

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. А.Ф. ИОФФЕ Российской академии наук

на правах рукописи

Малевская Александра Вячеславовна

**Модификация оптических и резистивных свойств каскадных A_3B_5
фотоэлектрических преобразователей и $AlGaAs/GaAs$
светоизлучающих диодов**

Специальность:

1.3.11 - физика полупроводников

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Шварц М.З.

Санкт-Петербург

2025

Оглавление

Введение	5
Основные положения, выносимые на защиту	10
Глава 1. Оптоэлектронные приборы на основе A3B5 структур: принцип действия и формирование.....	12
1.1. Фотоэлектрические преобразователи солнечного и лазерного излучения.....	12
1.2. Светоизлучающие диоды	17
1.3. Методы формирования структуры: диффузия из газовой фазы, жидкофазная, молекулярно-пучковая и газофазная эпитаксии.....	20
1.4. Основные методы постростовой обработки структур: фотолитография, осаждение металлических и диэлектрических покрытий, травление	24
Глава 2. Структуры фотоэлектрических преобразователей и светоизлучающих диодов	34
2.1. GaInP/GaInAs/Ge гетероструктура фотоэлектрического преобразователя солнечного излучения.....	34
2.2. Влияние глубины залегания p - n перехода на характеристики GaSb фотоэлектрических преобразователей	36
2.3. AlGaAs/GaAs гетероструктуры фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения (800-860 нм) и инфракрасных (850-940 нм) светоизлучающих диодов.	39
2.4. Исследование методов переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель.....	43
2.5. Методы исследования гетероструктур.	47
Глава 3. Каскадный фотоэлектрический преобразователь солнечного излучения на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge.	53
3.1. Расчет конфигурации контактных шин для оптимального введения оптической мощности в фотоэлектрический преобразователь	56

3.2. Омические контакты	60
3.2.1. Удельное контактное сопротивление	61
3.2.2. Последовательное сопротивление прибора	63
3.2.3. Исследование различных типов омических контактов	64
3.2.4. Увеличение электрической проводимости контактных систем	72
3.2.5. Влияние омических контактов на параметры каскадных фотоэлектрических преобразователей	81
3.3. Антиотражающие покрытия.....	84
3.3.1. Исследование методов травления контактного слоя GaInP/GaInAs/Ge гетероструктуры.....	85
3.3.2. Влияние обработки поверхности и состава антиотражающего покрытия на характеристики фотоэлектрических преобразователей.....	88
3.4. Меза-структура каскадных фотоэлектрических преобразователей ...	91
3.4.1. Исследование методов формирования мезы GaInP/GaInAs/Ge структуры.....	91
3.4.2. Влияние методов формирования мезы на скорость поверхностной рекомбинации фотоэлектрических преобразователей.....	100
3.4.3. Снижение деградации характеристик фотоэлектрических преобразователей при воздействии факторов окружающей среды	102
3.5. Характеристики концентраторных каскадных фотоэлектрических преобразователей.....	105
Глава 4. Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения ($\lambda=1300-1700$ нм) на основе GaSb структуры.....	109
4.1. Омические контакты к GaSb <i>n</i> - и <i>p</i> -типа проводимости	109
4.2. Исследование характеристик GaSb фотоэлектрических преобразователей.....	113
Глава 5. Оптические свойства многослойного комбинированного отражателя.	119
5.1. Конструкция комбинированного отражателя.....	119

5.2. Расчет оптических параметров отражателей	123
5.3. Влияние диффузии индия на характеристики комбинированного отражателя.	128
Глава 6. Фотоэлектрические преобразователи и светоизлучающие диоды на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур с комбинированным отражателем.....	131
6.1. Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения (800-860 нм) прямого и инвертированного роста	131
6.1.1. Снижение омических и оптических потерь фотоэлектрических преобразователей.....	131
6.1.2. Влияние комбинированного отражателя на характеристики фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения.....	137
6.1.3. Анализ соотношения оптических и омических потерь для преобразования лазерного излучения различной плотности.....	140
6.2. Увеличение эффективности вывода излучения из кристаллов инфракрасных (850 нм и 930 нм) светоизлучающих диодов.	142
6.2.3. Влияние методов текстурирования световыводящей поверхности на интенсивность электролюминесценции инфракрасных светоизлучающих диодов	144
6.2.4. Влияние состава комбинированных отражателей на параметры инфракрасных (850 нм) светоизлучающих диодов.....	147
6.2.5. Конструкции инфракрасных (930 нм) светоизлучающих диодов.	150
Заключение.....	155
Публикации по теме диссертации.....	157

Введение

Развитие энергетики в нашей стране и мире идет по пути поиска как новых источников энергии, так и повышения эффективности использования уже имеющихся методов преобразования энергии. Наиболее перспективными являются экологически чистые возобновляемые источники электроэнергии, такие как солнечное излучение (СИ) и ветер. В последние десять лет за счет развития технологий фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и увеличения их энергоэффективности солнечная фотоэнергетика демонстрирует впечатляющие темпы роста [1, 2]. Так к 2020 году общая мировая мощность солнечных энергоустановок составила 530 ГВт, а к 2021 году этот показатель вырос до 940 ГВт. В 2022 году превзойден тераваттный рубеж [3-5]. Развитие и широта использования солнечной энергетики определяется стоимостью электроэнергии, снижение которой в значительной степени определяется увеличением коэффициента полезного действия (КПД) солнечных энергоустановок, оптимизацией технологий их изготовления, повышением надежности работы и сроков эксплуатации. Увеличение эффективности элементов и систем достигается путем оптимизации гетероструктур фотоэлектрических преобразователей и совершенствованием постростовой технологии.

Наблюдается и рост потребностей в ФЭП лазерного излучения (ЛИ) [6-10] и мощных светоизлучающих диодах (СИД) [11, 12]. ФЭП ЛИ находят все более широкое применение в системах беспроводной передачи энергии в космосе и по оптоволокну для питания удаленных объектов, для наземных (бытовых) приложений при зарядке мобильных телефонов, в медицине при создании автономной аппаратуры и т.д. Инфракрасные (ИК) светоизлучающие диоды (длина волны 850-940 нм) применяются для подсветки в камерах видеонаблюдения, в охранных системах и т.п. Как и для ФЭП СИ разработка и совершенствование технологий изготовления полупроводниковых преобразователей ЛИ и СИД преследует цели увеличения КПД приборов с повышением их эксплуатационного ресурса.

Возможность достижения значений эффективности $\sim 69\%$ при преобразовании ИК излучения с длиной волны 858 нм и плотностью мощности 11 Вт/см^2 показана в работе [7] для AlGaAs/GaAs ФЭП. Эффективность преобразования ЛИ (809 нм) более высокой плотности продемонстрирована в РФ [A1]: 62% при 100 Вт/см^2 для AlGaAs/GaAs ФЭП специальной конструкции, разработка которой является предметом данного исследования.

Интерес к ИК области спектра (1300-1700 нм) и потребность эффективного преобразования ЛИ с длиной волны 1550 нм могут быть удовлетворены с использованием ФЭП на основе InGaAs/InP и антимонида галлия (GaSb). Достигнутый уровень по КПД GaSb ФЭП в 34% при плотности мощности 100 Вт/см^2 [13] может быть превышен при нахождении компромисса между оптическими и омическими потерями мощности в оптимизируемой конструкции прибора.

В данной диссертационной работе представлены решения по снижению оптических и омических потерь в мощных высокоэффективных ФЭП солнечного и лазерного излучения, исследованы способы подавления поверхностной рекомбинации при формировании периферийной области кристаллов ФЭП, рассмотрены способы увеличения эффективности вывода излучения из кристаллов ИК СИД.

Актуальность темы

Основными проблемами, препятствующими увеличению эффективности преобразования концентрированного солнечного и мощного лазерного излучения в электроэнергию, остаются оптические, омические и рекомбинационные потери. Решение этих проблем осуществляется совершенствованием как технологии роста квантоворазмерных гетероструктур, так и постростовой технологии, обеспечивающей сохранение свойств материалов при создании новых приборных конструкций с встраиваемыми оптическими отражателями и контактными системами, при исследовании методов травления структур и пр. К началу выполнения данной работы в

наименьшей степени изучены возможности модификации фотоэлектрических, оптических и резистивных свойств гетероструктур на этапе постростовой технологии для решения актуальных задач повышения эффективности и надежности преобразователей энергии концентрированного солнечного и мощного лазерного излучения и ИК СИД.

Известно, что для преобразования концентрированного СИ перспективными являются трех каскадные ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge гетероструктур [14, 15]. Однако для таких ФЭП при значительном увеличении кратности концентрирования преобразуемого СИ регистрируется существенное падение их энерговыработки (КПД) из-за роста омических потерь. Поиск и применение новых контактных систем, обеспечивающих снижение удельного и последовательного сопротивления прибора, остается под пристальным вниманием разработчиков ФЭП.

При изготовлении ИК СИД диапазона длин волн 850-940 нм на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур, выращиваемых на поглощающих излучение GaAs подложках, основной проблемой является вывод из кристалла излучения, генерируемого в активной области [16, 17]. Модификация световыводящей поверхности ИК СИД, исследование и разработка систем многослойных комбинированных отражателей должны способствовать существенному повышению внешней квантовой эффективности и оптической мощности приборов.

Таким образом, разработка и формирование научно-обоснованного комплекса взаимосвязанных методов обработки гетероструктур с модификацией их оптических и резистивных свойств для получения эффективных каскадных A3B5 фотоэлектрических преобразователей и AlGaAs/GaAs светоизлучающих диодов является актуальной научной и практической задачей.

Цели работы

Целью данной диссертационной работы является разработка постростовой технологии, объединяющей комплекс взаимосвязанных научно-обоснованных

методов обработки и модификации A3B5 гетероструктур различных типов (каскадные GaInP/GaInAs/Ge, AlGaAs/GaAs и GaSb) с созданием на их основе ФЭП СИ и ЛИ с уменьшенными омическими, оптическими и рекомбинационными потерями и AlGaAs/GaAs ИК СИД с увеличенной эффективностью вывода излучения из кристаллов.

Исследование различных типов приборов объединены едиными задачами в области постростовой технологии:

- расчет конфигурации шин фронтального омического контакта, обеспечивающей снижение оптических и омических потерь при вводе излучения в ФЭП;
- разработка методов формирования контактных шин на основе Ag/Ni/Au трапецевидного сечения согласно рассчитанной конфигурации;
- изучение омических потерь в новых контактных NiCr/Ag/Au + Ag/Ni/Au системах к полупроводниковым материалам GaAs, GaSb и Ge *p*-типа проводимости и разработка на их основе низкоомных контактов к приборным структурам;
- исследование рекомбинационных потерь при формировании мез приборных структур и разработка комбинированных методов их травления, снижающих рекомбинационные потери носителей заряда;
- исследование профиля *p-n* перехода, формируемого двухстадийной диффузией Zn в подложку GaSb, обеспечивающего оптимальное соотношение оптических и омических потерь в фотоэлектрических преобразователях мощного лазерного излучения;
- разработка конструкций и расчет оптических свойств многослойных комбинированных отражателей и исследование методов их встраивания в ФЭП ЛИ и ИК СИД с сохранением свойств базовых нано- и квантоворазмерных гетероструктур;
- изучение модификации оптических и приборных характеристик ФЭП ЛИ (800-860 нм) и ИК (850-940 нм) СИД, создаваемых методом переноса AlGaAs/GaAs

гетероструктуры на подложку-носитель с одновременным встраиванием многослойных комбинированных отражателей первичного и рекомбинационного (люминесцентного) излучений.

Научная новизна полученных результатов

1. Предложены новые методики постростовой обработки GaInP/GaInAs/Ge гетероструктур, обеспечивающие при создании каскадных ФЭП СИ снижение омических и оптических потерь, подавление поверхностной рекомбинации на периферии кристаллов более чем на 2 порядка.
2. Предложена и исследована новая контактная система к полупроводниковым материалам GaAs и GaSb *p*-типа проводимости на основе слоев NiCr/Ag/Au с низким контактным сопротивлением $\sim 10^{-6}$ Ом·см².
3. Предложена и исследована новая конструкция многослойного комбинированного отражателя, обеспечивающего отражение более 99% распространяющегося в структурах ФЭП ЛИ и ИК СИД излучения. Отражатель включает широкозонный слой Al_{0.9}Ga_{0.1}As (300 нм), слой диэлектрика SiO₂ (300 нм), адгезионный слой NiCr (0.5-1 нм), отражающий слой Ag (150-200 нм), барьерные слои Ti (50 нм) + Pt (50 нм).

Научная и практическая значимость работы

Исследованы и выявлены причины омических, оптических и рекомбинационных потерь в ФЭП солнечного и лазерного излучения и ИК СИД.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработке омических NiCr/Ag/Au+Ag/Ni/Au контактов с низким удельным сопротивлением, высокой электрической проводимостью, хорошей адгезией к поверхностным слоям фото и свето- преобразующих структур и низкой степенью диффузии в материалы полупроводников;
- освоении технологии формирования омического контакта в виде усеченных пирамид, повышающих эффективность ввода излучения в ФЭП за счет

использования эффекта зеркального отражения в направлении фотоприемной поверхности прибора;

- разработке комбинированных методов травления при формировании мезы GaInP/GaInAs/Ge гетероструктуры, обеспечивающих подавление поверхностной рекомбинации на периферии кристаллов;

- разработке многослойного комбинированного отражателя, обеспечивающего отражение более 99% излучения, и технологии его встраивания в конструкции ФЭП и СИД при переносе гетероструктуры на подложку-носитель с использованием интерметаллического соединения Au-In.

В результате проведенных исследований созданы высокоэффективные каскадные GaInP/GaInAs/Ge ФЭП СИ, мощные AlGaAs/GaAs (800-860 нм) и GaSb (1300-1700 нм) ФЭП ЛИ и AlGaAs/GaAs ИК СИД (850-940 нм).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Контактные шины трапецевидного сечения с зеркальными боковыми гранями, полученные электрохимическим осаждением Ag на массив планарных контактов, обеспечивают повышение эффективности ввода концентрированного излучения в фотоэлектрический преобразователь за счет переотражения на активную поверхность лучей, падающих на шины, нивелируя эффект затенения в области контакта, при одновременном снижении резистивных потерь.

2. Плавный профиль периферийных меза-поверхностей GaInP/GaInAs/Ge структур, полученный комбинацией методов реактивного ионно-плазменного и химического травления, уменьшает количество приповерхностных безызлучательных центров рекомбинации, снижая тем самым скорость поверхностной рекомбинации более чем на 2 порядка, и создает условия для формирования сплошных диэлектрических покрытий, подавляющих деградационные процессы.

3. Контактная система NiCr/Ag/Au + Ag/Ni/Au с малым последовательным сопротивлением, имеющая низкую степень диффузионного обмена атомами с полупроводником (глубина проникновения не более 15 нм), предотвращает

шунтирование p - n перехода, сформированного методом двухстадийной диффузии цинка, расположенного на малой глубине от поверхности в GaSb микроразмерных фотоэлектрических преобразователях.

4. Комбинированный $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}/\text{Ti}/\text{Pt}$ тыльный отражатель, объединяющий эпитаксиальный слой, напыленные диэлектрические и металлические слои, снижает до 1% потери ИК-излучения, распространяющегося в $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ гетероструктуре в сторону поглощающей подложки, дополнительно блокируя диффузию атомов интерметаллического соединения Au-In при формировании контакта с подложкой-носителем.

Апробация работы

Результаты работы опубликованы в реферируемых журналах и докладывались на различных конференциях: «Физика. СПб» (Санкт-Петербург, 2024), «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2021), «15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, CPV-15» (Fes, Morocco, 2019), «20-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2018), «Физика. СПб» (Санкт-Петербург, 2018), «17-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, опто- и наноэлектронике» (Санкт-Петербург, 2015), «10th International Conference on Concentrating Photovoltaics, CPV-10» (Albuquerque, NM, USA, 2014), «The 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition» (Amsterdam, The Netherlands, 2014).

Публикации. По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 26 печатных работ, 4 патента РФ. Список работ размещен в конце диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 171 страниц, включая 70 рисунков и 10 таблиц. Список цитируемой литературы включает 95 наименований.

Глава 1. Оптоэлектронные приборы на основе A3B5 структур: принцип действия и формирование

1.1. Фотоэлектрические преобразователи солнечного и лазерного излучения

История создания ФЭП начинается в 1839 г., когда Александр Эдмон Беккерель совершил открытие фотогальванического эффекта - преобразование солнечной энергии в электричество. В 1873 г. Уиллоуби Смит обнаружил резкое увеличение электропроводности селеновых стержней при облучении их солнечным светом [18]. В ходе исследований была обнаружена зависимость сопротивления от интенсивности света. Эксперименты с твердотельными фотоэлектрическими элементами на основе селена также проводились Адамсом и Деем в Лондоне в 1876 г. [19]. В 1883 г. Чарльзом Фриттсом был разработан первый фотоэлемент на основе селена, покрытого тонким слоем золота, КПД преобразования солнечного излучения в электроэнергию составлял 1%. В 1887 г. немецкий ученый Генрих Герц обнаружил влияние ультрафиолетового излучения на электрический заряд. В 1888 г. Александр Григорьевич Столетов создал первый вакуумный фотоэлемент. В конце XIX в. во Франции были построены первые солнечные батареи (СБ), осуществлявшие преобразование солнечной энергии в механическую энергию пара. Альберту Эйнштейну в 1921 г. была присуждена Нобелевская премия за изучение особенностей внешнего фотоэффекта. В 30-х гг. советские физики во главе с академиком А.Ф. Иоффе получили электрический ток, используя фотоэффект, с КПД равным 1% [20]. В 1951 г. Н.А. Горюновой в ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработаны кремниевые фотоэлементы с *p-n* переходом, имевшие КПД около 6% [21]. Широкое практическое использование солнечных батарей для энергетических целей началось с запуском в 1958 г. году искусственных спутников Земли – советского «Спутник-3» и американского «Авангард-1».

Создание в ФТИ им. А.Ф. Иоффе впервые в мире в 1969 г. году ФЭП на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур открыло новую страницу в космической

солнечной фотоэнергетике [22]. КПД ФЭП был увеличен до 19-20% и повышена радиационная стойкость. Примером масштабного использования AlGaAs/GaAs СБ явилось оснащение в 1986 г. орбитальной станции «Мир» гетероструктурной батареей площадью 70 м², изготовленной в НПО «Квант» по технологии, разработанной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. В последующие годы гетероструктурные батареи на основе каскадных ФЭП становились все более востребованными благодаря увеличению КПД до 27-29% и улучшению радиационной стойкости.

Наиболее перспективными материалами для изготовления солнечных элементов являются кремний и соединения АЗВ5: на основе AlGaAs/GaAs гетероструктуры – для однопереходных элементов, и GaInP/GaInAs/Ge – для трех-переходных элементов [23-25]. Для преобразования лазерного излучения в диапазоне длин волн 400-900 нм основными материалами являются AlGaAs/GaAs гетероструктуры [7, 8], для диапазона 900-1700 нм – InGaAs, GaSb, AlGaAsSb/GaSb, InGaAsP/InP [10, 13]. Литературный обзор показал [7, 8, 10, 13], что основные работы по тематике ФЭП связаны с разработкой высокоэффективных, но маломощных приборов, и для перехода в диапазон более высоких мощностей преобразуемого излучения (концентрированного солнечного и мощного лазерного излучений) требуются дополнительные исследования, направленные на снижение омических, оптических и рекомбинационных потерь.

Принцип действия ФЭП

Преобразование излучения в электроэнергию в полупроводниковых фотоэлектрических преобразователях основано на рождении электрон-дырочных пар при поглощении фотонов, энергия которых превышает ширину запрещенной зоны полупроводникового материала, и разделении носителей заряда разной полярности тянущим полем *p-n*-перехода [26, 27]. Возникает направленное движение носителей заряда и во внешней цепи начинает течь ток. Фотоны с энергией значительно превышающей ширину запрещенной зоны

материала, рождают носители, обладающие избыточной кинетической энергией в зоне проводимости. Эта избыточная энергия расходуется на нагрев кристаллической решетки и не дает вклад в вырабатываемую ФЭП электроэнергию. Еще одним значимым источником энергетических потерь является рекомбинация электронно-дырочных пар (рис. 1.1), что ограничивает теоретически достижимую эффективность при преобразовании энергии солнечного и лазерного излучения [28].

Максимально эффективное поглощение фотонов происходит вблизи поверхности ФЭП и будет распределено по глубине полупроводника согласно закону Бугера-Ламберта для излучения соответствующей длины волны:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

где α - коэффициент поглощения, x – глубина слоя полупроводника.

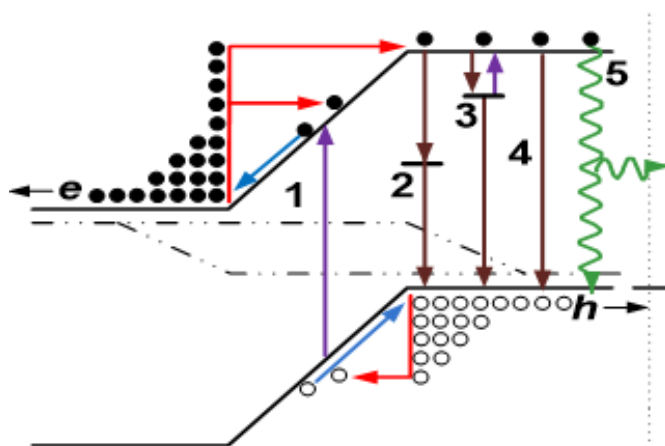


Рис. 1.1. Зонная диаграмма фотоэлектрического преобразователя. 1 – генерация электронно-дырочных пар под действием внешнего облучения, 2 – безызлучательная рекомбинация через глубокие центры, 3 – через примесные центры, 4 – рекомбинация зона-зона, 5 – излучательная рекомбинация.

Распределение плотности генерируемых носителей в слоях ФЭП будет определяться и законом поглощения, и спектральным распределением потока фотонов в спектре излучения. Однако фотогенерированные носители могут не

дать вклад в фототок из-за их рекомбинации: излучательной, Оже-рекомбинации или рекомбинации на дефектах или примесных центрах.

При постростовой обработке значительное количество дефектов образуется в области меза-структур, формируя каналы безызлучательной рекомбинации через глубокие центры (механизм 2 на рис.1.1). Снижению влияния данного механизма на эффективность ФЭП в данной работе будет уделено особое внимание (см. раздел 3.4).

Основные параметры ФЭП

Внешний квантовый выход фотоответа (Q_{ext}) характеризует отношение числа носителей, собранных ФЭП, к числу фотонов определенной длины волны, поглощенных элементом. Значение внутреннего квантового выхода фотоответа (Q_{int}) учитывает отражение (R) части поступающего излучения от поверхности полупроводника, а также затенение фоточувствительной области контактной системой:

$$Q_{\text{int}}(\lambda) = Q_{\text{ext}} \cdot [(1-R(\lambda)) \cdot (1-S_k/S_{\text{ФЭП}})] \quad (2)$$

где S_k – площадь контактной системы, $S_{\text{ФЭП}}$ – площадь ФЭП.

Плотность фотогенерированного тока определяется при интегрировании в диапазоне длин волн фоточувствительности ФЭП для соответствующего спектрального распределения плотности потока излучения $E(\lambda)$:

$$J = q/hc \int_{\lambda_0}^{\lambda(Eg)} \lambda \cdot E(\lambda) \cdot Q_{\text{ext}}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

где q – заряд электрона, c – скорость света, h – постоянная Планка

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) – это функциональная зависимость между величиной напряжения и значением фотогенерированного тока ФЭП. Формула плотности тока (j_ϕ) через освещенный p - n переход имеет следующий вид:

$$J(U) = J_\phi - J_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

где J_0 – плотность темнового тока, A – диодный параметр характеризующий механизм протекания тока ($A=1$ – инжекционный, $A=2$ – рекомбинационный, $A>2$ – туннельный механизмы).

