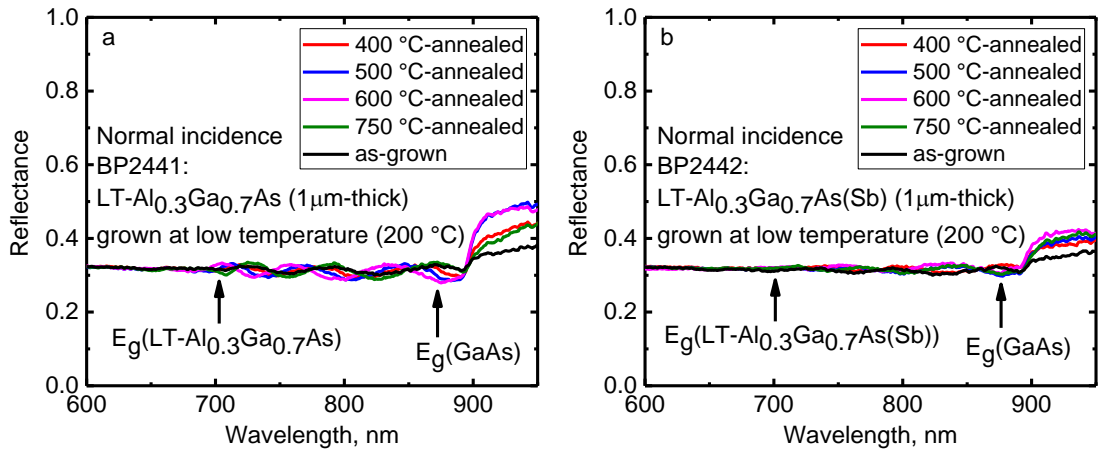


Рисунок 2. Спектры нормального оптического отражения в неупорядоченных системах нановключений As (а) и AsSb (б) в $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. Различные кривые соответствуют разным температурам послеростового отжига.

В разделах 3.2 и 3.3 обсуждаются особенности оптической экстинкции в указанных композиционных системах As- и AsSb- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. На рисунке 3а приведены соответствующие экспериментальные спектры коэффициента экстинкции света в сравнении с данными для референтного образца, не содержащего систем металлических наночастиц.

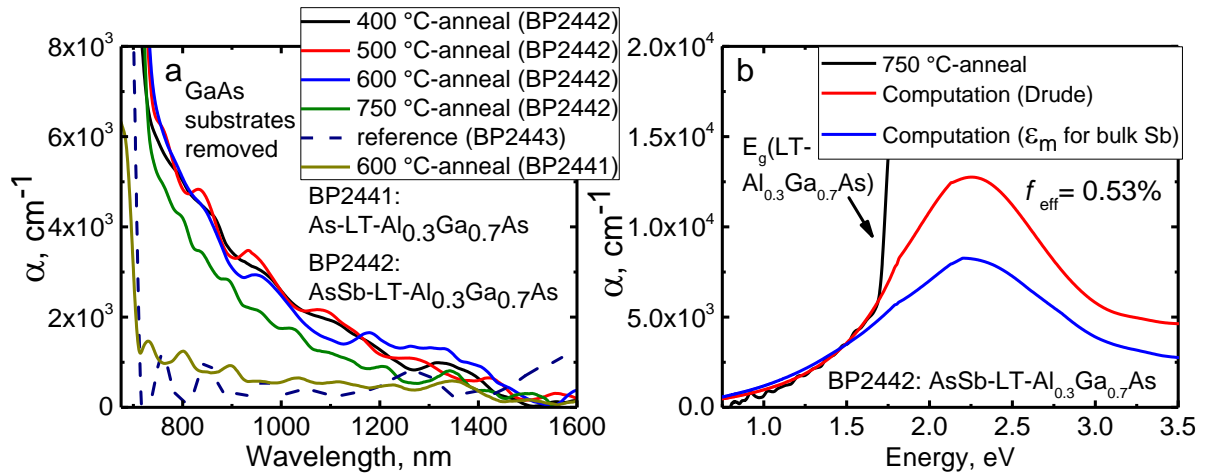


Рисунок 3. (а): спектры коэффициента оптической экстинкции в референтном образце, а также неупорядоченных системах нановключений As и AsSb в $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$. (б): сравнение экспериментального и расчетных спектров коэффициента экстинкции света, полученных в рамках теории Ми с использованием диэлектрической функции наночастиц AsSb, вычисленной по модели Друге или взятой из справочника для объемного материала Sb [6].

Оптическая экстинкция в образце с системой наночастиц AsSb показывает значительное взаимодействие света с композиционной средой в окне прозрачности $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ и существенно превышает таковую для системы нановключений As. Приведенные спектры характеризуются широкими бесструктурными хвостами

поглощения и рассеяния света и не демонстрируют точек экстремума в исследуемом диапазоне, что, по-видимому, связано с тем фактом, что резонансные энергии плазмонного поглощения и рассеяния света рассматриваемыми наночастицами оказываются больше энергии края фундаментального поглощения полупроводникового материала $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Коэффициент оптической экстинкции вблизи края фундаментального поглощения $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ в системе нановключений AsSb достигает $0.7 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$, тогда как для наночастиц As данное значение не превышает $0.15 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$.

Феноменологическое описание наблюдаемых особенностей оптической экстинкции в неупорядоченной системе $\text{AsSb}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ было выполнено по теории Ми [7] с использованием величины объемной доли наночастиц AsSb в образце, эффективное значение которой составило 0.53%. Диэлектрическая проницаемость наночастиц AsSb рассчитывалась в рамках модели Друде, подгоночными параметрами при использовании которой являлись параметр затухания и резонансная плазмонных возбуждений для свободных наночастиц AsSb в вакууме. С учетом высокой концентрации Sb в материале наночастиц (более 90%), а также присущей им ромбоэдрической структуры $A7$ после отжига при $750 \text{ }^\circ\text{C}$, характерной для объемных материалов V группы периодической таблицы Менделеева [A6, A7], в качестве их диэлектрической функции в расчете также рассматривалось табличное представление диэлектрической проницаемости объемного материала Sb из [6]. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов приведено на рисунке 3б.

