На правах рукописи

Фирсов Дмитрий Дмитриевич

ИНФРАКРАСНАЯ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ InAs и InSb

01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» на кафедре микро-и наноэлектроники.

Научный руководитель:	Пихтин Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Соколовский Григорий Семёнович, доктор физико-математических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ведущий научный сотрудник
	Бондаренко Антон Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Санкт-Петербургский Государственный Университет, научный сотрудник
Ведущая организация:	Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Защита состоится «11» декабря 2014 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) по адресу: 197376 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте: www.eltech.ru.

Автореферат разослан «10» октября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.04

д.ф.-м.н., проф. Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Узкозонные полупроводниковые соединения InSb, InAs и наногетероструктуры на их основе являются объектом неослабевающего интереса, обусловленного широкой областью их практического использования. Эпитаксиальные слои InSb и InAs находят применение в многочисленных классах полупроводниковых приборов, в том числе инфракрасных (ИК) фотоприёмных устройствах (включая приборы ночного видения) и датчиках магнитного поля. Наноструктуры на основе указанных бинарных соединений, излучающие в среднем ИК диапазоне, перспективны для создания светодиодов и лазеров, работающих в области спектра 3 - 6 мкм. Оптоэлектронные приборы данного диапазона представляют существенный интерес для применения в медицинской технике, приборах экологического контроля и системах скрытой беспроводной связи. Благодаря уникальным фундаментальным свойствам InSb, таким как малая эффективная масса и рекордные значения подвижности электронов при комнатной температуре, гетероструктуры $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$ актуальны также и как материал для СВЧ транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT).

Наличие подробной информации об оптических свойствах узкозонных материалов и структур является необходимым условием проектирования приборов ИК оптоэлектроники. Знание показателей поглощения и преломления при различном легировании, учёт особенностей зонной структуры позволяют определять оптимальные параметры создаваемых микро- и наноструктур.

Наиболее эффективным экспериментальным методом изучения оптических свойств узкозонных материалов в ИК диапазоне является фурье-спектроскопия. Благодаря высокой светосиле и эффективному накоплению сигнала фурье-спектрометры позволяют регистрировать спектры пропускания, отражения и люминесценции с наиболее высоким соотношением “сигнал/шум”.

В то же время, один из наиболее информативных оптических методов исследования полупроводниковых структур – модуляционная спектроскопия – в среднем ИК диапазоне практически не применяется по причине недостаточной светосилы классических установок на базе дифракционных спектрометров. Соответственно, представляется актуальной реализация нового метода

модуляционной спектроскопии на основе фурье-спектрометра, который позволит обойти существующие ограничения при изучении оптических свойств узкозонных полупроводников.

Цель работы - изучение оптических свойств ряда микро- и наноструктур InAs и InSb, результаты которого позволят определять оптимальные параметры при проектировании и изготовлении приборов и устройств на их основе.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка на основе инфракрасного фурье-спектрометра оригинального метода фотомодуляционной оптической спектроскопии, эффективного для определения параметров узкозонных материалов и систем. Апробация реализованного метода, применение к исследованию структур на основе InSb.
2. Изучение влияния параметров монослойных вставок InSb на люминесцентные свойства эпитаксиальных наноструктур InSb/InAs. Определение структуры, подходящей для создания излучателей диапазона 4-5 мкм, способных работать при комнатной температуре.
3. Определение основных оптических характеристик эпитаксиального твёрдого раствора $Al_xIn_{1-x}Sb$, являющегося оптимальным барьерным материалом для гетеросистем на основе InSb. Нахождение энергетического спектра квантовых ям $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$, востребованных для создания ИК излучателей и сверхвысокочастотных HEMT структур.
4. Оценка влияния легирования подложек на спектральные характеристики и эффективность фотоприёмных микроструктур $n\text{-}InAs/n^{++}\text{-}InAs$, освещаемых со стороны подложки. Реализация неразрушающей методики контроля толщин рабочих слоёв n-InAs по спектрам инфракрасного отражения.

Методы исследования и использованная аппаратура:

Исследования проводились методом инфракрасной фурье-спектроскопии, включая реализованные методики регистрации фотолюминесценции (ФЛ) и фотомодуляционного отражения. Исследуемые структуры получены методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), и эпитаксии из газовой фазы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Аномальный коротковолновый сдвиг пика фотолюминесценции наноструктур InSb/InAs с повышением температуры обусловлен термическим заполнением

локализованных состояний, возникающих за счёт флуктуации толщины и состава в экстрамонослойных вставках InSb.

2. Зависимость энергии прямого межзонного перехода $E_g^{\Gamma}(x)$ от состава твёрдого раствора $Al_xIn_{1-x}Sb$ в диапазоне $0 < x < 0.52$ имеет коэффициент нелинейности $c = 0.32 \pm 0.06$ эВ.
3. Выбор уровня легирования подложек фотоприёмных структур n-InAs/n^{++}-InAs позволяет не только изменять спектральный диапазон чувствительности, но и управлять поглощением в рабочем слое n-InAs при облучении через сильнолегированную подложку.
4. Получение модуляционного оптического спектра полупроводниковых структур методом инфракрасной фурье-спектроскопии требует учёта фазы сигнала, определяемой в отсутствие внешней модуляции свойств этих структур.

