

На правах рукописи

Матвеев Борис Анатольевич

**Инфракрасная полупроводниковая оптоэлектроника с использованием
гетероструктур из арсенида индия и твердых растворов на его основе**

Специальность

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Официальные оппоненты

Доктор физико- математических наук, профессор
Воробьев Леонид Евгеньевич
СПБГПУ, СПб

Доктор физико- математических наук, ведущий научный сотрудник
Мынбаев Карим Джафарович
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, СПб

Доктор технических наук, профессор
Тришенков Михаил Алексеевич
НПО «ОРИОН», Москва

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический
Университет («ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова/Ленина/)

Защита состоится 16 декабря 2010 года в 10.00 часов на заседании диссертационного
совета Д.002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу:
194021, Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им.
А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан 16 ноября 2010 года.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по
вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета

Ученый секретарь диссертационного совета
Доктор физико- математических наук

Л.М.Сорокин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последнее десятилетие исследования полупроводниковых структур заняли прочное положение среди наиболее быстро развивающихся направлений физики. Источники и приемники на основе гетероструктур, работающие в диапазоне длин волн 3-5 мкм, могут быть использованы в системах контроля химического состава газообразных и жидких сред, оптической связи и в тепловидении. До недавнего времени основными материалами для изготовления оптоэлектронных приборов в вышеуказанном спектральном диапазоне были соли свинца (PbS, PbSe и др.), а также твердые растворы КРТ (HgCdTe); на сегодняшний день эти материалы все более оттесняются на второй план ввиду их металлургической нестабильности, восприимчивости к влаге и плохой теплопроводности, а также из-за успехов в создании квантово-каскадных лазеров на диапазон 5-14 мкм на основе полупроводников A^3B^5 и сопутствующей этому разработке методов фотолитографии и сборки приборов.

При проведении разработок лазеров, свето- и фотодиодов важным обстоятельством является кристаллическое совершенство, как исходных материалов (подложек), так и самих структур, поскольку упругие напряжения, дислокации несоответствия и наклонные дислокации могут существенно снизить квантовый выход и увеличить токи утечек. Однако, исследования дефектообразования в узкозонных гетероструктурах A^3B^5 носили фрагментарный характер без выявления фундаментальных закономерностей, а во многих случаях, например, в двойных гетероструктурах (ДГС), и вовсе отсутствовали. То же относится и к механическим свойствам узкозонных полупроводников A^3B^5 , таких как InAsSb, InAsSbP и InGaAsSb, учет которых важен при проведении анализа релаксации упругих напряжений в гетероструктурах.

В разработке светодиодов (СД) на основе арсенида индия и близких к нему узкозонных твердых растворов основные успехи были обусловлены, главным образом, улучшениями, связанными с обеспечением электронного ограничения и с геттерированием дефектов и остаточных примесей. Вместе с тем, ряд вопросов оставался недостаточно освещенным. К ним относится, прежде всего, вопрос о предельно возможном значении внутреннего квантового выхода (или коэффициента преобразования), определяемого собственными свойствами полупроводника. Очевидно, что адекватное исследование этого фундаментального параметра возможно лишь в «бездефектных» образцах, где рекомбинация Шокли-Рида незначительна и отсутствует затеняющий контакт. Сгущение линий тока под непрозрачным контактом и искажения ватт-амперной ($L-I$) характеристики, вызванные затенением выходящего излучения, как правило, игнорировались. На начало описываемых в работе исследований структур с

незатеняющим контактом получено не было, и в литературе можно найти немало противоречивых данных об эффективности излучательной рекомбинации в узкозонных СД; анализ этих противоречий можно найти в [А76].

При создании инжекционных лазеров на основе узкозонных полупроводников A^3B^5 был использован широкий арсенал средств повышения эффективности за счет увеличения высоты барьеров в ДГС и подавления Оже-рекомбинации при создании гетероперехода второго типа с непрямыми излучательными переходами, впервые предложенного в [1], туннельно-инжекционных лазеров на основе изотипных и неизотипных гетеропереходов $GaInAsSb/InAs$, $GaInAsSb/InGaAsSb$, а также «W»-образной конфигурации активной области. Вместе с тем, практически нет работ, где в качестве материала активной области использован твердый раствор $InGaAsSb$, близкий по составу к $InAs$, который по оценкам имеет требуемый для подавления Оже-рекомбинации дисбаланс энергий ширины запрещенной зоны и спин-орбитально отцепленной зоны. Кроме этого, в наиболее интересной для практических приложений спектральной области (3-3.3 мкм) не проводились исследования по созданию «вертикально излучающих» лазеров с электрической накачкой, а также лазеров с большим интервалом токовой перестройки длины волны, важных для спектроскопии высокого разрешения.

Одним из новых физических явлений, имеющих ряд важных практических приложений в фотометрии в среднем ИК-диапазоне спектра, является отрицательная люминесценция (ОЛ). На начало работы имелись лишь единичные публикации по наблюдению ОЛ в полупроводниковых p-n структурах, проведенные в Великобритании и США, причем «критическая температура», т.е. температура, при которой коэффициент преобразования ОЛ превышает таковую при прямом смещении диода, была определена лишь в одной из работ в образцах на основе сверхрешеток $InAs/InAsSb$ ($\lambda=4.3$ мкм) ($T=310$ К). Исследования ОЛ при температурах выше 310 К, равно как и данные о значительном превышении эффективности ОЛ над эффективностью «положительной» люминесценции, в литературе отсутствовали. Для фотодиодов и светодиодов с активной областью из $InAs$, работающих при комнатной температуре, молчаливо полагалось, что создание освещаемых через подложку структур с согласованными периодами решеток слоев и подложки затруднено, в связи с чем, данные об «иммерсионных» свето- и фотодиодах на основе $InAs$ и близких к нему твердых растворов для диапазона 3-5 мкм отсутствовали.

Целью диссертационной работы является комплексное исследование оптических, электрических и механических свойств, а также дефектообразования в полупроводниковых твердых растворах и гетероструктурах с составами, близкими к $InAs$, и создание эффективно излучающих и принимающих излучение приборов в средней

инфракрасной области спектра (3-5 мкм), пригодных для решения задач газового анализа и энергосберегающего (минимально потребляющего) приборостроения.

Для осуществления поставленной цели решались следующие задачи:

В части технологии получения полупроводниковых структур:

- разработка методов определения степени упругой деформации в градиентных структурах и исследование упруго-пластического состояния градиентных и двойных гетероструктур.

- разработка методов изготовления градиентных и двойных диодных гетероструктур InAsSbP/InAs, InGaAsSb/InAs с низкой плотностью дислокаций и низкой концентрацией остаточных примесей в активной области.

В части исследования физических процессов, обеспечивающих повышение эффективности диодных структур:

- исследования отрицательной люминесценции в диодных структурах в широком диапазоне температур.

- исследования спонтанного и стимулированного излучения в структурах InAsSbP/InAs, InGaAsSb/InAs со встроенными резонаторами.

В части оптимизации конструкции свето- и фотодиодов:

- исследование факторов, обеспечивающих получение максимального коэффициента преобразования и обнаружительной способности в узкозонных диодах A^3B^5 (разработка отражающих омических контактов к InAsSbP и InAs и конструкций меза-диодов со встроенными микрорефлекторами и повышенными коэффициентом вывода/ввода излучения, тепловой проводимостью и минимальными шумами).

В части создания лазеров, свето- и фотодиодов и исследования возможности их использования для спектроскопии в среднем ИК-диапазоне:

- исследование возможности использования диодных лазеров на основе InAsSbP/InGaAsSb для спектроскопии высокого разрешения.

- исследование возможности использования свето- и фотодиодов среднего ИК-диапазона спектра для создания малогабаритных высокоточных оптических и оптико-акустических измерительных систем.

Диссертационная работа представляет совокупность актуальных исследований, имеющих отношение ко всем перечисленным задачам.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней развито новое научное направление в изучении полупроводниковых гетероструктур, полученных в условиях высокой пластичности подложки, основанное на представлениях о пониженной пластичности четверных твердых растворов и о формировании «инверсного»

распределения плотности дислокаций в процессе роста, и приборных структурах, совмещающих в себе функциональные возможности работы в качестве источников отрицательной люминесценции, свето- и фотодиодов и лазеров в средней ИК-области спектра (3-5 мкм). Данное научное направление является оригинальным, и возникло в результате деятельности автора диссертации. Развита методология количественной характеристики особенностей вышеуказанных гетероструктур, включая лазерные гетероструктуры, на основе оптических, металлографических и рентгенодифракционных методов. Исследованы процессы релаксации упругих напряжений и выявлена взаимосвязь электрических и оптических свойств слоев, гетероструктур и приборных структур с особенностями методов их получения. Обнаружены подавление безызлучательной Оже-рекомбинации при повышенных температурах в узкозонных диодных структурах при обратном смещении и модуляция равновесного теплового излучения встроенным резонатором Фабри-Перо.

Практическая ценность работы заключается в фундаментальном характере исследованных явлений и установленных закономерностей. Научные выводы носят общий характер и не ограничиваются объектами, непосредственно исследованными в работе. Новые методы количественного определения величины остаточной упругой деформации в структурах с профилированной подложкой, коэффициента оптического отражения, основанного на анализе ИК изображений, в сочетании с традиционными методами изучения полупроводниковых слоев и гетероструктур являются основой для разработки методов диагностики сложных структур, изучение которых традиционными методами затруднено. Установленные в результате проведенных исследований механизмы релаксации упругих напряжений могут быть использованы также и в других, далеких от полупроводниковой электроники областях, например, в рентгеновской технике при создании фокусирующих кристалл-монокроматоров с высоким фактором заполнения и комбинированных устройств, работающих в оптическом и рентгеновском диапазонах спектра. Результаты, полученные в диссертации, существенно углубляют понимание взаимосвязи электрических и оптических свойств полупроводниковых слоев, гетероструктур и приборных структур, что, с одной стороны, позволяет совмещать в одном устройстве функции нескольких приборов, например, таких как свето-, фотодиод и прибор отрицательной люминесценции, а с другой стороны, расширяет возможности диагностики, например, с использованием понятия предельно возможного коэффициента преобразования (NPL/I_{sat}), где NPL - мощность отрицательной люминесценции, а I_{sat} - значение тока насыщения. Продемонстрированное подавление Оже-рекомбинации в режиме ОЛ будет полезно для проведения оптических измерений в устройствах,

работающих в условиях повышенных температур, когда обычные («положительные») фотонные источники неэффективны. Разработанные подходы создания источников излучения с «тонкой» структурой спектра (резонансы Фабри-Перо) будут востребованы для спектроскопии высокого разрешения. Ряд полученных результатов, например подавление потерь, вызванных полным внутренним отражением, с помощью техники иммерсии, был использован при создании эффективных свето- и фотодиодов, уже нашедших практическое применение, например, в устройствах для определения концентрации углеводородов на трассе [2] и паров этанола в выдыхаемом воздухе.

Основные положения, выносимые на защиту:

Положение 1. Релаксация упругих напряжений, происходящая в процессе эпитаксиальной кристаллизации градиентных слоев твердых растворов A^3B^5 (*InAsSbP*) в области температур пластичности подложки из соединения A^3B^5 (*InAs*), сопровождается введением в неё дислокаций преимущественно одного знака вследствие её повышенной пластичности по сравнению с твердым раствором A^3B^5 . В процессе роста двойных гетероструктур *InAsSbP/InGaAsSb/InAsSbP* релаксация упругих напряжений происходит при преимущественном образовании сеток дислокаций несоответствия на границе с подложкой.

Положение 2. В градиентных структурах *InAsSbP/InAs*, *InGaAsSb/InAs*, полученных эпитаксиальной кристаллизацией в области температур пластичности *InAs* (680-720°C), слой твердого раствора деформирован в основном, упруго, а подложка - пластически. При этом градиентный эпитаксиальный слой без подложки сферически искривлен с радиусом кривизны $R_0 = a / \text{grad } a$, где a – период решетки твердого раствора.

Положение 3. Излучение, сформированное в гетероэпитаксиальной структуре с неоднородной толщиной подложки, линейно поляризовано, что связано с перераспределением остаточных упругих деформаций при профилировании подложки. Величина и спектральная зависимость степени линейной поляризации зависят от величины остаточных напряжений и характера профиля толщины подложки.

Положение 4. Вероятность поглощения и излучательной рекомбинации в слое *InAs* или твердого раствора на его основе, интегрированных внутри резонатора Фабри-Перо, в длинноволновой части спектра имеют резонансные максимумы и минимумы, соответствующие указанному резонатору.

Положение 5. Эффективность источника отрицательной люминесценции на основе узкозонных твердых растворов *InAsSb* увеличивается с ростом обратного тока вследствие уменьшения или полного подавления процессов безызлучательной Оже-рекомбинации при экстракции носителей заряда из областей, примыкающих к р-п переходу. При этом эффект подавления Оже-рекомбинации усиливается с повышением температуры, и при превышении пороговой температуры мощность отрицательной люминесценции превышает мощность «положительной» люминесценции.

Положение 6. В лазерах на основе двойных гетероструктур *InAsSbP/InGaAsSb* длина волны излучения уменьшается при увеличении тока сверх порогового значения

вследствие возрастания концентрации инжектированных носителей заряда, при этом скорость токовой перестройки длины волны увеличивается с уменьшением длины резонатора.

Положение 7. Предложены и реализованы новые типы высокоэффективных флип-чип оптоэлектронных приборов для средней ИК-области спектра на основе гетероструктур *InAs/InAsSbP*, *InGaAsSb/InAsSbP*. *InAsSb/InAsSbP* с внутренними концентраторами, отражающими контактами и «антиотражающей» световыводящей поверхностью, совмещающие в себе функциональные возможности свето- и фотодиодов, а также приборов отрицательной люминесценции. Указанные приборы перспективны для практического применения в абсорбционных анализаторах, оптико-акустических сенсорах газов и миниатюрных спектрометрах.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации представлялись для обсуждения Российскому и международному научным сообществам на конференциях по Физике и технологии GaAs и других полупроводников III-V (Conf. on Physics and Technology of GaAs and other III-V Semiconductors (1986, 2006 Томск), симпозиумах Materials Research Society (MRS, 1990 (v.216), Boston, USA, 2005 Boston, USA), 3-ей международной советской конференции по волоконной оптике (International Soviet Fiber Optics Conference (ISFOC-93)(1993 СПб), конференциях общества оптических инженеров SPIE (1993 Boston, USA (v,2069), 1995 Munich, Germany (v.2506), 1996 Uzhgorod, Ukraine (v.3182), 2000 Kyiv, Ukraine (v.4355), 2001 San Jose, USA (v.4285, v.4278), 2002 San Jose, USA (v.4650), 2005 Warsaw, Poland (v.5957), 2007 Prague, Czech rep.(v.6585), 2009 San Jose, USA (v. 7223), 2010 San Francisco, USA (v. 7597, v.7609, v.7607)), European Conference on Optical Chemical Sensors and Biosensors (EUROPTRODE)(1994 Firenze, Italy, 2000 Lyon, France), International Symposium on Monitoring of Gaseous Pollutants by Tunable Diode Lasers (1994, 1998 Freiburg, Germany), CLEO/Europe'96 (1996 Hamburg, Germany), International Conference on Mid-infrared Optoelectronics Materials and Devices (MIOMD) (1996 Lancaster, UK, 1998 Prague, Czech Rep., 2002 Annapolis, USA, 2004 СПб, 2005 Lancaster, UK, 2007 Bad Ischl, Austria., 2008 Freiburg, Germany), Optics Day'97 (1997, Tampere, Finland), 2nd International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy (1998, Moscow, Russia), International conference on Ecology of cities (1998, Rhodes, Greece), International Conference "Physics at the turn of the 21st century" (1998, СПб), Российской конференции по физике полупроводников (1999 Новосибирск, 2003 СПб, 2007 Екатеринбург), Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (2002, 2004, 2008, 2010 Москва), Международной конференция Оптика, Оптоэлектроника и Технологии (2001, Ульяновск), 15-th UK National Quantum Electronics and Photonics Conference (QEP-15, Mid-Infrared Workshop) (2001 Glasgow,

Великобритания), Всероссийской научной конференции «Физика полупроводников и полуметаллов (2002 СПб), Northern Optics (2003 Espoo, Finland), 11th international Conference on Narrow Band Semiconductors (2003 Buffalo, USA), Международном семинаре по оптоэлектронике (2003, 2008 СПб), конференции «Лазеры для медицины, биологии и экологии», (2005 СПб), Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems, (2005 СПб), IEEE SENSORS (2008, Italy) и Международном Форуме по нанотехнологиям (2008, 2009 Москва), а также неоднократно докладывались на Большом Ученом Совете, Ученом Совете Центра Физики Наногетероструктур и семинарах Лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 84 работах. Библиографический список публикаций приведен в конце диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, содержащего основные результаты, списка основных работ автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Общий объем 257 страниц, включая 175 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 372 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, её научная новизна и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Содержит краткий анализ фактов, являющихся предпосылками для развития новых представлений о свойствах полупроводниковых гетероструктур и приборных структур для средней ИК-области спектра. В первой части главы приводятся данные о свойствах структур и слоев из арсенида индия и твердого раствора $InAs_{1-x}Sb_x$, являющихся основными материалами для получения светодиодов (СД) в диапазоне 3-5 мкм, и отмечается основное препятствие для получения высокой эффективности преобразования - безызлучательная Оже-рекомбинация. Однако, даже при ее отсутствии (условия малых токах ($j < 10 \text{ А/см}^2$)) коэффициент преобразования оказывается невысоким - максимальное опубликованное значение квантовой эффективности в объеме, полученное при детальном анализе зависимости квантовой эффективности от уровня легирования активной области, составляло 24% для p-InAs, $p = 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [3], что существенно ниже, чем в СД на основе широкозонных материалов таких, как GaAs. Рассмотрены способы уменьшения скорости Оже-рекомбинации, основанные чаще всех других на использовании пространственно непрямых переходов между уровнями, образованными в сверхрешетках второго типа InAs/In(As_{1-x}Sb_x) [4], с обеих сторон гетероперехода второго рода в "W"-образных квантовых ямах [5] или в одиночном гетеропереходе [6]. Отмечается, что вопреки теоретическим предпосылкам, показывающим существенное снижение величины матричного элемента для Оже процесса, квантовый выход при температуре жидкого азота составлял всего ~30%; при 300 К он уменьшался в ~10 раз до значения $\eta_{\text{int}} = 2.5\%$ [6]. При этом в более поздних работах диодные структуры с гетеропереходами второго рода критиковались за высокую скорость Оже-рекомбинации, связанную с высокой концентрацией носителей (10^{18} см^{-3}), локализованных в узком слое толщиной порядка 100 нм [7]. Обращено внимание на отсутствие в литературе анализа влияния растекания тока на вольт-амперные (I-V) и ватт-амперные (L-I) характеристики

СД с контактами ограниченной площади, что приводило к некорректной интерпретации L-I характеристик и завышению значений фактора идеальности I-V характеристик и коэффициентов Оже-рекомбинации.