Численное моделирование коэффициента оптической экстинкции в системе $\text{AsSb}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ позволило идентифицировать широкий пик поглощения и рассеяния света с резонансной энергией 2.26 эВ и полной шириной на половине высоты 1.58 эВ. Соответствующие эффективные резонансные параметры плазмонных возбуждений в свободных наночастицах AsSb в вакууме, полученные в рамках модели Друде, равнялись: $\hbar\omega_{p_{vac}} = 13.6 \text{ эВ}$ и $\tau = 0.43 \text{ фс}$. Результаты численного расчета коэффициента экстинкции света с использованием различных подходов к моделированию диэлектрической проницаемости наночастиц AsSb демонстрировали хорошее согласие с экспериментальными данными.

В главе 4 приведены результаты исследования особенностей резонансного отражения света в периодических системах нановключений AsSb в матрице $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Количество плазмонных слоев AsSb в образцах составляло 12 и 24, а номинальный период их расположения равнялся 110 нм. Численное моделирование полученных оптических спектров было выполнено с помощью метода матриц переноса, учитывающего резонансные параметры плазмонных возбуждений в системе нановключений AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, полученные в главе 3.

В разделе 4.1 изложены результаты экспериментальных исследований оптического отражения в периодических системах $\text{AsSb}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ для различных углов падения и поляризаций света. На рисунке 4 приведены соответствующие данные для случая нормального оптического падения. Сравнение с экспериментальными данными по нормальному отражению света в неупорядоченных системах $\text{AsSb}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (глава 3)

показывает, что наличие пространственной периодичности в распределении металлических наночастиц AsSb приводит к формированию пика резонансного отражения света, сопровождающегося сателлитными осцилляциями в окне прозрачности матрицы $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

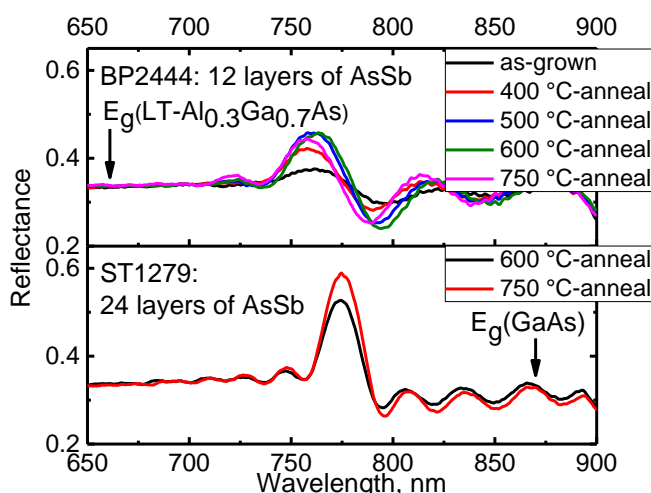


Рисунок 4. Экспериментальные спектры коэффициента нормального оптического отражения в периодической системе 12 и 24 слоев нановключений AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Различные кривые соответствуют различным условиям термообработки образцов.

При термическом отжиге, обеспечивающем формирование периодической системы слоев нановключений AsSb, а также их дальнейший рост, наблюдается появление и увеличение амплитуды главного резонансного пика. Для образца, содержащего 12 периодов, соответствующие значения амплитуд пиков отражения составили: 14% – для отжига при 400 °C, 20% – при 500 °C, 22% – при 600 °C и 19% – при 750 °C. Для образца, содержащего 24 слоя $\text{AsSb-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, амплитуды пиков резонансного отражения света равнялись 23 и 31% для термообработок при 600 и 750 °C, соответственно.

Исследование оптического отражения было обобщено на углы падения света 7.5 – 85° для s- и p-поляризаций, соответственно (рисунок 5).

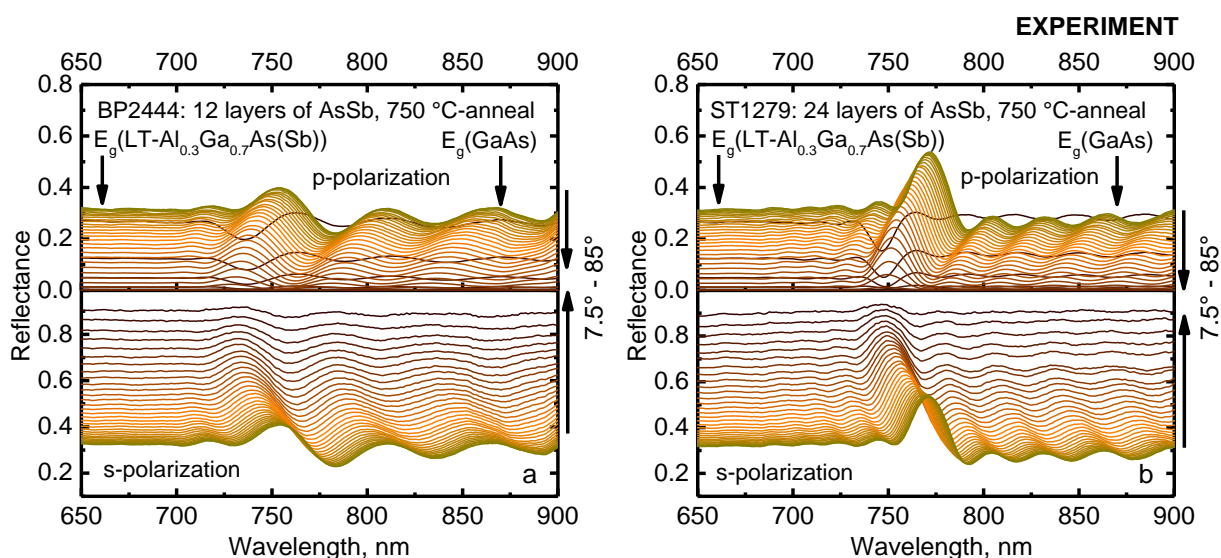


Рисунок 5. Экспериментальные спектры оптического отражения при углах падения 7.5 – 85° для s- и p-поляризаций для 12 (а) и 24 (б) периодов $\text{AsSb-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ после термообработки при 750 °C.