<u>Научная новизна</u> работы заключается в следующем:

1. Получена уточнённая зависимость прямой ширины запрещённой зоны от состава ненапряжённого твёрдого раствора $Al_xIn_{1-x}Sb$, выращенного методом МПЭ на полуизолирующей подложке GaAs.
2. Впервые экспериментально определены спектральные зависимости показателя преломления $n(E)$ $Al_xIn_{1-x}Sb$ различного состава в области энергий вблизи края фундаментального поглощения, в том числе для $E > E_g^{\Gamma}$.
3. Показана возможность определения ширины квантовых ям InSb/$Al_xIn_{1-x}Sb$ посредством сопоставления экспериментально полученных спектров фотолюминесценции с энергетическим спектром, рассчитанным по 8-зонной модели Кейна с учётом механических напряжений.
4. На основе экспериментальных данных проведена оценка поглощения света в рабочем слое фоточувствительных структур n-InAs/n^{++}-InAs, освещаемых через подложку. Показано влияние степени легирования подложек n^{++}-InAs на спектральные характеристики структур.
5. Для наноструктур InSb/InAs с толщиной вставок InSb более 1 монослоя впервые экспериментально наблюдался аномальный коротковолновый сдвиг фотолюминесценции с ростом температуры в диапазоне 12-80 К.

6. Сформулирован алгоритм обработки модуляционного сигнала, который позволяет определять знак экстремумов модуляционных оптических спектров, регистрируемых на фурье-спектрометре.
7. Впервые получен и проанализирован спектр фотоотражения объёмного InSb в диапазоне 2 – 10 мкм.

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов подтверждается сопоставлением полученных экспериментально данных с результатами измерений независимыми методами, теоретическими моделями, и современными литературными данными.

Научная и практическая значимость работы сводится к следующему:

1. Получена существенная информация об оптических свойствах структур на основе InAs, InSb и $Al_xIn_{1-x}Sb$, которая может быть использована при разработке ИК фотоприёмных и светоизлучающих устройств;
2. Реализованы интерференционные методики измерений толщин эпитаксиальных структур InAs, InSb и $Al_xIn_{1-x}Sb$ с учётом спектральной зависимости показателя преломления;
3. Реализован метод фотомодуляционной фурье-спектроскопии, позволяющий характеризовать узкозонные системы благодаря повышенной эффективности в среднем ИК диапазоне.

Внедрение результатов исследования

Результаты диссертационных исследований были использованы в хоздоговорных и госбюджетных НИР в 2012-2014 гг. Разработанная неразрушающая методика определения толщин эпитаксиальных слоёв n-InAs на n^{++}-InAs подложках внедрена на технологической базе ОАО «ЦНИИ «Электрон». Аналогичная методика для гетероструктур InSb/AlInSb/GaAs также используется в Лаборатории квантово-размерных гетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Методика определения оптических постоянных полупроводниковых структур внедрена в учебный процесс в СПбГЭТУ в рамках курса “Методы диагностики структур наноэлектроники и фотоники”.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 15th International Conference on Narrow Gap Systems (USA; 2011), XXII

и XXIV Международные научно-технических конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва; 2012 и 2014), 11 Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург; 2013), 1st International School and Conference Saint-Petersburg OPEN2014 (Saint-Petersburg; 2014), 22nd International Symposium Nanostructures: Physics and Technology (Saint-Petersburg; 2014) и др.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, 2 работы приняты к публикации. Из них 7 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК; 4 публикации в трудах научно-технических конференций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 148 страницах машинописного текста. Диссертация включает 58 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проводимых в работе исследований, сформулированы цель и задачи работы, излагаются её научная новизна, практическая значимость и представленные к защите научные положения.

Первая глава работы носит обзорный характер и посвящается литературным данным по электронным и оптическим свойствам InSb, InAs и структур на их основе. Проведён обзор современных публикаций, рассматривающих перспективные гетероструктуры на основе InSb, включая квантовые ямы InSb/$Al_xIn_{1-x}Sb$ и структуры с монослойными InSb вставками в матрице InAs.

Также описываются основы метода инфракрасной фурье-спектроскопии, являющегося наиболее подходящим для изучения оптических свойств узкозонных структур. Детально поясняются принцип работы фурье-спектрометров, особенности регистрации интерферограммы и алгоритмы её преобразования в спектр излучения.

Вторая глава посвящена реализации оригинального метода инфракрасной модуляционной спектроскопии на основе фурье-спектрометра.

В параграфе 2.1 показана актуальность разработки метода модуляционной оптической спектроскопии для среднего ИК диапазона.