В режиме короткого замыкания $U=0$ и $J=J_{кз}$. При $J=0$ можно определить напряжение холостого хода $U_{хх}$:

$$U_{хх} = \frac{AkT}{q} \ln \frac{J_{\phi} + J_0}{J_0} \quad (5)$$

На рис. 1.2. приведен общий вид ВАХ СЭ, максимальная мощность (P_{max}) достигается при оптимальных значениях тока ($J_{опт}$) и напряжения ($U_{опт}$).

$$P_{max} = J_{опт} U_{опт} \quad (6)$$

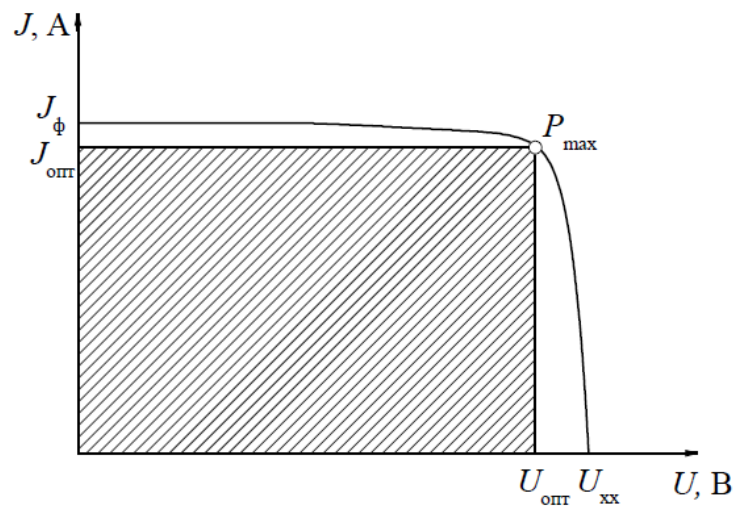


Рис. 1.2. Воль-амперная характеристика ФЭП.

Определив значения $J_{опт}$ и $U_{опт}$ можно рассчитать фактор (FF) заполнения ВАХ:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{кз} U_{хх}} = \frac{J_{опт} U_{опт}}{I_{кз} U_{хх}} \quad (7)$$

КПД ФЭП может выражен через отношение максимальной мощности ФЭП (P_{max}) к мощности поступающего на ФЭП излучения:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{пад}} \cdot 100\% \quad (8)$$

На основании данных регистрации спектральных и вольт-амперных характеристик ФЭП и определенных оптических и фотоэлектрических

параметров оценивается качество выращенной гетероструктуры, диэлектрических антиотражающих и защитных покрытий, омических контактов, определяется вклад меза-структуры в общие потери генерируемой прибором мощности (см. главы 3, 4, 6).

1.2. Светоизлучающие диоды

Принцип действия светоизлучающих диодов (СИД) основан на явлении электролюминесценции, открытом в начале XX в., заключающемся в излучении фотонов твердым телом под действием электрического тока.

Первые СИД были изготовлены на основе карбида кремния SiC в 1907 г. Г.Ж. Раунд, на основе кристаллов ZnS в 1936 г. Ж. Дестрио [29]. К концу 60-х гг. была разработана и усовершенствована технология изготовления СИД на основе SiC, КПД преобразования электроэнергии в оптическое излучение составлял всего 0.005% (*Potter et al., 1969*), а в 90-м гг. достигнуто значение КПД 0.03% в СИД с длиной волны излучения 470 нм (*Edmond et al., 1993*). Дальнейшие разработки технологии изготовления СИД велись на основе соединений AlGaAs.

В 60-х гг. разрабатывались технологии роста полупроводниковых структур с *p-n*-переходом на подложках GaAs методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и газофазной эпитаксии (ГФЭ), изготовлены ИК СИД с длиной волны излучения 870-980 нм. В 70-х гг. XX в. в ФТИ им. А. Ф. Иоффе под руководством Ж. И. Алферова велись активные разработки по изготовлению ИК СИД на основе гетероструктур AlGaAs [30]. Достигнуты значения внешней квантовой эффективности (*EQE*) ~ 40 % при токе 0.1-0.2 А [31].

Современные работы по ИК СИД, направленные на исследования оптических свойств структур [16,17], показали необходимость разработки более эффективных комбинированных отражателей, обеспечивающих снижение оптических потерь и увеличение внешней квантовой эффективности и оптической мощности приборов (см. главу 5, 6).

Принцип действия СИД

Принцип действия СИД заключается в образовании электронно-дырочных пар при протекании тока через p - n переход полупроводниковой структуры и генерации фотонов ($h\nu$) в результате их излучательной рекомбинации [29]. В прямозонном полупроводнике при рекомбинации электронно-дырочных пар вся энергия переходит в фотон $h\nu$. В непрямозонном полупроводнике минимум энергии в зоне проводимости не совпадает с максимумом энергии валентной зоны и в результате при рекомбинации часть энергии преобразуется в колебания ионов кристалла, идет на нагрев, что ведет к снижению КПД приборов.

Вероятность рекомбинации с излучением фотонов света пропорциональна концентрации электронно-дырочных пар, и, соответственно, увеличение количества генерированных фотонов может достигаться при увеличении концентрации основных носителей в p - и n -областях СИД. Увеличение концентрации основных носителей СИД может быть достигнуто при уменьшении толщины активной области, однако толщина активной области не может быть меньше диффузионной длины.

Альтернативным решением увеличения интенсивности излучения фотонов является формирование квантовых ям - потенциальных ям в энергетических зонах полупроводника, ширина которых сопоставима с длиной волны де Бройля и не превышает длину свободного пробега электрона. На рис. 1.3. приведена энергетическая диаграмма СИД, выполненного на основе двух полупроводниковых материалов с энергиями запрещенной зоны E_{g1} и E_{g2} , с потенциальной ямой (E_{g1}), рекомбинация в области потенциальной ямы происходит только с излучением фотона. Активная область светоизлучающего диода изготавливается из набора квантовых ям толщиной несколько нанометров, разделенных барьерными слоями, при этом суммарная толщина активной области может быть намного меньше толщины диффузионного слоя в обычном p - n переходе, а концентрация электронов намного выше [32]. Такой

гетеропереход может быть использован для реализации высокоэффективного СИД (см. главу 6).

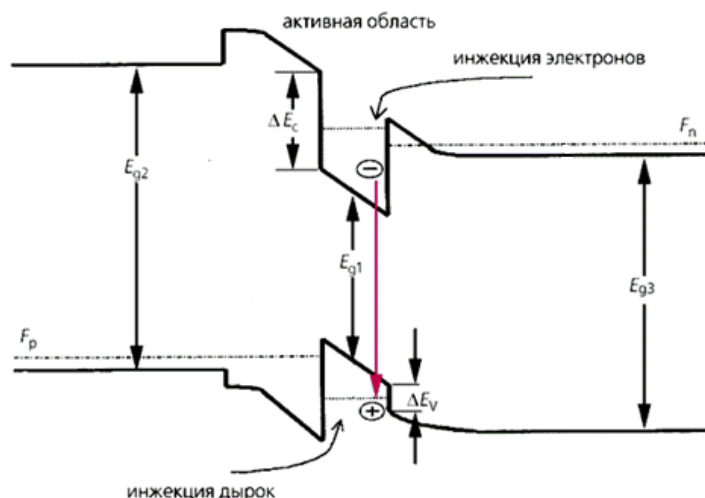


Рис. 1.3. Энергетическая диаграмма p - n перехода с потенциальной ямой.

Основные параметры СИД

Внутренняя квантовая эффективность (IQE – internal quantum efficiency) - характеризует излучательную способность полупроводникового материала и показывает долю носителей заряда, которые рекомбинируют с излучением фотонов:

$$IQE = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{н}} + r_{\text{б}}} = \frac{\tau_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}} + \tau_{\text{б}}} \quad (9)$$

где $r_{\text{и}}$ – темп излучательной рекомбинации, $r_{\text{б}}$ – темп безызлучательной рекомбинации, $\tau_{\text{и}}$ – время жизни избыточных носителей заряда, участвующих в излучательной рекомбинации, $\tau_{\text{б}}$ – время жизни избыточных носителей заряда, участвующих в безызлучательной рекомбинации.

Достижение внутренней квантовой эффективности близкой к 100% возможно при условии $\tau_n \ll \tau_b$, которое обеспечивается при введении в полупроводниковый материал специальных излучательных центров, путем уменьшения концентраций структурных дефектов и примесей, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации.

Внешняя квантовая эффективность СИД (EQE– external quantum efficiency) – это интегральный показатель излучательной способности СИД, характеризующий долю излучения, выводимого из кристалла с учетом потерь на самопоглощение, потерь на полное внутреннее отражение, потерь на обратное и торцевое излучение. Внешняя квантовая эффективность определяется отношением числа фотонов, испущенных СИД к числу инжектированных электронов в единицу времени:

$$EQE = \frac{P/(h\nu)}{I/e} \quad (10)$$

Спектр люминесценции – зависимость количества излучаемых фотонов от длины волны. Спектральная плотность потока фотонов (Φ_ν) (числа фотонов, приходящихся на единичный интервал энергий), излучаемых при межзонной рекомбинации, от энергии фотона имеет следующий вид:

$$\Phi_\nu(h\nu) \sim h\nu (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (11)$$

Данное выражение принимает значения больше нуля только при выполнении условия $h\nu > E_g$, однако уменьшение плотности потока фотонов происходит более плавно при падении энергии из-за размытия краев разрешенных зон при наличии мелких примесных уровней.

Вольт-амперная характеристика - зависимость значения электрического тока, протекающего через СИД, от величины приложенного напряжения.

Экспериментальные данные для СИД позволяют оценивать качество гетероструктуры, диэлектрических покрытий, разделительной меза-структуры, омических контактов, определять эффективность технологических и инженерных решений по выводу излучения из кристалла, инициировать решения по оптимизации ростовых и постростовых процессов (см. главу 6).

1.3. Методы формирования структуры: диффузия из газовой фазы, жидкофазная, молекулярно-пучковая и газофазная эпитаксии

Основными методами формирования структур являются диффузия из газовой фазы и эпитаксия. Диффузия из газовой фазы заключается в сублимации

примесного элемента, его последующей адсорбции на поверхности структуры и диффузии вглубь полупроводника для создания p - n перехода. Методом диффузии цинка сформированы структуры ФЭП ЛИ на основе GaSb, исследуемые в данной работе (см. главу 4). Основным преимуществом диффузионного метода формирования p - n перехода является возможность проведения локальной диффузии через маску диэлектрического слоя, что ведет к снижению скорости поверхностной рекомбинации на периферии кристалла при формировании меза-структуры.

Эпитаксия заключается в ориентированном наращивании монокристаллического материала на поверхности затравочного кристалла (подложки). При этом новая фаза наращиваемого слоя закономерно продолжает кристаллическую решетку подложки, обеспечивая когерентное срастание решетки нового слоя и решетки подложки по плоскостям и направлениям со сходной плотностью атомной упаковки [33, 34]. При различии химического состава наращиваемого слоя и подложки процесс роста называется гетероэпитаксией. Наиболее распространёнными являются три метода эпитаксиального наращивания: жидкофазная эпитаксия, газофазная эпитаксия и молекулярно-лучевая эпитаксия.

Метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) основан на кристаллизации монокристаллических слоев полупроводниковых материалов из растворов-расплавов полупроводника в легкоплавком металле-растворителе [35-37]. Метод ЖФЭ включает несколько стадий: создание раствор-расплава насыщенного полупроводниковым материалом, погружение подложки из того же полупроводникового материала в раствор-расплав и охлаждение. В результате пересыщения раствора-расплава полупроводниковым материалом на подложке происходит кристаллизация эпитаксиального слоя. В качестве растворителя используют легкоплавкий компонент наращиваемого соединения, что снижает температуру кристаллизации, повышает чистоту наращиваемого слоя и уменьшает концентрацию вакансий. Метод является простым, не требует использования дорогостоящего оборудования, и применяется в основном для

выращивания структур с толщиной слоев более 100 нм. Снижение скорости кристаллизации до 0.1-1.0 нм/с возможно при использовании низкотемпературной модификация метода ЖФЭ, что обеспечивает необходимые условия для создания структур с высоким совершенством кристаллической структуры. К недостаткам данного метода следует отнести сложность создания структур большой площади с высокой равномерностью кристаллизации слоев по пластине.

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) основан на взаимодействии нескольких молекулярных пучков различной плотности и химического состава с нагретой монокристаллической подложкой и осаждении на ней элементарных компонентов [38]. Недостатками метода МЛЭ являются сложность выращивания слоев большой толщины, высокая стоимость установки, высокие требования к чистоте молекулярных пучков, к чистоте поверхности источника. Преимуществами являются возможность поддержания постоянной скорости испарения, большой запас рабочего вещества, нагрев испаряемого вещества в широком интервале температур 400–800°С. Снижение температуры технологического процесса ведет к уменьшению диффузии примесей из подложки. Проведение процесса в высоком вакууме приводит к снижению вероятности столкновения частиц, что увеличивает точность в управлении процессом путем изменения параметров источника и создает оптимальные возможности выращивания однородных ультратонких слоев с резкими гетерограницами, получение заданных профилей распределения примесей по толщине.

Гетероструктуры каскадных ФЭП СИ и ЛИ, а также СИД, исследуемые в данной работе (см. главу 3, 6) изготовлены методом газофазной эпитаксии (ГФЭ), основанном на осаждении из газовой фазы металлоорганических соединений (МОС) [39, 40]. Основными недостатками МОС ГФЭ являются использование токсичных газов, высокие требования к чистоте химических веществ, необходимость в дорогостоящем оборудовании. Основными преимуществами являются высокая воспроизводимость процесса, возможность

выращивания ультратонких слоев с однородным составом по поверхности подложки, формирование резких гетерограниц, что особенно важно при формировании квантоворазмерных структур: с одиночными и множественными квантовыми ямами, квантовыми нитями и квантовыми точками.

Технологический комплекс включает установку МОС ГФЭ, оборудование, обеспечивающее бесперебойную работу, подачу всех необходимых компонентов и экологическую безопасность эксплуатации технологического комплекса, использующего высоко токсичные вещества. В качестве химических веществ при проведении эпитаксии используются металлоорганические соединения атомов элементов третьей группы (А3), находящиеся в жидком или порошкообразном состоянии, и гидриды атомов элементов пятой группы (В5) в виде смеси с высокочистым водородом или в виде концентратов. В качестве газаносителя - высокочистый водород. Для легирования соединений А3В5 используются гидриды элементов IV группы (SiH_4 , SeH_4 , H_2S) в виде сильно разбавленных смесей с водородом, МОС соединения $\text{Zn}(\text{CH}_3)_2$, $\text{Te}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$. Снижение температуры эпитаксиального осаждения достигается за счет низкой температуры термической диссоциации алкилов элементов А3 по сравнению с хлоридным или хлоридно-гидридным методами ГФЭ. В системе МОС ГФЭ отсутствуют агрессивные газовые продукты, например HCl , что исключает травление подложки и позволяет снизить толщину переходных слоев в гетероструктурах, снижает степень загрязнения эпитаксиальных слоев наногетероструктуры.

Процесс эпитаксиального осаждения при МОС ГФЭ происходит в условиях, далеких от термодинамического равновесия, и характеризуется необратимостью протекающих химических реакций. В результате метод дает возможность осаждения стабильных и метастабильных составов, лежащих, например, в пределах областей несмешиваемости твердых растворов на равновесных диаграммах состояния соответствующих систем. Выбор условий эпитаксии: температура осаждения, давление в рабочем реакторе, отношение компонентов В5 и А3 в газовой фазе – оказывает влияние на основные

показатели процесса: скорость эпитаксиального роста, состав и химическую однородность эпитаксиальных слоев, резкость гетерограниц в структурах.

Температурная зависимость скорости роста эпитаксиальных слоев следующая: при низких температурах скорость осаждения ограничивается кинетикой поверхностных реакций, наблюдается экспоненциальный рост скорости, что сказывается на качестве слоев из-за снижения диффузионной подвижности адсорбированных атомов на поверхности подложки. При увеличении температуры скорость роста перестает ограничиваться кинетикой реакций на поверхности, а зависит от скорости поступления компонентов осаждаемого материала к поверхности кристаллизации. Большинство процессов МОС ГФЭ проводятся в режиме ограничения скоростью поступления компонентов, при котором легче всего контролировать скорость роста, и современные реакторы оптимизированы для эффективной работы в данном режиме.

Высокое качество выращиваемых полупроводниковых слоев, точность контроля их уровня легирования и толщины, состава твердых растворов, а также гибкость метода, обеспечивающая возможность выращивания в одном процессе как объемных слоев (например, областей p - n переходов), так и наноразмерных слоев (туннельных диодов, множественных квантовых ям) обуславливает выбор МОС ГФЭ для создания гетероструктур исследуемых приборов ФЭП СИ и ЛИ, ИК СИД. Рост всех гетероструктур выполнен на установке МОС ГФЭ пониженного давления с горизонтальным реактором AIX-200/4 (AIXTRON, Германия).

1.4. Основные методы постростовой обработки структур: фотолитография, осаждение металлических и диэлектрических покрытий, травление

Постростовая обработка полупроводниковых структур состоит из комплекса технологических операций, включающего фотолитографию с формированием масок фоторезистов согласно заданной топологии приборов,

напыление слоев металлических контактов и диэлектрических покрытий, обработку поверхности методами реактивного ионно-плазменного, ионно-лучевого, химического и электрохимического травления [41, 42]. Разработка и оптимизация отдельных технологических этапов, и построение единого технологического маршрута обеспечивает высокое качество и надежность постростовой технологии, способствует улучшению фотоэлектрических характеристик приборов (см. главы 3-6).

Основные принципы контактной фотолитографии

Задание топологии оптоэлектронных приборов осуществляется при использовании контактной литографии, обеспечивающей воспроизведение заданного взаимного расположения и конфигурации элементов изготавливаемого прибора [43, 44].

Контактная литография заключается в фотопечати микрорисунка с фотошаблона на поверхности подложки, покрытой светочувствительным слоем фоторезиста. Предельное расстояние между двумя ближайшими разрешаемыми точками рисунка a_{min} определяются дифракционным пределом соответственно критерию Рэлея:

$$a_{min}=k\lambda/NA \quad (12)$$

где k – параметр, зависящий от условий процесса, λ – длина волны актиничного излучения, NA – числовая апертура объектива. Увеличение разрешающей способности литографии осуществляется путем уменьшения длины волны излучения до ультрафиолетового диапазона, дальнейшее уменьшение длины волны наталкивается на проблемы выхода в вакуумноультрафиолетовый диапазон, в котором отсутствуют прозрачные материалы, эффективные источники излучения, возникает необходимость вакуумировать оптический путь. Как правило, для создания оптоэлектронных приборов с критическим размером элемента более 1 мкм используют фотолитографию с длиной волны излучения 320 – 440 нм.

Органические фоторезисты, широко используемые в фотолитографии, представляют собой плёнообразующие полимеры, фотосенсибилизированные низкомолекулярными добавками. Полимерный компонент отвечает за плёнообразование, адгезию, стойкость к травлению, плазмостойкость и термостойкость. Изображение в фоторезисте формируется в результате локального изменения физико-химических свойств материала под действием актиничного излучения.

Существуют позитивные и негативные фоторезисты. Для позитивных резистов характерно увеличение растворимости засвеченных участков в жидких проявителях (слабых щелочных растворах). Для негативных резистов наблюдается обратная зависимость. Диазонафтохиноновые резисты (ДХН-резисты) являются наиболее распространёнными позитивными фоторезистами во всех областях микролитографии. К их главным достоинствам относятся широкий спектральный диапазон чувствительности, отличная стойкость к химическому и реактивному ионному травлению, проявление в водных растворах и достаточная термостабильность, что обуславливает выбор данных типов фоторезистов при проведении фотолитографии на исследуемых гетероструктурах (см. главу 3). ДХН-резисты состоят из новолачной смолы, смешанной с небольшим количеством диазонафтохиноновой фотоактивной добавки. При модификации фоторезиста под действием актиничного излучения с образованием новых молекул с пониженной химической стойкостью (фотолизе) и проявлении водным раствором щёлочи экспонированные участки анизотропно растворяются, а неэкспонированные практически не растворяются.

К структурам, подлежащим фотолитографической обработке, предъявляют требования, определяющие механическое и физико-химическое состояние их поверхности. Подготовка поверхности осуществляется путем химической обработки в органических растворителях, в гексаметилсилазане, проводится нанесение адгезивных материалов, обеспечивающих увеличение смачиваемости поверхности, а также путем ионно-лучевого травления, обеспечивающего высокую чистоту и активацию поверхности.

Наиболее распространенным методом нанесения фоторезиста является центрифугирование. После нанесения проводится предэкспозиционная термообработка, заключающаяся в физическом удалении растворителя из плёнки без деградации компонентов резиста, и непосредственно экспонирование пленки фоторезиста через фотошаблон. Зарождение элементов рисунка в плёнке фоторезиста зависит от оптической плотности тёмных и светлых участков рисунка фотошаблона, от коэффициентов преломления стеклянной основы фотошаблона и коэффициента отражения металлизированного слоя, резкости и ровности края элемента рисунка на фотошаблоне. При экспонировании можно наблюдать следующие оптические явления: дифракция света на границе фотошаблон – фоторезист, рассеяние света в плёнке фоторезиста и отражение света от подложки и плёнки фотошаблона. Дифракционные эффекты при прохождении света через фотошаблон к плёнке фоторезиста при экспонировании возникают из-за зазора между фотошаблоном и подложкой, влияние эффекта дифракции компенсируется нанесением в момент экспонирования на поверхность подложки жидких веществ (не взаимодействующих с фоторезистом), у которых такая же проницаемость, что и у материала фотошаблона (например, декан). Другим важным оптическим эффектом при экспонировании является возникновение в плёнке фоторезиста эффекта стоячей волны. Луч света проходит сквозь плёнку фоторезиста, достигает подложки, отражается от неё и интерферирует с лучом, идущим от источника излучения. В результате образуется стоячая световая волна. Плёнка фоторезиста неоднородно засвечивается по толщине и при проявлении края рисунка имеют не вертикальные стенки, а волнообразные. Степень проявления стоячей волны зависит от типа резиста (в высококонтрастных фоторезистах стоячая волна более чётко выражена), от характеристик излучения (монохроматическое излучение обостряет этот эффект), от температурной обработки фоторезиста. Её можно уменьшить, используя немонахроматические источники излучения, постэкспозиционную термообработку, специальные поглощающие слои, наносимые на подложку.

Процесс проявления состоит в воспроизводимом и контролируемом удалении резиста с экспонированного (позитивный) или неэкспонированного (негативный) участка со скоростью, превышающей скорость удаления остального резиста. В качестве проявителя для новолачных резистов используют водные щелочные растворы (KOH, NaOH), водные растворы на основе тетраметиламмония гидроксида (ТМАН – Tetramethylammonium hydroxide) с различными добавками поверхностно-активных веществ. Для проявления негативных резистов обычно используют органические растворители.

После проявления проводится задубливание фоторезиста – термическая обработка, при которой в резисте происходят физические и химические реакции. Задубливание позволяет восстановить адгезию, ослабленную проникновением проявителя между резистом и подложкой. Ограничения на условия задубливания определяются на практике наличием дополнительных искажений изображения, обусловленных плавлением или химической деструкцией резиста. В особых случаях позитивные изображения оплавляются намеренно: либо при формировании изображений с оплывшими краями для ионно-лучевого травления через окна резистивной маски, либо для улучшения планаризации ступенек. Условия задубливания подбираются, исходя из ряда факторов: толщины плёнки резиста, типа резиста и проявителя, типа травителя и условий травления, формы профиля изображения и размера элемента, требования последующих этапов обработки (термостойкость, летучесть), термореактивности резиста.

Осаждение металлических и диэлектрических покрытий

Основные методы осаждения металлических и диэлектрических покрытий в технологии изготовления оптоэлектронных приборов, следующие: вакуумное термическое испарение, магнетронное и электронно-лучевое распыление, плазмохимическое осаждение, электрохимическое осаждение.

Вакуумное термическое испарение заключается в нагреве распыляемого вещества в высоком вакууме ($10^{-3} \div 10^{-4}$ Па) до температуры, при которой

давление собственных паров вещества на несколько порядков превышает давление остаточных газов. Распыляемое вещество помещают в испаритель, расположенный в рабочей камере, откачиваемой до высокого вакуума. В результате нагрева испарителя молекулы испаренного вещества свободно распространяются, достигая поверхности подложки. Обеспечение высокой чистоты поверхности подложки осуществляется путем ее нагрева, что способствует десорбции загрязнений с ее поверхности перед напылением, а в процессе осаждения создает условия для улучшения структуры растущей пленки. На первом этапе осаждения вещества на подложке происходит адсорбция первых атомов (молекул) вещества подложкой до момента образования сплошного покрытия, на основном этапе происходит рост пленки до заданной толщины. Условия, в которых протекает начальный этап, имеют определяющее значение для структуры полученной пленки, прочности ее сцепления с подложкой. Методом вакуумного термического испарения проводилось осаждение металлических покрытий: Au(Ge), Ag(Mn), Ge, Cr, Au, Pd (см. главу 3)

Магнетронное распыление основано на использовании специальной магнитной системы, которая над распыляемой мишенью создает тороидальное магнитное поле. Благодаря этому полю создаются условия получения локализованной плазмы высокой плотности и, соответственно, высокой производительности распыления материалов. Заданный состав пленок обеспечивается правильно подобранным соотношением компонентов и режимами распыления исходной диэлектрической или металлической сплавной мишени [45, 46].