Экспериментальные спектры аналогично случаю нормального падения света демонстрируют наличие пика резонансного оптического отражения, смещение которого

в зависимости от угла падения наблюдается в диапазонах 730 – 754 нм для 12-периодной наноструктуры и 750 – 771 нм для 24 периодов AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, соответственно. Вариация резонансной длины волны согласуется с законом Вульфа-Брэгга и свидетельствует о наблюдаемой брэгговской оптической дифракции в периодической системе плазмонных слоев.

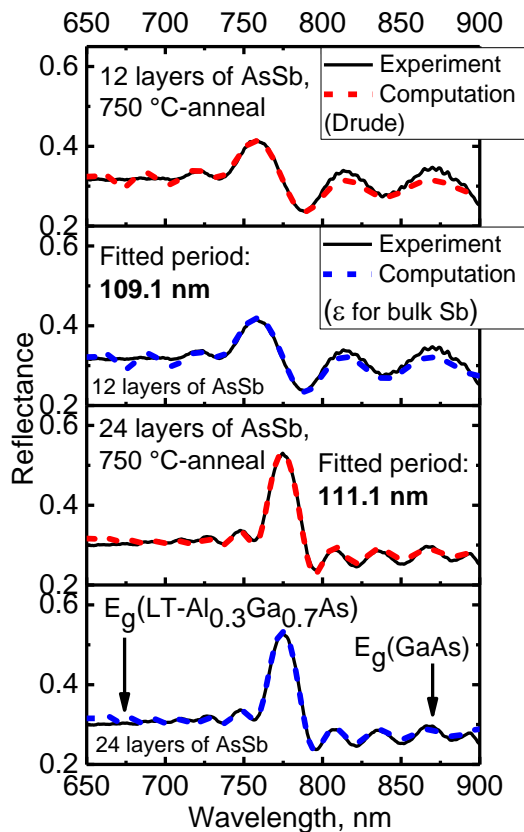


Рисунок 6. Экспериментальные и численно рассчитанные спектры коэффициента нормального отражения света для 12 и 24 периодов наночастиц AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Расчет проведен с использованием диэлектрической функции AsSb, вычисленной по модели Друде с учетом $\hbar\omega_{p_{vac}} = 13.6$ эВ и $\tau = 0.43$ фс или взятой из справочника для объемного материала Sb [6].

в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ был выполнен с использованием метода матриц переноса с учетом пространственной геометрии наноструктур, а также резонансных параметров плазмонных возбуждений, полученных на основании исследований оптической экстинкции в неупорядоченной системе AsSb- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (глава 3) (рисунок 6). Для описания взаимодействия света со слоем плазмонных нановключений использовался формализм, предложенный в работе [8]. В данном подходе рассматривается эффективная квазидвумерная решетка металлических сфер, размер которых много меньше длины волны света. Поляризуемость отдельной сферы в слое определяется влиянием внешнего

В окне оптической прозрачности полупроводниковой матрицы, ее диэлектрическая проницаемость ($\tilde{\epsilon}_m$) является положительной величиной, тогда как вещественная компонента диэлектрической функции металлических наночастиц ($\tilde{\epsilon}_{sph}$) отрицательна. Оптическое отражение от периодической системы слоев нановключений оказывается, таким образом, усиленным, благодаря выполнению условия $\tilde{\epsilon}_{sph} = -2\tilde{\epsilon}_m$ [7], за счет которого обеспечивается существенный диэлектрический контраст между компонентами слоистой наноструктуры. В исследуемой системе отражение света оказалось значительным, благодаря формированию резонансной оптической моды за счет брэгговской дифракции в периодической системе квазидвумерных слоев металлических наночастиц AsSb в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Следует отметить, что объемная доля наночастиц AsSb в исследуемых образцах не превышала 1%.

Моделирование экспериментальных спектров коэффициента оптического отражения рассматривается в разделе 4.2. Расчет указанных спектров для периодических систем 12 и 24 слоев AsSb

электромагнитного поля с учетом взаимодействия с остальными частицами в узлах решетки. Результирующий амплитудный коэффициент отражения, таким образом, становится зависим от поляризации падающего излучения. Диэлектрическая проницаемость нановключений AsSb рассчитывалась в модели Друде с использованием феноменологических параметров ПР, полученных в рамках исследования оптической экстинкции в неупорядоченных системах AsSb-Al_{0.3}Ga_{0.7}As (глава 3), или была взята из [6]. Подгоночными параметрами в процессе численного моделирования выступали пространственный период слоистой наноструктуры AsSb-Al_{0.3}Ga_{0.7}As, а также эффективное значение периода квазидвумерной решетки металлических сфер AsSb, представляющей отдельный слой нановключений.

Сравнение экспериментальных и расчетных спектров отражения света при нормальном падении, а также для углов падения света 7.5 – 85° для s- и p-поляризаций показывает хорошее качественное и количественное согласие. Расчетные значения пространственного периода наноструктур для образцов с 12 и 24 слоями AsSb-Al_{0.3}Ga_{0.7}As составили 109.1 и 111.1 нм, соответственно, что с точностью до 1% совпадало с номинальными параметрами, заданными в процессе эпитаксиального роста. Значения эффективного периода модельной решетки металлических наночастиц AsSb в слое для систем 12 и 24 периодов AsSb-Al_{0.3}Ga_{0.7}As составили 6.2R и 5.5R, соответственно, где $R \approx 7.5$ нм – среднее значение радиуса металлических сфер AsSb после отжига при 750 °С.

В главе 5 изложены результаты исследования взаимодействия света с периодической системой КЯ LTG-(GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}), δ -легированных примесями Sb и P, в нестехиометрическом случае, а также после отжигов при температурах 400 – 750 °С, вызывающих формирование системы нановключений AsSbP в наноструктуре.