В этой же главе систематизированы сведения об инжекционных лазерах для спектрального диапазона 3-5 мкм, для которых твердый раствор InAsSbP создает с InAs гетеропереход второго типа, а также лазерах на основе изотипных и неизотипных гетеропереходов *GaInAsSb/InAs*, *GaInAsSb/InGaAsSb*. Указывается на возможность создавать туннельно-инжекционные лазеры (*GaInAsSb/InAs*, *GaInAsSb/InGaAsSb*), и лазеры *InAsSbP/InAs* с энергетическими разрывами $\Delta E_v = -52$ мэВ, $\Delta E_c = 15$ мэВ [8], соотношение энергий которых ($\Delta E_v / \Delta E_c \approx 3.4$) оптимально для подавления интерфейсной оже-рекомбинации [9]. Делается вывод о том, что вопрос об эффективности интерфейсного канала рекомбинации остается открытым, поскольку расчетные значения пороговых токов для рекомбинации в объеме оказались почти на порядок ниже экспериментально наблюдаемых значений, а значения максимальной рабочей температуры ($T_{\max} = 203$ К) оказалась ниже, чем в образцах с гетеропереходом первого типа.

Рассмотрены наиболее часто упоминаемые подходы при изготовлении лазеров среднего ИК-диапазона, а именно, создание квантово-каскадных лазеров, работающих преимущественно в импульсном режиме, а также «W»-образной конфигурации активной области, использованной в работах исследователей из Университета в Монпелье (Франция) и Naval Research Lab.(США). Типичным представителем последнего является лазер, в котором в две квантовых ямы/колодца (QW) для электронов в InAs «вставлена» яма для дырок из Ga(In)Sb. Все ямы в свою очередь окружены барьерами из Al(Ga)Sb или AlGaAsSb (GaInAsSb). Невысокая эффективная масса электронов позволяет им осуществлять перекрытие с дырочной ямой из Ga(In)Sb, в то время как высота барьеров достаточна для формирования двумерного квантования состояний. Согласно теоретическому рассмотрению свойств InAs-лазеров на основе набора квантовых ям и структур с "W" профилем зон в активной области традиционные лазеры на основе квантовых ям InAsSb/InAs [10] вряд ли будут работать при комнатной температуре. Наилучшая по ожидаемым характеристикам структура типа "W" содержала 10 периодов квантовых ям InAsSb/InAsP/InAsSb/InAsPSb, волноводы InAsSbP, и барьерные слои AlAsSb. Для значений коэффициента оптических потерь $\alpha = 25$ см⁻¹ и коэффициента Оже-рекомбинации $C = 5 \times 10^{-27}$ см⁶/с ожидаемая плотность порогового тока при комнатной температуре в такой структуре составила $J_{th} = 6.6$ кА/см². Однако, работа таких лазеров при комнатной температуре пока не продемонстрирована. Это же относится и к дисковым лазерам на модах полного внутреннего отражения – WGM («whispering gallery mode»), работающим лишь до 125 К, для которых предполагается поднять добротность резонатора до 10^6 [11].

В этой же главе обращено внимание на близость требований, предъявляемых к фотодиодам и приборам отрицательной люминесценции (ОЛ), систематизированы литературные данные о разработках таких приборов [A73] и рассмотрены основные свойства ОЛ на примере магнитоконцентрационного эффекта [12, 13], работ Эллиота и его сотрудников по изучению экстракции носителей из примыкающей к обратно-смещенному p-n переходу области [14], а также классических расчетов, выполненных Пипой и Липтугой [15]. Проанализированы способы оценки эффективности ОЛ и эффективного понижения радиационной температуры (Δt [К]) и области применения ОЛ, из которых главными являются калибровка чувствительности и создание холодных экранов для фотоприемных матриц. В диодах HgCdTe отмечена немонотонность I-V характеристики, состоящая в резком падении обратного тока с появлением участка отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), связанная с истощением активной области. Обращено внимание на то, что данный эффект не наблюдался в диодах на основе полупроводников A^3B^5 , для которых зависимость мощности ОЛ от тока во всех

исследованиях являлась прямо-пропорциональной: с увеличением обратного тока росло истощение активного слоя носителями заряда и, соответственно, увеличивалась мощность ОЛ. Это свойство ОЛ было использовано нами для расчета коэффициента преобразования «идеального» фотонного излучателя.

Далее в главе рассмотрены вопросы, относящиеся к разработке фотодиодов, при этом отмечены металлургическая стабильность и невосприимчивость к влаге полупроводников A^3B^5 , делающие последние конкурентноспособной альтернативой фотодетекторам из CdHgTe и PbSe(PbS), используемым в системах оптической локации и противовоздушной обороне [16]. Отмечены возможность создания конструкций типа «back-side illuminated» (InAsSb/GaSb), создание области пространственного заряда в широкозонном слое, обеспечивающее снижение темновых токов, например, в структуре n-InAsSb/AlAsSb/p-GaSb, использование широкозонного «окна» на поверхности InAs, расширяющего спектральную кривую в область коротких длин волн и позволяющего снизить поверхностную рекомбинацию. Рассмотрены геттерирование примесей и дефектов в процессе роста при добавлении в расплав небольших количеств Ga или Gd и пассивация поверхности с помощью $(HN_4)_2S_x$, при которых внутренняя квантовая эффективность и обнаружительная способность достигали, соответственно, 100% и $D_\lambda^* = 8 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ [17], что близко к теоретическим оценкам в работе [18]: $D_\lambda^* = 5.4 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ (300 K) при $\lambda = 2.9 \text{ мкм}$.

Отмечается большой интерес к исследованиям по созданию сверхрешеток на основе гетеропереходов второго типа InAs/GaInSb и InAs/GaSb, в которых масса электрона больше, чем в CdHgTe и InAsSb, и ожидаемое значение туннельного тока невелико, и обсуждаются возможные причины противоречивости некоторых экспериментальных результатов. Так, в работе [19] для разделения фотогенерированных носителей и получения высоких значений обнаружительной способности ($D_\lambda^* = 5 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$, 4 мкм, 300 K), использовался изотипный гетеропереход второго типа n-InAsSb/n-GaSb. В других же работах аналогичный гетеропереход использовался в ином качестве - для получения низкого контактного сопротивления к GaSb (Te, $n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) [20, 21].

На основе сопоставительного анализа параметров опубликованных структур и фотодиодов, имеющих различающиеся постоянные решетки, сделан вывод о существенном влиянии дислокаций на характеристики ФД. Количественно это влияние было продемонстрировано в структурах n-InAs_{0.55}Sb_{0.15}P_{0.3} /n-InAs_{0.88}Sb_{0.11} /p-InAs_{0.55}Sb_{0.15}P_{0.3} / p -InAs_{0.94}Sb_{0.06} / p -InAs, в которых толщина буферного слоя p - InAs_{0.94}Sb_{0.06} варьировалась в пределах 1-9 мкм, [22]. С увеличением толщины буферного слоя в вышеуказанных пределах плотность наклонных дислокаций уменьшалась с $N = 3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ до $N = 4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, что сопровождалось двукратным увеличением значений R_0A , 2.7-кратным увеличением чувствительности и 4-кратным возрастанием обнаружительной способности. Проведенный анализ привел к формулировке необходимости разработки флип-чип фотодиодных структур, обладающих одновременно высоким кристаллическим совершенством и прозрачностью подложки в изопериодных и неизопериодных с подложкой гетероструктурах.

Глава 2 основывается на результатах работ [A1, A3-A5, A8, A15 -A19, A22, A24-A27, A33, A42, A71] и в ней представлены экспериментальные результаты изучения структурных, электрических и оптических свойств слоев арсенида индия и твердых растворов на его основе, и проведен анализ этих данных в рамках концепции радиальной симметрии элементарной ячейки градиентного кристалла с линейным по координате изменением периода решетки, оценок распределения упругих деформаций в структурах во время роста, и измерений механических свойств эпитаксиальных слоев (ЭС) твердых растворов. В начале главы приведен краткий анализ существующих воззрений на дефектообразование в полупроводниковых структурах и способов снижения плотности

дислокаций в неизопериодных композициях. Экспериментальные результаты [А4, А5, А8, А18] получены для градиентных ЭС *InAsSbP* толщиной 30-50 мкм с увеличивающимся в направлении роста периодом решетки ($\text{grad } \bar{a} = (2 \div 5) \cdot 10^{-8}$, несоответствие периодов решеток на границе раздела (ГР) $(\Delta \bar{a}/\bar{a}) = (-0.5\% \div +0.5\%)$), и для двойных гетероструктур *InAsSbP/InAs/InAsSbP/InAs*, *InAsSbP/InGaAsSb/InAsSbP/InAs* с общей толщиной слоев ~ 10 мкм, полученных методом ЖФЭ в установке открытого типа в режиме принудительного охлаждения насыщенного раствора-расплава при температурах 680-730° С на подложках *InAs*(111) n-типа проводимости с концентрацией носителей заряда $(3-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и плотностью дислокаций на уровне 10^4 см^{-2} . ЭС специально не легировались и имели n-тип проводимости с концентрацией электронов $n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Ряд

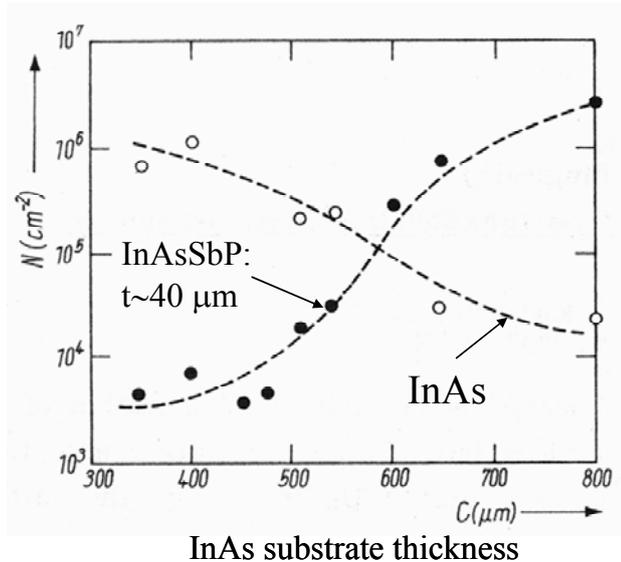


Рис. 2 Плотность наклонных дислокаций в подложках *InAs* и градиентных ЭС *InAsSbP* в зависимости от исходной толщины *InAs*.

образцов был приготовлен в виде клиновидных пластин. Металлографические исследования показали однородное распределение плотности дислокаций по поверхности градиентного слоя ($N=10^4-10^5 \text{ см}^{-2}$) и существенное большее значение и неоднородное распределение плотности дислокаций в подложке ($N=10^5-10^7 \text{ см}^{-2}$), коррелирующее с ее локальной толщиной. Из анализа данных рентгенодифракционных измерений профиля дублета CuK_α - линии на отражении (333) и (111) при засветке вогнутой поверхности подложки в образцах с однородной толщиной расходящимися пучками и измерения

пространственного распределения интенсивности отраженного коллимированного пучка диаметром ~ 1 мм в зависимости от расстояния между кристаллом и приемником был сделан вывод об изгибе отражающих плоскостей за счет равномерного введения в

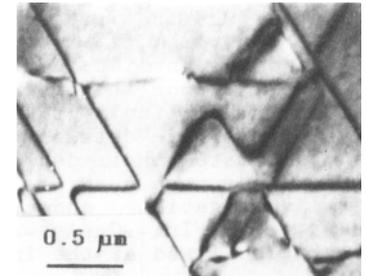


Рис. 3 Электронно-микроскопические изображения дислокационных сеток в ДГС на первой от подложки ГР.

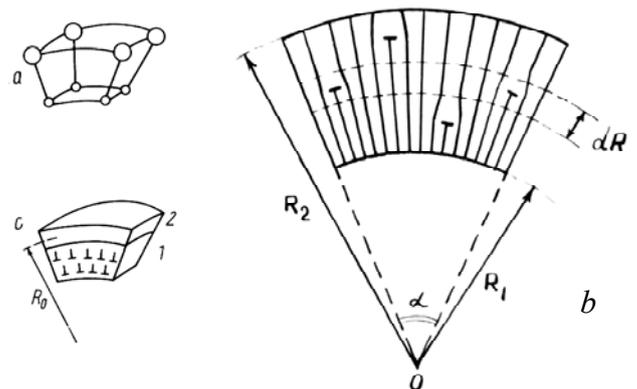


Рис. 1 Модель элементарной ячейки градиентного кристалла (а), кристаллической решетки, содержащей дислокации одного знака (b), пластически изогнутой подложки (с, 1) и релаксированного градиентного ЭС без ДН (с, 2)

кристалл дислокаций преимущественно одного типа (знака) аналогично тому, как это имеет место в пластически изогнутом кристалле (см. **Рис. 1, с**) [A3]. Совокупность данных о пониженной пластичности (повышенной твёрдости) многокомпонентных твёрдых растворов по сравнению с бинарными соединениями A^3B^5 [A25], данных рентгенодифракционного и металлографического анализа [A8, A18] позволили сформулировать концепцию оригинального способа получения кристаллически совершенных градиентных слоев твердых растворов, основанную на получении упруго деформированных слоев, сопряженных с пластически деформированной и изогнутой подложкой, как это представлено на **Рис. 1**. В основе концепции – предложенная модель, описывающая плотность краевых дислокаций в кристалле как: $N = \frac{1}{a} \left(\frac{grad \bar{a}}{\bar{a}} - \frac{1}{R} \right)$, где \bar{a} –

период решетки, R – радиус кривизны изопериодных плоскостей, и представление о преимущественной релаксации напряжений в подложке – «инверсном дефектообразовании», обусловленном особенностями перераспределения упругих напряжений при пониженной пластичности растущего градиентного слоя. Согласие с концепцией было получено при исследовании дефектообразования во всех исследованных градиентных системах (InGaAsSb/InAs, GaAsSbP/GaAs, InAsSbP/InAs), для которых наименьшая плотность дислокаций достигалась при максимальном изгибе систем ($R \rightarrow \bar{a}/grad \bar{a}$), обеспечиваемом выращиванием на наиболее тонких подложках в условиях пластичности последних (см. **Рис. 2**) [A19]. Описанным способом были также получены образцы $InAsSb_x$ в области «несмешиваемости» ($x \sim 0.54$) с резким краем оптического поглощения ($\epsilon \sim 7$ мэВ, $\alpha_0 = 644 \text{ см}^{-1}$ при $h\nu = E_{gmin}$), позволяющим рассматривать полученные слои, как монокристаллы [A23]. Применительно к образцам на основе двойных гетероструктур InAsSbP/InGaAsSb/InAsSbP/InAs с относительно тонкими слоями (3-4 мкм) упомянутая «инверсия», согласно проведенному комплексному исследованию с использованием рентгенодифракционных, электронно-микроскопических методов, проявлялась в том, что в образцах с регулярными сетками дислокаций несоответствия (ДН), в которых $(\Delta d/d)_\perp > 2 \cdot 10^{-3}$, в процессе роста третьего от подложки слоя со значительным несоответствием ($(\Delta d/d)_\perp = 4 \cdot 10^{-3}$) напряжения сжатия релаксировали с образованием дополнительной сетки ДН на границе раздела (ГР) с InAs при одновременном «расширении» всех трех слоев в направлении, параллельном ГР (см. **Рис.3**) [A22, A26, A33]. Описанная «инверсия» важна при создании полупроводниковых приборов, например, инжекционных лазеров, в которых сформированные дислокации расположены вне рабочей зоны приборов и поэтому не оказывают влияния на их работу.