Параграф 2.2 содержит описание параметров используемой экспериментальной системы и методик проводимых измерений. Экспериментальная установка основывается на фурье-спектрометре Vertex 80, система регистрации сигнала которого доработана для использования синхронного усиления. Оптическая схема позволяет проводить измерения пропускания и отражения света в диапазоне 0.4-28 мкм, а также спектров люминесценции.

В параграфе 2.3 выявлены ключевые особенности регистрации и фурье-преобразования модуляционного сигнала, показана необходимость учёта фазы в ходе преобразования для сохранения информации о знаке спектра.

Апробация реализуемого метода модуляционной фурье-спектроскопии проводилась на примере структуры с одиночной квантовой ямой (КЯ) $In_xGa_{1-x}As/GaAs$. Спектр ненормированного фотоотражения ΔR данной структуры в ближнем ИК диапазоне, полученный ранее при помощи классической установки на основе спектрометра с дифракционной решёткой, показан на рис. 1 (*а*). В спектре наблюдается ряд экстремумов различного знака, соответствующих осцилляциям Франца-Келдыша в GaAs, и экситонным переходам в квантовой яме.

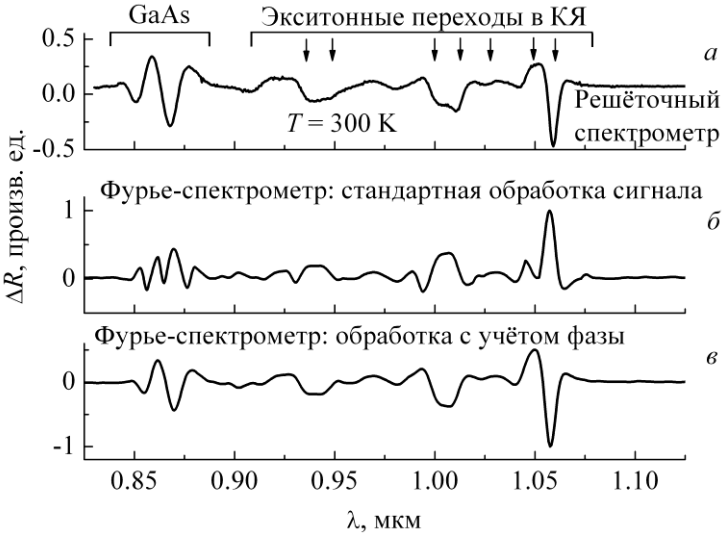

Рис. 1 Спектры фотоотражения структуры с одиночной КЯ $In_{0.225}Ga_{0.775}As/GaAs$ шириной 15 нм, полученные на дифракционном приборе, и на фурье-спектрометре

Спектр той же структуры при аналогичной модуляции отражения лазерным излучением, измеренный на фурье-спектрометре со стандартной обработкой сигнала, приведён на рис. 1(*б*). Заметно, что спектр существенно искажён по сравнению с рис. 1(*а*), что делает невозможной его корректную интерпретацию.

Сложности при измерении модуляционных спектров в фурье-спектроскопии связаны с тем, что для получения спектра непосредственно регистрируемый сигнал подвергается прямому преобразованию Фурье. Результат преобразования – комплексный спектр: , где – волновое число (= 1/λ, λ – длина вол-

ны). Информация о знаке регистрируемого сигнала содержится в фазе , на которую также влияют параметры оптической схемы. В стандартных алгоритмах обработки сигнала фаза исключается, что позволяет получить вещественный спектр интенсивности излучения. Однако при таком подходе утрачивается информация о знаке спектра, так как выполняется равенство: . Соответственно, стандартная фурье-спектроскопия не позволяет получать модуляционные спектры, поскольку их знак не известен заранее.

В данной работе показано, что спектр, содержащий сигналы различного знака (например, ненормированный спектр модуляционного отражения ΔR), может быть получен по формуле, учитывающей фазу: . Здесь $S_{\Delta R}(\ )$ – комплексный спектр, вычисленный в результате фурье-преобразования сигнала модуляционного отражения ΔR, а – фаза, которая определялась для сигнала немодулированного отражённого излучения R, заведомо являющегося положительным.

Соответствующий спектр фотоотражения КЯ $In_{0.225}Ga_{0.775}As/GaAs$, полученный на фурье-спектрометре с учётом фазы, показан на рис. 1(*в*). Данный спектр хорошо согласуется с результатами классического метода фотоотражения на решёточном спектрометре.

Параграф 2.4. В среднем ИК диапазоне разработанный метод был применён к структурам с нелегированными эпитаксиальными слоями InSb, выращенным по технологии МПЭ на InSb подложке. Спектр фотоотражения такой структуры в интервале длин волн 2-10 мкм показан на рис. 2.

Полученный результат подтверждает эффективность реализованного метода, и является первым измерением фотоотражения объёмного InSb.