В разделах 5.1 и 5.2 представлены экспериментальные данные по исследованию спектров модулированного оптического электроотражения ($\Delta R/R$) при температуре 6 К для различных стадий послеростовой термообработки образца (рисунок 7а, стрелками отмечены особенности, связанные с экситонными состояниями в КЯ). ПЭМ-исследования наноструктуры до отжига показали высокую степень резкости эпитаксиальных интерфейсов КЯ и отсутствие атомных градиентов, а также позволили определить фактическое значение ширины КЯ, равное 11.7 нм. Термообработка при 600 и 750 °С, обеспечивающая формирование систем наночастиц AsSbP со средними размерами ~ 10 и ~ 15 нм, соответственно, не влияла на видимую резкость эпитаксиальных интерфейсов КЯ, существенное диффузионное размытие которых отсутствовало. Тем не менее, согласно ПЭМ, отжиг при 750 °С вызывал флуктуации ширины ямы в локальных областях, прилегающих к сформированным преципитатам наибольшего размера. Наблюдение периодической системы δ -слоев Sb и P в ПЭМ после отжигов оказалось затруднительно вследствие их размытия и снижения контраста, за счет процессов усиленной взаимодиффузии атомов As-Sb и As-P в анионной подрешетке GaAs.

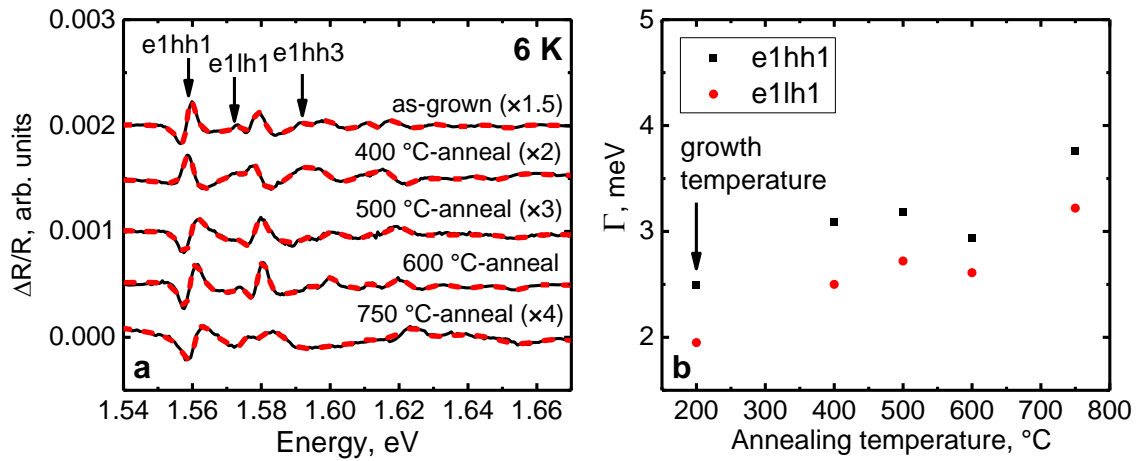


Рисунок 7. (а): сравнение спектров $\Delta R/R$ при 6 К для КЯ $GaAs_{0.975}P_{0.025}-Al_{0.3}Ga_{0.7}As_{0.975}P_{0.025}$ при различных термообработках. Черные сплошные кривые соответствуют экспериментальным данным, красные штриховые – численному моделированию в соответствии с [9]. (б): полные ширины на половине высоты экситонных линий $e1hh1$ и $e1lh1$ в зависимости от температуры отжига 400 – 750 °С.

Исследования спектров $\Delta R/R$ при температуре 6 К в нестехиометрическом случае и после термообработок при 400 – 600 °С наряду с квантово-механическим расчетом энергий электронов и дырок в прямоугольной КЯ $GaAs_{0.975}P_{0.025}$ позволили идентифицировать экситонные особенности $e1hh1$, $e1lh1$ и $e1hh3$ при энергиях 1.5589, 1.5722 и 1.5919 эВ, соответственно (рисунок 7а).

Наиболее выраженный пик в оптических спектрах соответствовал экситону в основном состоянии на тяжелой дырке, $e1hh1$, при этом его резонансная энергия сохранялась при отжигах до температуры 600 °С включительно. Термообработка при 750 °С приводила к незначительному увеличению его энергии (~ на 1.5 мэВ) вследствие модификации профиля потенциала КЯ из-за миграции атомов Al из барьерных областей. Оценка эффективного коэффициента взаимодиффузии Al-Ga в катионной подрешетке GaAs для данных условий термообработки была выполнена при помощи расчета резонансных энергий экситонных состояний в сглаженном потенциале диффузионно-размытой КЯ. В качестве подгоночного параметра в расчете выступала длина диффузии галлиевых вакансий, обеспечивающих взаимодиффузию атомов Al-Ga, которая составила 0.4 нм. Значение эффективного коэффициента взаимодиффузии Al-Ga равнялось $8.9 \times 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ и оказалось примерно на три порядка меньше соответствующих оценок для аналогичных нестехиометрических наноструктур, не подвергавшихся легированию элементами V группы. Данные наблюдения свидетельствовали о подавленной взаимодиффузии атомов Al-Ga в катионной подрешетке GaAs, тогда как диффузионное перемешивание As-Sb в анионной подрешетке оказалось усиленным.