По сравнению с существующими методами нанесения покрытий технология скоростного ионно-плазменного магнетронного распыления имеет следующие преимущества, обуславливающие использование данного метода при изготовлении исследуемых приборов:

- напыление материалов любого типа: проводники, полупроводники,

керамика и др.;

- широкий интервал скоростей напыления: 0.1-100 мкм/час и выше;
- высокое качество и однородность покрытий, в том числе, многокомпонентных и многослойных, как по составу, так и по слоям;
- отсутствие перегрева подложки;
- малая степень загрязнения плёнок;
- высокая точность конструирования состава наносимых покрытий.

Методом магнетронного распыления проводилось осаждение металлических покрытий: Ni, NiCr, Ag, Pd и диэлектрических слоев: SiO₂, TiO_x (при x близком к 2) (см. главу 3).

Электронно-лучевое распыление

Электронно-лучевое воздействие заключается в том, что кинетическая энергия электронного пучка превращается в зоне обработки распыляемого вещества в тепловую энергию. Диапазоны мощности и концентрации энергии в луче велики, что обеспечивает возможность оказывать термическое воздействие на распыляемое вещество для его нагрева до заданных температур плавления и испарения с высокими скоростями. Широкий диапазон термического воздействия обеспечивается путем концентрации тепловой энергии, что ведет к возможности распыления широкого спектра материалов [47]. Формирование электронного луча осуществляется электронной пушкой, включающей в состав вольфрамовый термокатод и фокусирующую систему. Эмитируемые электроны ускоряются за счет разности потенциалов до 10 кВ между катодом и анодом и формируются в электронный луч. Магнитное поле, перпендикулярное движению выходящих из фокусирующей системы пушки электронов, направляет электронный луч на распыляемое вещество. Поток испарившегося материала осаждается в виде тонкой пленки на подложке, располагаемой над испарителем. Процесс электронно-лучевого распыления проводится в высоком вакууме (10^{-4} Па), обеспечиваемым диффузионным и форвакуумным насосами.

Плазмо-активированный пиролиз осуществляется при пониженном давлении с использованием ВЧ – плазмы: реактивные газы (моносилан, аммиак, гелий) через фильеры подаются в верхнюю часть рабочей камеры, где они разлагаются под влиянием разряда, возбуждаемого резонатором с частотой 13.56 МГц, мощность разряда – 50 Вт. Рабочая камера предварительно откачивается до давления порядка 10^{-5} Па. Плазма осуществляет следующие функции: плазменное стимулирование реакции снижает температуру осаждения пленок; ускоряет диссоциацию молекул рабочих газов; генерирует радикалы – наиболее активные химические частицы; интенсифицирует диффузию частиц к подложке и миграцию их по поверхности подложки; способствует реиспарению адсорбированных частиц, что повышает скорость образования зародышей, островков и в целом пленок. Метод плазмо-активированного пиролиза силана в атмосфере азота позволяет формировать сплошное диэлектрическое покрытие Si_3N_4 на боковой поверхности меза-структуры, что обеспечивает надежную пассивацию и изоляцию периферийной области приборов (см. раздел 3.4).

Электрохимическое осаждение заключается в формировании слоя материала на токопроводящей поверхности подложки, и происходит при пропускании тока через электролит, содержащий химические элементы осаждаемого материала. В ванну с электролитом помещаются два электрода: катод (подложка) и анод, при этом на катод подается отрицательное по полярности напряжение. Электрохимическое осаждение материала обеспечивается пропусканием тока по цепи анод-электролит-катод. Электролит является проводником, в котором электрический заряд переносится ионами. При протекании электрического тока через электролит положительно заряженные ионы (катионы), двигаются к катоду, а отрицательно заряженные (анионы) к аноду. При контакте катионов с катодом, положительный заряд катионов нейтрализуется электронами, поступающими к катоду по внешней цепи, что ведет к осаждению металла на катоде. Анод может быть изготовлен из инертного материала, который не расходуется в процессе осаждения и обеспечивает

замыкание электрической цепи. Либо используется анод из осаждаемого материала, который растворяется в процессе осаждения и способствует поддержанию концентрации электролита на рабочем уровне.

В данной работе электрохимическое осаждение металлов используется для увеличения толщины контактных шин и, соответственно, их электрической проводимости (см. раздел 3.2).

Методы травления структур

Формирование рельефа в полупроводниковых структурах при формировании мезы травления, локальном удалении слоев структуры и т.д. осуществляется с использованием химического, электрохимического, реактивного ионно-плазменного и ионно-лучевого травления.

Химическое и электрохимическое травление являются распространёнными методами за счет простоты и высокой доступности при весьма широком ассортименте химических реактивов, обеспечивающих возможность травления большого спектра материалов. Жидкостное травление не ведет к структурным искажениям и деформации слоев, позволяет проводить селективное травление отдельных слоев структур, выявлять грани кристаллов, осуществлять полирование и формировать мезы в структурах сложного состава [43, 44].

Реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ) проводится в специальных газоразрядных камерах, в которых подложка подвергается воздействию плазмы, возбужденной высокочастотным электрическим полем. Радикалы и нейтральные частицы плазмы участвуют в химических реакциях на поверхности, образуя летучие продукты, а положительные ионы плазмы под действием электрического поля бомбардируют поверхность и выбивают атомы с незащищенной маской участков подложки. РИПТ обладает меньшей, по сравнению с химическим травлением, селективностью, что актуально при локальном травлении слоев структуры, но ведет к образованию нарушенного

дефектного слоя, который требует удаления. Преимуществом РИПТ является высокая однородность и воспроизводимость процесса [48].

Ионно-лучевое травление (ИЛТ) основывается на удалении поверхностного слоя материала при использовании кинетической энергии бомбардирующих поверхность ионов инертных газов. Скорость распыления при этом обычно невысока (0.1 – 1 нм/с) и зависит от массы ионов газа (обычно используют Ar), энергии ионов, рода распыляемого материала, давления газа в газоразрядной камере и других технологических параметров. Ионно-лучевое травление используется для очистки и активации поверхности перед процессами напыления контактных или диэлектрических материалов, обеспечивая увеличение адгезии и качества наносимых слоев, а также при травлении химически стойких материалов [49, 50].

Данные методы травления используются для локального селективного травления отдельных слоев гетероструктуры, формирования меза-структуры, подготовки поверхности перед осаждением различных покрытий (см. главы 3-6).

Выводы к главе 1

Несмотря на широкий спектр доступных ростовых и постростовых процессов, используемых для создания устройств оптоэлектроники, для каждого типа разрабатываемого прибора требуется формирование индивидуального научно-обоснованного комплекса конструктивных и технологических решений, позволяющих сохранить уникальные свойства материалов и гетероструктур, предотвратить ухудшение свойств периферии приборов. В данной работе, в качестве объектов исследования выбраны методы и решения по постростовой обработке гетероструктур, направленные на модификацию оптических и резистивных свойств каскадных AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей и AlGaAs/GaAs светоизлучающих диодов с целью повышения эффективности и надёжности разрабатываемых приборов.

Глава 2. Структуры фотоэлектрических преобразователей и светоизлучающих диодов

2.1. GaInP/GaInAs/Ge гетероструктура фотоэлектрического преобразователя солнечного излучения

Наиболее распространенным решением для монокристаллических ФЭП СИ является использование набора согласованных по параметру решетки полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны для отдельных субэлементов. На рис. 2.1 приведены значения параметров E_g и параметров решеток для ряда соединений A3B5 и твердых растворов [51]. Оптимальными материалами для формирования псевдоморфных структур 3-х каскадных ФЭП являются GaInP, GaInAs, Ge. Ga_{0.52}In_{0.48}P, изопериодический с Ga_{0.99}In_{0.01}As, используется в качестве материала верхнего широкозонного субэлемента ($E_g = 1.88$ эВ), преобразующего коротковолновую часть солнечного спектра (до 650 нм). GaInAs ($E_g = 1.4$ эВ) субэлемент преобразует излучение в диапазоне длин волн 650-900 нм, узкозонный Ge элемент ($E_g = 0.66$ эВ) преобразует длинноволновую часть спектра (900-1800 нм).

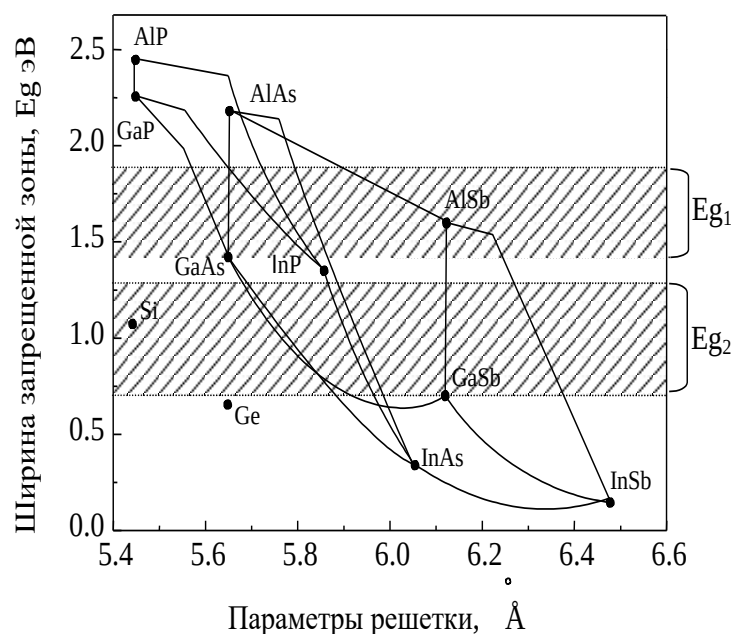


Рис. 2.1. Зависимость ширины запрещенной зоны соединений A3B5 и твердых растворов на их основе от параметра решетки этих материалов.

Схематическое изображение ФЭП СИ на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge, выращенной методом МОС ГФЭ на германиевой подложке p -типа проводимости, представлено на рис. 2.2. Субэлементы ФЭП соединены коммутирующими высоколегированными ($n, p = 10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$) туннельными диодами для "развязки" встречно включенных нефотоактивных p - n -переходов, образующихся при последовательном соединении фотоактивных p - n -переходов. Монолитный GaInP/GaInAs/Ge СЭ будет иметь наибольшую эффективность при равенстве фотогенерированных токов в субэлементах верхнего широкозонного A3B5 тандема. Равенство токов для конкретного распределения энергии в солнечном спектре достигается путем оптимизации толщин слоев и уровня уровней легирования областей базы и эмиттера каждого субэлемента.

В структуре верхнего GaInP субэлемента слой p -AlInP играет роль тыльного потенциального барьера, который улучшает собирание неосновных носителей заряда, не позволяя электронам, рожденным в глубине области базы диффундировать в сторону подложки. Для предотвращения потерь, связанных с поверхностной рекомбинацией фотогенерированных носителей, выращивается "широкозонное" n -AlInP окно. Формирование верхнего субэлемента GaInP завершается высоколегированным контактным слоем n^+ -GaAs, необходимым для снижения удельного переходного контактного сопротивления фронтального омического контакта [52-55, A2, A3].

Проведены исследования постростовой обработки гетероструктур по формированию омических контактов, антиотражающего покрытия (АОП) и травлению меза-структуры, обеспечивающих снижение омических, оптических и рекомбинационных потерь GaInP/GaInAs/Ge ФЭП.

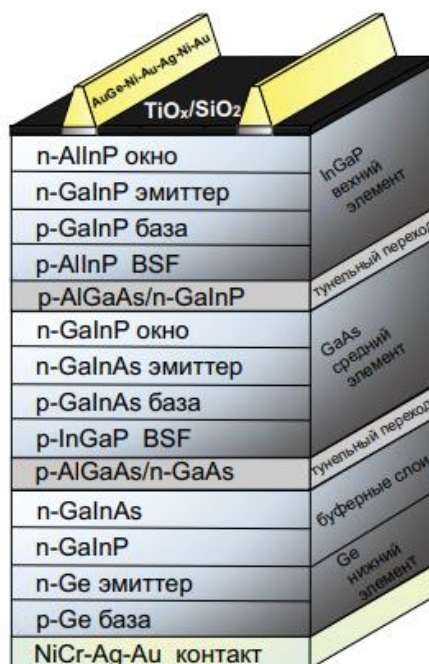


Рис. 2.2. Схематическое изображение ФЭП СИ на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge.

2.2. Влияние глубины залегания *p-n* перехода на характеристики GaSb фотоэлектрических преобразователей

Формирование структуры ФЭП ЛИ на основе GaSb осуществляется с использованием различных методов: технологии жидкофазной эпитаксии, газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и путем диффузии цинка из газовой фазы в подложку *n*-GaSb. В зависимости от области применения изготавливаются ФЭП ЛИ с разной площадью фоточувствительной области. В системах передачи лазерной энергии на большие расстояния применяются ФЭП большой площади (более 1 см²), что обеспечивает эффективный перехват излучения с соответствующим снижением оптических потерь. При преобразовании ЛИ большой плотности мощности (более 100 Вт/см²) применяются ФЭП малой площади менее 1 мм², т.к. снижение размера ФЭП ведет к уменьшению омических потерь.

Высокое качество и однородность свойств на большой площади обеспечивается при формировании структур с использованием метода диффузии из газовой фазы. Преимуществами технологически простого метода диффузии

является возможность формирования градиентного поля в структуре для носителей заряда, повышение уровня легирования приповерхностных областей до $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ для создания металлических контактов с низким удельным контактным сопротивлением, что особенно важно при изготовлении мощных ФЭП. Одновременно обеспечивается низкая скорость поверхностной рекомбинации, что позволяет формировать фотоактивную область GaSb ФЭП без широкозонного оптического окна [13].

Формирование исследуемой структуры ФЭП проводилось методом диффузии Zn в подложку *n*-GaSb на установке жидкофазной эпитаксии при одинаковой температуре диффузанта и подложки порядка 450 °C (см. раздел 1.3). При проведении диффузии использовалась кассета из графита, обладающего высокой термической прочностью, отсутствием открытой пористости, химической стойкостью к широкому ряду расплавленных материалов.

Глубина залегания *p-n* перехода оказывает влияние на значение фототока, радиационную стойкость и сопротивление растекания ФЭП. Увеличение сопротивления растекания и последовательного сопротивления прибора ведет к снижению фактора заполнения вольтамперной характеристики. При глубине залегания *p-n* перехода менее 0.2 мкм величина внешнего квантового выхода фотоответа максимальна (см. рис. 2.3), но при этом увеличивается вероятность диффузии материала фронтального омического контакта в область *p-n* перехода, что существенно снижает выход годных приборов. Увеличение глубины залегания *p-n*-перехода ведет к снижению слоевого сопротивления структуры и к увеличению фактора заполнения ВАХ, но имеет место снижение эффективности собирания неосновных носителей заряда, генерированных вблизи поверхности. При глубине залегания *p-n* перехода более 0.5 мкм внешний квантовый выход фотоответа снижается до величины менее 0.8.

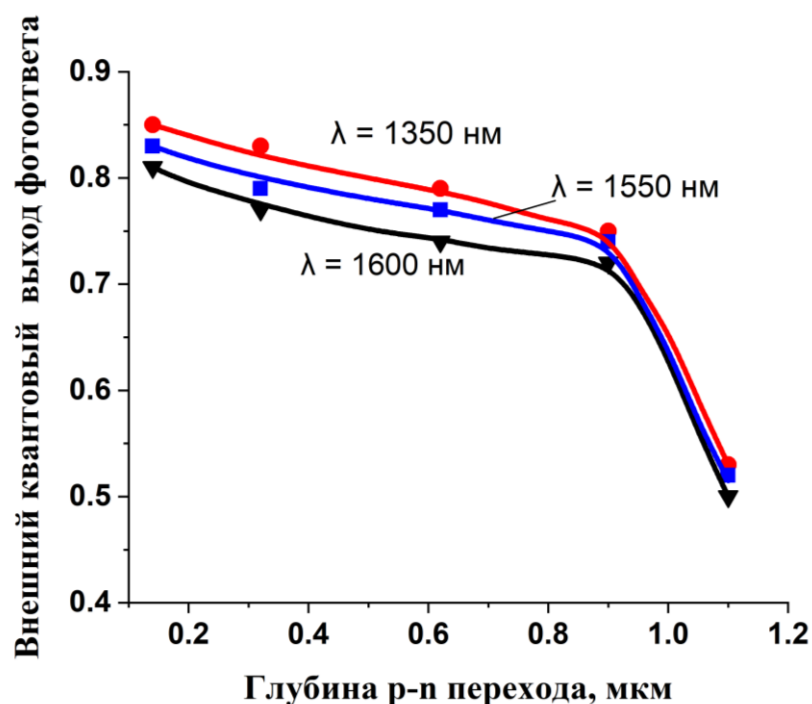


Рис. 2.3. Спектральные характеристики внешнего квантового выхода фотоответа ФЭП на основе GaSb в зависимости от глубины залегания p - n перехода для ЛИ с длиной волны 1350, 1550, 1600 нм.

Формирование p - n перехода в GaSb может проводиться путем одностадийной или двухстадийной диффузии цинка из газовой фазы. Одностадийная диффузия является более простым и экономичным вариантом, однако из-за большой вероятности шунтирования p - n перехода не может быть выполнена глубиной менее 0.5 мкм, что ведет к снижению внешнего квантового выхода фотоответа приборов.

При двухстадийной диффузии p - n переход в GaSb формируется на малой глубине от поверхности (< 0.2 мкм), обеспечивая максимальный внешний квантовый выход фотоответа на длине волны 1300-1700 нм [А4]. Заглубление p - n перехода под область омического контакта при дополнительной диффузии ведет к снижению омических потерь, к уменьшению токов утечки за счет снижения вероятности шунтирования p - n перехода, что в свою очередь увеличивает надежность работы ФЭП при малой толщине фронтального слоя p -GaSb.

Для GaSb ФЭП на основе структуры с диффузионным p - n переходом предложены различные варианты (топологии) контактов, выполнены исследования по формированию контактов и антиотражающего покрытия, обеспечивающих снижение омических и оптических потерь при преобразовании ЛИ большой плотности мощности (см. главу 4).

2.3. AlGaAs/GaAs гетероструктуры фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения (800-860 нм) и инфракрасных (850-940 нм) светоизлучающих диодов.

Увеличение эффективности преобразования лазерного излучения ФЭП и эффективности вывода излучения из кристалла ИК СИД возможно в гетероструктурах на основе AlGaAs/GaAs с тыльным отражателем [7, 11]. Для ФЭП формирование отражателя между слоями активной области гетероструктуры и поглощающей подложкой обеспечивает отражение длинноволнового излучения, прошедшего через активную область без поглощения, от отражателя обратно в сторону активной области и возможность его повторного поглощения. Для ИК СИД формирование отражателя обеспечивает возможность многократного повторного отражения генерированного излучения в сторону световыводящей поверхности, что ведет к существенному увеличению эффективности СИД (см. главу 6). Проведены исследования и разработки многослойных комбинированных отражателей (см. главу 5), рассмотрены принципы их встраивания в конструкцию приборов путем переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель (см. раздел 2.4).

Проведены исследования и разработки по снижению омических и оптических потерь при изготовлении мощных оптоэлектронных приборов на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs, выращенных методом МОС ГФЭ:

- ФЭП, обладающих спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн 800-860 нм;
- ИК СИД, генерирующих излучение на длинах волн 850 нм и 930 нм.

Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения

Проведены исследования ФЭП ЛИ (800-860 нм) на основе двух типов AlGaAs/GaAs гетероструктур, выращенных методом МОС ГФЭ: "прямых" и "обратных" (рост слоев производится в обратной, относительно "прямой" структуры, последовательности) с многослойным комбинированным отражателем [A1].

Гетероструктура прямого роста ФЭП ЛИ включает фотоактивный p - n -переход в GaAs, ограниченный со стороны базы слоем AlGaAs. Осаждение такого твердого раствора с шириной запрещенной зоны $E_g = 1.8$ эВ создает тыльный потенциальный барьер для носителей заряда, образованных при поглощении фотонов вдали от p - n -перехода, и повышает эффективность их собирания в базе. В качестве подложки использовались пластины n -GaAs. Со стороны эмиттера выращивался слой $Al_{0.17}Ga_{0.83}As$, обеспечивающий снижение сопротивления растекания носителей заряда, и функциональный широкозонный слой $Al_{0.35}Ga_{0.65}As$ (рис. 2.4, *a*). Твердый раствор создает барьер для генерированных в узкозонной области дырок, снижая таким образом скорость поверхностной рекомбинации, а также способствует растеканию носителей заряда. Рост гетероструктуры завершается кристаллизацией высоколегированного контактного слоя p^+ -GaAs, обеспечивающего снижение резистивных потерь при формировании фронтального омического контакта (см. раздел 3.2).

Гетероструктура инвертированного роста ("обратная") ФЭП ЛИ формировалась на подложке n -GaAs начиная с "жертвенного" слоя $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$, необходимого для последующего селективного травливания ростовой подложки при переносе гетероструктуры на подложку-носитель. Далее формировался контактный слой n^+ -GaAs, открываемый при травливании ростовой подложки и необходимый для формирования фронтального омического контакта. Далее формирование слоев осуществлялось аналогично гетероструктуре прямого роста (рис. 2.4, *b*).

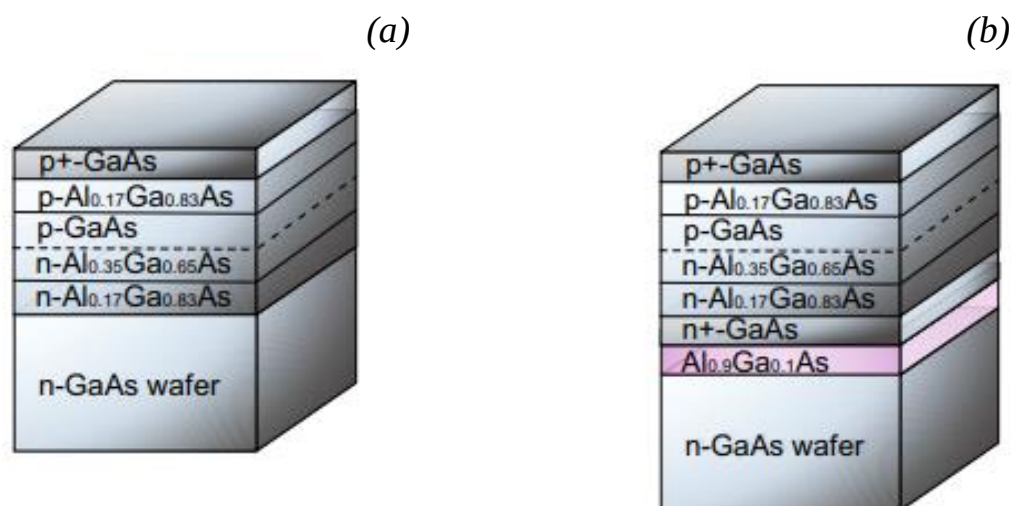


Рис. 2.4. Схематическое изображение гетероструктуры ФЭП ЛИ прямого (a) и инвертированного роста (b).

Инфракрасные светоизлучающие диоды

Исследованы различные типы гетероструктур ИК СИД на основе слоев AlGaAs/GaAs с множественными квантовыми ямами [56, 57], выращенные методом МОС ГФЭ на подложках n-GaAs, с отражателями, встроенными между активной областью и подложкой GaAs и обеспечивающими снижение поглощения для распространяющегося в сторону подложки излучения [A5]. Разработаны конструкции комбинированных отражателей, включающих брэгговский отражатель (БО) [58], Al_{0.9}Ga_{0.1}As дополнительный отражающий слой, слой диэлектрика и металлический отражатель на основе зеркального слоя серебра [11, A6]. Вывод излучения из кристалла осуществляется при отражении света от комбинированного отражателя в сторону светоизлучающей поверхности (см. главы 5, 6).

Активная область гетероструктур (850 нм) состоит из 6 пар слоев InGaAs квантовых ям, толщиной 3 нм каждая, разделенных Al_{0.2}Ga_{0.8}As слоями толщиной 30 нм каждый. Активная область с обеих сторон заключена в обкладки n- и p-типа, формируемыми парами широкозонных слоев Al_{0.2}Ga_{0.8}As и Al_{0.4}Ga_{0.6}As.