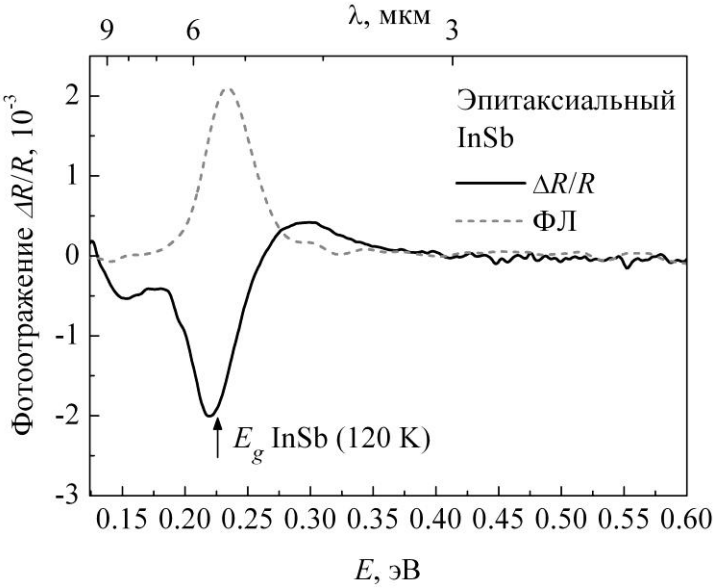

Рис. 2 Спектр фотоотражения $\Delta R/R$ эпитаксиального InSb и приведённый для сравнения спектр фотолюминесценции (ФЛ)

<u>В третьей главе</u> исследуется ряд узкозонных наногетероструктур InSb/InAs, перспективных для создания излучателей среднего ИК диапазона.

В параграфе 3.1 описываются исследуемые наноструктуры типа II InSb/InAs, содержащие вставки InSb номинальной толщиной от 1 до 1.9 монослоя (МС). Структуры включали от 10 до 50 вставок InSb, раздёленных между собой барьерами InAs толщиной 5-20 нм, и были выращены методом МПЭ на подложках (001) InAs и (001) GaSb. Для эффективного измерения фотолюминесценции в ИК диапазоне была реализована методика с синхронным усилением полезного сигнала, позволяющая одновременно исключить фоновое тепловое излучение.

Параграф 3.2 посвящён определению фотолюминесцентных свойств наноструктур InSb/InAs. В спектрах ФЛ наблюдалась интенсивная линия в диапазоне 3.5 - 6 мкм (рис. 3), соответствующая излучательной рекомбинации дырок, локализованных в InSb, и электронов из матрицы InAs. Зависимость энергии пика ФЛ от мощности P возбуждающего лазера продемонстрировала характерное для гетероструктур типа II смещение пропорционально $P^{1/3}$, связанное с возникновением на гетерограницах потенциальных ям для электронов.

Показано, что увеличение толщины слоёв InSb от 1 монослоя до ≈ 1.5 МС приводит к существенному смещению линии ФЛ в длинноволновую область с сохранением её интенсивности при криогенной температуре. Структуры с толщиной InSb ≈ 1.5 МС также демонстрируют более яркую ФЛ при повышении температуры вплоть до 300 К, что обусловлено увеличением энергии локализации дырок, препятствующим их термическому выбросу в InAs матрицу. Однако при дальнейшем повышении толщины вставок до ≈ 1.9 МС (величины, близкой к критической толщине для InSb на InAs) интенсивность ФЛ значительно снижается, что, вероятно, вызвано ростом плотности дефектов.

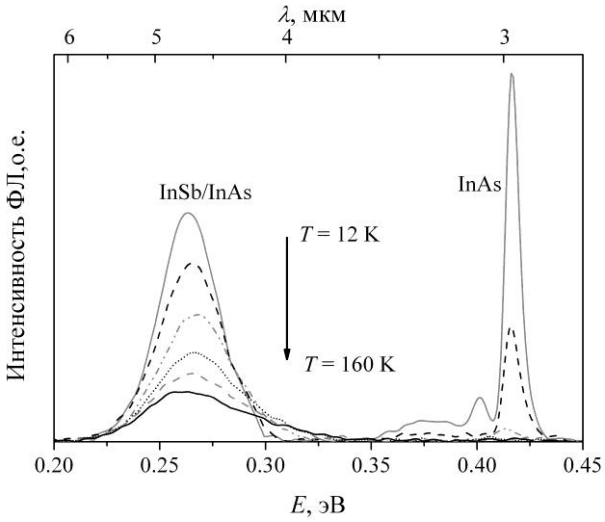

Рис. 3 Спектры ФЛ наноструктуры InSb/InAs с толщиной вставок InSb 1.5 монослоя

В параграфе 3.3 эффекты локализации носителей в наноструктурах InSb/InAs изучаются более детально посредством анализа температурных зависимостей их фотолюминесценции.

С повышением температуры от 12 К до ≈ 80 К было выявлено аномальное коротковолновое смещение пика ФЛ вставок InSb, показанное на рис. 4. Подобные эффекты в полупроводниковых структурах связываются с термическим заполнением уширенных состояний [1]. Заселённость таких состояний сдвигается по энергии относительно максимума их плотности на $-\sigma^2/kT$, где σ – дисперсия уширения, k – постоянная Больцмана. С ростом температуры этот сдвиг уменьшается, что приводит к смещению пика люминесценции в сторону больших энергий. Одновременно на энергию излучения влияет и температурное изменение ширины запрещённой зоны соответствующих материалов, которое становится определяющим при высоких T.