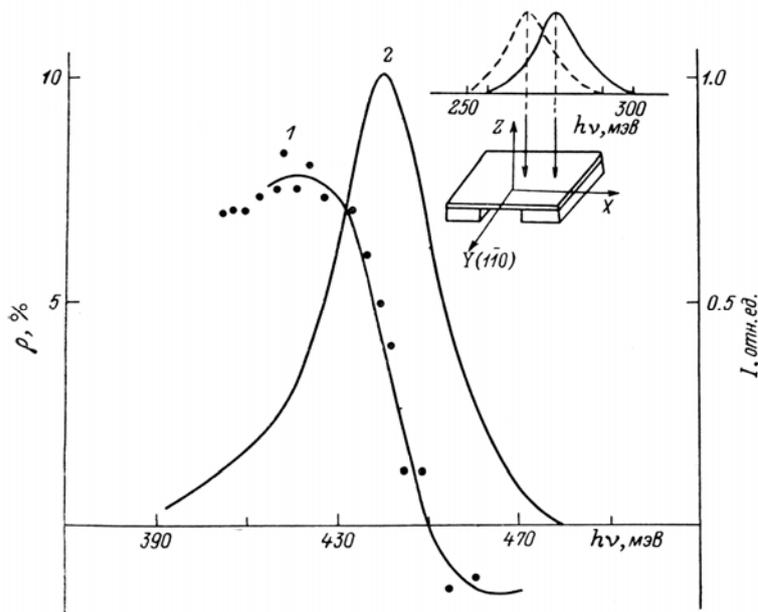


Рис. 4 Спектральная зависимость степени линейной поляризации ($\rho(h\nu)$, точки и кривая 1) и интенсивности фотолюминесценции (кривая 2) ЭС градиентной структуры $InAsSbP/InAs$ с профилированной в виде швеллера подложкой при 77 К.

Измерения остаточных упругих деформаций, проведенные с использованием оптических методов, подтвердили одно из основных положений вышеприведенной концепции, а именно, положение о повышенной прочности (твёрдости) четверного твердого раствора по сравнению с тройным твердым раствором и бинарной подложкой A^3B^5 . При измерениях остаточной упругой деформации были использованы образцы, в которых был сформирован профиль толщины подложки в виде «швеллера» и в которых, согласно проведенным рентгенодифракционным измерениям брэгговского асимметричного отражения (531) на CuK_{α} -излучении, имелась квазиодноосная деформация, вызванная перераспределением напряжений при формировании профиля толщины. Расчеты, выполненные по Биру и Пикусу [23] ($\Delta E_g = (\Xi_a + a)(Sp\varepsilon^{H_i} - Sp\varepsilon^{H_0})$), где Ξ_a, a – константы деформационного потенциала, ε^{H_0} – тензор деформации непрофилированной структуры, ε^{H_i} – тензор деформации профилированной структуры в области с измененной толщиной подложки, для которой $\varepsilon_{xx}^{H_i}(z) = -\nu \cdot \varepsilon_{yy}^{H_0}(z) + (1 + \nu) \cdot \varepsilon_{yy}^{H_i}(z)$, $\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{1 - \nu}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})$, где $\nu = 0.39$, а ось X направлена вдоль направления $[11\bar{2}]$, Y – $[\bar{1}10]$, Z – $[111]$ (см. вставку к **Рис.4**) [A15, A16, A24], а также вычисления по предложенному формализму, связывающему спектральную зависимость степени линейной поляризации (СЗСПИ) фотолюминесценции и величину деформации в центральной области «швеллера» [A27], показали, что четверные твердые растворы InAsSbP, InGaAsSb обладают значениями остаточной деформации ($\varepsilon_T \sim 0.2\%$), существенно большими, чем в тройных сплавах InAsSb, близких по составу к InAs ($\varepsilon_T < 0.08\%$).

В конце главы уделено внимание изучению оптических и электрических свойств четверного твердого раствора InGaAsSb, обогащенного InAs и образующего вместе с InAsSbP в силу вышеперечисленных особенностей дефектообразования, а также из-за его более высокой по сравнению с InAs эффективности излучательной рекомбинации привлекательную для создания лазеров и светодиодов гетеропару. Установлено [A42], что легирование раствора-расплава гадолинием до концентраций $X_{Gd}^I = 0.004 \div 0.005$ ат.% приводит к снижению концентрации электронов в эпитаксиальных слоях InGaAsSb до $n_{77} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и увеличению их подвижности до $U \approx 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. При этом снижение концентрации остаточных примесей происходит за счет уменьшения концентрации как доноров, так и акцепторов. С увеличением содержания Gd в жидкой фазе от 0.005 до 0.010 ат.% происходит дальнейшее снижение концентрации электронов до $n_{77} = (7 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ за счет возрастания концентрации акцепторов и перекомпенсации примесей, при этом подвижность носителей уменьшается до $U = (3 \div 4) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. При легировании Gd в интервале концентраций $X_{Gd}^I = 0.004 \div 0.005$ ат.% наблюдается увеличение интенсивности ФЛ в $(4 \div 10)$ раз и уменьшение полуширины спектров ФЛ в $(1.3 \div 1.8)$ раз по сравнению с нелегированными образцами. Слои InGaAsSb, легированные оловом с концентрацией до $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью электронов $2 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$, были прозрачны для излучения в диапазоне 3-3.3 мкм (эффект Мосса-Бурштейна) [A71], благодаря чему было возможно их использование в качестве буферных слоев в свето- и фотодиодах на длины волн от 3 до 5 мкм; слои InGaAsSb(Gd) были также использованы в качестве активных сред лазеров, описанных в последующих главах.

Глава 3 базируется на результатах работ [A43, A47, A48, A50, A55-57, A61, A62, A64 - A71, A75] и в ней представлены экспериментальные результаты изучения люминесценции, включая отрицательную люминесценцию (ОЛ), возникающую при приложении обратного напряжения к p-n переходу в диодных структурах на основе арсенида индия и близких к нему по составу ЭС твердых растворов InAsSbP, InAsSb. В градиентных образцах, имевших «инверсное» распределение плотности дислокаций,

эффективная оптическая толщина варизонного слоя $t_{eff.} = \varepsilon / \nabla c$ $E_g = E_{gMIN}$, где ε - характеристическая энергия экспоненциального спада оптической плотности ($D = -\ln(T/T_0)$), ∇ - градиент ширины запрещенной зоны вблизи узкозонной поверхности $InAsSb_x$, была существенно меньше физической толщины ЭС, и вывод излучения осуществлялся через широкозонные слои $InAsSbP$. Численные расчеты, а также изучение пространственного распределения люминесценции «в ближнем поле» с помощью инфракрасных камер, чувствительных в диапазоне 3-5 мкм, выявили неравномерность распределения излучения, обусловленную сгущением линий тока вблизи точечного контакта при больших токах и известную в англоязычной литературе как “current crowding” [24]. Показано, что в противоположность этому, в обратном смещенном p-n переходе имела место однородность распределения интенсивности ОЛ и неизменность плотности тока по поверхности СД, что объяснено истощением областей p-n перехода и преобладанием их сопротивления над сопротивлением других частей диода, включая контактное сопротивление и объемное сопротивление слоев. При этом величина эффективного радиационного охлаждения, оцененная для диапазона 3-5 мкм, увеличивалась с ростом обратного тока, достигая значений $\Delta T_a = -9$ К (СД $InAsSb_{0.12}$, $t=60^\circ\text{C}$); значение эффективности ОЛ с учётом потерь на отражение на границе полупроводник/воздух (30%) составило $\eta_{NL} = 54$ %. ($InAsSbP/InAsSb_{0.12}$, $t=60^\circ\text{C}$). Установлено, что спектральные зависимости ЭЛ и ОЛ имели приблизительно одинаковую форму и полуширину (FWHM) = 1.8 кТ (см. **Рис.5**), при этом для СД с максимумом спектров ЭЛ вблизи 4.3 мкм имелись «инструментальные» искажения формы спектров, связанные с поглощением ЭЛ в оптическом тракте «холодным» газом в области фундаментальной полосы 4.3 мкм, и экранированием ОЛ «горячим» по отношению к ней углекислым газом. На основе простой феноменологической модели, учитывающей расчетную зависимость мощности ОЛ от температуры и опубликованные данные о температурном «гашении» ЭЛ, определены ожидаемые значения «критической» температуры t_{cr} , т.е. температуры, начиная с которой, коэффициент преобразования (КП) ОЛ имеет значения, большие, чем для положительной люминесценции (т.е. ЭЛ) в светодиодах с длинами волн: 3.3 мкм ($t_{cr} = 180^\circ\text{C}$), 4.3 мкм ($t_{cr} = 100 \div 120^\circ\text{C}$) и 6 мкм ($t_{cr} = 60^\circ\text{C}$) [A48]. Определенные в эксперименте значения t_{cr} [A43, A50, A55, A56, A64] были близки к расчетным для всех указанных типов диодов. Было показано увеличение коэффициента преобразования в длинноволновых флип-чип диодах на основе $InAsSb_{0.2}$ и $InAsSb_{0.08}$ при возрастании тока в режиме ОЛ в противоположность ЭЛ; для последней увеличение концентрации инжектированных носителей и последующее усиление безызлучательных Оже-процессов снижало КП и приводило к сублинейной ватт-амперной характеристике СД (см. **Рис.6**). Максимально достигнутое подавление безызлучательных Оже-процессов было получено при температуре 180°C в диодах на основе $InAsSb_{0.08}$ со сверхлинейной ватт-амперной характеристикой в режиме ОЛ; отношение эффективности ОЛ и ПЛ в области обычных значений рабочих токов ($I=200$ мА) составляло 2.6 [A70]. Ток насыщения (I_s), определенный как ток, при котором коэффициент преобразования (КП) ОЛ имел максимальное значение, изменялся с температурой (Т) в соответствии с теорией Шокли [30]. В эксперименте наблюдался экспоненциальный рост дифференциального сопротивления в нуле смещения R_0 с увеличением $1/T$ (например, $R_0=230$ Ом, 230 К, $R_0=4$ Ом, 300 К в СД $InAsSb_{0.2}$), что свидетельствовало о несущественности токов утечки и о диффузионном механизме протекания тока в $InAsSb$ p-n переходе. Такие диоды имели высокий уровень чувствительности в фотодиодном режиме (50 В/Вт, 230 К и 3.5 В/Вт, 300 К, $\lambda=5.5$ мкм) и высокую эффективность ОЛ ($\eta_{NL} = 0.9$, 20°C) [A56].

На основе анализа распределения равновесного и неравновесного (т.е. отраженного от внешнего источника) ИК-излучения в несмонтированных образцах и в диодах,

собранных по методу флип-чип, изготовленных из одиночных или двойных гетероструктур $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y/\text{InAsSbP}$ ($x, y \geq 0$), были определены коэффициенты отражения от металла (Me) со стороны «внутренних» границ раздела (Me)/полупроводник (Me/p-InAsSbP, Me/n⁺-InAs) [A75, A80, A81]. С использованием этих данных были разработаны конструкции светодиодов с повышенной эффективностью за счет перенаправления части излучения при отражении от широких анодов из Cr (~100Å), Au (5%, Zn, ~1000Å), Ni (~500 Å), Au (~1000 Å) с коэффициентом отражения $R \sim 0.6$.

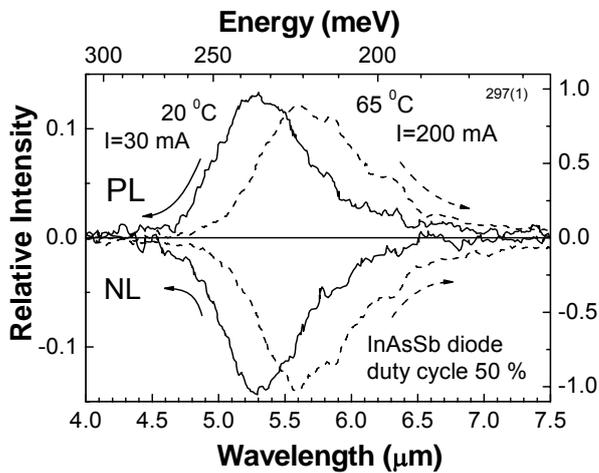


Рис. 5. Спектры излучения диода из $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$ при прямом и обратном смещениях при температурах 20 и 65°C [A56].

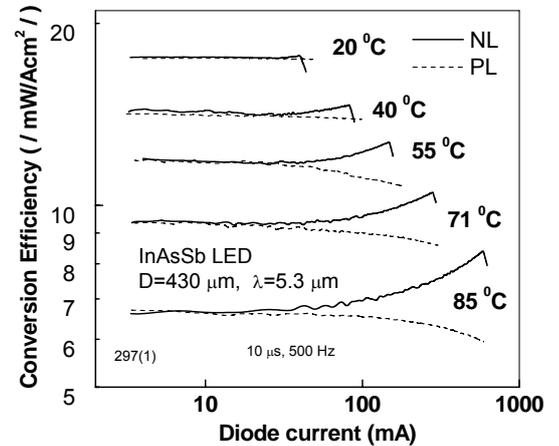


Рис.6. Зависимость коэффициента преобразования ЭЛ и ОЛ в диоде на основе $\text{InAs}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}$ от тока при температурах 20-85°C. Эффективность ОЛ: 0.9 (20°C) и 0.4 (65°C) [A56].

Продемонстрирована возможность эффективного ввода/вывода излучения в СД и ФД с длиной волны 3 – 4 мкм через сильнолегированную подложку n^+ - $\text{InAs}(\text{Sn})$ [A55, A57] и/или узкозонный буферный слой n^+ - $\text{InGaAsSb}_{0.07}(\text{Te})$ ($n^+ = (3 \div 6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) [A71], в которых поглощение на свободных носителях незначительно, а край поглощения сдвинут в коротковолновую область вследствие эффекта Мосса-Бурштейна, и модуляция спектров «положительной» и отрицательной люминесценции «вертикальным» резонатором, сформированным широким отражающим анодным контактом и границей полупроводник/воздух с характерным межмодовым расстоянием $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL$ ($n=3.52$, L -длина резонатора) (см. **Рис.7**) [A66, A65, A68]. Обсуждена идентичность значений межмодового расстояния $\Delta\lambda$ для «положительной» и отрицательной люминесценции в широком диапазоне температур до 480 К, сужение диаграммы направленности излучения в дальнем поле и увеличение эффективности вывода излучения в «вертикальном» направлении как в спонтанном режиме ($\lambda \approx 3.4$ мкм, 300 К), так и при стимулированной рекомбинации ($\lambda \approx 3$ мкм, 77 К), возникающей на одной из мод «вертикального» резонатора. Увеличение длины прозрачного резонатора (L) приводило к увеличению добротности (Q), значения которой для образцов с толщинами 7.5, 13 и 45 мкм, оцененные по полуширине мод, соответственно составляли 24, 32 и 80. Стимулированная рекомбинация начиналась при достижении токов $I_{th} = 300\text{-}600 \text{ А/см}^2$ на длинноволновом плече спектра спонтанной эмиссии, при характерной для лазеров из арсенида индия энергии квантов 410 мэВ (77 К) [A68]. При достижении порогового режима излучение спонтанной эмиссии насыщалось, отражая истощение активной области за счет генерации. Одновременно с этим ватт-амперная характеристика испытывала излом, при этом дифференциальная квантовая эффективность в стимулированном режиме достигала

10%, а выходная мощность - 60 mW. Показано, что при комнатной температуре повышение контраста пиков Фабри-Перо при увеличении тока (Рис. 7) связано со сгущением линий тока вблизи контакта, зависящим как от геометрии, так и от соотношения сопротивлений слоев, составляющих гетероструктуру, и сопротивлений контактов [A66].

Экспериментально показано, что обратная ветвь вольт-амперных характеристик узкозонных p-n структур с ростом температуры приближается к характеристике «идеального» диода, отражая несущественность поверхностных утечек на фоне больших значений диффузионного тока; при этом температурный сдвиг контура, огибающего полосу излучения, соответствует измерению ширины запрещенной зоны InAs: $dE_g/dT=2.8 \cdot 10^{-4} \text{ eV/K}$ [A55].