Активная область гетероструктур (930 нм) состоит из 5 пар слоев InGaAs квантовых ям, толщиной 7 нм каждая, разделенных $\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAsP}_{0.06}$ слоями толщиной 23 нм каждый. Активная область с обеих сторон заключена в обкладки n - и p -типа, формируемыми парами широкозонных слоев $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

Гетероструктура прямого роста со структурными слоями отражателя между подложкой n -GaAs и активной областью включает: слой n - $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ и БО. Слой n - $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ обеспечивает отражение от гетерограницы "латеральных" лучей, распространяющихся от p - n перехода в сторону подложки под углами более предельного угла полного внутреннего отражения. Слои БО: 15 пар слоев n - $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/n$ - $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ – отражают лучи в телесном угле порядка ± 20 угловых градусов. Выращивание гетероструктуры завершается кристаллизацией сильнолегированного слоя p^+ - $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (толщиной 4-6 мкм), обеспечивающего растекание носителей заряда, и контактного слоя p^+ -GaAs.

Инвертированная гетероструктура СИД с комбинированным отражателем выращивается с обратной последовательностью слоев: сначала кристаллизуется слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ – "стоп"-слой для стравливания ростовой подложки n -GaAs при переносе гетероструктуры на подложку-носитель, затем контактный слой n -GaAs, слой n^+ - $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной 4-6 мкм, обеспечивающий растекание носителей заряда, слои активной области и обкладок, буферный слой p - $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и контактный слой p -GaAs. Также дополнительно может кристаллизоваться отражающий слой p - $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ и/или слои БО между активной областью и контактным слоем p -GaAs (рис. 2.5).

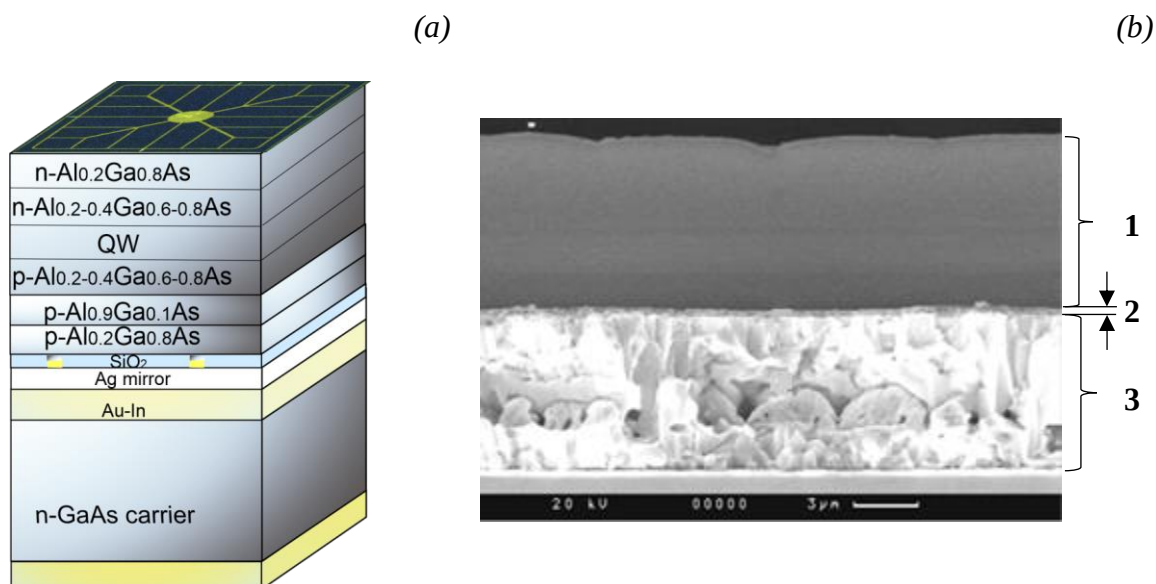


Рис. 2.5. Схематическое изображение (a) и вид скола, выполненный на сканирующем (растровом) электронном микроскопе (СЭМ), (b) гетероструктуры ИК СИД (1) с отражателем (2), изготовленного методом переноса гетероструктуры на подложку-носитель GaAs с соединением Au-In (3).

Исследование и разработка конструкций ФЭП ЛИ и ИК СИД на основе описанных гетероструктур изложены в главе 6.

2.4. Исследование методов переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель.

Изготовление оптоэлектронных приборов с многослойным комбинированным отражателем осуществляется путем переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель с последующим удалением ростовой подложки [A5]. Технология формирования приборов с многослойным комбинированным отражателем существенно более трудоемкая по сравнению со стандартной "прямой" технологией. Однако существенное увеличение эффективности работы приборов обосновывает проведение более сложных технологических маршрутов.

В качестве подложки-носителя используется подложка GaAs, которая обладает аналогичными с гетероструктурой AlGaAs/GaAs физико-химическими свойствами, что увеличивает надежность процесса изготовления приборов.

Гетероструктура AlGaAs/GaAs включает $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ жертвенный слой, обладающий высокой селективностью при жидкостном химическом удалении ростовой подложки GaAs.

Процесс переноса гетероструктуры на подложку-носитель с встраиванием отражателя выполняется в несколько этапов (рис. 2.6.):

- формирование точечных контактов к гетероструктуре;
- нанесение многослойного комбинированного отражателя;
- монтаж гетероструктуры на подложку-носитель GaAs;
- удаление ростовой подложки GaAs и жертвенного слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (контроль проводился методом рамановской спектроскопии см. раздел 2.5).

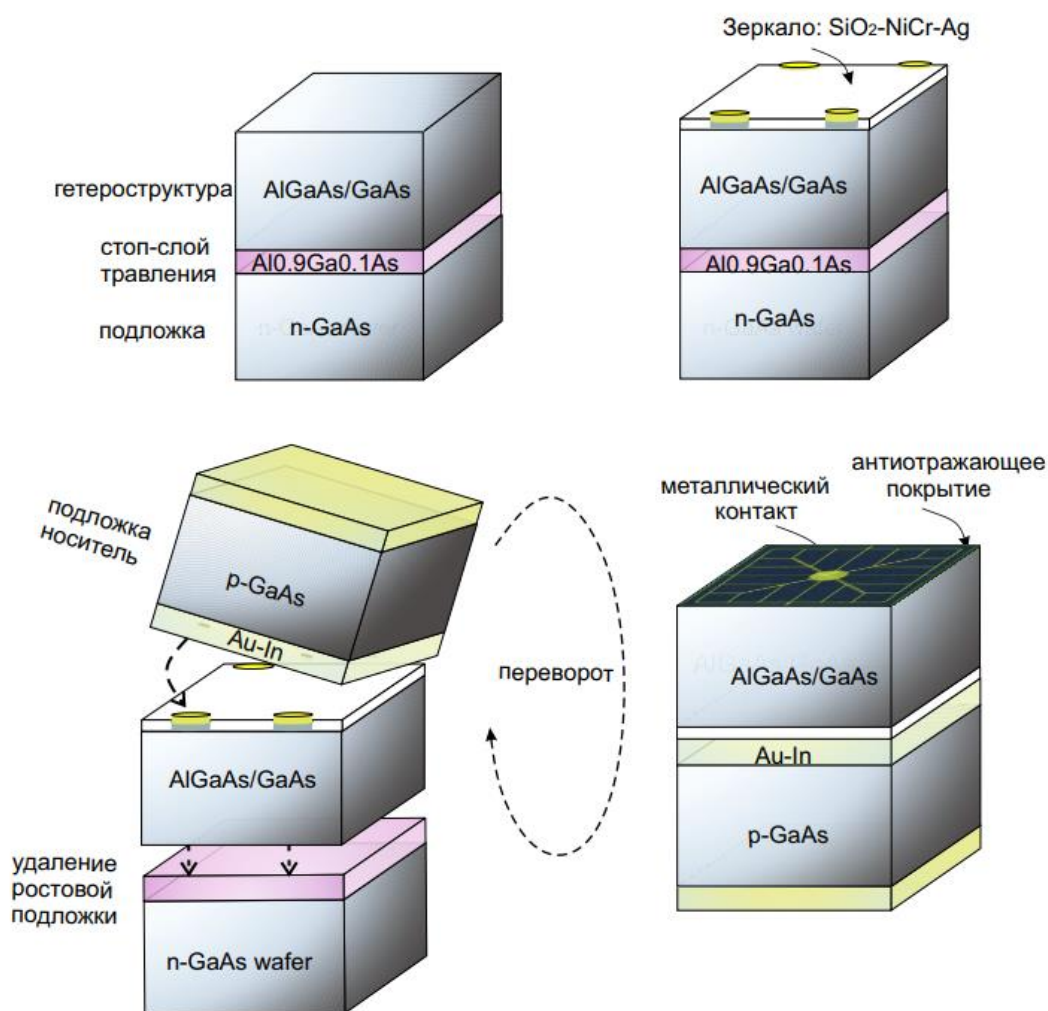


Рис. 2.6. Схематическое изображение технологии встраивания комбинированного отражателя путем переноса гетероструктуры на подложку-носитель.

Далее проводятся стандартные этапы постростовой обработки по формированию омических контактов, АОП и разделительной мезы, которые подробно будут описаны в главах 3, 6.

Монтаж гетероструктуры на подложку-носитель осуществляется с использованием соединения Au-In [59, 60]. На подложке-носителе создаются фронтальный и тыльный омические контакты: для подложки GaAs *n*-типа проводимости омический контакт формируется на основе слоев Au(Ge)/Ni/Au, а для GaAs *p*-типа проводимости – на основе слоев NiCr/Ag/Au. Для формирования монолитного соединения гетероструктуры и подложки-носителя проводится осаждение слоя золота толщиной 2-3 мкм на поверхность отражателя гетероструктуры и слоя индия на поверхность омических контактов подложки, толщиной 2-3 мкм. Данная система помещается в пресс и проводится термическая обработка в вакууме при температуре 170-200 °С в течении 30-60 мин. При нагреве системы «гетероструктура-Au-In-подложка-носитель» до температуры плавления индия происходит образование кристаллического интерметаллического соединения Au-In (рис. 2.7.).

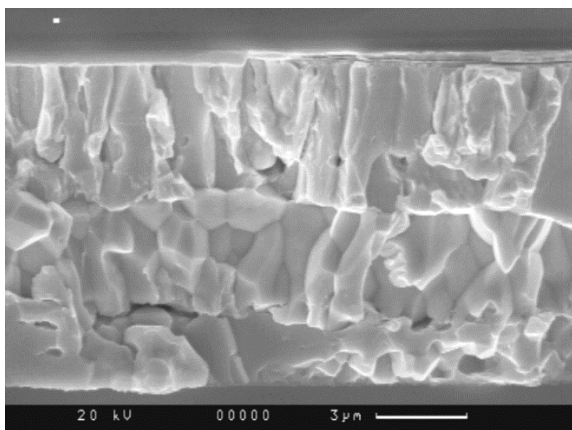


Рис. 2.7. Изображение СЭМ соединения Au-In после переноса гетероструктуры на подложку-носитель.

Альтернативным вариантом носителя к гетероструктуре могут быть толстые (80-100 мкм) металлические слои (Au, Ag или др.) электрохимически наращиваемые непосредственно на поверхности тыльного металлического отражателя (рис. 2.8). Золото обладает высокой стойкостью к параметрам

окружающей среды. Серебро является более пластичным материалом, что обеспечивает снижение напряжений в системе гетероструктура-металл. Однако серебро легко окисляется на воздухе, что требует формирования дополнительного защитного покрытия из инертного материала, например, золота. Преимуществом данной технологии "наращивания" носителя является монолитность соединения при отсутствии механической стыковки гетероструктуры и подложки-носителя. Однако, различие коэффициентов термического расширения материала гетероструктуры и металлов (Au и Ag) может вести к возникновению микродефектов в гетероструктуре и сказываться на величине токов утечки приборов, что требует более детальной проработки конструкции носителя и режимов его формирования.

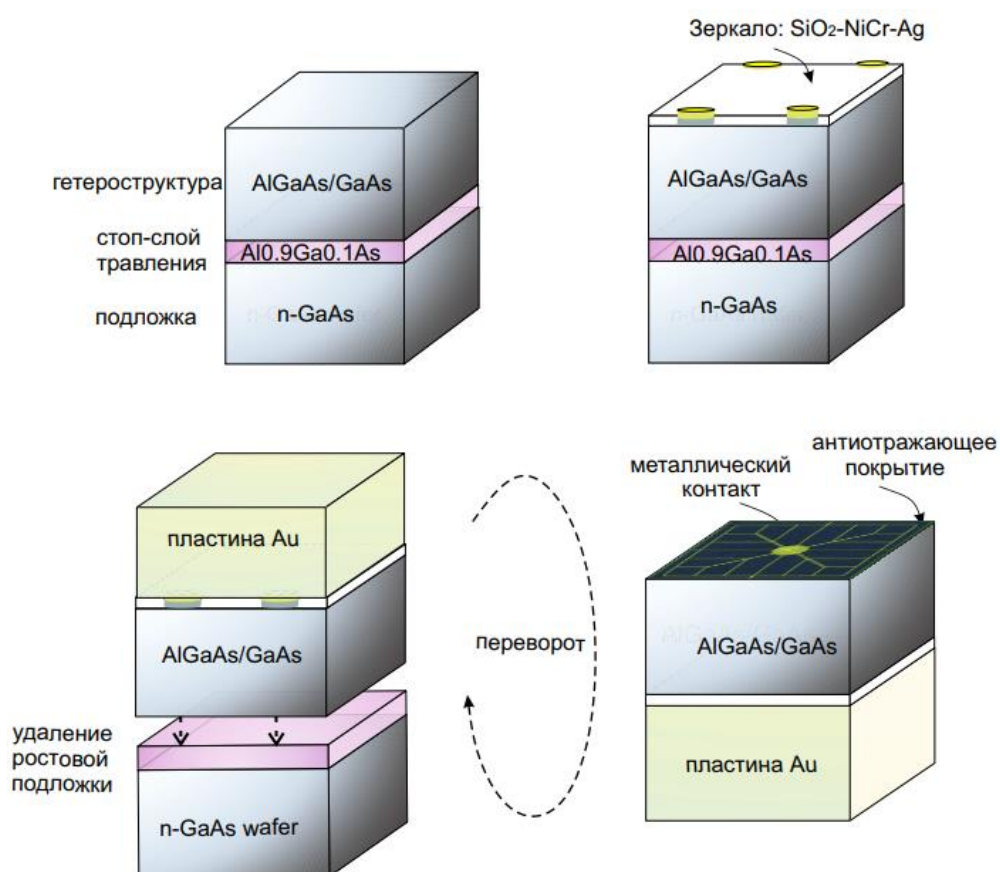


Рис. 2.8. Схематическое изображение формирования прибора путем электрохимического наращивания металлической пластины-носителя.

2.5. Методы исследования гетероструктур.

Анализ качества гетероструктур и полупроводниковых приборов на их основе (ФЭП СИ и ЛИ, ИК СИД) проводился с использованием различных методов [61]:

- сканирующей (растровой) электронной микроскопии,
- рамановского рассеяния света,
- фото- и электролюминесценции,
- метода Холла.

Сканирующая (растровая) электронная микроскопия

В основе сканирующей (растровой) электронной микроскопии (СЭМ) лежит сканирование поверхности образца электронным зондом и детектирование возникающего при этом широкого спектра излучений. В результате взаимодействия электронов с исследуемой структурой генерируются различные сигналы, основными из них являются поток электронов: отраженных, вторичных, Оже-электронов, а также излучений катодолуминесцентного и рентгеновского [62]. Для получения изображения поверхности структуры используются вторичные, отраженные и поглощённые электроны.

Формирование контраста в СЭМ определяется разностью детектируемых сигналов от соседних участков образца. Контраст зависит от нескольких факторов: топографии поверхности, химического состава структуры, поверхностных локальных магнитных и электрических полей, кристаллографической ориентации элементов структуры. Вторичные электроны обеспечивают максимальную в сравнении с другими сигналами разрешающую способность порядка 5-10 нм, поэтому они являются в СЭМ главным источником информации для получения изображения поверхности исследуемой структуры. Количество образующихся вторичных электронов слабо зависит от атомного номера элемента. Основным параметром, определяющим выход вторичных электронов, является угол падения пучка первичных электронов на

поверхность структуры. Таким образом, вариации наклона микроучастков поверхности вызывают резко выраженные изменения в выходе вторичных электронов. Этот эффект используется для получения информации о топографии поверхности.

Методом СЭМ определялось качество слоев исследуемых гетероструктур и морфология поверхности. Выполнялся анализ слоев и адгезии наносимых диэлектрических и металлических покрытий, а также соответствие топологии приборов заданным параметрам. Исследовалось состояние поверхности мезоструктуры приборов после проведения химического, электрохимического и реактивного ионно-плазменного травления.

Метод рамановского рассеяния света

Метод комбинационного рассеяния света (Рамановская спектроскопия) позволяет определить с высокой точностью концентрацию свободных носителей заряда и состав твердого раствора на поверхности полупроводника с помощью коротковолнового излучения, которое поглощается в материале структуры и образует отклик в виде сигнала [63]. Метод использует рассеяние света на оптических фононах и фонон-плазмонных модах, которое возникает вследствие модуляции электронной поляризации кристалла смещениями атомов, в результате чего в спектре рассеянного кристаллом света присутствуют линии с частотами, отличающимися от частоты возбуждения на величину, равную частотам оптических фононов.

Уравнение Релея:

$$\frac{I_s}{I_o} = \frac{16 \pi^4 a^2 \sin^2 \varphi}{r^2 \lambda^4} \quad (13)$$

I_s – интенсивность прошедшего излучения; I_o – интенсивность поступающего излучения; a – поляризуемость молекулы; φ – угол рассеяния излучения по отношению к электрическому диполью молекулы; r – расстояние (путь), пройденный рассеянным излучением; λ – длина волны излучения.

Метод рамановской спектроскопии использовался для контроля селективного удаления ростовой подложки GaAs до жертвенного слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ при изготовлении ФЭП и ИК СИД на основе инвертированных гетероструктур с комбинированным отражателем, получаемых путем переноса гетероструктуры на подложку-носитель (см. раздел 2.4).

Фотолюминесценция и электролюминесценция

Анализ оптических свойств является важнейшим методом изучения электронных процессов в полупроводниках и характеристики реальных полупроводниковых материалов, составляющих основу микроэлектроники. Для того чтобы полупроводниковый кристалл излучил свет, надо возбудить его электронную систему. Если возбуждение происходит в результате поглощения света, то последующее излучение кристаллом света другого спектрального состава называется фотолюминесценцией (ФЛ) [64]. При облучении кристалла быстрыми электронами происходит их торможение при вхождении в кристалл и последующее поглощение. При этом кинетическая энергия электрона расходуется на возбуждение электронно-дырочных пар. Такой процесс называется электролюминесценцией (ЭЛ) (рис. 2.9).

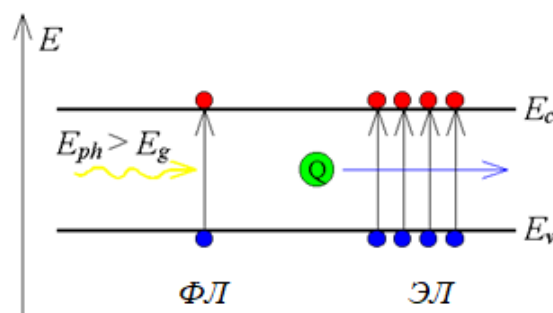


Рис. 2.9. Два основных типа генерации электронно-дырочных пар: поглощение света и ионизация под действием облучения.

Анализ спектров фото- и электролюминесценции исследуемых гетероструктур позволил получить достоверную информацию о толщине узкозонного слоя и планарности входящих в состав структуры слоев. Также с использованием фотолюминесценции выполнялся анализ спектральной

фоточувствительности гетероструктур до проведения процессов формирования омических контактов. Спектры электролюминесценции исследуемых гетероструктур ИК СИД приведены в главе 6.

Метод Холла

Эффект Холла – возникновение э.д.с. на боковых гранях находящегося в поперечном магнитном поле прямоугольного образца, через который протекает ток [65]. Возникающая разность потенциалов $\Delta\varphi_H$, пропорциональна величине тока I и индукции магнитного поля B :

$$\Delta\varphi_H = \frac{R_H BI}{d}, \quad (14)$$

где d – толщина образца (рис. 2.10). Величина R_H называется постоянной Холла, или коэффициентом Холла.

Эффект Холла обусловлен взаимодействием носителей заряда (электронов проводимости и дырок) с магнитным полем. В магнитном поле на электрон действует магнитная сила $F = e[B, v]$, на положительные заряды $F = q[B, v]$ ($v = j/ne$ – средняя скорость направленного движения носителей в электрическом поле; n – концентрация носителей; e, q – заряды), под действием которой частицы отклоняются в направлении, перпендикулярном j и B (рис. 2.10). В результате на боковой грани пластины происходит накопление зарядов и возникает поле Холла $E_H = \frac{\Delta\varphi_H}{l}$. При одном и том же направлении тока на передней грани накапливаются разные по знаку заряды в зависимости от типа носителей.

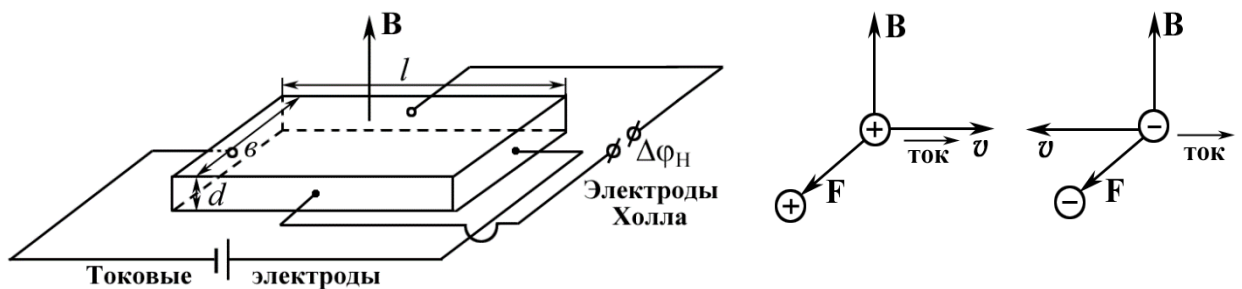


Рис. 2.10. Схематическое изображение измерения по методу Холла.

Постоянная Холла равна $R_H = A/ne$ [м³/Кл], где A – постоянная, зависящая от механизма рассеяния носителей тока в кристаллах. R_H можно выразить через подвижность носителей заряда $\mu = v/E$ или $\mu = \sigma R_H$, где σ – проводимость образца.

С использованием метода Холла исследовались объемные полупроводниковые монокристаллы и эпитаксиальные пленки, выращенные на полуизолирующей подложке. С помощью эффекта Холла определялись следующие параметры исследуемых гетероструктур: удельная электропроводность σ , постоянная Холла R , концентрации свободных носителей заряда n и холловская подвижность μ :

$$\sigma = \frac{I_x l_1}{U_\sigma d W} \quad (15); \quad R = \frac{W U_x}{I_x B} \quad (16);$$

$$n = \frac{1}{eR} \quad (17); \quad \mu = \sigma R = \frac{l_1 U_x}{d U_\sigma B} \quad (18);$$

где I_x – ток пропускаемый через структуру; W – толщина слоя; l_1 – расстояние между контактами; d – ширина образца; U_σ – омическое падение напряжения; U_x – холловское напряжение; B – напряженность магнитного поля; e – заряд электрона.

Все данные о концентрации свободных носителей заряда в слоях гетероструктур, приведенные далее в работе (в главах 3, 4, 6) опираются на результаты измерений тестовых образцов эпитаксиальных слоев, выращенных по полуизолирующим подложкам методом МОС ГФЭ.

Выводы к главе 2

Рассмотрены гетероструктуры ФЭП СИ на основе GaInP/GaInAs/Ge, ФЭП ЛИ на основе AlGaAs/GaAs и GaSb, а также ИК СИД на основе AlGaAs/GaAs структур. Выполнен анализ состава структур полупроводниковых приборов для обеспечения наибольшей эффективности их работы. Проведены исследования и разработана технология встраивания отражателя между активной областью гетероструктуры и ростовой подложкой при изготовлении многопроходных

приборов. Проведены исследования методов переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель GaAs или металла.

Представлен потенциал методов сканирующей (растровой) электронной микроскопии, рамановского рассеяния света, метода Холла, фото- и электролюминесценции при проведении исследований по модификации оптических и резистивных свойств каскадных A3B5 фотоэлектрических преобразователей и AlGaAs/GaAs светоизлучающих диодов.