В разделе 5.3 приведен количественный анализ формы линий $\Delta R/R$ экситонного состояния $e1hh1$ при температуре 6 К для нестехиометрического случая, а также после термообработок (рисунок 7б). До отжига полная ширина на половине высоты данного

состояния составляла 2.49 мэВ и оказалась преимущественно обусловлена однородным уширением, благодаря ультракоротким временам рекомбинации электронов и дырок на антиструктурных дефектах As_{Ga} и V_{Ga} в нестехиометрическом материале. Оценка соответствующего времени жизни носителей составила ~ 264 фс и хорошо согласовывалось с результатами прямых измерений времен рекомбинации в наноструктурах на основе LTG-GaAs, выращенных и термообработанных по идентичным технологиям [5]. Высокотемпературный отжиг в диапазоне 400 – 600 °С обеспечивал некоторое уширение исследуемой экситонной линии. Полная ширина на половине высоты после термообработки при 600 °С составила 2.94 мэВ и оказалась частично обусловлена неоднородным вкладом вследствие влияния формирования системы нановключений в областях КЯ. Отжиг при температуре 750 °С приводил к существенному уширению экситона (полная ширина на половине высоты составила 3.76 мэВ) и был аналогично обусловлен значительным неоднородным вкладом, вызванным локальными вариациями ширины КЯ вблизи сформированных нановключений.

Исследование температурных зависимостей параметров экситонного состояния $e1hh1$ в диапазоне 6 – 290 К представлено в **разделе 5.4**. На рисунке 8 приведены спектры $\Delta R/R$ в системе исследуемых нестехиометрических КЯ в диапазоне температур 6 – 150 К.

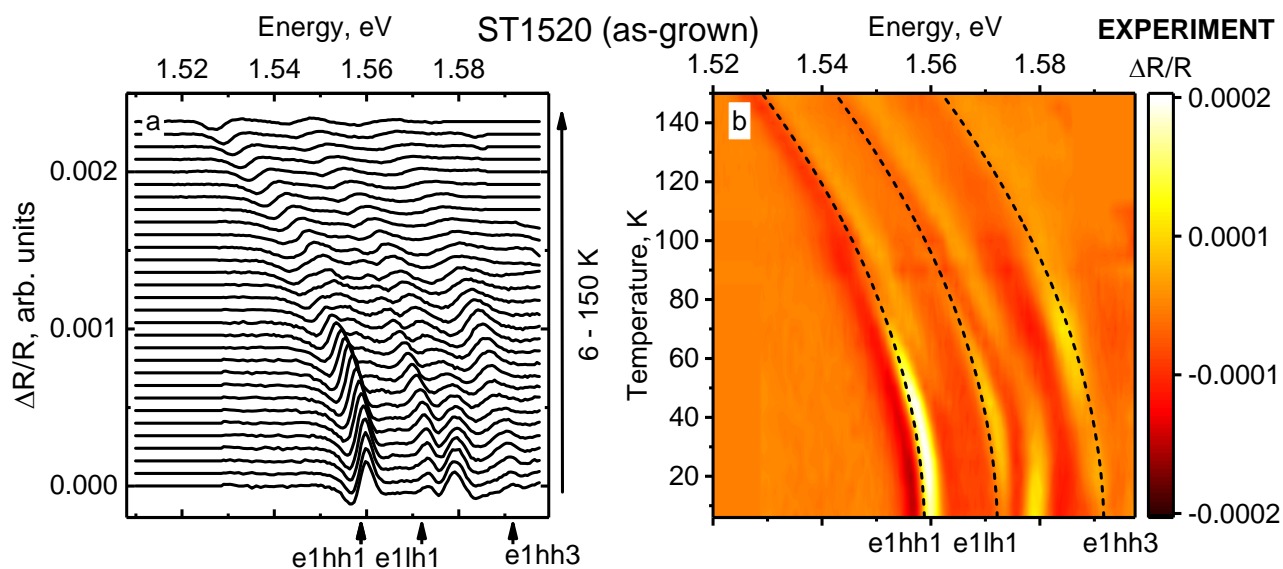


Рисунок 8. Температурные зависимости $\Delta R/R$ в системе нестехиометрических КЯ $GaAs_{0.975}P_{0.025}$. Стрелками (а) и штриховыми линиями (б) указаны энергии экситонных переходов $e1hh1$, $e1lh1$ и $e1hh3$.

Температурные зависимости полной ширины экситонной линии $e1hh1$ на половине высоты в диапазоне 6 – 290 К для нестехиометрического случая, а также после отжига при 600 °С были получены при помощи моделирования соответствующих экспериментальных данных $\Delta R/R$ в рамках подхода, представленного в [9] (рисунок 9).

Анализ ширин экситонов $e1hh1$ в КЯ был выполнен с учетом вкладов температурно-зависимых однородного и неоднородного уширений. Однородное уширение в нестехиометрическом материале при низких температурах в отсутствие существенного рассеяния экситонных состояний на продольных оптических фонах полагалось обусловленным преимущественно ультракороткими временами жизни носителей заряда.

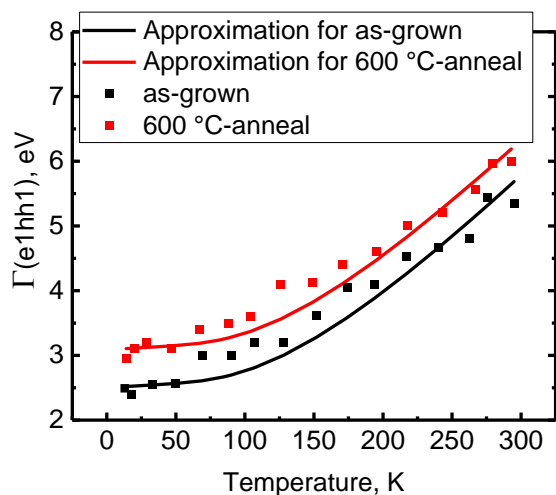


Рисунок 9. Температурные зависимости полных ширин экситонных линий $e1hh1$ на половине высоты в нестехиометрических КЯ $\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}$, а также после отжига при $600\text{ }^\circ\text{C}$. Точками представлены данные, полученные из моделирования спектров $\Delta R/R$. Сплошные кривые - расчет.

полная ширина экситонной линии $e1hh1$ зависела только от Γ_{inhom} и Γ_0 . Использованное в расчете значение параметра α было получено в [11]. Параметр β в расчете являлся варьируемым. Его величина составила (8.8 ± 0.4) мэВ и оказалась сопоставима с значениями для аналогичных КЯ GaAs-AlGaAs высокой степени стехиометричности.