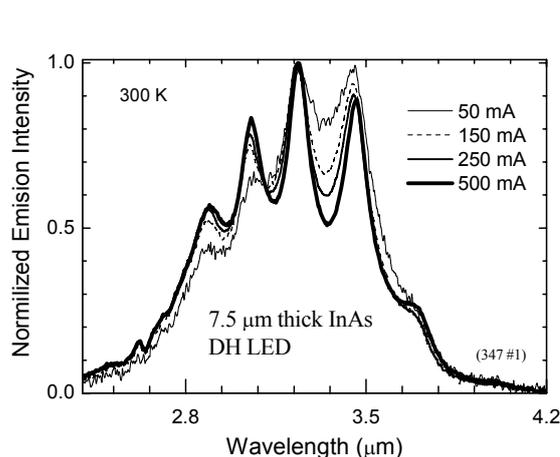


Рис. 7 Нормированные спектры электролюминесценции СД толщиной 7.5 мкм при токах накачки 50, 150, 250 и 500 мА.

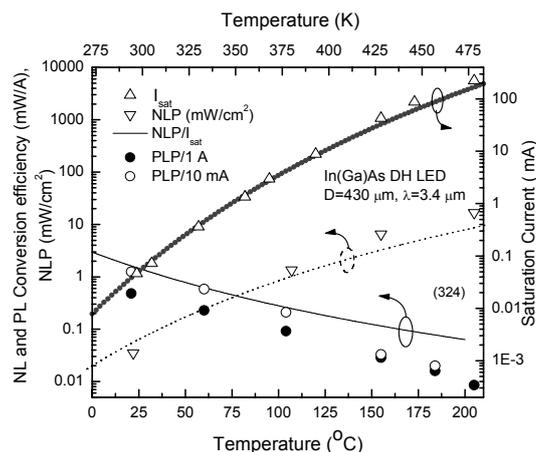


Рис. 8 Температурная зависимость тока насыщения (Δ), мощности ОЛ (∇), коэффициента преобразования при токе 10 мА (\circ) и 1 А (\bullet) в диоде на основе In(Ga)As. Линии – расчетные значения.

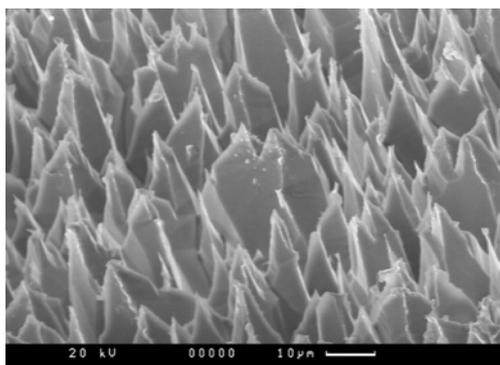


Рис. 9 Фотография поверхности СД с глубокой мезой, обработанного в селективном травителе. Размер кадра 100x70 мкм.

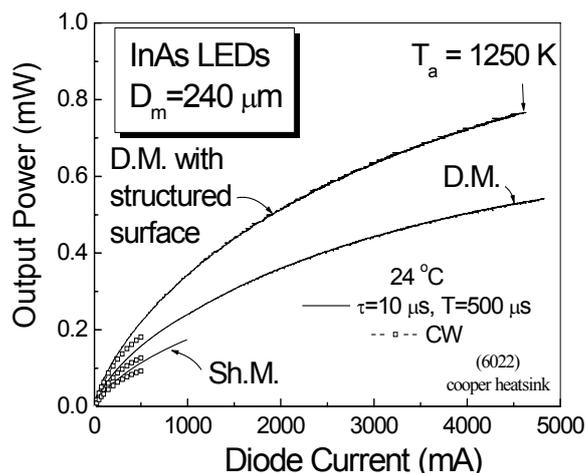


Рис. 10 (справа) Ватт-амперные характеристики в трех светодиодах на основе InAs с диаметром мезы 240 мкм при комнатной температуре: в СД с мелкой мезой и плоской световыводящей поверхностью (Sh.M.), в СД с глубокой мезой и плоской поверхностью (D.M.) и в СД с глубокой мезой и текстурированной поверхностью (D.M. with structured surface). Сплошные линии соответствуют импульсному режиму питания, точки – непрерывному.

Предложен универсальный параметр NLP/I_{sat} - частное от деления мощности ОЛ (в английской транскрипции - NLP) на величину тока насыщения (I_{sat}) - описывающий зависимость мощности излучения СД от температуры (см. **Рис.8**) и представляющий собой предельное значение КП для диодного излучателя.

Продемонстрировано увеличение КП при снижении величины обратного тока, например, в диоде с активным слоем $n\text{-InAsSb}$ ($E_g=300$ мэВ) толщиной ~ 8 мкм при создании электрического ограничения носителей за счет введения дополнительного широкозонного слоя $p\text{-InAsSbP}$ ($E_g = 375$ мэВ) толщиной ~ 5 мкм и изотипного интерфейса $n^+\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}$ на границе с подложкой, создающего барьер для дырок. Для комнатной температуры обратный ток ($I_{sat} = 0.4$ А/см²) был в 5 раз меньше, чем в аналогичных диодах ($D=300$ мкм, $\lambda = 4.3$ мкм, $I_{sat}=2$ А/см²) с гомо-p-n переходом [А63].

Установлено возрастание на 30-40% внешнего квантового выхода в светодиодах с глубокой (30-50 мкм) мезой травления, связанное с отражением от стенок мезы и перенаправлением части сформированного вблизи от p-n перехода излучения в сторону к световыводящей поверхности с углами падения, меньшими угла полного внутреннего отражения ($\alpha_{crit.}$). Дополнительное повышение эффективности СД на 20-30% было достигнуто текстурированием («чернением») световыводящей поверхности при химическом травлении, создающим рельеф в виде остrokонечных пирамид, показанный на **Рис. 9**. Свойства указанной текстурированной поверхностями обеспечивали снижение коэффициента отражения для нормальных лучей ($R \rightarrow 0$), а также эффективное увеличение $\alpha_{crit.}$, что следовало из наблюдаемого возрастания излучающей площади (над анодом), полученного из измерений распределения интенсивности ЭЛ в ближнем поле.

Мощность излучения в СД из InAs (при токе 1 А) возрастала в соответствии с увеличением коэффициента вывода излучения из полупроводникового кристалла в пропорции (1):(1.38):(1.95) при переходе от диода с мелкой мезой и плоской поверхностью к диоду с глубокой мезой и плоской поверхностью и далее к диоду с глубокой мезой и текстурированной поверхностью (см. **Рис.10**) [А67]. Аналогичные данные были получены нами для всех типов СД, а также были частично повторены в более поздних работах других авторов [25]. При токе $I = 4.6$ А мощность лучших диодов из InAs (3.4 мкм) достигала 0.76 мW, что соответствовало $T_a = 1250$ К - рекордно высокому значению эффективной «радиационной» температуры, полученной с помощью фотонных излучателей.

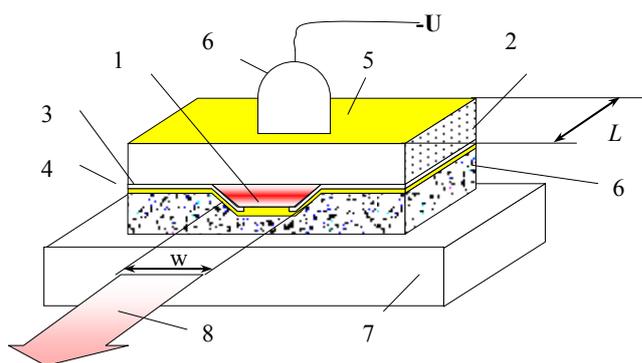


Рис.11. Схема мезаполоскового лазера на основе ДГС $\text{InGaAsSb}/\text{InAsSbP}$, излучающего при $\lambda=3.2\text{-}3.3$ мкм (77 К). Цифрами обозначены: 1 – активная часть структуры, 2 – подложка $n\text{-InAs}$, 3 – слой диэлектрика (Si_3N_4), 4 – анодный контакт на основе Au, 5 – катодный контакт на основе Au, 6 – индиевые контакты, 7 – медный теплоотвод, 8 – направление вывода излучения (направление наблюдения, [110]). Для «широких» лазеров ($W \geq 200$ мкм) меза не вытравливалась.

Глава 4 представляет результаты работ [А7, А11, А12, А14, А19-А21, А30, А32, А35, А38, А40, А41, А45, А52, А54], и в ней обобщены экспериментальные результаты изучения стимулированного излучения в диодных лазерах, изготовленных из двойных гетероструктур (ДГС), состоявших из нелегированной подложки $n\text{-InAs}$ (111)А ($n=1\text{-}2 \cdot 10^{16}$ см⁻³) и трех эпитаксиальных слоев: широкозонного ограничивающего слоя $n\text{-InAs}_{1-x}$.

$y\text{Sb}_x\text{P}_y$, активного слоя $n\text{-In}_{1-y}\text{Ga}_y\text{As}_{1-z}\text{Sb}_z(\text{Gd})$ ($0.01 \leq y \leq 0.07$, $0.065 \leq z \leq 0.07$) и широкозонного эмиттера $p\text{-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y(\text{Zn})$ ($0.05 \leq x \leq 0.09$, $0.09 \leq y \leq 0.18$) с толщинами активного слоя 1.5-3 и широкозонных слоев 4-6 мкм соответственно. В начале главы кратко представлены данные и исследования, приведшие к созданию четырехсклоотых ДГС-лазеров с гранями (110) [A20, A21, A30] с рекордно низкими значениями порогового тока $J_{\text{th}}=39 \text{ A/cm}^2$ (имп.режим) и $J_{\text{th}}=60 \text{ A/cm}^2$ (непр.режим, 77K, $\lambda=3.23 \text{ мкм}$). Затем рассмотрены меза-полосковые лазеры с шириной полоска $W=10, 20$ или 200 мкм (см. **Рис.11**),

Показано, что для «узких» лазеров с толщиной активной области $d=1\text{-}2 \text{ мкм}$ и шириной полоска 10 и 20 мкм в плоскости, перпендикулярной плоскости p-n перехода, наблюдалась продольная мода излучения $m=0$, $\Delta\Theta_{\perp}\sim 30^{\circ}\text{-}35^{\circ}$, интенсивность которой описывалась угловой зависимостью $I(\Theta_{\perp})/I(0)=\gamma^4/(\gamma^2+k_0^2\sin^2\Theta_{\perp})^2$, где $\gamma\approx(n_2^2-n_1^2)k_0d/2$, n_2 и n_1 —показатели преломления активной области и ограничивающего слоя соответственно, $k_0=2\pi/\lambda$, λ —длина волны излучения в вакууме, d —толщина активной области, а значение разности $n_2-n_1=0.065$. При $d=2.5\text{-}4 \text{ мкм}$ наблюдалась поперечная мода $m=1$ с $\Delta\Theta_{\perp}\sim 50^{\circ}\text{-}60^{\circ}$. В плоскости, параллельной плоскости p-n перехода, диаграмма направленности зависела от ширины полоска w . При $w=10 \text{ мкм}$ наблюдалась продольная мода ($m=0$) с расходимостью $\Delta\Theta_{\parallel}\sim 15^{\circ}$, при $w=20 \text{ мкм}$ чаще реализовывалась поперечная мода $m=1$ с $\Delta\Theta_{\parallel}\sim 40^{\circ}\text{-}45^{\circ}$.

Установлено, что при генерации в продольной пространственной моде дифференциальная квантовая эффективность η_{dif} была в ~ 4 раза выше, чем при генерации в моде с $m=1$ (3% и 0.8% соответственно, $I=1.1I_{\text{th}}$), что соответствовало уменьшению оптического ограничения с ростом порядка моды [26].

Уменьшение дифференциальной квантовой эффективности η_d с увеличением тока связывалось нами с увеличением внутренних потерь α_i :

$$\alpha_i = \Gamma(\alpha_0 + \alpha_{FC} + k_0 \times N) + (1 - \Gamma)\alpha_c,$$

где α_0 - «собственные» потери (потери в активной области в отсутствии инжекции), α_{FC} - поглощение на свободных носителях ($\alpha_{FC}\sim 1\div 2 \text{ см}^{-1}$ [27]), k_0 - коэффициент внутризонного поглощения, N - концентрация инжектированных носителей, Γ - параметр оптического ограничения ($\Gamma=0.6$), α_c - поглощение в ограничивающих слоях ($\alpha_c\sim\alpha_0$). С ростом тока за порогом генерации одновременно с уменьшением η_d наблюдалось увеличение интенсивности спонтанного излучения P_{SP} ; зависимость P_{SP} от тока свидетельствовала о существенном вкладе внутризонного поглощения (ВП) и была использована для оценки коэффициента ВП $k_0\approx 5.6\times 10^{-16} \text{ см}^2$ с применением формализма, изложенного в работе [28]. Величина собственных потерь ($\alpha_0\approx 5 \text{ см}^{-1}$) определялась из зависимости плотности порогового тока j_{th} от обратной длины резонатора $1/L$ (**Рис.12**) [26]:

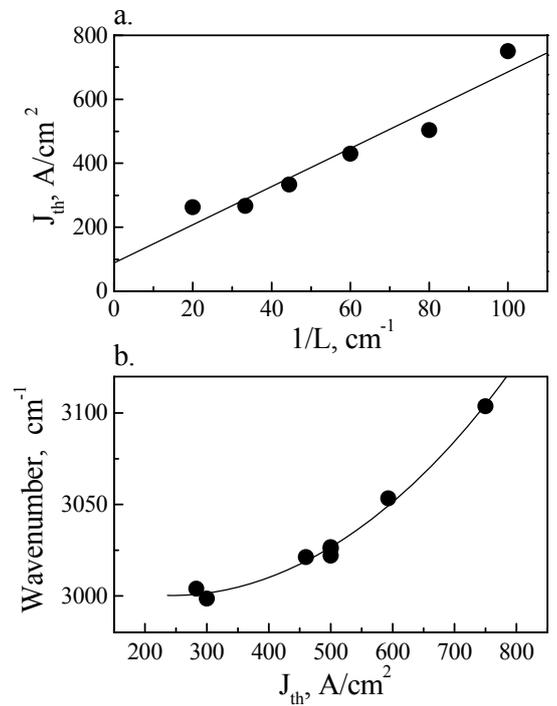


Рис.12. Зависимость плотности порогового тока от обратной длины резонатора (a) и спектрально-пороговая характеристика (b) ($T=77 \text{ K}$).

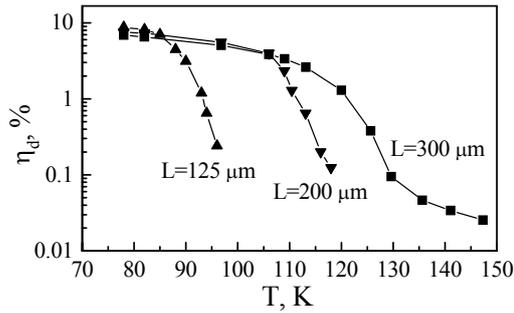


Рис.13. Температурные зависимости дифференциальной квантовой эффективности лазеров с длинами резонаторов $L=125, 200, 300$ мкм.

Экспериментально установлено, что с уменьшением длины резонатора увеличение пороговой концентрации носителей, вызванное увеличением потерь на выход, приводит к росту ВП и более резкой зависимости $j_{th}=f(L^{-1})$. В **таблице 1** для лазеров с длиной резонатора $L=100, 200, 300$ и 500 мкм приведены пороговые токи I_{th} (j_{th}) ($T=77$ К), пороговые концентрации носителей $N_{th}=j_{th}\tau/ed$ ($\tau=10^{-8}$ с), внутренние потери на пороге генерации $\Gamma k_0 N_{th}$, вызванные ВП; внутренние потери на пороге генерации α_i^{th} ; дифференциальные квантовые эффективности, рассчитанные в соответствии с α_i^{th} и приращение внутренних потерь за порогом генерации при превышении порогового тока на $\Delta I=10$ мА. Как видно из таблицы, с увеличением концентрации носителей увеличивается величина ВП, которая в случае $L=100$ мкм становится сравнимой с величиной усиления, достижимой в полупроводниковых лазерах. Это объясняет близость значений η_d в лазерах с разными L , когда с уменьшением длины резонатора увеличение потерь из-за ВП превосходит увеличение потерь на выход. Вероятно, при $T=120\div 130$ К энергия кванта $h\nu$ близка к энергии спин-орбитального отщепления Δ и ВП максимально, при $T>130$ К энергия кванта $h\nu$ становится меньше Δ , ВП насыщается и появляется точка перегиба (**Рис.13**).

С ростом тока от 85 до 150 мА наблюдалось увеличение усиления в максимуме от 110 до 210 см^{-1} , что с учетом $\alpha_r \sim 40 \text{ см}^{-1}$, дает увеличение α_i от 70 до 170 см^{-1} . Рост α_i с увеличением тока и, соответственно, концентрации неосновных носителей линеен (см. вставку к **Рис.14**), что согласуется с выводом о том, что за увеличение внутренних потерь ответственно внутризонное поглощение.