Глава 3. Каскадный фотоэлектрический преобразователь солнечного излучения на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge.

В каскадных ФЭП достигается высокоэффективное преобразование энергии фотонов при расщеплении солнечного излучения на несколько спектральных участков, преобразуемых фотоэлементами с различной шириной запрещенной зоны E_g [51]. Каскадные ФЭП имеют меньшую величину температурного коэффициента снижения КПД и лучшую стойкость к воздействию космической радиации.

Рассчитанные теоретические предельные параметры КПД составляют 30% для ФЭП с одним p - n переходом, 40% для однокаскадного ФЭП при использовании концентраторов солнечного излучения [66]. Дальнейшее увеличение КПД возможно только при использовании структур каскадных фотопреобразователей, так как однопереходный ФЭП преобразует только часть солнечного спектра (рис. 3.1, слева). Одними из перспективных каскадных солнечных элементов на сегодняшний день являются элементы на основе полупроводниковых соединений $\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{GaInAs}/\text{Ge}$ [24, 25]. Это обусловлено достаточно высокой разностью величин запрещенной зоны этих материалов с одинаковым параметром решетки. Каждый p - n переход каскадной гетероструктуры спектрально ориентирован на определенную часть солнечного спектра (рис. 3.1, справа), что обеспечивает оптимальные условия преобразования излучения и повышает КПД каскадных ФЭП. При этом переходы, преобразующие коротковолновое излучение, характеризуются большим напряжением холостого хода, так как они выполнены из материалов с большей шириной запрещенной зоны, а использование узкозонных материалов позволяет значительно расширить область фоточувствительности каскадных ФЭП [A7, A8]. Рассчитанные теоретические предельные параметры КПД составляют 68% для каскадных ФЭП без концентраторов и 87% для каскадных ФЭП при преобразовании концентрированного излучения [66].

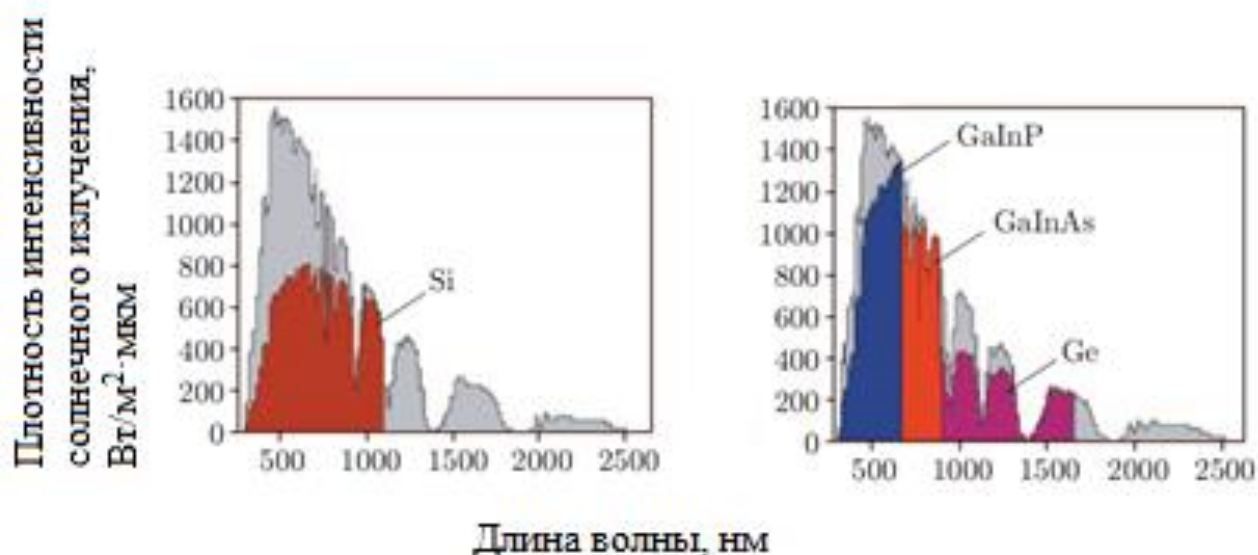
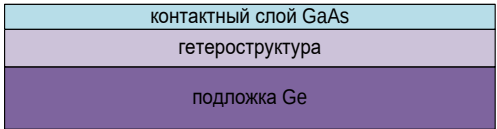
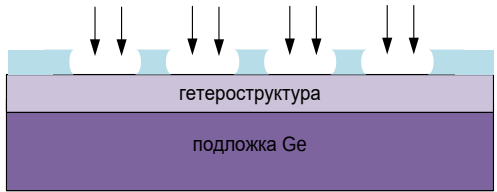
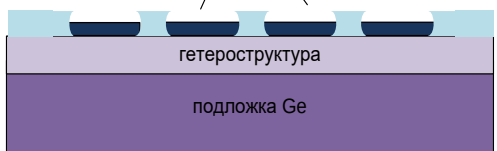
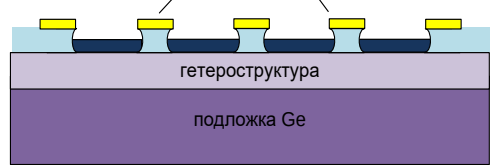
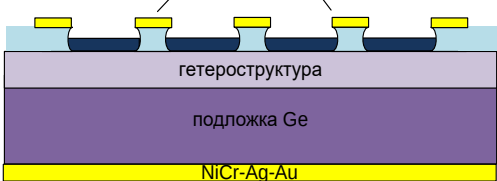


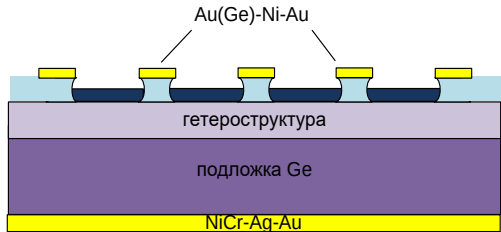
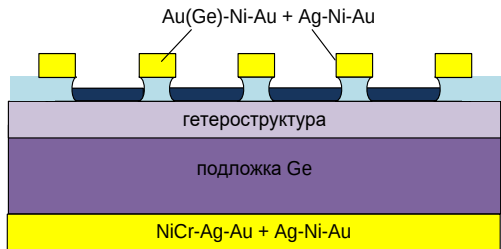
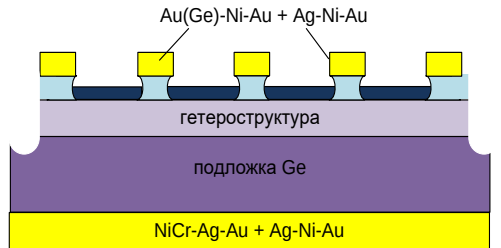
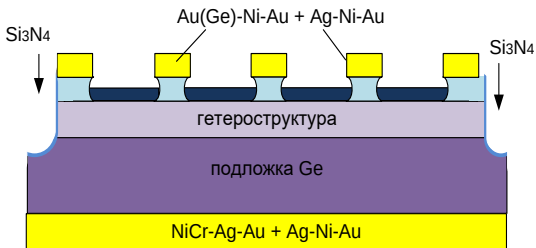
Рис. 3.1. Спектр солнечного излучения (AM1.5), преобразуемого в однопереходном Si СЭ и трехпереходном GaInP/GaInAs/Ge ФЭП.

Данная глава включает исследования по модификации оптических и резистивных свойств GaInP/GaInAs/Ge гетероструктур, направленных на снижение омических, оптических и рекомбинационных потерь при изготовлении концентраторах каскадных ФЭП СИ, предназначенных для преобразования сильно концентрированного солнечного излучения (более 200 крат).

В таблице 3.1 представлен основной технологический маршрут изготовления каскадных GaInP/GaInAs/Ge ФЭП, выращенных методом МОС ГФЭ на подложках Ge *p*-типа проводимости. Далее подробно будут рассмотрены методы оптимизация данного маршрута с целью получения максимально возможных для имеющихся каскадных структур эффективностей преобразования солнечного излучения и повышения степени надежности приборов.

Таблица 3.1. Технологический маршрут изготовления каскадных GaInP/GaInAs/Ge ФЭП.

Технологическая операция	Схема
Травление тыльной стороны подложки германия методом химического травления (в травителе CP4) на глубину 15-30 мкм.	 контактный слой GaAs гетероструктура подложка Ge
Локальное селективное стравливание контактного слоя GaAs методом химического травления через маску фоторезиста. Очистка поверхности методом ионно-лучевого травления (ИЛТ) на глубину 5-10 нм.	 селективное стравливание контактного слоя GaAs гетероструктура подложка Ge
Напыление двуслойного антиотражающего покрытия (АОП) $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$.	 Антиотражающее покрытие $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ гетероструктура подложка Ge
Напыление фронтального <i>n</i> -контакта Au(Ge)/Ni/Au толщиной 0.15-0.25 мкм через маску фоторезиста с предварительной очисткой поверхности структуры методом ИЛТ на 5-10 нм.	 Au(Ge)-Ni-Au гетероструктура подложка Ge
Напыление тыльного <i>p</i> -контакта NiCr/Ag/Au толщиной 0.2-0.3 мкм с предварительной очисткой поверхности методом ИЛТ на 10-20 нм.	 Au(Ge)-Ni-Au гетероструктура подложка Ge NiCr-Ag-Au

Вжигание контакта при температуре 370-400 °С в течении 30-60 сек.	
Локальное электрохимическое осаждение гальванических слоев Ag/Ni/Au через маску фоторезиста.	
Травление гетероструктуры и подложки методом химического, электрохимического или реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) через маску фоторезиста.	
Пассивация боковой поверхности мезоструктуры слоем диэлектрика через ту же маску фоторезиста, путем осаждения Si₃N₄.	

3.1. Расчет конфигурации контактных шин для оптимального введения оптической мощности в фотоэлектрический преобразователь

Исследование процессов формирования известных контактных систем является необходимым аспектом при работе с новыми типами гетероструктур. Выбор наиболее подходящей по электрическим свойствам контактной системы,

оптимизация режимов термического отжига контактов обеспечивает снижение удельного контактного сопротивления, уменьшение последовательного сопротивления прибора, что в совокупности ведет к снижению омических потерь, увеличению КПД ФЭП и к возможности преобразования солнечного излучения высокой концентрации. Разработка новых типов гетероструктур, необходимость преобразования излучения повышенной мощности ведет также к необходимости поиска новых контактных систем, отвечающих требованиям эксплуатации готовых приборов.

Каскадные ФЭП предназначены для работы при высоких степенях концентрации солнечного излучения (более 300 крат) при плотности фототока более 10 А/см^2 , что приводит к увеличению омических потерь при протекании фототока от области генерации фотоносителей к токосборным контактным шинам и, как следствие этого, к снижению КПД элементов. Снижение омических потерь при повышенных рабочих токах возможно при уменьшении расстояния между контактными шинами, что, однако, приводит к увеличению оптических потерь на ввод излучения в ФЭП.

Для снижения омических и оптических потерь выполнен расчет конфигурации контактных шин трапецевидного сечения с зеркальными боковыми гранями ("пирамидальные" шины) [А9]. СИ, поступающее на область контактных "пирамидальных" шин, отражается от зеркальной боковой поверхности шин на фоточувствительную поверхность ФЭП, что ведет к снижению оптических потерь (рис. 3.2). Условием, обеспечивающим поглощение отраженного излучения, является определенная конфигурация контактных шин, выполненных в виде "пирамид" с длиной ребра нижнего основания W_1 и верхнего основания W_2 , расположенных на расстоянии l друг от друга. При этом длина ребра нижнего основания шины зависит от шага контактных шин, что обеспечивает минимизацию оптических потерь на затенение фоточувствительной области и омических потерь на последовательное сопротивление прибора:

$$W_1 = (0.05 \div 0.1) l \quad (19)$$

Технологические особенности формирования контактных шин накладывают ограничение на минимальную длину ребра верхнего основания шины W_2 , которая не может быть выполнена менее 2 мкм. Формирования "пирамидальной" формы шины осуществляется при соотношении:

$$2 \text{ мкм} \leq W_2 \leq 0,3W_1 \quad (20)$$

Боковые грани "пирамид" изготавливаются зеркальными и образуют с основанием угол α . Определение угла наклона боковых граней "пирамидальных" шин является главным фактором, обеспечивающим поглощение излучения, поступающего на область контакта. Угол α зависит от соотношения высоты (h) и шага (l) контактных шин, размера апертуры (D) и фокусного расстояния концентратора (F) и определяется соотношением:

$$\alpha = 45^\circ + \arctg \frac{h}{l} + \arctg \frac{D}{2F} \quad (21)$$

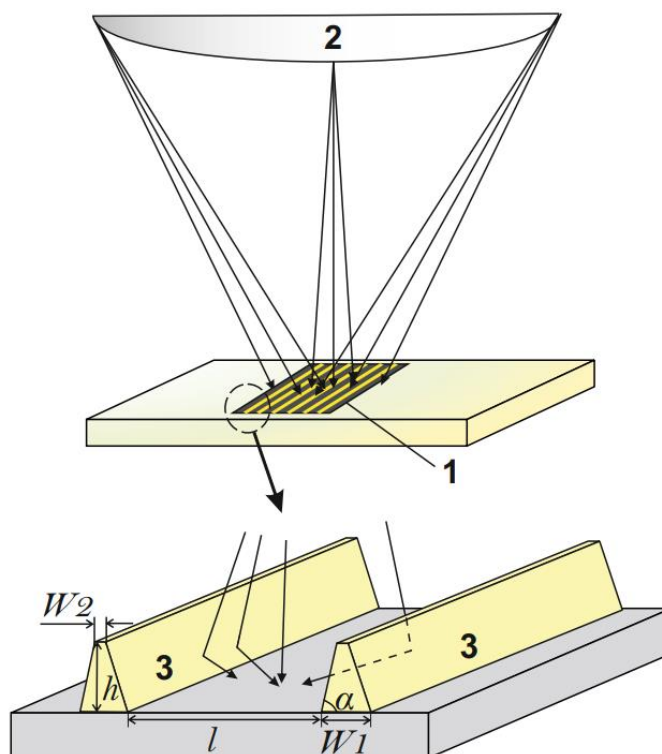


Рис. 3.2. Схематическое изображение конструкции ФЭП (1) с концентратором солнечного излучения (2) и контактными шинами (3).

Условие $\arctg \frac{h}{l} < \alpha - 45^\circ < \arctg \frac{D}{2F}$ обеспечивает выполнение требования попадания на фоточувствительную поверхность лучей, распространяющихся к фотоэлементу от концентратора и отражающихся от боковых граней контактных шин. При этом условие $\alpha - 45^\circ > \arctg \frac{h}{l}$ обеспечивает выполнение данного требования для лучей, поступающих перпендикулярно поверхности фотоэлемента. Оптимальные величины соотношения $\frac{h}{l} = 0,075 - 0,15$ дают величину данного ограничения $\alpha > 49-53^\circ$.

Условие $\alpha - 45^\circ < \arctg \frac{D}{2F}$ обеспечивает выполнение данного требования для всех лучей, собираемых концентратором с размером апертуры D и фокусным расстоянием F . Большее же значение угла $\alpha - 45^\circ > \arctg \frac{D}{2F}$ приводит к увеличению доли лучей попадающих на верхнее основание с длиной ребра W_2 , т.к. при этом увеличивается соотношение W_2/W_1 .

Оптимальное соотношение $\frac{D}{2F}$ для концентраторов – например, линз Френеля составляет 0.25, соответственно $\arctg 0.25 = 14^\circ$. Таким образом, угол α , соответствующий оптимальным значениям соотношений $\frac{h}{l}$ и $\frac{D}{2F}$, находится в диапазоне $49^\circ < \alpha < 59^\circ$ (рис. 3.3).

Пример расчета конфигурации контакта: оптимальное расстояние между контактными полосами $l = 80$ мкм, обеспечивающее баланс оптических потерь на ввод излучения и омических потерь на последовательное сопротивление прибора. При этом длина ребра нижнего основания "пирамид" (W_1) составляет 8 мкм, а отношение $\frac{W_1}{l} = 0.1$, длина ребра верхнего основания

"пирамид" $W_2 = 2$ мкм при высоте "пирамиды" $h = 6$ мкм, отношение $\frac{h}{l} = 0.075$, а угол $\alpha > 49^\circ$.

Формирование "пирамидальных" контактных шин обеспечивает оптимальное введение оптической мощности в ФЭП и позволяет снизить оптические потери до 2% (в 2-4 раза), что является особенно существенным при преобразовании сильно концентрированного солнечного излучения.

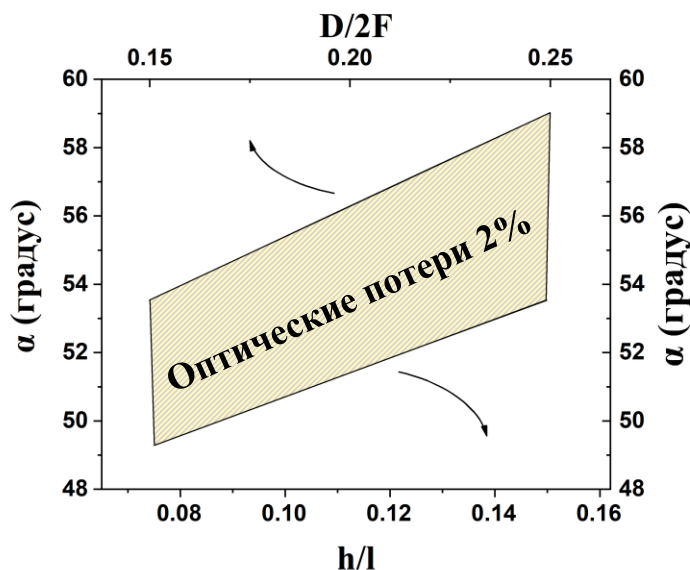


Рис. 3.3. Расчет конфигурации контакта для оптимального введения оптической мощности в ФЭП.

Формирование шин согласно рассчитанной конфигурации является весьма сложной технологической задачей: шины должны быть выполнены с наклонными боковыми гранями, точно повторяющими заданный профиль, а также должны обладать высоким коэффициентом отражения поступающего излучения. Исследования, посвященные решению данной задачи, будут подробно изложены разделе 3.2.

3.2. Омические контакты

Модификация резистивных свойств каскадных ФЭП, направленная на формирование омических контактов с низким удельным контактным сопротивлением и высокой электрической проводимостью контактных шин, в

совокупности, обеспечивающих снижение последовательного сопротивления приборов, является одним из ключевых этапов при снижении потерь мощности ФЭП [67].

3.2.1. Удельное контактное сопротивление

Одним из основных параметров контактных систем является удельное контактное сопротивление, которое позволяет оценить качество омического контакта и возможность его использования с конкретной гетероструктурой.

Значение контактного сопротивления зависит от ряда параметров: температуры, концентрации носителей заряда в полупроводнике и высоты энергетического барьера на контакте, которые определяют механизм переноса тока через контакт металл/полупроводник: термоэлектронная, термополевая или туннельная эмиссия [68].

При низкой концентрации носителей заряда в полупроводнике $E_{00} \ll kT$ преобладает механизм термоэлектронной эмиссии переноса тока. В режиме термоэлектронной эмиссии контактное сопротивление прямо пропорционально температуре (T) и обратно пропорционально плотности тока (j):

$$R_k = \frac{k}{qA^*T} e^{\frac{q\phi_k}{kT}} = \frac{kT}{qj} \quad (22),$$

где q – заряд электрона, A^* - эффективная постоянная Ричардсона, k – постоянная Больцмана.

При увеличении концентрации носителей заряда (N) в полупроводнике ($E_{00} \gg kT$) начинает преобладать туннельный механизм протекания тока, таким образом можно выразить отношение термоэмиссионного тока к туннельному:

$$\frac{kT}{E_{00}} = \frac{kT}{\frac{qh}{4\pi\sqrt{m^*\epsilon_0\epsilon_s}} \sqrt{\frac{N}{m^*\epsilon_0\epsilon_s}}} \approx \frac{T}{\sqrt{N}} \quad (23),$$

где ϵ_s — диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; m^* - эффективная масса электрона.

В исследуемых структурах ФЭП контактный слой n -GaAs выращивается с высокой степенью легирования с концентрацией носителей $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

(измерено методом Холла, см. раздел 2.5), соответственно преобладает туннельный механизм протекания тока через границу контакт/полупроводник.

Для экспериментального анализа величины удельного контактного сопротивления известна методика измерения LTLM (linear transmission line model) с прямоугольной геометрией контактных площадок [69, 70].

При исследовании контактных систем к полупроводниковым структурам изготавливались тестовые образцы с системой прямоугольных контактных площадок, расположенных на различных расстояниях друг от друга, на слоях *n*-GaAs толщиной 150 нм, выращенных методом МОС ГФЭ на полуизолирующих GaAs подложках. Для ограничения проводящей области полупроводника проводилось формирование меза-структуры путем обтавливания групп контактных площадок до подложки.

Методика измерения контактного сопротивления LTLM заключается в следующем: при пропускании тока I_0 через две соседние площадки, полное сопротивление R между контактами, выражается по формуле:

$$R = 2R_m + 2R_c + R_s \quad (24)$$

где R_m – сопротивление металла, R_c – контактное сопротивление, R_s – сопротивление полупроводника. При этом сопротивление металла в контакте настолько низко, что его можно не учитывать: $R_m \ll R_c$. Сопротивление полупроводника может быть выражено через слоевое сопротивление R_{sh} :

$$R = 2R_c + R_{sh} \frac{Li}{b} \quad (25)$$

b – длина контактных площадок, Li – расстояние между соседними площадками.

Полное сопротивление R измеряется между каждыми соседними площадками и откладывается на графике (рис. 3.4). Путем экстраполяции прямой до оси ординат (при $L=0$) определяется величина $2R_c$.

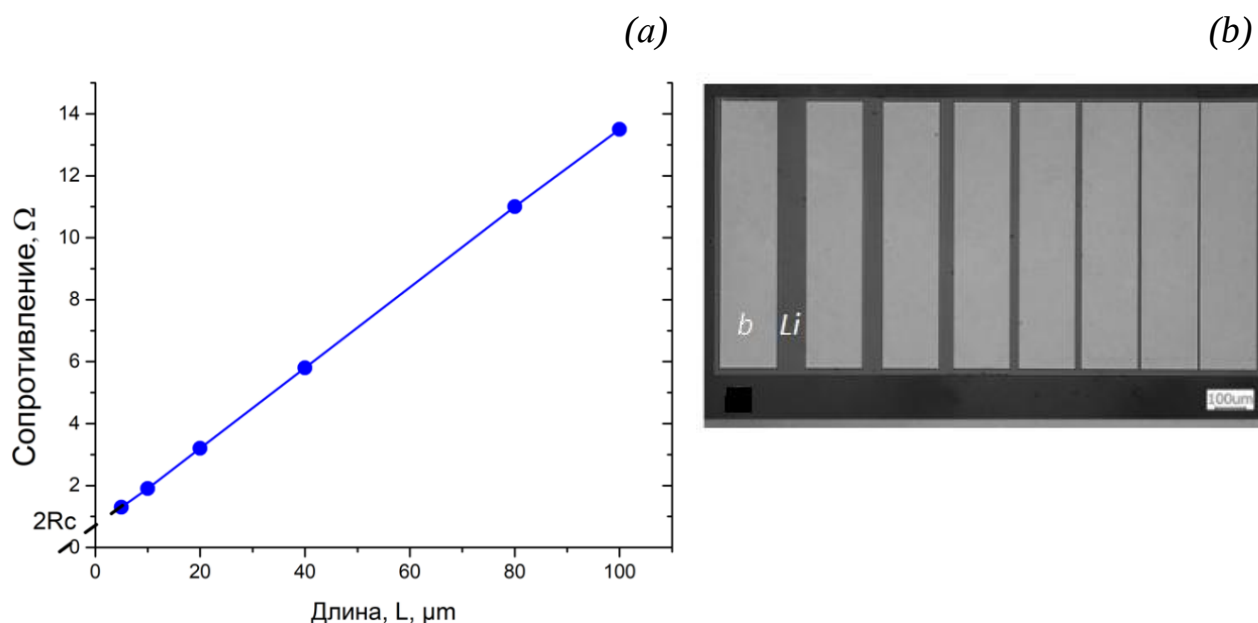


Рис. 3.4. Полное сопротивление между контактными площадками в зависимости от расстояния между ними (a) и фотография тестового образца (b).

Измерение величины удельного контактного сопротивления для исследуемых систем металл/полупроводник позволяет определить подходящие контактные системы и оптимальные условия формирования омических контактов, что особенно важно при работе с новыми типами гетероструктур и разработке новых контактных систем.