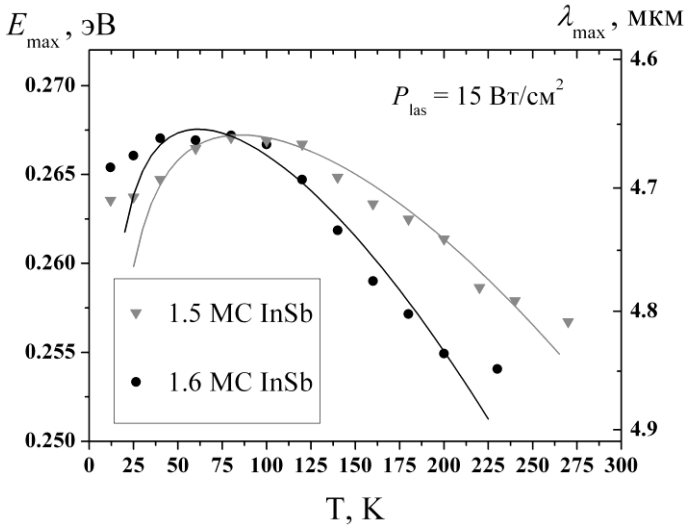

Рис. 4 Температурная зависимость энергии пика ФЛ для различных структур InSb/InAs. Точки – экспериментальные ранные, линии – расчёт

Применение данной модели для описания наблюдаемой температурной зависимости пика ФЛ наноструктур InSb/InAs демонстрирует хорошее согласие с экспериментальными данными (рис. 4). Расчётная величина дисперсии распределения, соответствующей уширению состояний, составила σ ≈ 4-5 мэВ.

Полученные результаты позволяют заключить, что наблюдаемый сдвиг фотолюминесценции в сторону высоких энергий соответствует термическому заполнению локализованных состояний, возникающих за счёт флуктуации толщины и состава вставок InSb. Благодаря данному эффекту наноструктуры InSb/InAs обладают большей температурной стабильностью люминесценции по сравнению с объёмными материалами.

[1] Eliseev P.G. Journal of applied physics. – 2003. – Т. 93. – №. 9. – С. 5404-5415

<u>В четвёртой главе</u> исследуются оптические свойства эпитаксиальных структур на основе InSb и твёрдых растворов $Al_xIn_{1-x}Sb$, включая структуры с квантовыми ямами $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$.

В параграфе 4.1 описываются исследуемые структуры, представляющие собой ненапряжённые эпитаксиальные слои InSb и твёрдого раствора $Al_xIn_{1-x}Sb$, выращенные на полуизолирующих подложках GaAs (100) с буферными слоями AlSb методом МПЭ. Диапазон составов $Al_xIn_{1-x}Sb$ составляет $x = 0 – 0.52$, и соответствует прямозонным твёрдым растворам ($x < 0.6$). В структурах, содержащих одиночные КЯ $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$, с целью снижения плотности дефектов формировались короткопериодные сверхрешётки $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$.

Параграф 4.2 посвящён определению оптической ширины запрещённой зоны E_g^{Γ} для $Al_xIn_{1-x}Sb$, и её зависимости от состава x твёрдого раствора. Показано, что полученные спектры поглощения $Al_xIn_{1-x}Sb$ могут быть описаны моделью Кейна для края собственного поглощения прямозонных полупроводников с непараболичной зоной проводимости. Соответствующая аппроксимация позволила определить ширину запрещённой зоны E_g^{Γ} для $Al_xIn_{1-x}Sb$.

Сопоставление полученных данных с информацией о составах x эпитаксиальных слоёв $Al_xIn_{1-x}Sb$, полученной методом рентгеноспектрального микроанализа, позволило получить зависимость $E_g^{\Gamma}(x)$. Данная зависимость описывается аналитической функцией вида: $E_g^{\Gamma}(x) = E_g^{\Gamma}(0) + [E_g^{\Gamma}(1) - E_g^{\Gamma}(0)]x - cx(1 - x)$, где $E_g^{\Gamma}(1) = 2.3$ *эВ и* $E_g^{\Gamma}(0) = 0.175$ эВ – энергии прямых межзонных переходов в точке Г для AlSb и InSb. Полученное значение коэффициента провисания составило $c = 0.32 \pm 0.06$ эВ. Данный результат уточняет единственные имеющиеся в литературе данные ($c = 0.43$ эВ), найденные на основе единичной серии образцов $Al_xIn_{1-x}Sb$ с градиентами по составу x порядка 10% [2].

[2] Isomura S., Prat F. G. D., Woolley J. C. Electroreflectance Spectra of $Al_xIn_{1-x}Sb$ Alloys //Physica Status Solidi (b). – 1974. – Т. 65. – №. 1. – С. 213-219.