Режим одномодовости сохранялся, как правило, при превышении порогового тока I_{th} на $\Delta I \approx 2\div 3 I_{th} \approx 30\div 100$ мА, при этом отношение мощности доминирующей моды к полной мощности излучения достигало $\sim 96\%$. При больших токах, вне

Таблица 1.				
$L, \text{ мкм}$	100	200	300	500
$j_{th}, \text{ А/см}^2$	750	360	235	172
$I_{th}, \text{ мА}$	15	14	14	17
$N_{th}, \text{ см}^{-3}$	5×10^{17}	2.4×10^{17}	1.6×10^{17}	1.1×10^{17}
$\Gamma k_0 N_{th}, \text{ см}^{-1}$	169	81	54	37
$\alpha_i^{th}, \text{ см}^{-1}$	174	86	59	42
η_d	0.3	0.31	0.3	0.27
$\Delta \alpha_i^{10mA}, \text{ см}^{-1}$	45	23	15	9

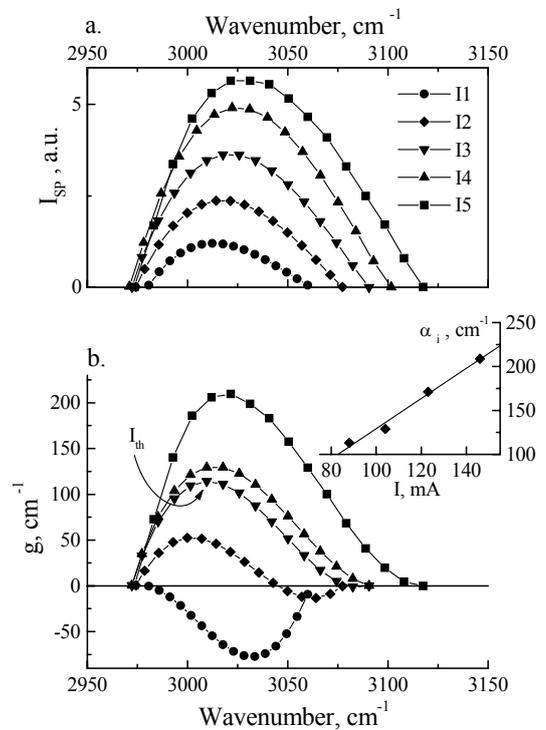


Рис.14. Спектры спонтанного излучения (а) и спектры усиления (б) при токах: $I1\div I5, 74, 80, 88, 104$ и 146 мА; на вставке: токовая зависимость полных потерь (80 К).

зависимости от величины I_{th} , чаще наблюдались многомодовые спектры с расстоянием между продольными модами $20 \div 90 \text{ \AA}$ в соответствии с $\Delta\lambda = \lambda^2 / 2\bar{n}L$ (\bar{n} - показатель преломления активной области). Уменьшение длины резонатора приводило к тому, что в контур усиления попадала только одна резонансная частота, поэтому в лазерах с $L < 200$ мкм нам чаще всего удавалось достичь одномодовой генерации в диапазоне токов $\Delta I \approx 100$ мА; при $L < 75$ мкм, увеличение внутренних потерь из-за роста пороговой концентрации делало невозможным достижение лазерной генерации.

Установлено, что зависимость $P_{sp}(I)$, также как и токовая перестройка длины волны из-за изменения n имела перегиб вблизи порога $I \approx I_{th}$, при этом с уменьшением наклона $P_{sp}(I)$ уменьшалась скорость токовой перестройки моды. Произведенные оценки, дали значение $\partial n / \partial N \sim -10^{-18} \div -10^{-19} \text{ см}^3$, что соответствовало величине токовой перестройки $d\bar{\nu} / dI$, составляющей сотни $\text{см}^{-1} / \text{А}$ (в эксперименте - $d\bar{\nu} / dI \approx 80 \text{ см}^{-1} / \text{А}$), при этом согласно оценке влияния разогрева активной области ($\partial T / \partial I \approx 10^2 \text{ КА}^{-1}$), последний имеет незначительный вклад в «температурную» перестройку длины волны. В лазерах с короткими резонаторами ($L < 150$ мкм) наблюдалось увеличение скорости токовой перестройки по сравнению с «длинными» лазерами ($L = 300$ мкм), что связывалось с возрастанием пороговой концентрации неосновных носителей при уменьшении длины резонатора.

Полосковые лазеры $w = 200$ мкм и меза-полосковые лазеры $w = 20$ мкм имели близкие значения плотности порогового тока и дифференциальной квантовой эффективности η_D , так, например, для лазеров с длиной резонатора 640 и 140 мкм η_D составляла 50 и 70%, соответственно; значение внутреннего квантового выхода, определенное из зависимости $\eta_D^{-1} = f(L^{-1})$, $\eta_i = 74\%$, значение внутренних потерь $\alpha_i = 5 \text{ см}^{-1}$.

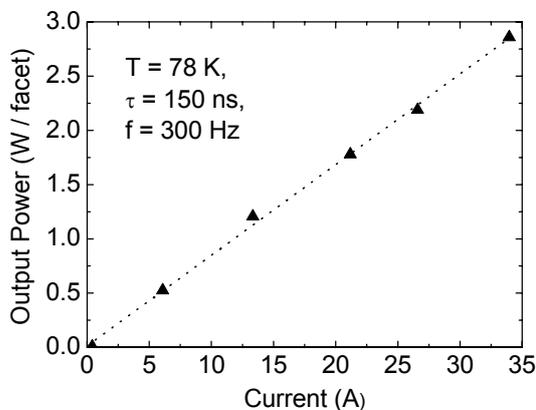


Рис. 15. Зависимость мощности лазера InGaAsSb/InAsSbP шириной $W = 200$ мкм, выходящей с одной грани, от тока в импульсном режиме (150 нс, 500 Гц, 78 К).

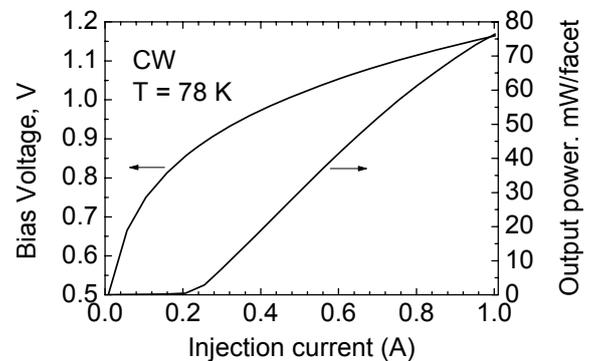


Рис. 16. Вольт-амперная характеристика и зависимость мощности, выходящей с одной грани, от тока в непрерывном режиме

В экспериментах с использованием коротких импульсов с длительностью 150 нс [A54] показано, что скорость температурного изменения положения максимума огибающей спектра ($\text{FWHM} \approx 0.01$ мкм) составляла $dh\nu / dT \approx 0.1$ мэВ/К, что почти в три раза меньше, чем соответствующее ожидаемое изменение ширины запрещенной зоны ближайшего аналога – арсенида индия - ($dE_g / dT \approx 0.28$ мэВ/К). Указанное различие объяснено подъемом уровня Ферми при повышении уровня инжекции (порогового тока); аналогичная тенденция имела место при измерениях спектров спонтанной эмиссии светодиодов на основе ДГС. Максимальная полная мощность с двух граней полоскового лазера $w = 200$ мкм достигала значения 6 Вт (Рис.18), что соответствовало лучшим значениям, опубликованным для квантово-каскадных лазеров. При этом можно отметить линейный

характер ватт-амперной (L-I) характеристики (Рис.15, 16), указывающей на незначительность разогрева лазера при прохождении тока из-за его низкого последовательного сопротивления (0.25Ω).

Глава 5 посвящена свойствам пар фотодиод-светодиод [A29, A36, A39, A43, A50, A57, A60, A63, A72, A81] и диодных лазеров на основе InAs, InAsSb, InGaAsSb применительно к спектроскопии газов в диапазоне 3-5 мкм, включая абсорбционную диодно-лазерную [A46], недисперсионную (NDIR) [A79, A84] и оптико-акустическую спектроскопию [A77, A83]. В начале главы в первом параграфе рассматриваются поверхностно облучаемые фотодиоды из InAs, для которых на основе проведенного анализа расчетных значений произведения динамического сопротивления в нуле смещения R_0 на площадь диода A в диодах с резким p-n переходом был определен тип структур, представляющий наибольший интерес для исследований, а именно, несимметрично легированные p⁺-n структуры с активной областью n-InAs, для которых ожидаемые значения R_0A и обнаружительной способности при 300 К имеют наибольшие значения [A29]. Измерения барьерной емкости на частоте 1 МГц в диодах, состоящих из согласованных с InAs по постоянной решетке слоев p-InAsSbP ($p=10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина 3 мкм, ширина запрещенной зоны 0.43 эВ при T=300 К), выращенных на поверхности (111)В монокристаллических пластин n-InAs ($n=(2\div3)\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и выполнявших функцию широкозонного «окна», обеспечивавшего как расширение спектральной чувствительности в коротковолновую область, так и снижение уровня поверхностных утечек, показали, что экспериментальные зависимости хорошо спрямлялись в координатах C^2-U . Величина диффузионного потенциала составляла 0.2 ± 0.01 В для T=290 К и 0.27 ± 0.01 В для T=221 К, концентрация носителей на краю слоя объемного заряда при T=290 К изменялась в пределах $n=(4\div6)\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а толщина области пространственного заряда составляла $W=0.08\div 0.1$ мкм [A60]. Проведенный анализ вольт-амперных характеристик и механизмов токопрохождения показал, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных имело место при следующих параметрах: $N=6\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p=150 \text{ см}^2/\text{В с}$, $\tau_p=80 \text{ нс}$, $\tau_o=32 \text{ нс}$, а основным являлся диффузионный ток. Вывод о диффузионном характере токопрохождения получен также и из исследований ОЛ и температурных зависимостей R_0A в диапазоне $t=20\dots 185^\circ\text{C}$ [A43, A50]. Установлено, что 1/f шум преобладал в частотном диапазоне 1÷150 Гц; при $f > 200$ Гц шум не зависел от частоты, а его величина составляла $\sim 10^{-9} \text{ В}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$. При этом, для диода с динамическим сопротивлением $R_0 = 1.38\cdot 10^3 \text{ Ом}$ величина измеренного шума составляла $\bar{U}_u = 4\cdot 10^{-9} \text{ В}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$, что соответствовало величине теплового шума $\bar{U}_u = (4kTR)^{1/2} = 4.7\cdot 10^{-9} \text{ В}\cdot\text{Гц}^{-1/2}$, обнаружительная способность D_λ^* (3.3 мкм, 800 Гц, 1 Гц) изменялась в пределах $2.5\div 3.0\cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$ при T=290 К [A60]. Показано, что при уменьшении концентрации носителей в активном слое n-InAs в образцах с эпитаксиальным слоем, легированном гадолинием ($n \sim 5\cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), значение D_λ^* возрастало до $4\div 6\cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1/2} \text{ см Гц}^{1/2}$ при T=290 К. В температурном диапазоне $-40\div + 50^\circ\text{C}$ было получено слабое изменение токовой чувствительности фотодиода, что облегчает разработку схмотехники, например в дистанционном измерителе низких концентраций углеводородов на трассе [2].

Из изучения фотодиодов на основе градиентных структур InAsSb_xP ($x=0.04-0.14$) с резким p-n переходом (данные фольт-фарадных измерений), расположенном в слое состава InAs_{0.88}Sb_{0.12}, красной границей фотоответа $\lambda_{\text{cut-off}}=4.92$ мкм (77 К), $\lambda_{\text{cut-off}}=5.1$ мкм (300 К) [A36] делаются выводы о том, что в области T=77-120 К растет вклад туннельного тока, а при T>120 К имеется преобладание генерационно-рекомбинационной составляющей тока и наблюдается резкое падение R_0 . Тем не менее в области температур 180÷200 К значение R_0 ещё достаточно велико ($R_0=5\div 8\cdot 10^2 \text{ Ом}$), что позволяет использовать такие фотодиоды при термоэлектрическом охлаждении без большой потери чувствительности. В таблице 2 приведены полученные расчетным путем [28] значения

тепловых (u_t) и Г-Р шумов (u_{G-R}), а также экспериментальные величины шумов, измеренные при 77 К на частоте 1 кГц в полосе $\Delta f = 100$ Гц. Как видно из таблицы 2, при $R_0 \sim 10^4$ Ом тепловой шум немного превосходит Г-Р шум, при $R_0 \sim 10^5$ Ом становится заметным преобладание Г-Р шумов, а при $R_0 \sim 10^6$ Ом этот вид шума уже на порядок превышает величину теплового шума. Экспериментальные значения шумов, измеренные при 77 К, были близки к величине Г-Р шума. В области неглубокого охлаждения величина $D_{500K}^* = 5 \cdot 10^8 \div 10^9$ см Гц^{1/2}/Вт, а обнаружительная способность в максимуме спектра $D_\lambda^* = 3.5 \div 7 \cdot 10^9$ см Гц^{1/2}/Вт, что показывает перспективность использования таких фотоприемников при термоэлектрическом охлаждении.

Таблица 2.			
R_0 , Ом	1E4	1E5	1E6
\hat{U}_{G-R} , В	4.5E-8	4.5E-7	4.5E-6
\hat{U}_T , В	6.5E-8	2E-7	2.1E-7
$\hat{U}_{\text{Experim.}}$, В	3E-8	5E-7	6.3E-7

В лучших структурах были получены значения обнаружительной способности $D_\lambda^* = (3-5) \cdot 10^9$ см Гц^{1/2}/Вт ($T \sim 200$ К) и $D_\lambda^* = 3 \cdot 10^{11}$ см Гц^{1/2}/Вт (77 К), что согласно [29] близко к теоретическому пределу.

Во втором параграфе уделено внимание изучению неохлаждаемых фотодиодов, облучаемых через подложку (флип-чип диодов), для которых характерным признаком являлось наличие сильнолегированной подложки $n^+-InAs(Sn)$ (111) ($n^+ = (0.1 \div 6) \cdot 10^{18}$ см⁻³) с вырождением электронов в зоне проводимости, активного слоя $n-InAsSb_{0.08}$ или $n-InAs$ и широкозонного слоя $p-InAsSbP$ ($E_g = 375$ мэВ) толщиной 3-5 мкм с нанесенным на него отражающим анодом из $Cr-Au(Zn)-Ni-Au$. Спектры чувствительности в таких ФД были ограничены с коротковолновой стороны оптическим пропусканием подложки и зависели от её толщины [A57, A81].

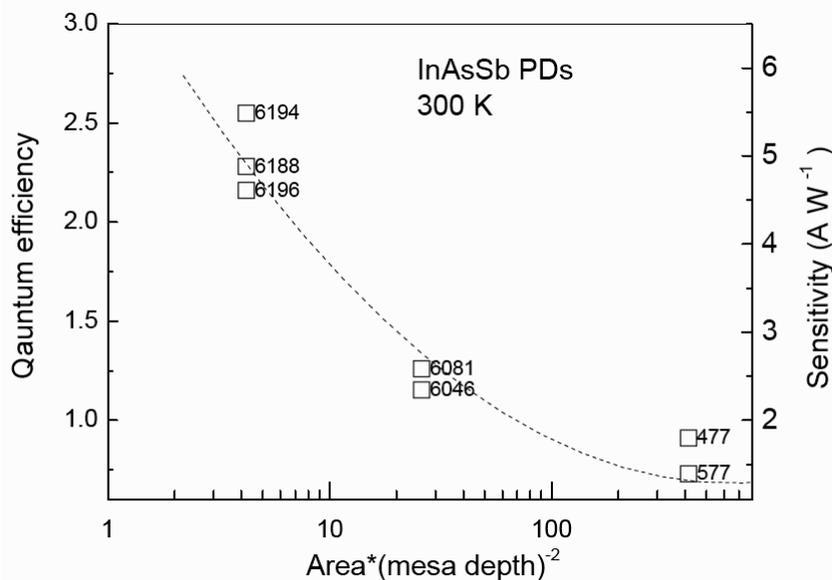


Рис.17. Зависимость “квантовой эффективности” и чувствительности ФД на основе *InAsSb* при комнатной температуре от отношения площади мезы к квадрату ее полной глубины [A81].

На основе измерений распределения излучения в ближнем поле в режимах ЭЛ и ОЛ показано увеличение площади сбора излучения ($D_{opt} \approx 1.68 D_m$) в диодах на основе $n-InAsSb_{0.08}$ с глубокой мезой травления, эквивалентного увеличению эффективной токовой чувствительности. Зависимости чувствительности и «эффективной» квантовой эффективности от соотношения площади p-n перехода (мезы) и высоты стенок мезы, варьировавшихся с помощью многостадийного химического травления, представлены на **Рис.17**. Использование отражательных контактов в сочетании с глубоким травлением

позволило достичь рекордных значений обнаружительной способности $D_{4.1 \text{ мкм}}^* = 2.8 \cdot 10^9$ см Гц^{1/2}Вт⁻¹.