3.2.2. Последовательное сопротивление прибора

Последовательное сопротивление полупроводниковых приборов включает сопротивление слоев гетероструктуры, контактное сопротивление между металлическим контактом и полупроводником, сопротивление фронтального и тыльного омических контактов.

$$I = I_L - I_0 \exp \frac{q(V + IR_s)}{nkT} \quad (26)$$

где I – выходной ток солнечного элемента, I_L – фотогенерируемый ток, V – напряжение, T – температура, q и k – константы, n – коэффициент определяющий механизм протекания тока, R_s – последовательное сопротивление.

Влияние последовательного сопротивления на ВАХ фотоэлектрического преобразователя приведено на рис. 3.5, и характеризуется наклоном вертикальной составляющей ВАХ.

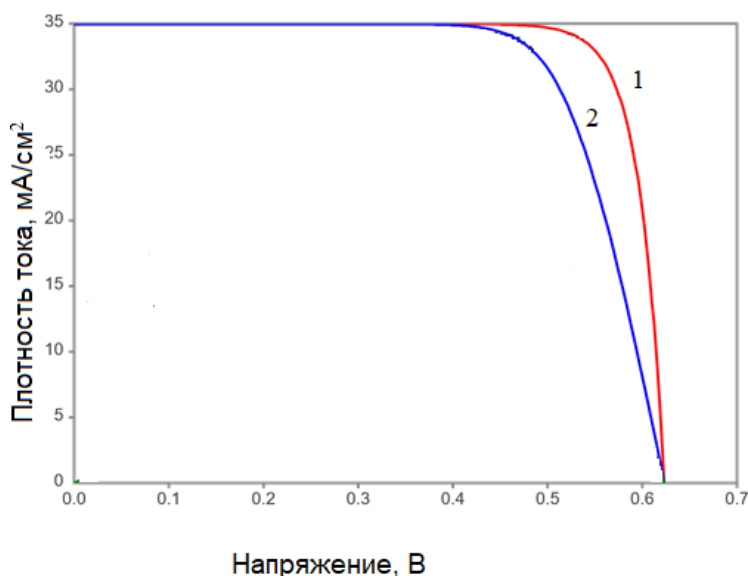


Рис. 3.5. Пример ВАХ ФЭП СИ: 1 – идеального, 2 – с последовательным сопротивлением.

Снижение последовательного сопротивления прибора позволяет увеличить фактор заполнения ВАХ и, соответственно, максимальную вырабатываемую мощность.

3.2.3. Исследование различных типов омических контактов

Развитие технологии изготовления полупроводниковых приборов ведет к формированию гетероструктур нового состава, изменяется уровень легирования контактного слоя, глубина залегания *p-n* перехода и другие параметры, что оказывает существенное влияние на выбор систем контактных материалов и требует проведения оптимизации этапов формирования омических контактов, ведет к необходимости исследования как уже известных контактных систем, так и разработки новых.

Проведены исследования различных контактных систем *n*- и *p*-типа проводимости к контактным слоям GaAs и к германиевой подложке. Исследованы и оптимизированы известные системы для использования в разрабатываемых приборах:

- *p*-типа проводимости Ag(Mn)/Ni/Au, Cr/Au;
- *n*-типа проводимости Au(Ge)/Ni/Au, Pd/Ge/Au [A10, A11].

Разработана новая контактная система к полупроводниковым слоям *p*-типа проводимости: NiCr/Ag/Au [A12].

Для нанесения многослойных контактных систем использовались установки, сконструированные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе на базе установок УВН-71 и ВУП-5М. В установке УВН-71 дополнительно установлены: два магнетронных источника распыления, два резистивных испарителя, нагреватель подложек с ламповым подогревом, карусель на три подложкодержателя с приводом от шагового двигателя, кварцевый измеритель толщины плёнок, газовый блок с системой стабилизации давления в камере. Тонкие плёнки Ni, NiCr, Pd, Ag формируются методом магнетронного напыления, слои сплавов Au(Ge) и Ag(Mn), Pd, Ge, Au – методом резистивного вакуумного термического испарения (см. раздел 1.4).

*Контактные системы *p*-типа проводимости*

Рассмотрены известные контактные системы на основе слоев Ag(Mn)/Ni/Au и Cr/Au, которые широко используются при изготовлении полупроводниковых приборов, однако существенным недостатком этих контактов является высокая степень диффузии материалов вглубь полупроводника при проведении термического отжига. Изготовление приборов с *p-n* переходом на малой глубине от поверхности (< 0.2 мкм) ведет к необходимости разработки новых контактных систем, обладающих как высокой адгезией к слою полупроводника, так и низкой степенью диффузии, позволяющей избежать шунтирования *p-n* перехода.

Для решения поставленной задачи выполнена разработка новой контактной системы к слоям *p*-типа проводимости на основе слоев NiCr/Ag/Au, включающая слой сплава NiCr с содержанием в сплаве хрома (15-50) мас.% толщиной 5-25 нм, слой Ag толщиной 50-800 нм и слой Au толщиной 30-100 нм. Первый слой NiCr увеличивает адгезию и уменьшает контактное

сопротивление металла к поверхности полупроводниковой гетероструктуры, а также является барьерным слоем, препятствующим диффузии Ag в структуру. Слой Ag напыляется толщиной до 800 нм для увеличения электрической проводимости контактных шин. Дополнительно может напыляться второй слой сплава NiCr, который выполняет барьерную функцию при проведении пайки/бондинга готовых элементов. Верхний слой Au обеспечивает защитную функцию и используется для последующего монтажа приборов.

Важным параметром процесса формирования омических контактов является этап термического отжига контактных систем. Выбор температурного режима обусловлен материалом полупроводника и контакта. Для снижения контактного сопротивления проведен ряд экспериментов и выполнены расчеты удельного контактного сопротивления с использованием метода LTLM (таблица 3.2 и 3.3).

Таблица 3.2 Температурная зависимость удельного контактного сопротивления контактных систем на основе NiCr/Ag/Au, Ag(Mn)/Ni/Au и Cr/Au к *p*-GaAs.

№	Температура отжига, °C	Контактное сопротивление, Ом·см ²		
		NiCr/Ag/Au	Ag(Mn)/Ni/Au	Cr/Au
1	Без вжигания	не омический контакт	не омический контакт	не омический контакт
2	200 (30-60 сек)			
3	300 (30-60 сек)			
4	360 (30 сек)	$5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$
5	370 (30 сек)	$2 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$
6	400 (30 сек)	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
7	400 (60 сек)	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3.3 Температурная зависимость удельного контактного сопротивления контактных систем на основе NiCr/Ag/Au, Ag(Mn)/Ni/Au и Au к *p*-Ge

№	Температура отжига, °C	Контактное сопротивление, Ом·см ²		
		NiCr/Ag/Au	Ag(Mn)/Ni/Au	Au
1	100	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
2	350 30 сек	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
3	370 30 сек	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
4	400 30-60 сек	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$

Результаты исследования показали, что разработанная новая контактная система на основе NiCr/Ag/Au обеспечивает минимальные значения удельного контактного сопротивления к слою *p*-GaAs при температуре вжигания 370-400 °С в течении 30-60 сек и к слою *p*-Ge при температуре вжигания от 100 °С. Для анализа глубины диффузии материалов омического контакта вглубь полупроводника выполнено исследование при использовании контактного слоя *p*-GaAs различной толщины: 20 нм, 60 нм, 100 нм. Результаты исследования показали, что даже при толщине контактного слоя 20 нм, значения удельного контактного сопротивления составляют $(2-4) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, что свидетельствует об отсутствии диффузии материалов контакта вглубь полупроводника (рис. 3.6) [A10, A11].

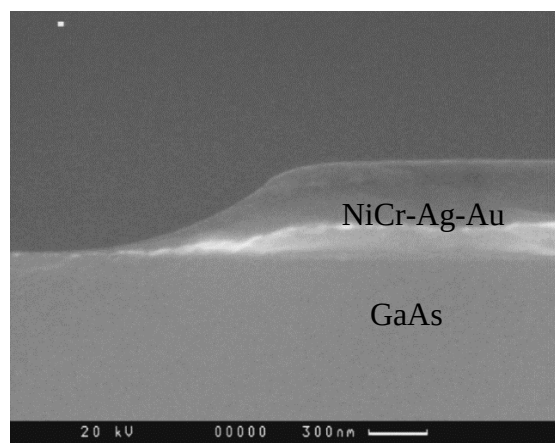


Рис. 3.6. Изображение, полученное методом сканирующей (растровой) микроскопии (СЭМ), контактной системы NiCr/Ag/Au к *p*-GaAs после вжигания при $T=400 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Контактные системы n-типа проводимости

Контактная система Au(Ge)/Ni/Au является широко распространённой при формировании омических контактов *n*-типа проводимости для полупроводниковых приборов. Система включает слой сплава AuGe (золото 88 масс.% и германий 12 масс.%) обладающий хорошей адгезией к поверхности гетероструктуры и обеспечивающий низкие значения удельного контактного сопротивления $(2-4) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при температурах вжигания 370-400 °С. Однако разработка новых типов оптоэлектронных приборов, подверженных деградации

при высокотемпературной обработке, ведет к необходимости исследования контактных систем, обеспечивающих низкое контактное сопротивление при пониженных до 170-200 °С температурах вжигания.

Известна контактная система Pd/Ge/Au, включающая слой Pd толщиной 10-20 нм, слой Ge толщиной 30 нм, слой Au толщиной 150-300 нм. Введение палладиевого слоя обеспечивает снижение температуры отжига (до 170 °С) при формировании омического контакта с низким контактным сопротивлением [71, 72, A10, A11] (рис. 3.7).

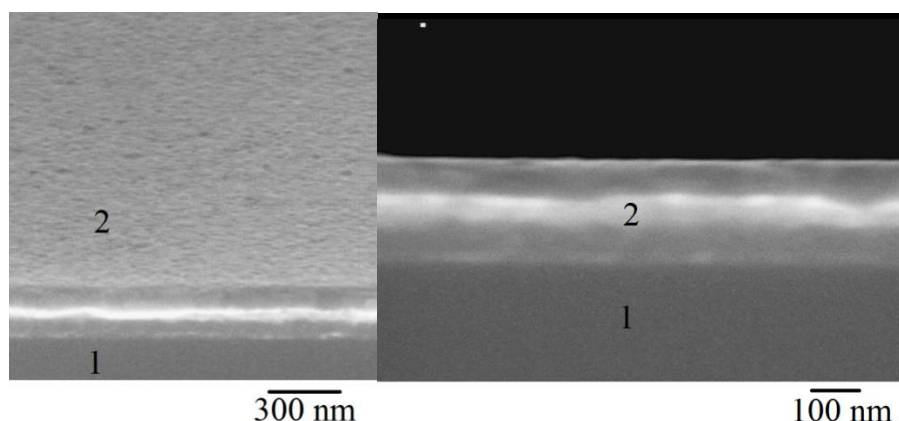


Рис. 3.7. Изображение СЭМ контактной системы Pd/Ge/Au к *n*-GaAs после вжигания при $T=185$ °С. 1 – *n*-GaAs, 2 – Pd/Ge/Au.

Применение данного контакта имеет свои особенности и для анализа его свойств проведены дополнительные исследования по оптимизации толщины палладиевого слоя, граничащего с материалом полупроводниковой структуры *n*-GaAs, а также исследовано влияние типа легирования распыляемого германия на параметры контакта. Для напыления слоя Ge использовался легированный германий трех типов:

- слаболегированный *n*-типа проводимости *i*-Ge ($4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$);
- сильнолегированный *n*-типа проводимости n^+ -Ge ($3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$);
- *p*-типа проводимости *p*-Ge ($3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) (измерено методом Холла, см. раздел 2.5).

На рис. 3.8 представлены результаты измерений, выполненные методом LTLM, удельного контактного сопротивления для различных вариантов

контактной системы при термической обработке в атмосфере водорода в широком диапазоне температур ($T=185-400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Согласно проведенным исследованиям наибольшая стабильность контактного сопротивления достигается при толщине слоя Pd 10-20 нм (толщины слоя Ge 30 нм и Au 100-150 нм заданы постоянными) и составляет менее $3\cdot 10^{-5}\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ после вжигания при $T=185-210\text{ }^{\circ}\text{C}$ и менее $3\cdot 10^{-4}\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ при $T=290\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 30-60 мин в атмосфере водорода (рис. 3.8, *a*). Однако увеличение температуры вжигания до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ нивелирует влияние толщины слоя Pd на электрические параметры контакта за счет сплавления Ge и Au в поверхность *n*-GaAs, и контактное сопротивление слабо зависит от толщины палладиевого слоя.

Для оценки влияния типа легирования распыляемого Ge на электрические параметры контактной системы толщина барьерного слоя Pd снижена до 3-4 нм, при этом уменьшаются абсолютные значения контактного сопротивления и появляется возможность оценить влияние легирующей примеси (As, Ga). В ходе распыления материалов контактной системы первым осаждается тонкий барьерный слой Pd, далее при распылении легированного Ge, сначала частично могут распыляться более летучие примеси за счет более низких температур плавления ($T_{\text{Ge}} = 938\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{As}} = 886\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Ga}} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$). Таким образом, легирующая примесь оказывает влияние на состав осаждаемой контактной системы и, соответственно, на величину контактного сопротивления. Наибольшее влияние оказывает использование легированного до концентрации $3\cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ Ge *p*-типа проводимости: при температурах вжигания контактной системы менее $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ контакт является не омическим, при увеличении температуры вжигания до 290°C удельное контактное сопротивление составляет $\sim 10^{-5}\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Использование германия, легированного до концентрации $4\cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$ (*i*-Ge) или $3\cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ (*n*⁺-Ge), обеспечивает формирование омического контакта во всем исследуемом диапазоне температур. Минимальные значения удельного контактного сопротивления $8\cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ получены при температуре вжигания $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ при распылении *n*⁺-Ge. Увеличение толщины слоя Pd до оптимальной (10-12 нм)

приводит к менее значительному влиянию материала Ge на контактное сопротивление, которое составило менее $3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при температурах вжигания 185-210 °С в атмосфере водорода (рис. 3.8, b).

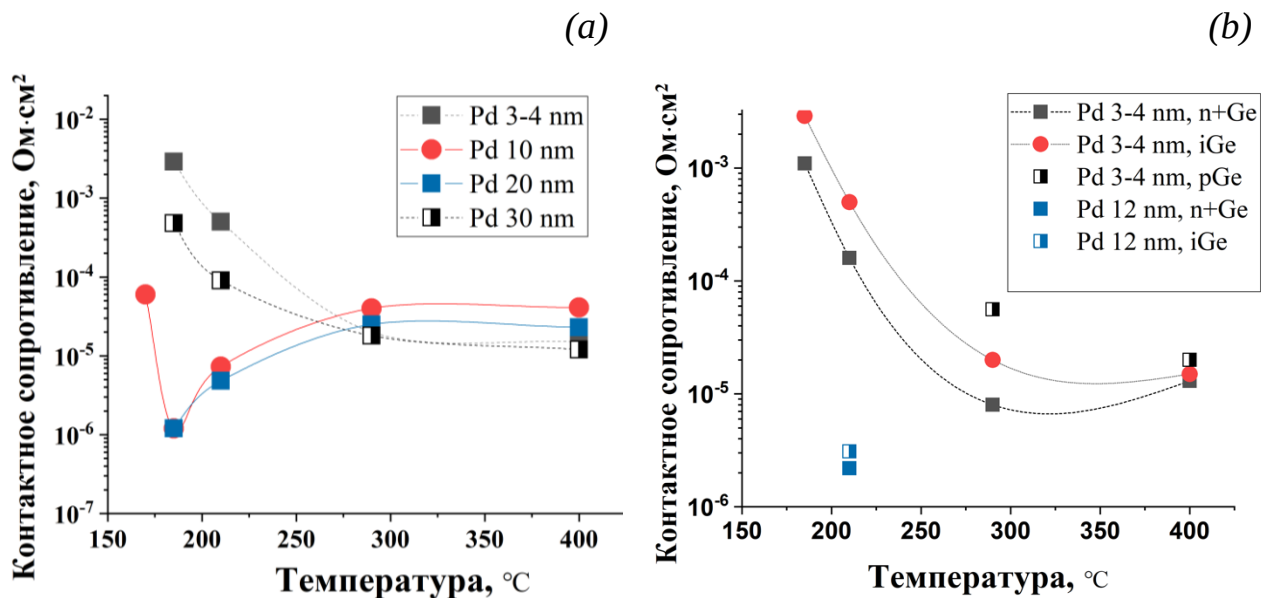


Рис 3.8. Зависимость контактного сопротивления Pd-Ge-Au к *n*-GaAs от температуры вжигания (H_2) при толщине Pd 3–30 нм (a) и при разном легировании распыляемого Ge (b).

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. В отличие от галлия, атомы сурьмы, а, в особенности, атомы мышьяка склонны к образованию молекул – димеров (As_2) и тетрамеров (As_4). При этом время образования молекул из освобождающихся при разогреве навески легированного германия атомов сурьмы или мышьяка чрезвычайно мало и намного меньше времени пролета атомов от испарителя до образца. Вследствие этого, во-первых, поверхности материалов адсорбируют нейтральные молекулы хуже, чем атомы, поэтому часть молекул сурьмы или мышьяка может отражаться от поверхности образца при напылении. Во-вторых, часть нейтральных молекул, все же адсорбированных поверхностью напыляемого слоя, может диффундировать на поверхность напыляемого слоя германия вследствие поверхностной сегрегации и десорбировать с него. Протекание этих процессов усугубляется тем, что образец мог быть разогрет при проведении процесса

напыления слоев лишь до 100-120 °С (из-за наличия на поверхности образца маски из фоторезиста), в то время как процесс диссоциации молекул мышьяка на поверхности GaAs начинает становиться заметным при температурах более 500 °С. Тем не менее, часть от распыленного мышьяка может способствовать небольшому увеличению уровня легирования напыляемого слоя *n*-Ge и, соответственно, уменьшению значений сопротивления контакта Pd/Ge/Au к *n*-GaAs при низких температурах отжига.

Проведен сравнительный анализ влияния температуры вжигания для используемых контактных систем Au(Ge)/Ni/Au и Pd/Ge/Au к контактному слою *n*-GaAs на величину удельного контактного сопротивления (таблица 3.4).

Таблица 3.4 Температурная зависимость удельного контактного сопротивления Au(Ge)/Ni/Au и Pd/Ge/Au к *n*-GaAs.

№	Температура вжигания, °С	Контактное сопротивление, Ом·см ²	
		Au(Ge)/Ni/Au	Pd/Ge/Au
1	Без вжигания	не омический контакт	не омический контакт
2	185		$2 \cdot 10^{-6}$
2	210		$5 \cdot 10^{-6}$
3	290		$2 \cdot 10^{-5}$
4	360	$8 \cdot 10^{-5}$	-
5	370	$2 \cdot 10^{-6}$	-
6	400	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$

Результатом проведенных исследований стала оптимизация технология формирования контактов к слоям GaAs *n*- и *p*-типа проводимости, и к слою Ge *p*-типа проводимости, определены оптимальные параметры термического отжига контактных систем в атмосфере водорода. Разработана новая контактная система на основе NiCr/Ag/Au к GaAs *p*-типа проводимости, обладающая низким удельным контактным сопротивлением $(2-4) \cdot 10^{-6}$ Ом·см², низкой степенью диффузии металла вглубь полупроводника и высокой адгезией. Проведены исследования контактной системы на основе Pd/Ge/Au, выявлено влияние типа и уровня легирования распыляемого германия на величину удельного

контактного сопротивления, которое составило $(2-5) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к слою $n\text{-GaAs}$ при распылении легированного $n^+\text{-Ge}$ при температуре отжига 185-210 °C.

3.2.4. Увеличение электрической проводимости контактных систем

Увеличение электрической проводимости контактов достигается при увеличении площади поперечного сечения контактных шин и площадок. При этом увеличение ширины контактов ведет к увеличению степени затенения элементов, что сказывается на увеличении оптических потерь, а увеличение толщины шин не оказывает негативного влияния и может использоваться для увеличения электрической проводимости. Увеличение толщины контактов осуществляется путем электрохимического осаждения контактных материалов, обладающих низким удельным сопротивлением, например, золото ($0.023 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) и серебро ($0.15\text{-}0.016 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) [A13].

Формирование масок фоторезистов

Проведение электрохимического осаждения контактных материалов на фронтальную поверхность гетероструктуры проводится с использованием маски фоторезиста, при этом коммутирующим слоем является либо непосредственный слой структуры, либо слой напыленного металла. При формировании различных контактных систем используются маски фоторезиста с пологим, вертикальным или обратным профилем наклона боковой грани маски, причем толщина фоторезиста должна соответствовать толщине осаждаемого металла. Для защиты фоточувствительной области от разрастания материала контакта используются также двуслойные маски, включающие слой диэлектрика и слой фоторезиста.

Для формирования маски фоторезиста специфической конфигурации для осаждения контактных шин в виде усеченных "пирамид", согласно расчётам, выполненным в разделе 3.1, исследована методика обращения позитивного фоторезиста, в результате которого рисунок маски фоторезиста формируется обратным относительно рисунка шаблона. Данный метод позволяет сочетать

высокую разрешающую способность и стойкость позитивного фоторезиста, и характерный для негативного фоторезиста обратный профиль. Применяются два метода обращения позитивного фоторезиста: путем термической или химической сшивки.

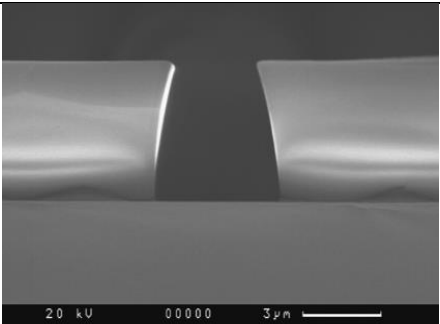
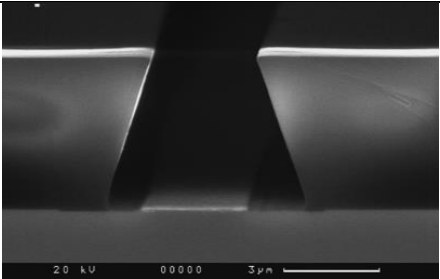
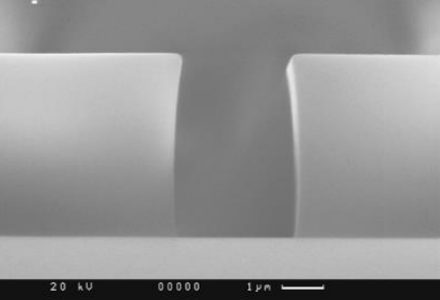
Обращение с помощью термической сшивки возможно только со специальными фоторезистами (image reversal photoresists), в состав которых введены специальные добавки. Недостатком данных фоторезистов является небольшой срок годности.

Метод обращения позитивного фоторезиста с помощью химической сшивки можно использовать со всеми видами фоторезистов, основным реагентом процесса является аммиак. При экспонировании позитивного фоторезиста через фотошаблон, основное светочувствительное вещество которого сульфозфиры нафтохинондиазидов превращается в инденкарбоновую кислоту, с выделением азота как побочного продукта. Далее в процессе термической обработки в среде аммиака инденкарбоновая кислота превращается в инден. При повторном экспонировании без шаблона сульфозфиры нафтохинондиазидов в неэкспонированных до этих областей, превращается в инденкарбоновую кислоту. В ходе проявления в слабом щелочном растворе, области, подвергнутые экспонированию через фотошаблон, не проявляются, а подвергнутые экспонированию без фотошаблона – проявляются, т.к. инден является более устойчивым к щелочному проявителю веществом, чем инденкарбоновая кислота. Используя данный процесс можно регулировать наклон боковой грани маски фоторезиста, осуществляя изменение параметров процесса (а именно времени первого и второго экспонирования, времени и температуры обработки в среде аммиака).

Процесс аммиачного переворачивания проводился на установке Image Reversal YES 10 TA, представляющей собой камеру с точно контролируемыми: температурой и парциальными давлениями аммиака и азота. В ходе исследования режимов проведения процесса было установлено время выдержки в среде аммиака 1300 сек, данный интервал является оптимальным для

химической сшивки разорванных связей без пересушивания фоторезиста. Температура процесса выбрана равной 80 °С, т.к. при температуре ниже 75 °С происходит частичное растворение фоторезиста при проявлении, что является следствием частичной сшивки химических связей. При температуре выше 90 °С происходит сшивка связей в слабозасвеченных областях и профиль маски фоторезиста может становится прямым, как при проведении прямой фотолитографии (таблица 3.5).

Таблица 3.5. Профили фоторезиста.