В **параграфе 4.3** экспериментально получены спектральные зависимости показателя преломления $n(E)$ для InSb и $Al_xIn_{1-x}Sb$ вблизи края собственного поглощения. На зависимостях $n(E)$, аналогичных показанной на рис. 5, наблюдаются характерные пики вблизи энергии E_g^{Γ}. Дальнейший рост показателя преломления обусловлен, согласно современным модельным представлениям, вкладом переходов E_g^{L}. Обзор литературы не дал ранее опубликованных экспериментальных результатов по зависимости $n(E)$ для $Al_xIn_{1-x}Sb$. Полученные данные $n(E)$ задействованы в разработанной интерференционной методике контроля толщин эпитаксиальных слоёв InSb и $Al_xIn_{1-x}Sb$ на подложке GaAs.

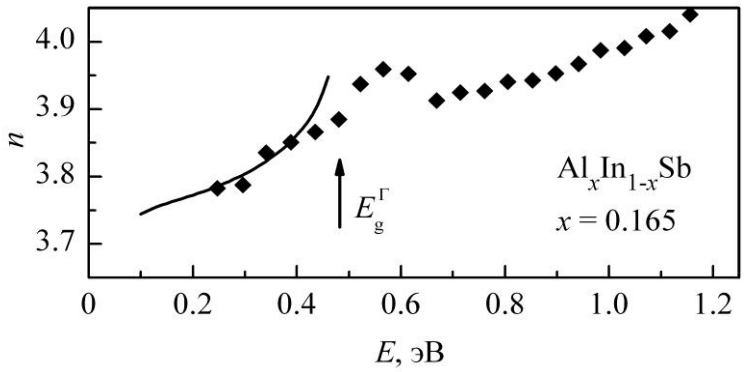

Рис. 5 Пример спектральной зависимости показателя преломления $Al_xIn_{1-x}Sb$. Точки – экспериментальные данные, линия – результаты расчёта по модели [3], применимой в области прозрачности ($E < E_g^{\Gamma}$)

В параграфе 4.4 рассматриваются фотолюминесцентные свойства квантовых ям InSb/$Al_xIn_{1-x}Sb$ и осуществляется интерпретация их спектра. Схема расположения слоёв в структуре приведена на рис. 6(а).

Измерения проводились в режиме пошагового сканирования фурье-спектрометра, что позволяло осуществлять синхронное усиление сигнала ФЛ и исключать тепловой фон. Исследуемые структуры продемонстрировали ФЛ КЯ в диапазоне 3.5 - 5.5 мкм, типичные спектры которой приведены на рис. 6(б). Наряду с основным максимумом в спектрах наблюдается ряд пиков, соответствующих переходам с более высоких энергетических состояний в КЯ.

[3] Пихтин А. Н., Яськов А.Д. Рефракция света в полупроводниках: Обзор //Физика и техника полупроводников. – 1988. – Т. 22. – №. 6. – С. 969-992.

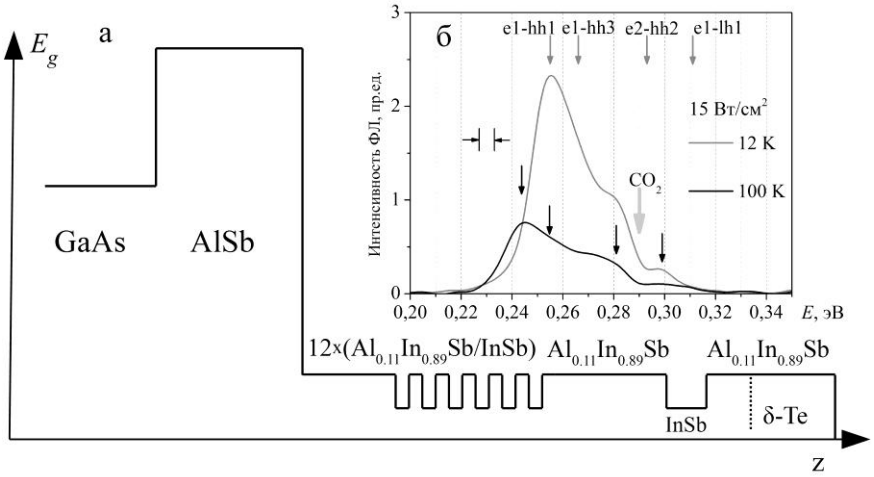

Рис. 6 Профиль ширины запрещённой зоны типичной структуры с КЯ вдоль направления роста (а), спектры ФЛ данной структуры (б). Стрелками показаны энергии излучательных переходов в КЯ $InSb/Al_{0.11}In_{0.89}Sb$ шириной 30 нм

Сравнение спектров с результатами расчётов уровней размерного квантования в КЯ $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$, выполненных в рамках 8-зонной модели Кейна с учётом механических напряжений, позволило интерпретировать наблюдаемые пики ФЛ. Был продемонстрирован алгоритм определения толщин квантовых ям $InSb/Al_xIn_{1-x}Sb$ посредством сопоставления экспериментально полученных спектров фотолюминесценции с расчётным энергетическим спектром.