В проекции на возможные применения полупроводниковых излучателей и фотоприемников в спектроскопии газов, в частности, в спектрометрах, измеряющих пропускание среды на выделенных дифракционной решеткой длинах волн в области 3.7 мкм, в начале третьего параграфа продемонстрирован высокий контраст ИК изображений ($K > 100$, $I = 4$ мА), определяемый как отношение интенсивности излучения над мезами и в промежутке между ними, в монолитных светодиодных линейках типа «флип-чип», содержащих один ряд из 4-х элементов размером 130x130 или 70x70 мкм с индивидуальной адресацией, состоящих из широкозонного контактного слоя p-InAsSbP (~2 мкм, $E_g(300 \text{ K}) \sim 420$ мэВ) с нанесенным на него анодом размером 100x100 или 50x50 мкм и активной области из n-InGaAsSb (~5 мкм), полученных на подложке n⁺-InAs ($n^+ \sim 10^{18}$ см⁻³) [A80, A78]. Показана возможность создания ИК изображения типа «шахматная доска», когда часть элементов имитирует «холодные» ($T_a < T_{\text{окр.}}$, режим ОЛ), а часть – «горячие» ($T_a > T_{\text{окр.}}$, режим ЭЛ) по отношению к окружающей среде ($T_{\text{окр}}$) области [A78]. Установлено, что переход от экспоненциального (фактор неидеальности $\gamma = 1.1$, ток насыщения – $I_{\text{sat}} = 39$ мкА ($j_{\text{sat}} = 230$ мА/см²)) к линейному участку I-V характеристики соответствует переходной области от линейного ($\delta^2 L / \delta^2 I = 0$) к сублинейному ($\delta^2 L / \delta^2 I < 0$) участку ватт-амперной (L-I) характеристики. Одной из основных причин вышеуказанного соответствия указывается наблюдаемое в эксперименте сужение области протекания тока над анодом («current crowding»), приводящее к быстрому увеличению плотности тока и росту вероятности безызлучательной Оже-рекомбинации в локальных областях структуры над анодом с уменьшением КП с 0.133 мВт/А ($I \ll 1$ А) до 0.035 мВт/А ($I \sim 1$ А). С учетом отражения от границы полупроводник/воздух ($R = 0.3$) предельно возможный КП для малых токов составил $NPL / j_{\text{sat}} = 0.23$ мВт/А ($NLP = 0.054$ мВт/см²), что на 40% больше экспериментально наблюдаемого значения; при этом достигнутая эффективная температура вблизи от максимума излучения светодиода $\lambda = 3.7$ мкм, составляла $T_a = 835$ К ($I = 1$ А, $j = 10$ кА/см²), что выше, чем в импульсных нагревательных источниках.

В этом же параграфе экспериментально показаны увеличение обнаружительной способности [A72], сужение угла зрения [A63], а также спектральная фильтрация вводимого излучения [A57], обусловленные применением иммерсионных линз. Линзы имели эффективный диаметр 3.2 мм, и были близки по форме к «гиперполусфере» (сфера Вейрштрасса, для которой расстояние от центра кривизны линзы до её плоской части (до места установки ФД/СД) составляло R/\bar{n} , где R – радиус кривизны сферической поверхности линзы, а \bar{n} – показатель преломления [31]). Фотодиоды типа «флип-чип» на основе InAs, InAsSb, InAsSbP, были состыкованы с линзами с помощью иммерсионного слоя на основе халькогенидного стекла с высоким показателем преломления ($n = 2.4$). Установлено расширение спектральной характеристики чувствительности для ФД с толстым градиентным слоем n-InAsSbP (PD46, PD55), связанное с диффузией к p-n переходу фотовозбужденных на поверхности n-InAsSbP носителей с диффузионной длиной, имеющей характерные значения $L_p = 10-15$ мкм. Из линейного характера зависимости R_o от площади диода сделано предположение о доминировании диффузионного токопрохождения над токами утечек при 300 К [A63], при этом с изменением температуры или состава активной области (т.е. с изменением E_g) изменение $R_o A_{p-n}$ совпадало с ходом зависимости $\exp(E_g/kT)$, что также соответствовало диффузионному механизму токопрохождения. Установлено, что изменения спектров чувствительности с температурой связаны как с изменением ширины запрещенной зоны активной области, так и со снятием вырождения электронов в сильнолегированном «окне» из n⁺-InAs и уменьшением его оптического пропускания в коротковолновой области спектра [A57]. В силу некоторого несовершенства использованных методов сборки и трудностей при контроле геометрического расположения составляющих иммерсионных фотодиодов, последние имели несколько меньшие по сравнению с «плоскими» аналогами

значения квантовой эффективности и токовой чувствительности, как показано на **Рис. 18** (слева). Однако, наиболее важный параметр ФД (обнаружительная способность D) в результате иммерсии был увеличен примерно на порядок до значений, являющихся рекордными для диапазона 3-5 мкм во всех типах ФД (см **Рис. 18** (справа)).

С учетом особенностей спектральных характеристик и параметров источников и приемников излучения, а также характеристик поглощения исследуемого газа определено «нормированное» отношение сигнал/шум ($\xi P = PE/(P_0 \cdot NEP) = \Psi/(P_0 \cdot \sqrt{t})$, [$\sqrt{\text{Hz/W}}$]), определяющее вышеуказанное отношение за единицу времени при единичном энергопотреблении и соответствующий «нормализованный» нижний порог обнаружения газа, и установлено, что для диодных пар, состоящих из иммерсионных свето- и фотодиодов на основе InAs и InAsSb, указанный порог (например, $0.5 \cdot 10^{-3}$ (ppm см)/(мВт $\cdot\sqrt{c}$) для углекислого газа, $\lambda=4.3$ мкм) существенно ниже, чем для всех других известных комбинаций спонтанных источников и приемников излучения [A79, A84].

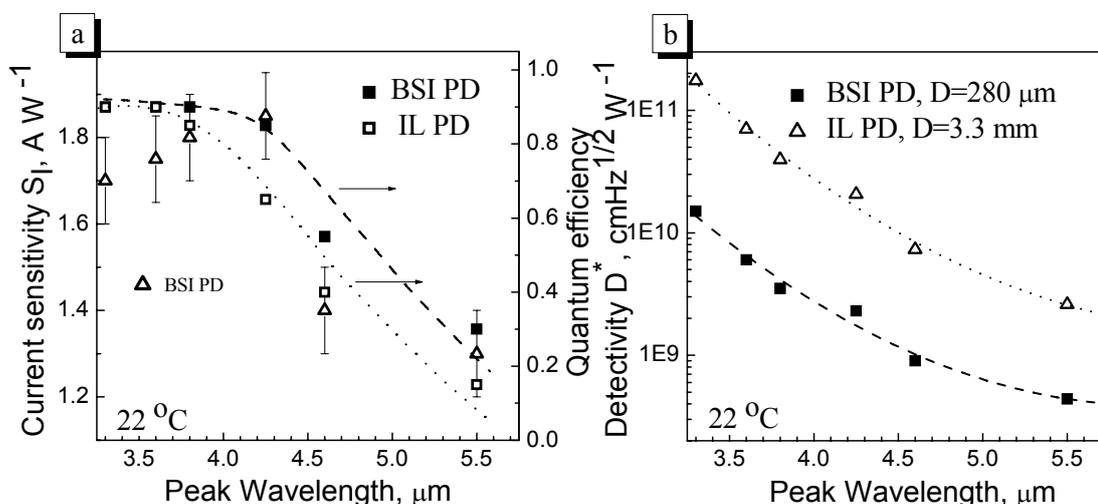


Рис. 18. Чувствительность, квантовая эффективность (слева) и обнаружительная способность (справа) флип-чип фотодиодов на основе InAs, InAsSb, InAsSbP без линзы (заполненные символы) и с иммерсионными линзами (незаполненные символы) при 300 К [A72].

В конце параграфа дана оценка пределов обнаружения метана (CH_4), двуокси углерода (CO_2), пропана (C_3H_8) и диоксида серы (SO_2) оптико-акустической ячейкой длиной - 42.0 мм, в которой чувствительным элементом был кремниевый кантилевер толщиной 10 мкм и размерами 3.0 x 1.5 мм с контролем положения с помощью интерферометра Майкельсона с примерно одинаковой длиной плечей при использовании лазерного луча с длиной волны 670 нм и ортогональной матрицы фотодиодов [A77]. При полезном использовании не более 35% световой мощности иммерсионных СД, питаемых импульсным током амплитудой 200 мА (скважность 1:1, частота 80 Гц), при нормальной атмосфере (1 атм.) пределы обнаружения CO_2 (СД 4.2 мкм, 300 К) и C_3H_8 (СД 3.4 мкм, 300 К) при времени измерений 1 с составили 11 и 6 частей на миллион (11 и 6 ppm) соответственно. В заключении продемонстрированы синхронность фазы колебаний кантилевера и полярности напряжения на узкозонном диоде из InAsSb, вызывающим оптико-акустические колебания газа, и показан «отрицательный оптико-акустический эффект» на длине волны 5.3 мкм в режиме отрицательной люминесценции, состоящий в колебаниях давления газа, соответствующих его радиационному охлаждению при воздействии на него потоков ОЛ [A83].

В четвертом параграфе приведен пример использования ДГС лазеров InAsSbP/InGaAsSb глубокой мезаполосковой конструкции с шириной полоска $w=20$ мкм и длиной резонатора $L=70\div 150$ мкм в диодной лазерной спектроскопии метана [A46]. Показано, что увеличение мощности происходило вплоть до значений тока более $30I_{th}$ ($I_{th}=9$ мА (320 А/см²) при 77 К (CW)), с максимальным значением мощности 0.42 мВт. В лазере с длиной резонатора 70 мкм было получено наибольшее значение скорости токовой перестройки $d\bar{\nu}/dI=210$ см⁻¹/А и наибольший интервал токовой перестройки одной моды ~ 10 см⁻¹ ($\Delta I=40$ мА). При токах $I=3\div 6I_{th}$ соотношение интенсивностей основной и наиболее сильной неосновной мод составляло не менее $100:1$ и определялось шумами регистрирующей схемы.

На **Рис. 19** приводятся временные развертки пилообразного импульса тока накачки одномодового ($L=120$ мкм, $d\bar{\nu}/dI=70$ см⁻¹/А) лазера (левая шкала) и сигналы фотоприемника, регистрирующего излучение, прошедшее через эталон Фабри-Перо и газовую кювету, наполненную смесью 1% CH₄ в N₂ при атмосферном давлении (правая шкала). Измерения проводились при температуре лазера $T=98$ К, когда был получен наиболее глубокий минимум сигнала, отвечающий поглощению метана. Соответствующие спектры пропускания для смеси, содержащей 1% CH₄ в N₂ при давлении $10, 50$ и 150 гПа, приведены на **Рис. 20**. Спектры симметричны, имеют форму, близкую к кривой Гаусса; уменьшение ширины линии пропускания согласуется с уменьшением давления паров метана. На рисунке показаны также линия пропускания смеси 1% CH₄ в N₂ при давлении 10 ГПа в области $\bar{\nu}=3028.8$ см⁻¹ и серия линий пропускания $\bar{\nu}=2950\div 3150$ см⁻¹ ($\lambda\approx 3.4\div 3.15$ мкм) по данным атласа HITRAN (длина оптического пути 10 см).

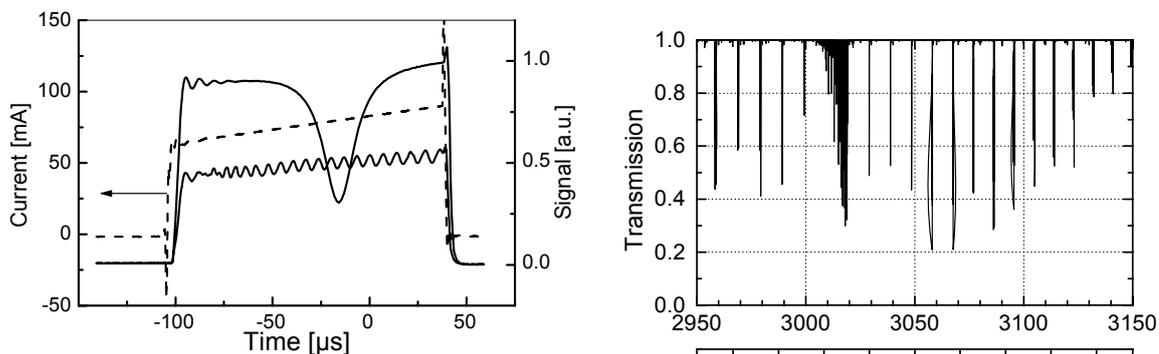


Рис. 19. (слева) Осциллограммы импульса тока накачки (штриховая линия, левая шкала) и сигналов с фотоприемника после пропускания излучения через эталон Фабри-Перо и газовую кювету, заполненную смесью 1% CH₄ в N₂ при атмосферном давлении (сплошные линии, правая шкала).

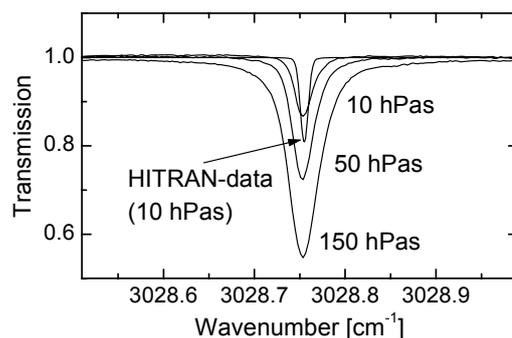


Рис. 20. (справа) а) Спектры пропускания смеси 1% CH₄ и N₂ при давлении 50 гПа и длине оптического пути 10 см (HITRAN-Database). б) Экспериментальные спектры пропускания смеси 1% CH₄ и N₂ при давлениях $10, 50$ и 150 гПа и спектр пропускания (HITRAN) при давлении 10 гПа.

В **заключении** подведены итоги работы и приведен перечень основных результатов:

1. Развита новые представления о дефектообразовании в полупроводниковых структурах A^3B^5 , содержащих четверные твердые растворы. Релаксация упругих

напряжений, вызванных градиентом периода решетки ($\text{grad}(a)$), в процессе роста четверного твердого раствора в условиях пластичности подложки сопровождается изгибом структуры, при этом знак изгиба соответствует знаку $\text{grad}(a)$, а плотность дислокаций в слое уменьшается, а в подложке – увеличивается, с уменьшением ее исходной толщины. При этом градиентный эпитаксиальный слой без подложки сферически искривлен с радиусом кривизны $R_0 = \bar{a} / \text{grad } \bar{a}$, где \bar{a} – период решетки твердого раствора. Предложена модель, качественно описывающая совокупность полученных данных, представляющая плотность краевых дислокаций в градиентном кристалле как: $N = \frac{1}{a} \left(\frac{\text{grad } \bar{a}}{\bar{a}} - \frac{1}{R} \right)$, где R – радиус изгиба кристалла. Показано увеличение остаточных деформаций в эпитаксиальном слое ε_T до 0.002, т.е. упрочнение материала, при «изовалентном легировании» твердых растворов - переходе от тройного InAsSb к четверному твердому раствору InGaAsSb , подтвержденное прямыми измерениями микротвердости.

Таким образом, проведенные исследования позволили сформулировать условия и методы получения градиентных структур с низкой плотностью дислокаций ($N < 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$), в частности, структур на основе InAsSb_x в области «несмешиваемости» ($x \sim 0.54$) с резким краем оптического поглощения ($\varepsilon \sim 7 \text{ мэВ}$, $\alpha_0 = 644 \text{ см}^{-1}$ при $h\nu = E_{\text{gmin}}$), позволяющим рассматривать полученные слои, как монокристаллы, а также двойных гетероструктур (ДГС) без сеток ДН в активном слое. В последнем случае в процессе роста третьего от подложки слоя, могущим иметь даже значительное несоответствие периода решетки с подложкой ($(\Delta d / d)_\perp = 4 \cdot 10^{-3}$), напряжения сжатия релаксируют с образованием дополнительной сетки ДН на ГР с InAs при одновременном «расширении» всех трех слоев в направлении, параллельном ГР. Это позволяет локализовать дефекты структуры вне рабочей области, т.е. вне второго от подложки слоя ДГС InGaAsSb/InAsSbP .

2. Разработан метод определения величины и знака остаточных упругих деформаций в полупроводниковых гетероструктурах, основанный на измерении спектральной зависимости степени линейно поляризации излучения (СЗСПИ), выходящего с поверхности структур с профилированной подложкой, например, типа «швеллер».