№	1е время эксп., сек	2е время эксп., сек	Изображение СЭМ	
1	10	40		
2	13	50		
3	30	360		

Для создания маски фоторезиста с различными вариантами наклона боковой грани исследовано влияние времени экспонирования пленки фоторезиста марки AZ4533 через фотошаблон до процесса термической обработки в среде аммиака (1е время экспонирования) и без фотошаблона после обработки (2е время экспонирования). Контроль топологии маски

осуществлялся с использованием растровой (сканирующей) электронной микроскопии, описанной в разделе 2.5.

При варьировании профиля угла наклона боковой грани маски фоторезиста, можно получить контактные шины различной конфигурации. Для создания отражающих шин в виде усеченных "пирамид" оптимальный профиль наклона боковых граней фоторезиста формируется при режиме №2: 1e экспонирование 13 сек, 2e – 50 сек.

Контактные системы на основе серебра

Использование серебра обусловлено его высокой электропроводностью, а также высокой пластичностью данного материала, позволяющего увеличить толщину контактных шин без разрастания на фоточувствительную область прибора [A14, A15]. Для анализа технологических особенностей процесса электрохимического осаждения серебра проведен ряд исследований с использованием бесцианистого электролита серебрения следующего состава: AgNO_3 – 20 г/л, KCO_3 – 25 г/л, калий железистосинеродистый – 60 г/л, $\text{pH} = 8.0$, $T = 18\text{-}25\text{ }^\circ\text{C}$, анод – сталь, катодная плотность тока (DC): $J_{\text{Ag}} = 0.01\text{ мА/мм}^2$. Низкая химическая активность и осаждение при комнатной температуре при использовании данного электролита способствуют целостности маски фоторезиста и позволяют осаждать более толстые слои.

При проведении электрохимического процесса осаждения серебра через маску фоторезиста с заданным профилем боковых граней (согласно расчетам в разделе 3.1) серебро, благодаря высокой пластичности, повторяет профиль маски фоторезиста и позволяет формировать контактные шины с гладкой, зеркальной поверхностью боковых граней (рис. 3.9). Было изучено осаждение слоев серебра с использованием режимов постоянного и импульсного тока. При проведении процесса осаждения серебра в режиме импульсного тока (АС) наблюдалось формирование дендритов, что вело к низкой плотности осадков из-за формирования пор. Осаждение качественных слоев серебра без пор и с высокой

адгезией к поверхности структуры проводилось только при постоянном токе ($J_{Ag} = 0.01 \text{ мА/мм}^2$).

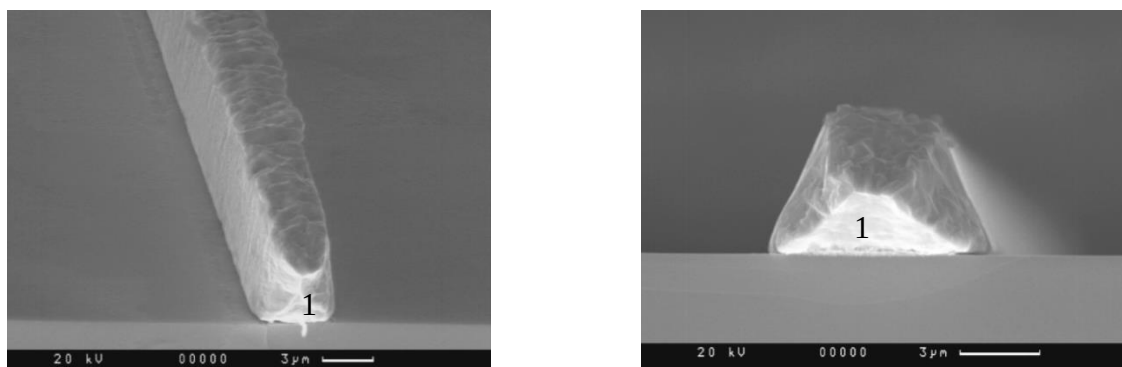


Рис. 3.9. Изображения СЭМ скола контактных шин (1) в виде усеченной "пирамиды", полученных путем электрохимического осаждения Ag.

Для проведения последующей операции пайки/бондинга элементов ФЭП при их монтаже осуществляется нанесение промежуточного слоя никеля на поверхность серебра, выполняющего функцию барьерного слоя, и верхнего слоя золота толщиной 0.1-0.2 мкм. Слой никеля осаждается из электролита никелирования, следующего состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 70-75 г/л, Na_2SO_4 – 40-45 г/л, H_3BO_3 – 20-25 г/л, NaCl – 5-10 г/л, $\text{pH} = 5.6-5.8$, $T = 20-25 \text{ }^\circ\text{C}$; анод – никель, катодная плотность тока (DC): $J_{\text{Ni}} = 0.05 \text{ мА/мм}^2$, $t = 1 \text{ мин}$. Слой золота – из цианистого электролита золочения: $\text{K}[\text{Au}(\text{CN})_2]$ – 30 г/л, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ – 80 г/л, $\text{pH} = 5.2-5.0$, $T = 50-60 \text{ }^\circ\text{C}$, анод – золото, катодная плотность тока (DC): $J_{\text{Au}} = 0.02-0.2 \text{ мА/мм}^2$.

Преимуществом использования серебра при формировании контактных систем является его высокая электрическая проводимость и возможность формирования шин заданной конфигурации, обеспечивающей оптимальный баланс омических и оптических потерь на ввод излучения в ФЭП. Однако серебро не обладает значительной стойкостью к воздействию факторов окружающей среды и не может использоваться без защитного слоя золота. Применение контактной системы на основе серебра может использоваться при изготовлении высокомоощных приборов.

Контактные системы на основе золота

Альтернативным вариантом утолщения омических контактов является электрохимическое осаждение слоя золота. Для анализа технологических особенностей процесса электрохимического осаждения золота проведен ряд исследований с использованием различных золотых электролитов при варьировании режимов осаждения [A13].

Цианистый электролит золочения

Наиболее используемым является цианистый электролит золочения, основные преимущества которого – разработанная технология изготовления электролита и технологического процесса осаждения, большой срок годности.

Для задания топологии прибора формирование контактов осуществляется через маску позитивного фоторезиста. Однако при использовании цианистого электролита золочения происходит разрушение маски фоторезиста химически активными ионами $(CN)^-$, нарушение адгезии фоторезиста к поверхности гетероструктуры и подрастание слоя золота на проводящую фоточувствительную область (рис. 3.10, *a*). С целью уменьшения разрастания слоя золота проведен ряд исследований по формированию масок для проведения электрохимического осаждения. Исследованы однослойные маски из фоторезиста различных марок: AZ1518, AZ4533 и AZ4562, и двуслойные маски, состоящие из слоя диэлектрического материала: Si_3N_4 , TiO_2 или SiO_2 , и слоя фоторезиста. В ходе эксперимента обнаружено снижение разрушения маски фоторезиста при проведении высокотемпературного задубливания до 130-150 °C. Однако при увеличении температуры задубливания происходит "опливание", изменение профиля фоторезиста, что сказывается на форме контактных шин. При использовании двуслойной маски с подслоем диэлектрика достигнуто уменьшение подрастания золота за счет изоляции проводящей полупроводниковой поверхности структуры (рис. 3.10, *b*).

Улучшение адгезии осаждаемого слоя Au к поверхности гетероструктуры, улучшение монолитности и увеличение плотности слоя золота, наблюдалось при

осаждении на импульсном токе и при изменении плотности тока в процессе осаждения: $J_0 = 0.002 \text{ мА/мм}^2$ в течении 2-4 мин для оптимизации процесса зародышеобразования золота, с последующим увеличением плотности тока до $0.02-0.03 \text{ мА/мм}^2$ для задания оптимальной скорости роста, при скважности 0.25, частоте 33 Гц. (рис. 3.10, *b*).

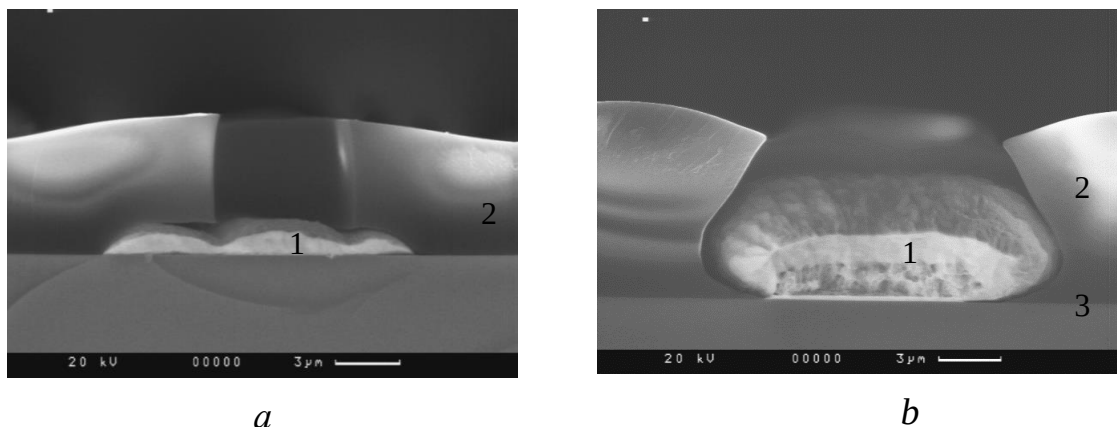


Рис. 3.10. Изображение СЭМ скола контактной шины (1), полученной путем электрохимического осаждения Au из цианистого электролита через маску фоторезиста (2) (*a*) и через двуслойную маску (*b*): слой диэлектрика (3) + слой фоторезиста (2).

Снижение степени разрушения маски фоторезиста при осаждении золота возможно при использовании бесцианистых электролитов золочения: сульфитного и электролита на основе NaAuCl_4 .

Сульфитный электролит золочения

Сульфитный золотой электролит имеет короткий срок эксплуатации (~ 1 месяца) и обладает нестабильностью в процессе работы. Эти недостатки затрудняют процесс его использования в лабораторных условиях. Состав электролита: $\text{K}_3[\text{Au}(\text{SO}_3)_2]$ – 0.03 моль/л, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$ – 0.3 моль/л, H_3PO_4 – 0.15 моль/л, $\text{pH} = 7.9 - 8.1$, $T = 50-60 \text{ }^\circ\text{C}$, анод – золото, катодная плотность тока (DC): $J_{\text{Au}} = 0.001-0.03 \text{ мА/мм}^2$. Режим осаждения при начальной низкой плотности тока 0.001 мА/мм^2 в течении 2-4 мин, и последующем увеличении плотности тока до $0.01-0.03 \text{ мА/мм}^2$ для задания оптимальной скорости роста.

Основным преимуществом использования сульфитного электролита является рост золотого осадка без подрастания под фоторезист и без разрушения маски фоторезиста, что позволяет осуществлять формирование золотого контакта в строгом соответствии с заданной конфигурацией. Однако было обнаружено нарушение адгезии осаждаемого материала к поверхности напыленных контактных систем, что проявлялось в образовании щели под осажденным слоем золота при скалывании образца (рис. 3.11). Для улучшения адгезии золотого осадка проведено исследование влияния процесса обработки поверхности напыленных контактных систем методом ионно-лучевого травления на глубину 5-10 нм. Однако при этом наблюдается процесс переосаждения контактного материала на поверхности маски фоторезиста, что приводит к образованию тонкого слоя проводящего материала на боковой грани маски и, как следствие, осаждение на него слоя золота при проведении электрохимического процесса. Данный процесс ведет к изменению конфигурации контактных шин и к образованию наростов золота на периферийной области контактов.

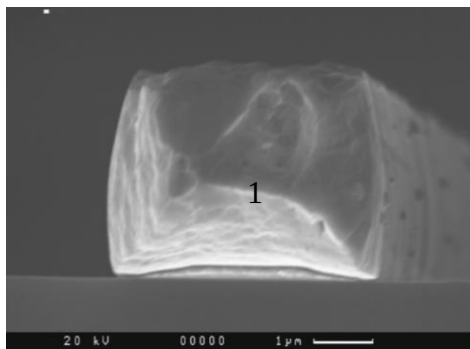


Рис. 3.11. Изображение СЭМ скола контактной шины (1), полученной путем электрохимического осаждения Au из сульфитного электролита.

Электролит золочения на основе NaAuCl_4

Проведена разработка электрохимического утолщения контактов из электролита золочения на основе NaAuCl_4 , который обладает несколько большим сроком эксплуатации, чем сульфитный золотой электролит, описанный

выше. Для увеличения срока службы до 3-4 месяцев данный электролит требует особых условий хранения: в темноте и при температуре $+5 - +8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разработанный состав электролита золочения: $\text{NaAuCl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 0.03\text{ моль/л}$, $\text{Na}_2\text{SO}_3 - 0.21\text{ моль/л}$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - 0.21\text{ моль/л}$, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 - 0.15\text{ моль/л}$, $\text{pH} = 7.1 - 7.5$, $T = 50-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, анод – золото, катодная плотность тока (DC): $J_{\text{Au}} = 0.005-0.01\text{ мА/мм}^2$. Осаждение ведется при начальной плотности тока 0.005 мА/мм^2 в течении 2-4 мин, и дальнейшем увеличении плотности тока до 0.01 мА/мм^2 в течении требуемого времени.

Процесс осаждения золота из электролита данного состава осуществляется через маску фоторезиста, без подрастания под маску и без разрушения маски, осадок формируется монолитный, без пор, с хорошей адгезией (рис. 3.12).

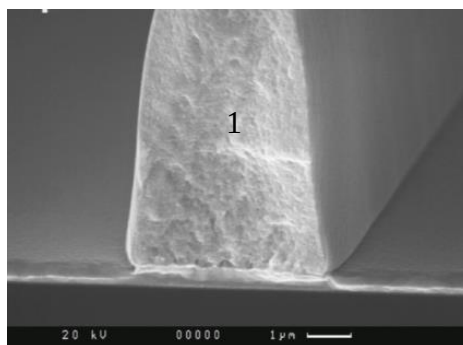


Рис. 3.12. Изображение СЭМ скола контактной шины (1), полученной путем электрохимического осаждения Au из электролита золочения на основе NaAuCl_4 .

Для проведения последующей операции пайки/бондинга кристаллов ФЭП при их монтаже, как и при изготовлении серебряных контактных шин, осуществляется нанесение промежуточного барьерного слоя никеля. Таким образом, контактная система включает основной слой золота толщиной 2-3 мкм, барьерный слой никеля толщиной 0.1-0.2 мкм и верхний слой золота толщиной 0.1-0.2 мкм.

Преимуществом электрохимического осаждения золота при формировании контактных систем является его высокая стойкость к воздействию факторов окружающей среды, а также высокая электрическая

проводимость. Однако при осаждении золота из цианистого электролита золочения происходит увеличение ширины контактной шины, что ведет к увеличению оптических потерь и к снижению точности задания топологии прибора. Преимуществом цианистых электролитов остается большой срок годности и высокая технологичность процесса, что обуславливает их широкое применение при изготовлении приборов, работающих при низких мощностях. При использовании сульфитного электролита золочения и электролита на основе NaAuCl_4 снижается технологичность процесса и увеличивается стоимость изготовления приборов из-за низкого срока годности электролитов, однако конфигурация контактных шин при этом может быть более точно задана в соответствии с рассчитанной топологией (см. раздел 3.1), обеспечивающей увеличение электрической проводимости контактов при минимальных оптических потерях на ввод излучения. При изготовлении высокомоощных ФЭП, в особенности предназначенных для работы в космосе, использование технологии бесцианистого золочения является приоритетной.

3.2.5. Влияние омических контактов на параметры каскадных фотоэлектрических преобразователей

Проведено исследование для определения влияния материала омических контактов на параметры ФЭП. Для сравнения электрической проводимости контактных шин были изготовлены тестовые образцы: на непроводящей подложке кремния были сформированы контактные шины разной конфигурации путем напыления слоев Cr/Au и электрохимического осаждение слоев золота толщиной 2-2.5 мкм и серебра толщиной 4-4.5 мкм. Серебро осаждалось только в режиме постоянного тока (DC) из бесцианистого электролита серебрения, а золото в различных режимах: при постоянном (DC) и переменном токе (AC) из цианистого электролита золочения. Были проведены измерения сопротивления отдельных контактных шин четырех-зондовым методом на лабораторном мультиметре B1/78, и выполнены расчеты соответствия удельного сопротивления контактов справочным данным.

Удельное сопротивление рассчитано по формуле: $\rho = R \cdot S / L$ (Ом·мм²/м), где ρ – удельное сопротивление, R – измеренное сопротивление, S – площадь поперечного сечения шины, L – длина шины. Справочные данные по удельному сопротивлению серебра и золота следующие: $\rho(\text{Ag})=0.015\div 0.016$ Ом·мм²/м; $\rho(\text{Au})=0.023$ Ом·мм²/м. Данные по измерениям и расчетам приведены в таблице 3.6 [A13].

Таблица 3.6. Зависимость удельного сопротивления контактных шин от материалов и режимов формирования.

№ обр	Мате- риал шины	$\rho_{\text{теор}}$, Ом·мм ² /м	Режим осаждения	№ шины	L, мм	S _{сеч} , мм ²	R _{изм} , Ом	$\rho_{\text{практ}}$, Ом·мм ² /м
1	Ag	0.015÷0.016	DC	1	19.7	4,07·10 ⁻⁵	12.17	0.025
				2	19.2		12.2	0.026
				3	19.2		12.1	0.025
2	Au	0.023	DC	1	15.1	4,06·10 ⁻⁵	8.5	0.028
				2	15.1		8.9	0.024
				3	15.1		9.1	0.024
3	Au		AC	1	20.8	3,64·10 ⁻⁵	13.27	0.023
				2	19.2		13.22	0.025
				3	18.7		11.5	0.024

Как видно из таблицы 3.6, удельные сопротивления контактных шин из золота и серебра близки по значениям. Соответственно удельное сопротивление контактных шин из золота соответствует справочным данным. Однако удельное сопротивление контактных шин из серебра несколько выше теоретического. Это может быть обусловлено структурой получаемых слоев, возможностью возникновения пористости и наличием примесей. Однако преимуществом использования серебра остается высокая технологичность процесса осаждения из бесцианистых электролитов при комнатной температуре, что обеспечивает возможность создавать шины большего сечения, за счет увеличения толщины контактов без разрастания на фоточувствительную область ФЭП.

При создании контактных шин из серебра в виде усеченных "пирамид" с зеркальными боковыми гранями шириной 3-10 мкм и толщиной 4-8 мкм,

расположенных с шагом 50-100 мкм происходит снижение оптических потерь ФЭП, за счет отражения солнечного излучения от боковых граней шин. Формирование шины большего сечения позволяет снизить резистивные потери за счет увеличения электрической проводимости контактов. Выполнен расчет последовательного сопротивления (R_s) каскадных ФЭП с различными контактными системами. Значение R_s ФЭП с планарными Au шинами (с шагом 50 мкм) составило $15.5 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, а формирование Ag "пирамидальных" шин позволило уменьшить последовательное сопротивление до $13 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, что привело к увеличению в 1.2 раза максимальной кратности солнечного излучения, преобразуемого ФЭП.

Сравнительные характеристики GaInP/GaInAs/Ge ФЭП СИ, изготовленных на одной гетероструктуре с Ag "пирамидальными" и Au планарными шинами приведены на рис. 3.13. Увеличение внешнего квантового выхода фотоответа субэлементов составило 2-3% для ФЭП с "пирамидальными" контактными шинами из Ag, что свидетельствует о снижении оптических потерь (рис. 3.13, *a*). Максимальный КПД ФЭП с серебряными контактами составляет 35.7% при степени концентрирования (K_c) 1000 солнц и не менее 35.0% в диапазоне 300-2000 солнц (АМ 1.5D, 1000 Вт/м^2). Максимальный КПД ФЭП с золотыми контактами составляет 33.8% при степени концентрирования 500-1000 солнц (рис. 3.13, *b*) [A13]. Увеличение эффективности ФЭП при большей кратности концентрирования СИ свидетельствует о снижении оптических потерь.

Таким образом, модификация оптических и резистивных свойств каскадных ФЭП при использовании серебра для создания контактов без увеличения оптических потерь на ввод излучения привело к росту КПД на ~2% при степени концентрирования солнечного излучения 1000 солнц и увеличило рабочий диапазон концентрирования до 3000 солнц без существенного снижения КПД.

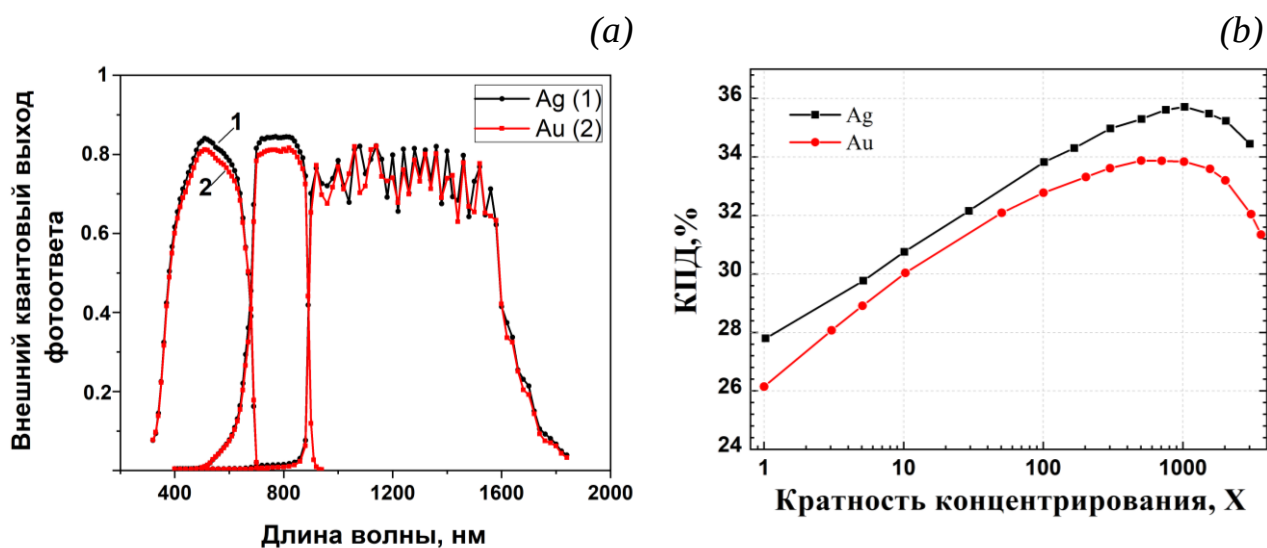


Рис. 3.13. Спектральная характеристика каскадного ФЭП на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge (a) и эффективность (КПД) (b) ФЭП с Ag "пирамидальными" шинами и Au планарными шинами в зависимости от степени концентрирования солнечного излучения (AM1.5D).

3.3. Антиотражающие покрытия

Формирование антиотражающего покрытия (АОП) на поверхности полупроводниковых приборов предназначено для снижения оптических потерь на отражение поступающего излучения.

Для ФЭП, преобразующих широкий спектральный диапазон солнечного излучения (350–1800 нм), проведены исследования различных многослойных АОП [44, 73, A2]. Согласно требованиям высокой химической стойкости, возможности нанесения с использованием технологии фотолитографии и оптическим характеристикам, предъявляемым к АОП возможно использование многослойных покрытий на основе $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ (где x близок к 2). Преимуществом использования данных материалов является возможность нанесения с помощью метода магнетронного распыления с большой равномерностью по толщине слоев (см. раздел 1.4).

3.3.1. Исследование методов травления контактного слоя GaInP/GaInAs/Ge гетероструктуры

Формирование исследуемых гетероструктур ФЭП на основе GaInP/GaInAs/Ge завершается ростом контактного слоя GaAs, обеспечивающего снижение удельного контактного сопротивления при формировании омического контакта. Однако слой GaAs поглощает излучение на длине волны менее 900 нм, что ведет к необходимости его селективного удаления для "открытия" фоточувствительной области гетероструктуры.

Одним из способов удаления GaAs является химическое травление в аммиачно-перекисном травителе, обладающим высокой селективностью по отношению к нижележащему слою широкозонного окна $Al_{0.52}In_{0.48}P$ толщиной 30-40 нм. Травление проводится локально через маску фоторезиста или фронтального омического контакта. Преимуществом нанесения АОП на первом этапе формирования элементов является отсутствие металла (контактов) на поверхности гетероструктуры, что увеличивает качество поверхности травления контактного слоя GaAs через маску фоторезиста (рис. 3.14, *a*). При травлении контактного слоя через маску фронтального омического контакта, содержащего серебро, в аммиачно-перекисном травителе происходит пассивация поверхности GaAs и остановка травления из-за высокой чувствительности компонентов к металлическим примесям в растворе (рис. 3.14, *b*). При изготовлении фронтального металлического контакта на основе золота, являющегося инертным материалом к составу травителя, травление контактного слоя можно проводить через маску контакта, окисления поверхности не происходит. Использование контакта в качестве маски для удаления GaAs увеличивает точность задания топологии прибора за счет исключения дополнительной фотолитографии с совмещением рисунка прибора (рис. 3.14, *c*).