Основные результаты и выводы работы

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Исследование неупорядоченных систем металлических нановключений AsSb в полупроводниковой матрице $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ показало наличие бесструктурных хвостов оптической экстинкции в окне ее оптической прозрачности, обусловленных поглощением и рассеянием света плазмонными возбуждениями в нановключениях металлической фазы. Средний размер нановключений определялся условиями послеростового отжига и не превышал 15 нм. Неупорядоченные массивы наночастиц As в $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, сформированные при аналогичных условиях, в отсутствие легирования примесью Sb не вызывали существенного взаимодействия света с

металло-полупроводниковой средой. Коэффициент экстинкции света вблизи края фундаментального поглощения $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ в нановключениях AsSb достигал $0.7 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$, тогда как для наночастиц As данное значение не превышало $0.15 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$.

Численное моделирование спектров коэффициента оптической экстинкции в неупорядоченной системе $\text{AsSb-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ было выполнено по теории Ми в пределе малых концентраций металлических частиц и показало хорошее количественное согласие с экспериментальными результатами в окне прозрачности $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Учитывая, что концентрация Sb в нановключениях превышала 90%, а также то, что они обладали ромбоэдрической структурой $A7$ [A6, A7], характерной для объемного материала Sb , феноменологическое рассмотрение взаимодействия света с системой наночастиц было реализовано с использованием экспериментальных данных по диэлектрической функции объемной Sb . Численное моделирование продемонстрировало наличие широкого пика ПР в области фундаментального поглощения матрицы $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Расчетная энергия ПР в AsSb составила 2.26 эВ, а его полная ширина на половине высоты равнялась 1.58 эВ.

2. Пространственное упорядочение наночастиц AsSb в брэгговскую решетку квазидвумерных слоев, возможное за счет δ -легирования эпитаксиальной пленки примесью Sb и последующих высокотемпературных отжига, показало наличие резонансного оптического отражения, амплитуда пика которого достигала 22 и 31% в системах 12 и 24 слоев нановключений $\text{AsSb-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, соответственно. δ -слои Sb до отжига существенных резонансных особенностей в оптическом отражении не демонстрировали. Значительная амплитуда отражения света была обусловлена высоким диэлектрическим контрастом между материалами полупроводниковой матрицы и нановключений металлической фазы. Период расположения слоев наночастиц обеспечивал выполнение закона Вульфа-Брэгга для энергии света 1.60 эВ, в результате чего в данной оптической области, близкой к энергии ПР для $\text{AsSb-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, оказывалось возможным формирование резонансной оптической моды, связывающей индивидуальные электронные возбуждения в нановключениях AsSb . При этом доля объема, занимаемая нановключениями AsSb , не превышала 1%.
3. Оптическое исследование в рамках модуляционной спектроскопии электроотражения света в периодической системе КЯ $\text{LTG}-(\text{GaAs}_{0.975}\text{P}_{0.025}-\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.975}\text{P}_{0.025})$, выращенной методом МЛЭ при низкой температуре 200 °С и периодически δ -легированной изовалентными примесями Sb и P , показало наличие узких спектральных особенностей, связанных с экситонным откликом в системе КЯ. Сложный профиль легирования приводил к формированию системы металлических нановключений AsSbP в областях КЯ и барьеров и обеспечивал сохранение узких экситонных линий в рамках послеростовой термообработки при температурах 400 – 750 °С. Положение экситонных пиков сохранялось при температурах отжига до 600 °С включительно. Термообработка при 750 °С приводила к незначительному смещению экситонных особенностей, что свидетельствовало об отсутствии заметной диффузии в катионной подрешетке GaAs , нарушающей морфологию эпитаксиальных

интерфейсов КЯ и приводящей к деградации оптического отклика электронных состояний. Длина взаимодиффузии атомов Al-Ga для температуры отжига 750°C, не превышала 0.4 нм. Соответствующее значение эффективного коэффициента взаимодиффузии Al-Ga составило $8.9 \times 10^{-19} \text{ см}^2/\text{с}$ и оказалось примерно на три порядка меньше аналогичных оценок для нестехиометрических КЯ LTG-GaAs, не подвергавшихся легированию элементами V группы, что свидетельствовало о высокой температурной стабильности исследованной системы КЯ.

4. Параметры экситонных состояний в КЯ GaAs_{0.975}P_{0.025} были получены в рамках количественного анализа формы спектральных линий электроотражения. Полная ширина экситонной линии $e1hh1$ на половине высоты при температуре 6 К в нестехиометрическом случае до отжига составила 2.49 мэВ, и оказалась преимущественно обусловлена однородным уширением, благодаря ультракоротким временам рекомбинации носителей заряда на антиструктурных дефектах As_{Ga} и V_{Ga}. Оценка соответствующего времени жизни носителей составила ~264 фс и находилась в хорошем согласии с результатами прямых измерений времен рекомбинации в наноструктурах на основе LTG-GaAs, выращенных по идентичным технологиям. Высокотемпературный отжиг при температурах 400 – 600 °С приводил к некоторому уширению исследуемого экситонного состояния. Полная ширина экситонной линии после термообработки при 600 °С оказалась равна 2.94 мэВ и была частично обусловлена неоднородным вкладом вследствие влияния формирования наночастиц AsSbP в областях КЯ. Формирование нановключений, средний размер которых достигал 15 нм для максимальной температуры отжига 750 °С, приводило к заметным локальным флуктуациям толщины КЯ, наблюдаемым в методе ПЭМ, а также обеспечивало неоднородное уширение экситона $e1hh1$, полная ширина которого превышала таковую в нестехиометрическом случае в отсутствие нановключений AsSbP в ~ 1.5 раза. Температурные зависимости ширины линии экситонного состояния $e1hh1$ в нестехиометрическом случае, а также после термообработки при 600 °С, находились в хорошем согласии с соответствующими результатами для высокостехиометрических КЯ GaAs-AlGaAs, выращенных методом МЛЭ при стандартных температурах и не содержащих наночастиц металлической фазы.