3. Установлено, что легирование раствора-расплава гадолинием до концентраций $X_{\text{Gd}}^I = 0.004 \div 0.005 \text{ ат\%}$ приводит к снижению концентрации электронов в эпитаксиальных слоях InGaAsSb , полученных методом ЖФЭ на подложке InAs , до $n_{77} \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и увеличению их подвижности до $U \approx 6 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. При этом снижение концентрации остаточных примесей происходит за счет уменьшения концентрации как доноров, так и акцепторов. С увеличением содержания Gd в жидкой фазе от 0.005 до 0.010 ат% происходит дальнейшее снижение концентрации электронов до $n_{77} = (7 \div 8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ за счет возрастания концентрации акцепторов и перекомпенсации примесей, при этом подвижность носителей уменьшается до $U = (3 \div 4) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. При легировании Gd в интервале концентраций $X_{\text{Gd}}^I = 0.004 \div 0.005 \text{ ат.}\%$ наблюдается увеличение интенсивности фотолюминесценции в (4 ÷ 10) раз и уменьшение полуширины спектров ФЛ в (1.3 ÷ 1.8) раз по сравнению с нелегированными образцами. Легирование Gd было успешно применено для снижения пороговых токов в инжекционных лазерах и обратных токов в фотодиодах на основе InGaAsSb и InAs .

4. Получены обогащенные InAs узкозонные слои n^+ - $\text{InGaAsSb}(\text{Sn})$ с концентрацией до $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью электронов $2 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}^{-1}$, прозрачные для излучения в диапазоне 3-3.3 мкм за счет вырождения электронов в зоне проводимости (эффект Мосса-Бурштейна). Указанные слои использованы в качестве буферных слоев n^+ - $\text{InGaAsSb}(\text{Sn})$, пропускающих рабочее излучение во флип-чип СД.

5. Фотометрическими и опто-акустическими методами экспериментально подтвержден принцип выведения фотонной системы излучателя из состояния равновесия с окружающей средой с уменьшением излучательной способности за счет изменения

концентрации излучающих осцилляторов в диодах на основе арсенида индия и близких к нему твердых растворов.

6. Сформулировано положение о предельно возможном коэффициенте преобразования для спонтанных источников, определяемом как отношение мощности излучения отрицательной люминесценции к темновому току диода (NLP/I_{sat}), адекватно описывающем экспериментальные данные, например, температурные вариации мощности излучения светодиода.

7. Разработаны методы получения отражательных контактов к узкозонным полупроводникам на основе InAs. Обнаружена модуляция теплового излучения полупроводника в присутствии резонатора Фабри-Перо, сформированным отражательным анодом и границей раздела полупроводник/воздух, на примере отрицательной люминесценции в диодных структурах, для которой пики в спектральном распределении отстоят на расстоянии $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL$ ($n=3.52$), где L – расстояние между анодом и световыводящей поверхностью.

8. Получено «вертикальное», перпендикулярное p-n переходу, когерентное излучение ($\lambda=3$ мкм) и получено увеличение эффективности в спонтанном режиме за счет взаимодействия фотонов со строенным резонатором, сформированным отражательным анодом и границей раздела полупроводник/воздух, в диодах на основе InAs при электрической инжекции неравновесных носителей.

9. Экспериментально продемонстрировано влияние безызлучательных процессов (Оже-рекомбинации), на эффективность преобразования в узкозонных диодах на основе InAs в широком диапазоне температур, включая повышенные (до 180°C). Показано, что при повышенных температурах и обратном смещении имеет место эффективная экстракция носителей, при которой происходит заметное подавление Оже-рекомбинации. В результате при достижении «критической» температуры эффективность преобразования для обратного смещенного диода (режим ОЛ) превосходит коэффициент преобразования для диода, смещенного в прямом направлении (режим электролюминесценции). Экспериментально установлены значения «критических» температур, составившие 80 , 110 и 140°C для диодов с шириной запрещенной зоны в активной области 234 , 317 и 344 мэВ (300K) соответственно. Максимальный достигнутый фактор превосходства коэффициента преобразования ОЛ над ЭЛ составил ~ 2.6 для диодов из InGaAsSb ($E_g \sim 317$ мэВ).

10. Разработаны и созданы диоды на основе InAsSb, в которых получена отрицательная люминесценция с эффективностью до 90% и эффективное понижение радиационной температуры $8-10$ К (для диапазона длин волн $3-5$ мкм).

11. Разработаны конструкции светодиодов и приборов отрицательной люминесценции, обеспечивающие увеличение эффективности за счет организации отражения излучения от наклонных стенок мезы и анода, а также за счет микротекстурирования световыводящей поверхности и приближении к условиям увеличенного эффективного угла полного внутреннего отражения и $R_{\perp} = 0$. Получена максимальная яркость излучения спонтанного диодного источника в диапазоне $3-5$ мкм, соответствующая эффективной температуре 1250K .

12. Созданы лазеры среднего ИК диапазона на основе ДГС $n\text{-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y/n\text{-In}_{1-v}\text{Ga}_v\text{As}_{1-z}\text{Sb}_z(\text{Gd})$ ($0.01 \leq v \leq 0.07$, $0.065 \leq z \leq 0.07$)/ $p\text{-(Zn)-InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{P}_y$ ($0.05 \leq x \leq 0.09$, $0.09 \leq y \leq 0.18$) с рекордно низкими пороговыми токами (40 А/см²), показано, что уменьшение длины резонатора приводит к возрастанию пороговой концентрации неосновных носителей и соответственно росту внутризонного поглощения, получено увеличение скорости токовой перестройки в «коротких» лазерах ($L \sim 70$ мкм, $d\bar{\nu}/dI = 210$ см⁻¹/А). Получены рекордные значения мощности лазеров (6Вт) (ширина полоска $W=200$ мкм, $L=600$ мкм) в области 3 мкм и продемонстрирована спектроскопия высокого разрешения газа метана при токовой перестройке длины волны в одномодовых лазерах с шириной полоска 20 мкм.

13. Созданы эффективные линейки и «иммерсионные» фото- и светодиоды, создающие положительный и отрицательный контраст в спектральном диапазоне 3-5 мкм. С использованием разработанных флип-чип диодов продемонстрированы отрицательный оптико-акустический эффект и детектирование ряда газов в малогабаритных кюветах (длина оптического пути менее 5 см) с пределом обнаружения на уровне нескольких частей на миллион.

Публикации по теме диссертации:

- A1 Матвеев Б.А., Рогачев А.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Кристаллы с виртуальной решеткой, обладающей радиальной симметрией», Письма в ЖТФ, **6**, 204-207 (1980)
- A2 Есина Н.П., Зотова Н.В., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Абишев Т.Д., «Длинноволновые неохлаждаемые светодиоды на основе твердых растворов InAsSbP », Письма в ЖТФ, **9**, 391-395 (1983)
- A3 Аверкиев Н.С., Зотова Н.В., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Поляризация люминесценции эпитаксиальных слоев твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x\text{P}_y$ », ФТП, **18**, 1795 (1984)
- A4 Бакун А.А., Матвеев Б.А., Попов И.Н., Рогачев А.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Дифракция рентгеновских лучей на пластических деформированных эпитаксиальных гетероструктурах», Письма в ЖТФ, **10**, 1297-1301 (1984)
- A5 Бакун А.А., Матвеев Б.А., Смирницкий В.Б., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Вогнутые дифракционные решетки на поверхности монокристаллов», Письма в ЖТФ, **11**, 1172 -1175 (1985)
- A6 Есина Н.П., Зотова Н.В., Марков И.И., Матвеев Б.А., Рогачев А.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Газоанализатор на основе полупроводниковых элементов», Журнал прикладной спектроскопии, **42**, 691-694 (1985)
- A7 Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Когерентное излучение 3.9 мкм в р-п структурах на основе InAsSbP », Письма в ЖТФ, **12**, 1444-1447 (1986)
- A8 Конников С.Г., Матвеев Б.А., Попова Т.Б., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Уманский В.Е., «Распределение дислокаций в изогнутых структурах $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ », ФТТ, **28**, 789 – 792 (1986)
- A9 Матвеев Б.А., Петров В.И., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Шабалин А.В. «Плотность дислокаций в искривленных градиентных кристаллах GaAsSbP », Поверхность. Физика, химия, механика - .41-44 (1986)
- A10 Матвеев Б.А., Петров В.И., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Шабалин А.В., «Дислокации несоответствия в пластически деформированных структурах $\text{GaAsSbP}/\text{GaAs}$ », Изв.АН СССР, сер."Физическая", **50**, 455-458 (1986)
- A11 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Инжекционное когерентное излучение в ДГС $\text{InAsSbP}/\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ », Письма в ЖТФ, **13**, 563-565 (1987)
- A12 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Температурная зависимость параметров стимулированного излучения в р-п структурах на основе InAsSb », Письма в ЖТФ, **13**, 329-331 (1987)
- A13 Матвеев Б.А., Новикова Л.Г., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Чернов М.А., «Проявления краевых искажений на рентгеновских топограммах изогнутых структур $\text{GaAsSbP}/\text{GaAs}$ », ЖТФ, **57**, 2000- 2004 (1987)
- A14 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Стимулированное излучение (3-3.3 мкм, 77К) при инъекции тока в пластически деформированных ДГС $\text{InAsSbP}/\text{InAs}$ », Письма в ЖТФ, **14**, 1617- 1621 (1988)
- A15 Кушкимбаева Б.Ш., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Филиппенко А.С.

- Чайкина Е.И., «Перераспределение остаточных напряжений при профилировании подложек в структурах InGaSbAs/GaSb», Письма в ЖТФ, **14**, 247-250 (1988)
- A16 Кушкимбаева Б.Ш., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Чайкина Е.И., «Профиль деформации в градиентных структурах InAs_{1-x-y}Sb_xP_y/InAs (x+y<0.3)», Письма в ЖТФ, **14**, 2044 – 2048 (1988)
- A17 Матвеев Б.А., Петров В.И., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Шабалин А.В., «Катодолюминесценция градиентных эпитаксиальных структур InAsSbP/InAs», ФТП, **22**, 1244- 1247 (1988)
- A18 Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Явление инверсного дефектообразования при выращивании эпитаксиальных структур InAsSbP/InAs», Кристаллография, **32**, 216- 221 (1988)
- A19 Aidaraliev M., Zotova N.V., Karandashov S.A., Matveev B.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N., «Spontaneous and stimulated Emission from InAsSbP/InAs Heterostructures».-phys. stat.sol. (a), **115**, K117-K120 (1989)
- A20 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Низкопроговые лазеры 3-3.5 мкм на основе ДГС InAsSbP/InGaAsSb», Письма в ЖТФ, **15**, 49-52 (1989)
- A21 Aydaraliev M., Argunova T.S., Zotova N.V., Karandashov S.A., Kutt R.N., Matveev B.A., Ruvimov S.S., Sorokin L.M., Stus N.M., Talalakin G.N., "LPE growth and characterization of InAsSbP/In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}Sb_y (x > 0 ,y > 0) heterostructures.for long wavelength ($\lambda > 3 \mu\text{m}$) LEDs and lasers", MRS Proc., **216**, Long - wavelength Semiconductor Devices, Materials and Processes, 203-206 (1990)
- A22 Аргунова Т.С., Кютт Р.Н., Матвеев Б.А., Рувимов С.С., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Структурное совершенство двойных гетероструктур InAs_{1-x-y}Sb_xP_y - InAs», ФТТ, **32**, 3355- 3361 (1990)
- A23 Зотова Н.В., Лосев А.В., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Филиппенко А.С., «Край поглощения варизонных эпитаксиальных слоев InAs_{1-x}Sb_x (x<0.54)», Письма ЖТФ, **16**, 76-80 (1990)
- A24 Кушкимбаева Б.Ш., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Филиппенко А.С., Чайкина Е.И., «Остаточная деформация в эпитаксиальных слоях InGaAsSb, InAsSbP - и InAsSb на подложке InAs», Кристаллография, **35**, 1307-1308 (1990)
- A25 Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Чернева Т.В., Фадин Ю.А., «Микротвердость полупроводниковых сплавов InGaAs, InGaAsSb, InAsSbP, обогащенных арсенидом индия», Неорганические материалы", **26**, 639-640 (1990)
- A26 Argunova T.S., Kyutt R.N., Matveev B.A., Ruvimov S.S., Stus' N.M., Talalakin G.N., "Distribution of defects in InAs_{1-x-y}Sb_xP_y- InAs DHs", Solid State Phenomena , **19*20**, 581-586 (1991)
- A27 Аверкиев Н.С., Кушкимбаева Б.Ш., Кютт Р.Н., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Чайкина Е.И., «Поляризация фотолуминесценции с поверхности гетероструктуры A³B⁵ с профилированной подложкой», ФТП, **25**, 12-16 (1991)
- A28 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Светодиоды на основе InAsSbP для анализа окислов углерода», Письма в ЖТФ , **17**, 75-79 (1991)
- A29 Zotova N.V, Karandashev S.A., Matveev B.A., Pentsov A.V., Slobodchikov S.V., Smirnova N.N., Stus' N.M., Talalakin G.N., Markov I.I., "Optoelectronic sensors based on narrow band A³B⁵ alloys", SPIE Proc., **1587**, 334-345 (1992)
- A30 Aidaraliev M., Zotova N.V., Karandashov S.A., Matveev B.A., Stus' N.M., Talalakin G.N., "Low-threshold long-wave lasers ($\lambda=3.0-3.6 \mu\text{m}$) based on III-V alloys" Semicond.Sci.Technol., **8**, 1575-1580 (1993)
- A31 Malinen J., Hannula T., Zotova N.V., Karandashov S.A., Markov I.I., Matveev B.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N., "Nondispersive and multichannel analyzers based on mid-IR LEDs and arrays", SPIE Proc., **2069**,95-101 (1993)

- A32 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Длинноволновые низкопороговые лазеры на основе соединений A^3B^5 », ФТП, **27**, 21-29 (1993)
- A33 Аргунова Т.С., Кютт Р.Н., Матвеев Б.А., Рувимов С.С., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., "Распределение деформации в двойных гетероструктурах InAsSbP/InGaAsSb", ФТТ, **36**, 3071-3078(1994)
- A34 Aidaraliev M., Zotova N.V., Karandashov S.A., Matveev B.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N., "Midwave (3-4 μm) InAsSbP/InGaAsSb infrared diode lasers as a source for gas sensors ", Infrared Physics & Technology, **37**, 83-86(1996)
- A35 Zotova N.V, Karandashev S.A., Matveev B.A., N.N., Stus' N.M., Talalakin G.N., Remennyi M.A., "Tunable mid-IR Diode Lasers based on InGaAsSb/InAsSbP DH", Spectrochimica Acta Part A, **52**, 857-862 (1996)
- A36 Михайлова М.П., Стусь Н.М., Слободчиков С.В., Зотова Н.В., Матвеев Б.А., Талалакин Г.Н., "Фотодиоды на основе твердых растворов InAsSb для спектрального диапазона 3-5 мкм", ФТП, **30**, 1613-1620 (1996)
- A37 Matveev B.A., Gavrilov G.A., Evstropov V.V., Zotova N.V., Karandashov S.A., Sotnikova G.Yu., Stus' N.M., Talalakin G.N., Malinen J., "Mid-infrared (3-5 μm) LEDs as sources for gas and liquid sensors", Sensors and Actuators B, **38-39**, 339-343 (1997)
- A38 Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., "Меzapолосковые лазеры на основе ДГС InAsSbP/InGaAsSb, легированных гадолинием, диапазона 3-3.6 мкм", Письма ЖТФ, **23**, 72-76 (1997)
- A39 Matveev B., Aidaraliev M., Gavrilov G., Zotova N, Karandashov S., Sotnikova G., Stus' N., Talalakin G., Il'inskaya N., Aleksandrov S., "Room temperature InAs photodiode-InGaAs LED pairs for methane detection in the mid-IR", Sensors & Actuators , **51**, 233-237 (1998)
- A40 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Излучательные характеристики меzapолосковых лазеров на основе двойных гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP», Письма в ЖТФ, **24**, 40-45 (1998)
- A41 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Коэффициент усиления и внутренние потери в лазерах на основе двойных гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP», ФТП, **33**, 759-763 (1999)
- A42 Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Твердые растворы InGaAsSb на основе InAs, легированные гадолинием, для светодиодов в спектральной области 3 - 5 мкм», ФТП, **33**, 1010-1014 (1999)
- A43 A'daraliev M., Zotova N.V., Karandashev S.A., Matveev B.A., Remennyi M.A., Stus' N.M., Talalakin G.N., Malyutenko V.K., Malyutenko O. Yu., "4 μm negative luminescence from p-InAsSbP/n-InAs diodes in the temperature range of 20–180°C", SPIE Proc., **4355**, 161-167 (2000)
- A44 Айдаралиев М., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., "Электролюминесценция светодиодов $\lambda = 3.3-4.3$ мкм на основе твердых растворов InGaAs и InAsSbP в интервале температур 20-180°C", ФТП, **34**, 102-105 (2000)
- A45 Айдаралиев М., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Beyer T., Brunner R., «Спектральные характеристики лазеров на основе двойных гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP ($\lambda = 3.0-3.6$ мкм), ФТП, **34**, 504-508 (2000)
- A46 Айдаралиев М., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Beyer T., «Лазеры $\lambda = 3.0-3.3$ мкм на основе ДГС InGaAsSb(Gd)/InAsSbP для диодно-лазерной спектроскопии», ФТП, **34**, 124-128