Пятая глава посвящена исследованию оптических свойств фотоприёмных микроструктур n-InAs/n^{++}-InAs с различным легированием подложки.

В **параграфе 5.1** описываются исследуемые сильнолегированные серой подложки n^{++}-InAs, а также структуры с автоэпитаксиальными слоями n-InAs на таких подложках, выращенные эпитаксией из газовой фазы по хлоридно-гидридной методике. Концентрация носителей в легированном n^{++}-InAs составляла от $6\cdot10^{17}$ до $3\cdot10^{18}$ $см^{-3}$. Спектры отражения и пропускания измерялись при комнатной и криогенных температурах.

Параграф 5.2 посвящён реализации неразрушающей методики определения толщин эпитаксиальных слоёв n-InAs, основанной на интерференционных эффектах в спектрах отражения автоэпитаксиальных структур n-InAs/n^{++}-InAs. Были получены необходимые для применения методики параметры, выбран оптимальный спектральный диапазон. Проведённое сравнение с независимой разрушающей методикой определения толщин эпитаксиального слоя (металлографическим методом) показало хорошее совпадение результатов.

В **параграфе 5.3** описывается экспериментальное определение и анализ спектра показателя поглощения для n^{++}-InAs с различной степенью легирования. Полу-

ченные спектры количественно характеризуют величину сдвига края собственного поглощения, обусловленного эффектом Бурштейна-Мосса, а также интенсивность поглощения на свободных носителях.

В **параграфе 5.4** проведена оценка поглощения света в рабочем слое фоточувствительных микроструктур n-InAs/n^{++}-InAs при засветке со стороны n^{++}-InAs подложки. Соответствующие расчёты производилась на основе экспериментальных данных по отражению и пропусканию эпитаксиальных структур при различных температурах, а также спектров поглощения n^{++}-InAs с различной степенью легирования. Полученные результаты дают возможность подбирать оптимальный уровень легирования фоточувствительных структур n-InAs/n^{++}-InAs, исходя из требуемого спектрального диапазона и рабочей температуры. Повышение степени легирования позволяет расширить спектральный диапазон вплоть до $\lambda = 2.4$ мкм, а использование слаболегированных подложек повышает долю излучения, поглощаемую в рабочем слое n-InAs.

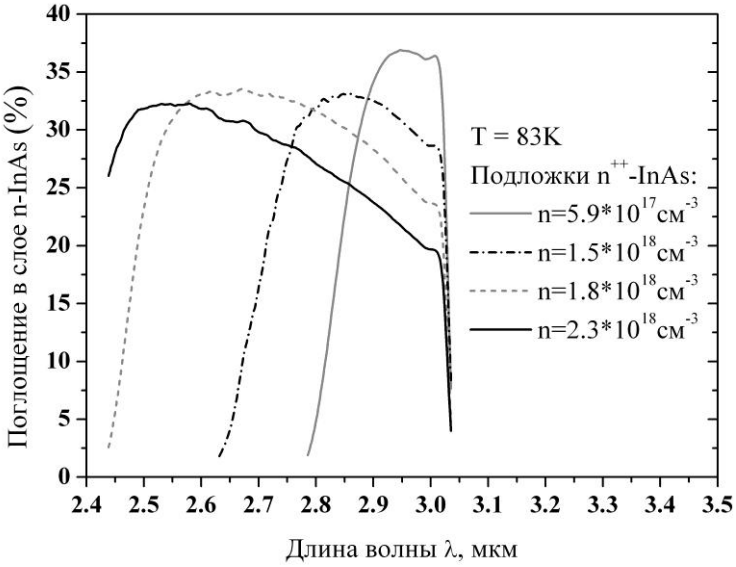

Рис. 7 Доля света, поглощаемая рабочим слоем фотоприемных структур n-InAs/n^{++}-InAs с различным уровнем легирования

<u>В заключении</u> сформулированы наиболее важные результаты исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определена зависимость ширины прямой запрещённой зоны от состава твёрдого раствора $Al_xIn_{1-x}Sb$. Коэффициент провисания зависимости $E_g^{\Gamma}(x)$ составляет $c = 0.32 \pm 0.06$ эВ.

2. На основе экспериментальных данных получена спектральная зависимость показателя преломления InSb и $Al_xIn_{1-x}Sb$ в области края фундаментального поглощения, включая область $E > E_g^{\Gamma}$.

3. Охарактеризованы фотолюминесцентные свойства InSb/$Al_xIn_{1-x}Sb$ квантовых ям при различных температурах. Наблюдаемые излучательные переходы

идентифицированы с использованием расчётов энергетического спектра КЯ по 8-зонной модели Кейна с учётом механических напряжений.

4. Экспериментально оценено влияние степени легирования на оптическое поглощение n^{++}-InAs при различных температурах, получены спектры показателя поглощения эпитаксиальных n-InAs слоёв на n^{++}-InAs подложках.