Публикации по теме диссертационного исследования

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК:

- A1. Ушанов, В. И. Отражение света от брэгговской решетки металлических нановключений AsSb в матрице AlGaAs // В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путьято, Б. Р. Семягин // ФТП. – 2013. – Vol. 47. – P. 1043.
- A2. Ушанов, В. И. Резонанс Фрѐлиха в системе AsSb/AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путьято, Б. Р. Семягин // ФТТ. – 2014. – Vol. 56. – P. 1891.
- A3. Ушанов, В. И. Плазмонный резонанс в новых металло-полупроводниковых метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. А. Берт, В. Н.

- Неведомский, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // ФТП. – 2015. – Vol. 49. – P. 1635.
- A4. Ушанов, В. И. Брэгговский резонанс в системе плазмонных нановключений AsSb в AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // ФТП. – 2016. – Vol. 50. – P. 1620.
- A5. Ushanov, V. I. Resonant Optical Reflection from AsSb–AlGaAs Metamaterials and Structures / V. I. Ushanov, V. V. Chaldyshev, V. V. Preobrazhenskiy, M. A. Putyato, B. R. Semyagin // Semiconductors. – 2017. – Vol. 52. – P. 468.
- A6. Bert, N. A. Metallic AsSb nanoinclusions strongly enriched by Sb in AlGaAsSb metamaterial / N. A. Bert, V. V. Chaldyshev, N. A. Cherkashin, V. N. Nevedomskii, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato, B. R. Semyagin, V. I. Ushanov, M. A. Yagovkina // J. Appl. Phys. – 2019. – Vol. 125. – P. 145106.
- A7. Bert, N. A. Sb-rich nanoinclusions in an AlGaAsSb metamaterial / N. A. Bert, V. V. Chaldyshev, N. A. Cherkashin, V. N. Nevedomskii, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato, B. R. Semyagin, V. I. Ushanov, M. A. Yagovkina // MRS Advances. – 2019. – Vol. 4. – P. 277.

Тезисы докладов и труды конференций:

- A8. Ушанов, В. И. Отражение света от брэгговской решетки и хаотических массивов металлических нановключений As и AsSb в матрице AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 16 – 20 сентября, 2013, С. 411.
- A9. Ушанов, В. И. Отражение света от брэгговской решетки и хаотических массивов металлических нановключений As и AsSb в матрице AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика.СПб», Санкт-Петербург, 23 – 24 октября, 2013, С. 162.
- A10. Ушанов, В. И. Отражение света от брэгговской решетки и хаотических массивов металлических нановключений As и AsSb в матрице AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев // Тезисы докладов 15^{ой} всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 26 – 30 ноября, 2013, С. 88.
- A11. Ушанов, В. И. Отражение света от брэгговской решетки и хаотических массивов металлических нановключений As и AsSb в матрице AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, // Материалы научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбГПУ», Санкт-Петербург, 2 – 7 декабря, 2013, С. 102.
- A12. Чалдышев, В. В. Плазмонный резонанс в новых металло-полупроводниковых метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. В. Чалдышев, В. И. Ушанов, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Сборник трудов VIII международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2014», Санкт-Петербург, 20 – 24 октября, 2014, С. 322.

- A13. Ушанов, В. И. Плазмонный резонанс в метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика.СПб», Санкт-Петербург, 28 – 30 октября, 2014, С. 114.
- A14. Ушанов, В. И. Плазмонный резонанс в новых металло-полупроводниковых метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. А. Берт, В. Н. Неведомский, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Труды XIX Международного симпозиума «Нанопластика и наноэлектроника» Том 2, Нижний Новгород, 10 – 14 марта, 2015, С. 680.
- A15. Ushanov, V. I. Plasmon resonance in metal-semiconductor AsSb-AlGaAs metamaterials / V. I. Ushanov, V. V. Chaldyshev, N. A. Bert, V. N. Nevedomskiy, N. D. Ilinskaya, N. M. Lebedeva, M. A. Yagovkina, V. V. Preobrazhenskiy, M. A. Putyato, B. R. Semyagin // Book of abstracts of 2nd International school and conference on optoelectronics, photonics, engineering and nanostructures “Saint-Petersburg OPEN 2015”, St. Petersburg, April 6 – 8, 2015, P. 170.
- A16. Chaldyshev, V. V. Optical plasmon resonance in an AsSb-AlGaAs metamaterial / V. V. Chaldyshev, V. I. Ushanov, N. A. Bert, N. D. Ilinskaya, N. M. Lebedeva, V. N. Nevedomskiy, M. A. Yagovkina, V. V. Preobrazhenskiy, M. A. Putyato, B. R. Semyagin // Proceedings of 23rd international symposium “Nanostructures: Physics and Technology” Saint-Petersburg, Russia, June 22 – 26, 2015, P. 193.
- A17. Чалдышев, В. В. Оптический плазмонный резонанс в новых метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. В. Чалдышев, В. И. Ушанов, Н. А. Берт, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, В. Н. Неведомский, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы пленарных докладов IX Петербургской встречи лауреатов Нобелевской премии «Наноструктуры: физика и технологии», Санкт-Петербург, 22 – 26 июня, 2015, С. 151.
- A18. Ушанов, В. И. Плазмонный резонанс в новых металло-полупроводниковых метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. А. Берт, В. Н. Неведомский, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы докладов XII Российской конференции по физике полупроводников, Ершово, 21 – 25 сентября, 2015, С. 354.
- A19. Ушанов, В. И. Плазмонный резонанс в металло-полупроводниковых метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. А. Берт, В. Н. Неведомский, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Сборник трудов IX международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2015», Санкт-Петербург, 12 – 16 октября, 2015, С. 438.
- A20. Ушанов, В. И. Плазмонный резонанс в металло-полупроводниковых метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев // Тезисы докладов 17^{ой} всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур,

- полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 23 – 27 ноября, 2015, С. 134.
- A21. Ушанов, В. И. Брэгговский резонанс в системе плазмонных нановключений AsSb в AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Материалы XX Международного симпозиума «Наноп физика и наноэлектроника» Том 2, Нижний Новгород, 14 – 18 марта, 2016, С. 758.
- A22. Ушанов, В. И. Брэгговский резонанс в системе плазмонных нановключений AsSb в AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы конференции Российской молодежной конференции по физике и астрономии «Физика.СПб», Санкт-Петербург, 1 – 3 ноября, 2016, С. 185.
- A23. Ushanov, V. I. Resonant Bragg Diffraction in AsSb-AlGaAs Metamaterial Structures / V. I. Ushanov, V. V. Chaldyshev, V. V. Preobrazhenskiy, M. A. Putyato, B. R. Semyagin // Abstracts of international symposium “Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2017 St Petersburg”, Saint-Petersburg, Russia, 22 – 25 May, 2017, P. 597.
- A24. Ushanov, V. I. Resonant optical reflection from AsSb-AlGaAs metamaterials and structures / V. I. Ushanov, V. V. Chaldyshev, N. A. Bert, N. D. Ilinskaya, N. M. Lebedeva, V. N. Nevedomskiy, M. A. Yagovkina, V. V. Preobrazhenskiy, M. A. Putyato, B. R. Semyagin // Proceedings of 25th international symposium “Nanostructures: Physics and Technology” Saint-Petersburg, Russia, June 26 – 30, 2017, P. 304.
- A25. Ушанов, В. И. Брэгговская дифракция на системе плазмонных наночастиц AsSb в AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. А. Берт, В. Н. Неведомский, Н. Д. Ильинская, Н. М. Лебедева, М. А. Яговкина, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы докладов XIII Российской конференции по физике полупроводников, Екатеринбург, 2 – 6 октября, 2017, С. 378.
- A26. Ушанов, В. И. Резонансное отражение и поглощение света в метаматериалах AsSb-AlGaAs / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Сборник трудов X международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018», Санкт-Петербург, 15 – 19 октября, 2018, С. 288.
- A27. Ushanov, V. I. Resonant optical properties of AsSb-AlGaAs metamaterials / V. I. Ushanov, V. V. Chaldyshev, N. A. Bert, V. N. Nevedomskiy, N. D. Ilinskaya, N. M. Lebedeva, M. A. Yagovkina, V. V. Preobrazhenskiy, M. A. Putyato, B. R. Semyagin // Abstract book of International conference “Frontiers of 21st century physics and Ioffe Institute”, Saint-Petersburg, Russia, October 29 – November 1, 2018, P. 113.
- A28. Берт, Н. А. Микроструктура нановключений AsSb в плазмонном метаматериале LTG-AlGaAsSb / Н. А. Берт, В. В. Чалдышев, Н. А. Черкашин, В. Н. Неведомский, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин, В. И. Ушанов, М. А. Яговкина // Тезисы докладов XIV Российской конференции по физике полупроводников, Новосибирск, 9 – 13 сентября, 2019, С. 72.
- A29. Ушанов, В. И. Термическая стабилизация экситонов в квантовых ямах на основе GaAs, выращенного при низкой температуре / В. И. Ушанов, В. В. Чалдышев, Н. А. Берт, В. Н. Неведомский, В. В. Преображенский, М. А. Путято, Б. Р. Семягин // Тезисы

докладов XIV Российской конференции по физике полупроводников, Новосибирск, 9 – 13 сентября, 2019, С. 1848.

Список используемой литературы

1. Майер, С. А. Плазмоника. Теория и приложения / С. А. Майер – R&C Dynamics, Москва, 2011.
2. Lavrent'eva, L. G. Low-Temperature Molecular Beam Epitaxy of GaAs: Influence of Crystallization Conditions on Structure and Properties of Layers / L. G. Lavrent'eva, M. D. Vilisova, V. V. Preobrazhenskii, V.V. Chaldyshev // Crystallography Reports. – 2002. – Vol. 47. – P. S118.
3. Mil'vidskii, M. G. Nanometer-size atomic clusters in semiconductors—a new approach to tailoring material properties / M. G. Mil'vidskii, V. V. Chaldyshev // Semiconductors. – 1998. – Vol. 32. – P. 457.
4. Chaldyshev, V. V. Two-dimensional organization of As clusters in GaAs / V. V. Chaldyshev // Mater. Sci. Eng. – 2002. – Vol. B88. – P. 195.
5. Пастор, А. А. Влияние отжига на время жизни неравновесных носителей заряда в GaAs, выращенном при низкой температуре / А. А. Пастор, У. В. Прохорова, П. Ю. Сердобинцев, В. В. Чалдышев, М. А. Яговкина // ФТП. – 2013. – Т. 47. – P. 1144.
6. Adachi, S. The Handbook on Optical Constants of Metals in Tables and Figures / S. Adachi – World Scientific, 2012.
7. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хаффмен. – Мир, М., 1986.
8. Persson, B. N. J. Optical properties of two-dimensional systems of randomly distributed particles / B. N. J. Persson, A. Liebsch // Phys. Rev. B. – 1983. – Vol. 28. – P. 4247.
9. Pollak, F. H. Modulation spectroscopy of semiconductors: bulk/thin film, microstructures, surfaces/interfaces and devices / F. H. Pollak, H. Shen // Mater. Sci. Eng. – 1993. – R10. – P. 275.
10. Rudin, S. Temperature-dependent exciton linewidths in semiconductors / S. Rudin, T. L. Reinecke, B. Segall // Phys. Rev. B. – 1990. – Vol. 42. – P. 11218.
11. Kuhl, J. Optical dephasing and orientational relaxation of wannier-excitons and free carriers in GaAs and GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum wells / J. Kuhl, A. Honold, L. SchuLTGheis, C.W. Tu // Festkörperprobleme/Advances in Solid State Physics. – 1989. – Vol. 29. – P. 157.