- (2000)
- A47 Malyutenko V. K., Malyutenko O.Yu., Podoltsev A. D., Kucheryavaya I.N., Matveev B. A., Remennyi M. A., Stus' N. M., "Current crowding in InAsSb LED structures", *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 4228-4230 (2001)
- A48 Matveev B.A., A'daraliev M., Zotova N.V, Karandashev S.A., Remenniy M.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N., Malyutenko V.K., Malyutenko O.Yu., "Negative luminescence from InAsSbP-based diodes in the 4.0-4.3 μm range", *SPIE Proc.*, **4285**, 109-117 (2001)
- A49 Matveev B.A., Zotova N.V, Karandashev S.A., Remenniy M.A., Stus' N.M., Talalakin G.N., "III-V optically pumped mid-IR LEDs", *Proc. SPIE*, **4278**, 189-196 (2001)
- A50 Айдаралиев М., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Отрицательная люминесценция в диодах на основе p-InAsSbP/n-InAs», *ФТП*, **35**, 335-338 (2001)
- A51 Айдаралиев М., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Электролюминесценция светодиодов на основе твердых растворов InGaAs и InAsSbP ($\lambda=3.3-4.3$ мкм) в интервале температур 20-180°C (продолжение)», *ФТП*, **35**, 619-625 (2001)
- A52 Айдаралиев М., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Мощные лазеры ($\lambda=3.3$ мкм) на основе двойных гетероструктур InGaAsSb(Gd)/InAsSbP», *ФТП*, **35**, 1261-1265 (2001)
- A53 Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., Шустов В.В., «Инфракрасные светодиоды с оптическим возбуждением на основе InGaAs(Sb)», *ФТП*, **35**, 371-374 (2001)
- A54 Aydaraliev M., Zotova N.V., Karandashov S.A., Matveev B.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N., Bewley W. W., Lindle J. R., Meyer J. R., "6 W InGaAsSb(Gd)/InAsSbP double-heterostructure diode lasers emitting at $\lambda =3.3 \mu\text{m}$), *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1166-1167 (2002)
- A55 Matveev B.A., Zotova N.V, Il'inskaya N .D., Karandashev S.A., Remenniy M.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N. ,"Towards efficient mid-IR LED operation: optical pumping, extraction or injection of carriers? ", *J.Mod.Optics*, **49**, 743-756 (2002)
- A56 Matveev B.A., Zotova N.V, Karandashev S.A., Remenniy M.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N. "Towards longwave (5-6 μm) LED operation at 80°C : injection or extraction of carriers?", *IEE Proc.*, **149** , 33 – 35 (2002)
- A57 Matveev B.A., Zotova N.V, Karandashev S.A., Remenniy M.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N., "Backside illuminated In(Ga)As/InAsSbP DH photodiodes for methane sensing at 3.3 μm ", *Proc. SPIE*, **4650**, 173-178 (2002)
- A58 Айдаралиев М., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., «Иммерсионные» инфракрасные светодиоды с оптическим возбуждением на основе узкозонных полупроводников A^{III}B^V», *ФТП*, **36**, 881-884 (2002)
- A59 Матвеев Б.А. «Полупроводниковый диод для инфракрасного диапазона спектра», патент РФ № 2286618 по заявке № 2002119616 от 16.07.2002.
- A60 Сукач А.В., Тетеркин В.В., Зотова Н.В. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., "Неохлаждаемые фотодиоды p+-InAsSbP/n-InAs для использования в оптоэлектронных сенсорах метана", *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, вып.37, 215-219 (2002)
- A61 Aidaraliev M., Zotova N.V., Il'inskaya N.D., Karandashev S.A., Matveev B.A., Remennyi M.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N., "InAs and InAsSb LEDs with built-in cavities", *Semicond. Sci. Technol.* **18**, 269–272 (2003)
- A62 Matveev B.A., Aydaraliev M., Zotova N.V, Karandashov S.A., Il'inskaya N. D., Remenniy M.A., Stus' N.M. , Talalakin G.N. «Flip-chip bonded InAsSbP and InGaAs LEDs and detectors for the 3 μm Spectral Region», *IEE Proc.-Optoelectronics*, **150**, 356-359 (2003)

- A63 Remenniy M.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Matveev B.A., Stus'N.M., Talalakin G. N., "Low voltage episcide down bonded mid-IR diode optopairs for gas sensing in the 3.3-4.3 μm spectral range", *Sensors & Actuators B: Chemical*, **91**, 256-261 (2003)
- A64 Айдаралиев М., Зотова Н.В., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Талалакин Г.Н., "Отрицательная люминесценция на длине волны 3.9 мкм в диодах на основе InGaAsSb", *ФТП*, **37**, 951-953 (2003)
- A65 Remenniy M.A., Matveev B.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Stus'N.M., Talalakin G. N., "InGaAsSb negative luminescent devices with built-in cavities emitting at 3.9 μm ", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **20**, 548-552 (2004)
- A66 Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Шустов В.В., «Светодиоды на основе InAs с резонатором, сформированным анодным контактом и границей раздела полупроводник/воздух», *ФТП*, **38**, 1270-1274 (2004)
- A67 Matveev B., Zotova N., Il'inskaya N., Karandashev S., Remenniy M., Stus'N., Kovchavtsev A., Kuryshev G., Polovinkin V., Tarakanova N., "3.3 μm high brightness LEDs", *MRS Proc.*, **891**, paper # 0891-EE01-04 (2005)
- A68 Matveev B., Zotova N., Il'inskaya N., Karandashev S., Remenniy M., Stus'N., "Spontaneous and stimulated emission in InAs LEDs with cavity formed by gold anode and semiconductor/Air interface", *phys. stat. sol. (c)* **2**, 927-930 (2005)
- A69 Matveev B.A., "LED-Photodiode Opto-pairs" in *Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics*, Springer Series in OPTICAL SCIENCE, ISSN 0342-4111, 395- 428 (2006)
- A70 Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., «Светодиоды флип-чип на 4.2 мкм с глубокой мезой травления», *ФТП*, **40**, 717-723 (2006)
- A71 Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Шустов В.В., Тараканова Н.Г., «Флип-чип светодиоды на основе InAs с буферными слоями из InGaAsSb», *ФТП*, **40**, 1004-1008 (2006)
- A72 Remenniy M.A., Matveev B.A., Zotova N.V., Karandashev S.A., Stus'N.M., Ilinskaya N. D., "InAs and InAs(Sb)(P) (3-5 μm) immersion lens photodiodes for portable optic sensors", *SPIE Proc*, **6585**, 658504, DOI: 10.1117/12.722847 (2007)
- A73 Иванов-Омский В.И., Матвеев Б.А., «Отрицательная люминесценция и приборы на ее основе» (обзор), *ФТП*, **41**, 257-268 (2007)
- A74 Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Лунин Л.С., Ратушный В.И., Корюк А.В., Кузнецов В.В., "Флип-чип фотодиоды на основе InAs, работающие при 20-100оС в интервале длин волн 2.7-3.7 мкм", *Известия ВУЗов, Материалы электронной техники*, №3, 36-38 (2007)
- A75 Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Усикова А.А., Черняков А.Е., «ИК изображения флип-чип диодов на основе InAsSbP в спектральной области 3 мкм», *Прикладная Физика*, N6, 143-148 (2008)
- A76 Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., «Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия (обзор)», *ФТП*, **42**, 641-657, (2008)
- A77 Kuusela T., Peura J., Matveev B. A., Remenniy M. A., Stus' N. M. , «Photoacoustic gas detection using a cantilever microphone and III-V mid-IR LEDs», *Vibrational Spectroscopy*, **51**, 289-293 (2009)
- A78 Matveev B.A., Zadiranov Yu. M., Zakgeim A. L., Zotova N.V, Il'inskaya N.D., Karandashev S.A., Remenniy M.A., Stus' N.M., Usikova A. A., Usov O.A., Cherniakov A.E., "Midinfrared ($\lambda= 3.6 \mu\text{m}$) LEDs and arrays based on InGaAsSb with photonic crystals", *SPIE Proc*, **7223**, 72231B-1-7 (2009)
- A79 Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Матвеев Б.А., Сотникова Г.Ю.,

- Ременный М.А., «Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра», ЖТФ, **79**, 112-118 (2009)
- A80 Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Усикова А.А., Черняков А.Е., «Светоизлучающая диодная линейка ($\lambda=3.7$ мкм) на основе InGaAsSb», ФТП, **43**, 531-536 (2009)
- A81 Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Черняков А.Е., «Неохлаждаемые широкополосные флип-чип фотодиоды на основе InAsSb ($\lambda_{\text{cut off}}=4.5$ мкм)», ФТП, **43**, 412-417 (2009)
- A82 Закгейм А.Л., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Черняков А.Е., Шленский А.А., «Распределение излучения в светодиодах на основе GaInAsSb/GaSb», ФТП, **43**, 689-694 (2009)
- A83 Kuusela T., Peura J., Matveev B.A., Remennyu M.A., Stus' N.M., "Photoacoustic effect induced by negative luminescence device", J. Appl. Phys. **108**, 014903, doi:10.1063/1.3456499 (6 pages) (2010)
- A84 Sotnikova, G. Y., Gavrilov, G. A., Aleksandrov, S. E., Kapralov, A. A., Karandashev, S. A.; Matveev, B. A.; Remennyu, M. A., "Low Voltage CO₂-Gas Sensor Based on III–V Mid-IR Immersion Lens Diode Optopairs: Where we Are and How Far we Can Go?", Sensors Journal, IEEE, **10**, 225 – 234 (2010)

Список цитируемой литературы:

- 1 Kroemer H. and Griffiths C., "Staggered-Lineup Heterojunctions as Sources of Tunable Below-Gap Radiation: Operating Principle and Semiconductor Selection", IEEE Electron Dev. Lett., **4**, 20-22 (1983).
- 2 Кузнецов А.А., Балашов О.Б., Васильев Е.В., Логинов С.А., Луговской А.И., Черняк Е.Я., «Дистанционный инфракрасный детектор углеводородных газов», Приборы и системы. Управление контроль, диагностика, № 6, 55-59 (2003).
- 3 Kane M.J., Braithwaite G., Emeny M.T., Lee D., Martin T., Wright D.R., "Bulk and surface recombination in InAs/AlAs_{0.16}Sb_{0.84} 3.45 μm light emitting diodes", Appl. Phys. Lett., **76**, 943-945 (2000).
- 4 Pullin M., Heber X. Li, J., Gevaux D., Phillips C., "Improved efficiency positive and negative luminescent light emitting devices for mid-infrared gas sensing applications", SPIE Proc., **3938**, 144 (2000).
- 5 Gevaux D. G., Green A. M., Philips C. C., Vurgaftman I., Bewley W.W., Felix C.L., Meyer J.R., Lee H., Martinelli R., "3.3 μm "W" quantum well light emitting diodes". IEE Proc. Optoelectron., **150**, 351- 355 (2003).
- 6 Krier A., Sherstnev V.V., "Powerful interface light emitting diodes for methane gas detection", J. Phys. D: Appl. Phys., **33**, 101-106 (2000).
- 7 Krier A., Huang X.I., "Design considerations for uncooled InAs mid-infrared light emitting diodes grown by liquid phase epitaxy", J.Phys.D. Appl.Phys, **39**, 255-261 (2006).
- 8 Данилова Т.Н., Именков А.Н., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П., «Лазеры на основе двойных гетероструктур InAsSb/InAsSbP, излучающие в спектральной области 3-4 мкм. Часть 1», ФТП, **34**, 1396- 1403 (2000).
- 9 Зегря Г.Г., Андреев А.Д., «Механизм подавления процессов Оже рекомбинации в гетероструктурах II типа», Письма в ЖЭТФ, **61**, 749-755 (1995).
- 10 Christol P., Gazouli M.El., Bigenwald P., Joullie A., "Performance simulation of 3.3 μm interband laser diodes grown on InAs substrate", Physica E, **14**, 375-384 (2002).
- 11 Аверкиев Н.С., Астахова А.П., Гребенщикова Е.А., Ильинская Н.Д., Калинина К.В., Кижаяев С.С., Кислякова А.О., Монахов А.М., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П., «Дисковые WGM - лазеры ($\lambda=3.0$ мкм) на основе InAsSbP - гетероструктур, работающих в непрерывном режиме», ФТП, **43**, 124-127 (2009).

- 12 Иванов-Омский В.И., Коломиец Б.Т., Смирнов В.А., «Излучательная рекомбинация в InSb при магнитоконцентрационном эффекте», Доклады Академии наук СССР, **161**, 1308-1309 (1965).
- 13 Malyutenko V., "Negative luminescence in semiconductors: A retrospective view", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, **20**, 553-557 (2004).
- 14 Elliott C.T., "Negative luminescence and its applications", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, **359**, 567 (2001).
- 15 Pipa V.I., Liptuga A.I., "Parameter analysis and optimization for the radiative cooling effect due to negative luminescence", J.Appl.Phys, **92**, 5053-5059 (2002).
- 16 Филачев А.М., И.И.Таубкин, М.А.Тришенков, «Совершенное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники», Москва, Физматкнига, 128 с. (2010).
- 17 Gong X.Y., Yamaguchi T., Kan H., Makino T., Iida T., Kato T., Aoyama M., Suzuki Y., Sanada N., Fukuda Y., Kumagawa M., "Influence of Sulphidation Treatment on the Performance of Mid-Infrared InAsPSb/InAs Detectors", Jap.J.Appl.Phys, **37**, 55-58 (1998).
- 18 Lal R.K., Chakrabarti P., "An analytical model of P⁺-InAsSbP/n⁰-InAs/n⁺-InAs single heterojunction photodetector for 2.4-3.5 μm region", Optical and Quantum Electronics, **36**, 935-947 (2004).
- 19 Sharabani Y., Paltiel Y., Sher A., Raizman A., Zussman Z., "InAsSb/GaSb heterostructure based mid wavelength infrared detector for high temperature operation", MIOMD-VII Abstracts 8-th International Conference on Mid-Infrared Optoelectronics: Materials and Devices (MIOMD-VIII), Bad Ischl, Austria (2007).
- 20 Lauer C., Dier O., Amann M-C., "Low-resistive metal/n⁺-InAsSb/n-GaSb contacts", Semicond. Sci. Technol., **21**, 1274-1277 (2006).
- 21 Астахова А.П., Журтанов Б.Е., Именков А.Н., Михайлова М.П., Сиповская М.А., Стоянов Н.Д., Яковлев Ю.П., «Длинноволновые фотодиоды на основе двойной гетероструктуры n-GaSb/n-GaInAsSb/p-AlGaAsSb», Письма ЖТФ, **33**, 23-29 (2007).
- 22 Krier A. and Suleiman W., "Uncooled photodetectors for the 3–5 μm spectral range based on III–V heterojunctions", Appl. Phys.Lett., **89**, 083512 (2006).
- 23 Бир Г.Л., Пикус Г.Е., Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках, М. 584 с., (1972).
- 24 Шуберт Ф., «Светодиоды», пер. с англ. под ред. А.Э.Юновича, с.496 (Москва, «ФИЗМАТЛИТ») (2008).
- 25 Головин А.С., Астахова А.П., Кижаяев С.С., Ильинская Н.Д., О.Ю.Серебренникова, Яковлев Ю.П., «Светодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSb для спектроскопии CO₂ (λ=4.3 μm)», Письма ЖТФ, **36**, 105-110 (2010).
- 26 Кейси Х., Паниш М., «Лазеры на гетероструктурах», М.: Мир, 1981, т.1.
- 27 Dixon J. R. , Ellis J. AI., "Optical properties of n-type indium arsenide in the fundamental absorption edge region", Phvs. .. Rev., **123**, 1560-1566 (1961).
- 28 Joindot I. and Beylat J.-L., "Intervalence band absorption coefficient in quantum well 1.55 μm semiconductor lasers", Electron. Lett., **29**, 604 (1993).
- 29 Джамисов Д.Э., Мак-Фи Р.Х., Пласс Дж.Н., Ричардс Р.Дж.. «Физика и техника инфракрасного излучения» (Пер.с англ.), (Сов.Радио), с.386 (1965).
- 30 Зи С.М., «Физика полупроводниковых приборов». В 2-х томах. Том 1. – М.: Мир,- 465 с. (1981).
- 31 Johnes R.C., "Immersed radiation detectors", Appl.Opt., **1**, 607-613 (1962).