5. Проведена оценка поглощения света в рабочем слое фоточувствительных микроструктур n-InAs/n^{++}-InAs, освещаемых со стороны подложки. Получены результаты, позволяющие выбрать степень легирования n^{++}-InAs в зависимости от требуемого спектрального диапазона и рабочей температуры.

6. Реализована методика определения толщин слоёв InSb, $Al_xIn_{1-x}Sb$ и n-InAs за счёт интерференционной картины, наблюдаемой в спектрах отражения эпитаксиальных структур.

7. Показано, что варьирование толщин экстрамонослоёв InSb позволяет задавать люминесцентные свойства InSb/InAs наноструктур. Увеличение толщины вставок InSb от 1 монослоя до ≈ 1.5 монослоёв приводит к смещению пика ФЛ от 3.5 до 5 мкм (для T = 80 K), а также повышает температурную стабильность интенсивности излучения, что обуславливается более глубоким залеганием дырочных уровней.

8. С повышением мощности возбуждения P происходит сдвиг энергии максимума ФЛ наноструктур InSb/InAs пропорционально $P^{1/3}$, характерный для гетероструктур типа II. При повышении температуры до ≈ 80 К наблюдается аномальный коротковолновый сдвиг люминесценции, связанный с термическим заполнением локализованных состояний в InSb вставках.

9. Реализован оригинальный метод фотомодуляционной спектроскопии на основе фурье-спектрометра, эффективный в ИК диапазоне.

10. Проведена апробация разработанного метода в ближнем ИК диапазоне на примере структур с одиночными КЯ $In_xGa_{1-x}As$/GaAs. В среднем ИК диапазоне получен и проанализирован спектр фотоотражения объёмного InSb для λ = 2-10 мкм.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

А1. Комков О.С., Семёнов А.Н., Фирсов Д.Д., Мельцер Б.Я., Соловьёв В.А., Попова Т.В., Пихтин А.Н., Иванов С.В. Оптические свойства эпитаксиальных слоёв твёрдых растворов $Al_xIn_{1-x}Sb$ //Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – №. 11. С. 1481-1485.

А2. Komkov O. S., Firsov D.D., Pikhtin A.N., Semenov A.N., Meltzer B.Ya., Solov'ev V.A., Ivanov S.V. Molecular Beam Epitaxy Growth and Optical Characterization of $Al_xIn_{1-x}Sb$/GaAs Heterostructures //American Institute of Physics Conference Proceedings. – 2011. – Т. 1416. – С. 184-187.

А3. Комков О.С., Фирсов Д.Д., Семёнов А.Н., Мельцер Б.Я., Трошков С.И., Пихтин А.Н., Иванов С.В. Определение толщины и спектральной зависимости показателя преломления эпитаксиальных слоёв $Al_xIn_{1-x}Sb$ из спектров отражения //Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – №. 2. С. 258-263.

А4. Фирсов Д. Д., Комков О. С. Фотомодуляционная ИК фурье-спектроскопия полупроводниковых структур: особенности фазовой коррекции и применение метода //Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – №. 23. С.87-94.

А5. Комков О.С., Фирсов Д.Д., Ковалишина Е.А., Петров А.С. Спектральные характеристики поглощения в эпитаксиальных структурах на основе InAs при температурах 80 К и 300 К // Прикладная физика. – 2014. – №. 4. С. 93-96.

А6. Комков О.С., Фирсов Д.Д., Ковалишина Е.А., Петров А.С. Определение толщины автоэпитаксиальных слоёв арсенида индия методом инфракрасной фурье-спектроскопии // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. №3. – 2014. Принято к печати.

А7. Mironova M.S., Komkov O.S., Firsov D.D. and Glinskii G.F. Determination of InSb/AlInSb quantum well energy spectrum // IOP Journal of Physics: Conference Series. 2014. Принято к печати.

Публикации в трудах научно-технических конференций:

А8. Соловьёв В.А., Семёнов А.Н., Мельцер Б.Я., Мухин М.С., Терентьев Я.В., Фирсов Д.Д., Комков О.С., Иванов С.В. Оптические исследования наноструктур InSb/InAs, излучающих в среднем ИК диапазоне. // В сборнике трудов III Симпозиума

по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, Москва, 28-30.11.2011. – М.: ФИАН – 2012. – стр. 99-103.

A9. Комков О.С., Семёнов А.Н., Фирсов Д.Д., Пихтин А.Н., Иванов С.В. Оптические свойства гетеросистемы InSb/AlInSb/GaAs // Труды 22-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ОАО «НПО «Орион». – 2012. – стр. 124-126.

A10. Комков О.С., Фирсов Д.Д., Ковалишина Е.А., Петров А.С. Спектральные характеристики фотоприёмников на основе InAs в температурном интервале 80-300 К // Труды 23-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ОАО «НПО «Орион» – 2014. – стр. 240-242.

A11. Firsov D.D., Komkov O.S. Photomodulation Fourier transform infrared spectroscopy of narrow-gap semiconductor structures // Proceedings of 22nd International Symposium “Nanostructures: physics and technology”. Saint-Petersburg. – 2014. P. 148-149.