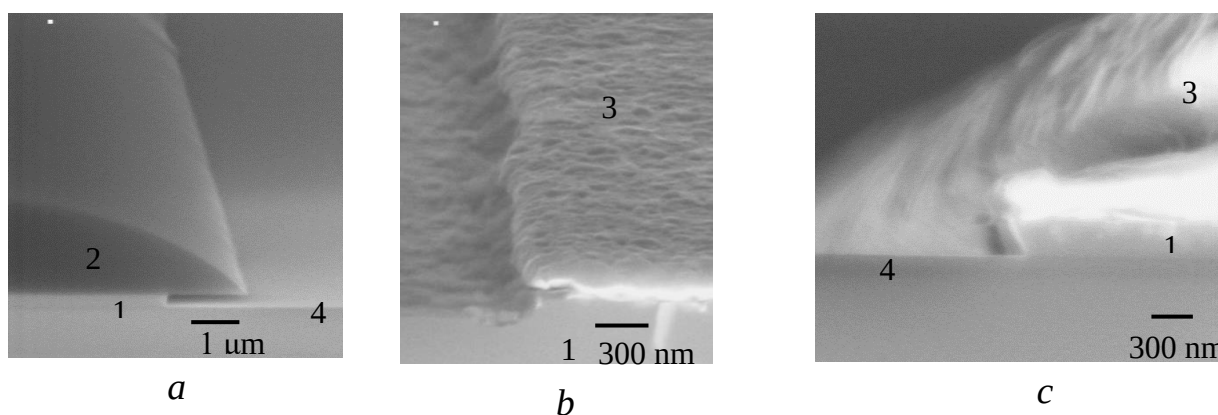


Рис. 3.14. Изображение СЭМ скола структуры ФЭП после травления контактного слоя (1) методом химического травления через маску: *a* - фоторезиста (2); *b* - металлического контакта с Ag (3), *c* - металлического контакта с Au (3) до слоя AlInP (4).

Для проведения локального химического травления контактного слоя GaAs исследован ряд травителей, обеспечивающих высокую точность и качество поверхности, необходимое для формирования АОП с минимальным коэффициентом отражения поступающего излучения. Хорошую селективность при травлении контактного слоя GaAs до стоп-слоя AlInP обеспечивает травитель на основе $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$ в соотношении 1:2, однако скорость травления очень высокая, порядка 2 мкм/мин, что сильно усложняет контроль процесса травления GaAs толщиной 0.3-0.5 мкм. Для снижения скорости травления GaAs до 0.5 мкм/мин и увеличения точности задания топологии ФЭП разработан травитель следующего состава: $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ в объемном соотношении 1:2:50, а также травитель на основе лимонной кислоты 50% и H_2O_2 в соотношении 4:1.

Альтернативным методом травления контактного слоя является реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ) в плазме BCl_3 и SF_6 , обеспечивающего высокую точность задания топологии прибора за счет анизотропности травления (рис. 3.15). Основные режимы: 10-15 см³/мин BCl_3 , и 3-6 см³/мин SF_6 при давлении 1-2 Па, мощности емкостной плазмы 50-100 мВт/см² и индуктивно-связанной плазмы 1.5-2.0 Вт/см². Особенностью метода РИПТ является формирование нарушенного слоя, для удаления которого исследован ряд химических травителей на основе перекиси водорода с

добавлением ортофосфорной или серной кислоты ($\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ или $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$).

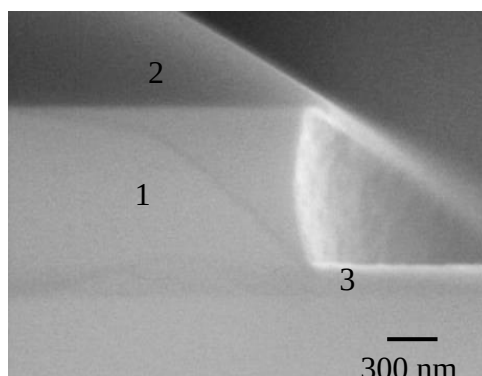


Рис. 3.15. Изображение СЭМ скола ФЭП после травления контактного слоя (1) методом РИПТ через маску фоторезиста (2) до слоя AlInP (3).

Особенностью химического травления является процесс образования на поверхности гетероструктуры слоя естественного окисла после химической обработки и промывки деионизованной водой. Толщина и состав естественного окисла зависят от состава используемого травителя. Наличие окисла на фоточувствительной поверхности может приводить к нарушению адгезии АОП, и увеличению коэффициента отражения поступающего излучения (рис. 3.16, *a*).

Для увеличения качества поверхности гетероструктуры проведены исследования метода ионно-лучевого травления в среде Ar для ее очистки и удаления слоя окисла непосредственно перед осаждением АОП (рис. 3.16, *b*) [A2]. При варьировании ускоряющего напряжения (U), получены разные скорости травления (V) широкозонного окна $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$ и, соответственно, разные состояния поверхности: $U = 100 \text{ В}$, $V = 0.3 \text{ Å/s}$; $U = 300 \text{ В}$, $V = 0.8 \text{ Å/сек}$.

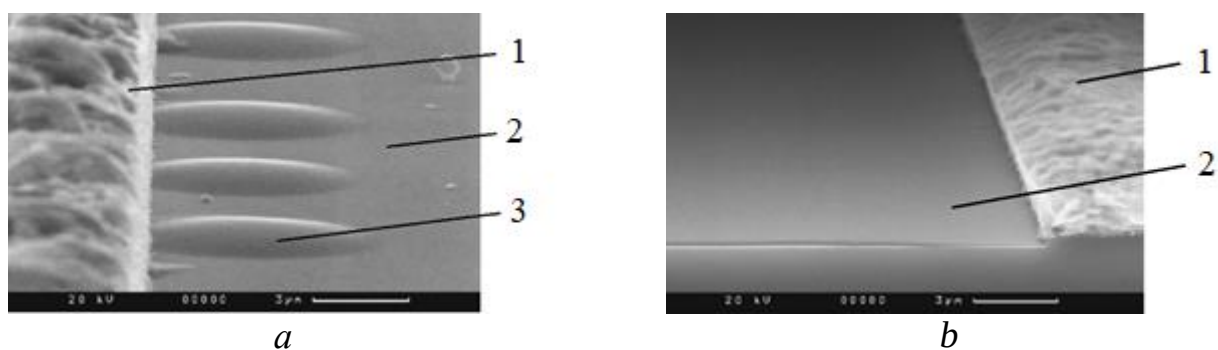


Рис. 3.16. Изображение СЭМ поверхности структуры после травления контактного слоя методом химического травления и нанесения АОП (а) и с дополнительной обработкой поверхности методом ионно-лучевого травления (b). 1 – металлический контакт, 2 – АОП, 3 – нарушение адгезии АОП.

3.3.2. Влияние обработки поверхности и состава антиотражающего покрытия на характеристики фотоэлектрических преобразователей

Проведено исследование влияния параметров травления контактного слоя GaAs на коэффициент отражения от поверхности тестовой структуры AlGaAs/GaAs с нанесенным АОП на основе слоев TiO_x/SiO_2 . Было установлено, что состав травителей и режимы процесса не оказывают существенного влияния на величину коэффициента отражения в рабочем диапазоне длин волн ФЭП, но позволяют улучшить адгезию осаждаемых слоев и точность задания топологии приборов (рис. 3.17).

Наиболее технологичными и оптимальными методами подготовки фоточувствительной области ФЭП с точки зрения передачи заданной топологии, скорости травления контактного слоя GaAs и высокой адгезии АОП являются следующие:

- Метод РИПТ с последующим удалением нарушенного слоя в сильно разбавленном травителе на основе перекиси водорода и серной кислоты ($H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$).

- Метод химического травления в сильноразбавленном травителе на основе $NH_4OH+H_2O_2$ с дополнительной обработкой ионным пучком при $U = 100$ В.

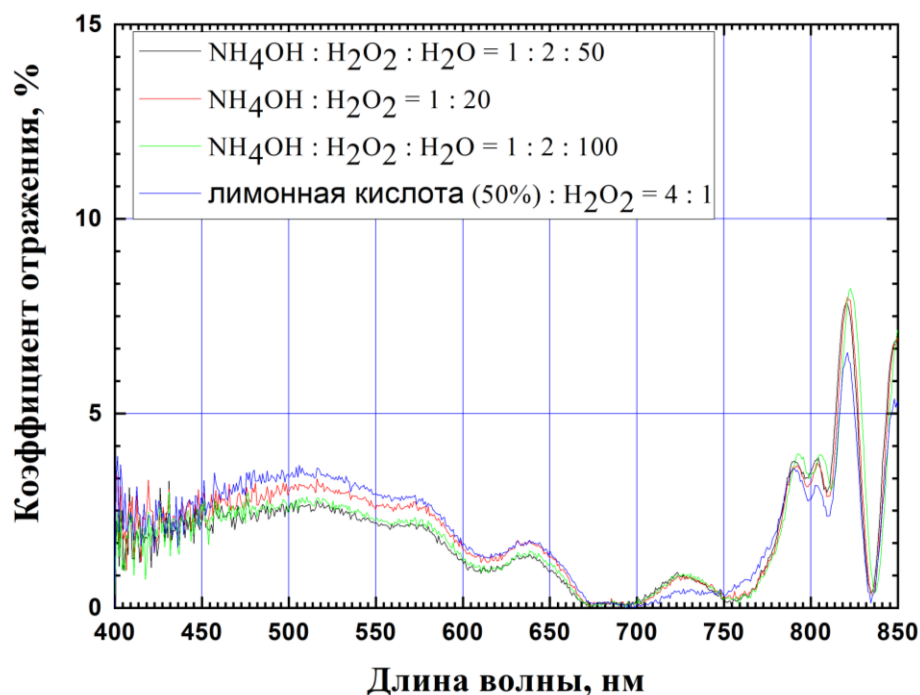


Рис. 3.17. Зависимость коэффициента отражения от поверхности структуры AlGaAs/GaAs с АОП $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ для различных составов и режимов травления контактного слоя GaAs.

В обоих методах достигнут коэффициент отражения менее 3% в диапазоне длин волн 450-850 нм – в области чувствительности верхних двух субэлементов (рис. 3.18). Следует отметить, что чувствительность германиевого субэлемента находится в диапазоне длин волн 950-1600 нм, и так как ток, вырабатываемый германиевым субэлементом превышает ток верхних двух субэлементов на 20-30% [74], то согласно условию согласования субэлементов по току, основные требования по снижению коэффициента отражения накладываются на диапазон длин волн 350-950 нм.

Использование трехслойного антиотражающего покрытия $\text{TiO}_x/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ позволяет еще больше снизить отражение в области спектра, соответствующей чувствительности верхнего и среднего переходов. Введение слоя Si_3N_4 обусловлено его оптическими параметрами и возможностью его получения методом магнетронного распыления, что обеспечивает технологическую совместимость с другими слоями АОП (SiO_2 и TiO_x). Показатель преломления

Si_3N_4 $n = 2$ является промежуточным значением между показателями преломления SiO_2 ($n = 1.46$) и TiO_x ($n = 2.46$).

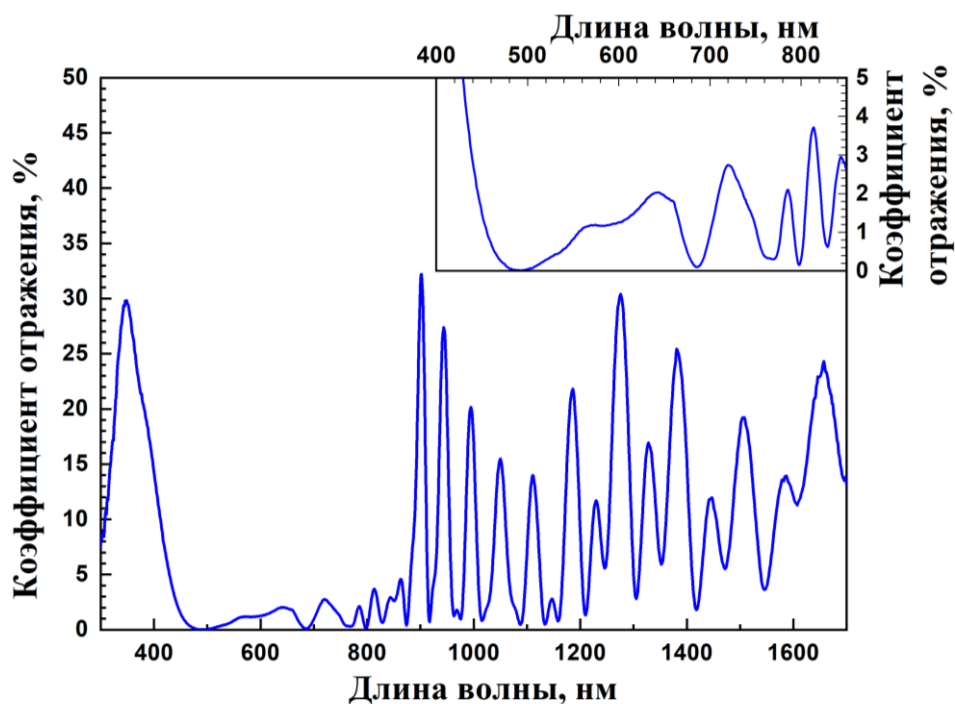


Рис. 3.18. Спектральная характеристика коэффициента отражения от поверхности гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge с АОП $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$.

Выводы к разделу 3.3

Приведены исследования методов подготовки гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge ФЭП СИ перед осаждением АОП. Разработана технология травления контактного слоя гетероструктуры с использованием комбинированных методов химического, реактивного ионно-плазменного и ионно-лучевого травления. Высокое качество состояния поверхности достигнуто при использовании метода РИПТ с последующим химическим удалением нарушенного слоя, а также при использовании метода химического травления с дополнительной обработкой ионным пучком. Рассмотрено влияние методов травления контактного слоя и состава АОП на основе $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ и на характеристики ФЭП СИ. Достигнуто значение коэффициента отражения менее 3% в диапазоне длин волн 450-850 нм.

3.4. Меза-структура каскадных фотоэлектрических преобразователей

Процесс формирования мезы GaInP/GaInAs/Ge структуры оказывает влияние на состояние ее боковой поверхности и выходящих на торец элемента p - n переходов. Кристаллическая решетка полупроводниковой структуры резко обрывается на поверхности меза-структуры, при этом образуются дефекты, что ведет к увеличению количества приповерхностных центров безызлучательной рекомбинации, и, соответственно, к росту скорости поверхностной рекомбинации фотогенерированных носителей. Это приводит к тому, что область вблизи мезы становится обедненной неосновными носителями. Формирование дефектов и протравов на поверхности мезы вносит дополнительный вклад в рост токов утечки, т.е. к доминированию "тунельно-ловушечного" механизма токопрохождения, а также нарушается целостность боковой поверхности, что снижает качество защитного диэлектрического слоя, создаваемого на боковой поверхности кристаллов.

3.4.1. Исследование методов формирования мезы GaInP/GaInAs/Ge структуры

Для формирования мезы GaInP/GaInAs/Ge структуры проведены исследования методов химического, электрохимического [A16, A17] и реактивного ионно-плазменного травления [A18].

В основе химического метода лежит химическая реакция жидкого травителя и твердого тела, в результате которой образуется растворимое соединение. Преимуществами химического травления являются низкая стоимость использованного оборудования, высокая стойкость маски фоторезиста, отсутствие радиационных дефектов и большой выбор химических реактивов [43]. Недостатками являются ухудшение качества поверхности за счет продуктов реакции, большое различие скоростей травления разных по химическим свойствам слоев и латеральное травление под маску фоторезиста, приводящее к снижению точности задания топологии ФЭП.

Процесс РИПТ осуществляется в плазме тлеющего разряда, состоящей из заряженных частиц, участвующих в химических реакциях на поверхности структуры. Для каждого материала, подвергаемого РИПТ, подбирается соответствующий реактивный газ. Для удаления с поверхности остатков органических фоторезистов травление осуществляется в кислородсодержащей плазме ($\text{CF}_4 + \text{O}_2$). Травление полупроводниковых соединений A3B5 осуществляется в хлорсодержащей плазме (BCl_3) [75, 76].

Травление слоев гетероструктуры проводится через маску, обеспечивающую защиту фоточувствительной области элемента и омических контактов. Преимуществом РИПТ является высокая точность задания топологии прибора за счет отсутствия бокового подтравливания под маску фоторезиста, к недостаткам следует отнести наличие радиационных дефектов и частичное разрушение маски.

Разработка технологии формирования защитной маски позволяет увеличить ее стойкость к травлению. Для ФЭП разработана многослойная маска, включающая слои антиотражающего диэлектрического покрытия и слоя фоторезиста. Слои АОП $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$ обладают высокой устойчивостью к РИПТ, что позволяет создавать ровный край меза-структуры.

Гетероструктура ФЭП содержит два фотоактивных p - n перехода в A3B5 полупроводниковых материалах на базе GaInP и GaInAs и фотоактивный переход в Ge подложке, причем все p - n переходы имеют электрическую низкоомную развязку в виде туннельных диодов. В структуре может содержаться брэгговский отражатель на основе сверхрешетки $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$. Основной сложностью травления структуры данного состава является наличие тонких слоев туннельных диодов, толщиной 30 нм, и в ряде случаев брэгговского отражателя, состоящего из набора тонких слоев толщиной порядка 70 нм. При химическом травлении гетероструктуры в большинстве травителей происходит протравливание напряженных слоев малой толщины, до 30-70 нм, что ведет к образованию уступов на боковой поверхности мезы, вследствие различия скоростей травления разных по составу слоев. Кроме

того, различие физико-химических свойств слоев гетероструктуры и германиевой подложки ведет к необходимости исследования различных травителей для обеспечения возможности формирования ровной боковой поверхности мезы и снижения токов утечки.

Проведены исследования и разработки различных методов: РИПТ, одностадийного и двухстадийного химического травления, комбинирование химического и электрохимического методов, а также комбинирование РИПТ и химического травления разных по составу многослойных гетероструктур.

Метод РИПТ

РИПТ гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge осуществляется в комбинированной плазме индуктивного и емкостного разряда (ICP/RIE) в потоке рабочего газа BCl_3 . Процесс РИПТ включает набор технологических параметров, оказывающих влияние на скорость и однородность травления отдельных слоев гетероструктуры и подложки, а также на стойкость маски, закрывающей фоточувствительную область ФЭП. Основными параметрами РИПТ являются: давление в камере, мощность индуктивно связанной плазмы (ICP), мощность смещения (RIE), напряжение смещения, температура столика (Т), на котором располагается образец.

Для обеспечения высокого качества травления были проведены различные исследования по оптимизации указанных параметров РИПТ: мощность индуктивного источника составила 600 Вт, мощность емкостного источника – 100 Вт. Поток рабочего газа (BCl_3) составил $40 \text{ см}^3/\text{мин}$, что позволяет поддерживать оптимальную скорость травления всех слоев гетероструктуры порядка $0.6\text{-}0.8 \text{ мкм}/\text{мин}$. Давление в рабочей камере составило 0.5 Па [А18].

Травление гетероструктуры осуществлялось на глубину, превышающую суммарную толщину эпитаксиальных слоев гетероструктуры (порядка 5-6 мкм) на 1-4 мкм в германиевую подложку для протравливания Ge *p-n* перехода. Разработанные режимы травления обеспечили получение боковой поверхности мезы без селективных протравов по отдельным слоям гетероструктуры,

благодаря выравниванию скоростей травления отдельных слоев, и за счет использования разработанной двуслойной маски, состоящей из диэлектрического слоя, используемого в качестве АОП с нанесенным сверху толстым (5-8 мкм) слоем фоторезиста (рис. 3.19).

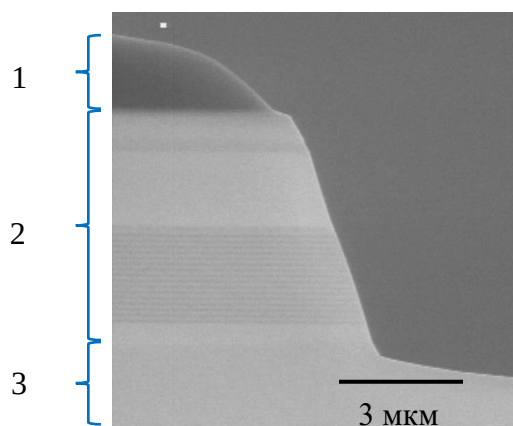


Рис. 3.19. Изображение СЭМ скола структуры ФЭП после РИПТ. 1 – маска, 2 – гетероструктура GaInP/GaInAs/Ge, 3 – германиевая подложка.

Однако при формировании меза-структуры с использованием метода РИПТ образуется нарушенный слой, удаление которого проводится с использованием метода химического травления на глубину 30-100 нм в составах на основе ортофосфорной или серной кислоты с добавлением перекиси водорода ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ или $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$).

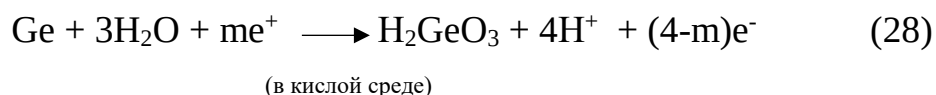
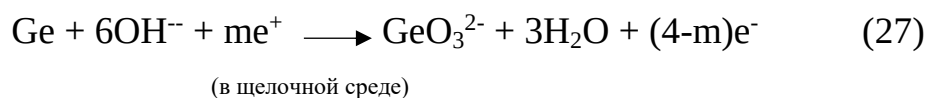
Методы химического и электрохимического травления

Разработка и модификация состава слоев гетероструктуры приводит к необходимости тщательной проработки и исследования методов химического и электрохимического травления при работе с новой гетероструктурой.

Метод электрохимического травления

Проведена разработка электрохимического травления подложки германия в электролите на основе водного раствора глицерина [A16]. Состав электролита варьируется в следующих диапазонах: 25-50 г/л глицерина и 0.2-21 г/л, и выбирается в пределах устойчивости фоторезиста. При концентрации КОН больше 8 г/л устойчивость фоторезиста уменьшается и происходит разрушение

маски фоторезиста. Наиболее оптимальным с точки зрения скорости травления германия и устойчивости фоторезиста выбран следующий состав электролита: 40 г/л глицерина и 2 г/л КОН. Анодное растворение германия начинается при потенциале 0.15 В, в ходе процесса образуется германий (IV) и небольшое количество (II).



В данном исследовании процесс проводится в щелочной среде. В процессе анодного растворения германия участвуют электроны и дырки. При низких плотностях тока ($j < 3 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$) скорость анодного растворения не зависит от типа проводимости германия. При больших плотностях тока ($j > 3 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$), скорость анодного растворения начинает зависеть от поверхностной концентрации дырок и лимитируется скоростью диффузии дырок из объема к поверхности полупроводника, следовательно, потенциал анодной поляризации для германия *n*-типа резко возрастает. Анодное растворение германия при использовании электролита на основе водного раствора глицерина, указанного состава, проходит при больших плотностях тока ($j \approx 10^{-1} \text{ А/см}^2$). С увеличением удельного электрического сопротивления германия *p*-типа увеличивается потенциал его анодной поляризации, так как при этом уменьшается концентрация дырок. Таким образом, с увеличением сопротивления кривые анодной поляризации германия *n*- и *p*-типа сближаются даже в области больших значений плотности тока и сливаются для германия с собственной проводимостью.

При внешнем напряжении около 9 В на анодно поляризованном электроде из германия *n*-типа проводимости происходит резкое возрастание тока анодного растворения, вызванное лавинным процессом генерации дырок. При напряжении больше 15 В уменьшается адгезия фоторезиста к поверхности полупроводниковой структуры и происходит боковое подтравливание.

Оптимальным является напряжение 10 В, скорость анодного растворения германия при этом составляет 1 мкм/мин при комнатной температуре 18-23 °С, и практически не зависит от типа проводимости германия [77]. При этом остальные слои структуры не растворяются.

Метод химического травления в два технологических этапа

Разработана методика формирования мезы при травлении структуры и германиевой подложки в 2 технологических этапа (рис. 3.20). На первом этапе создается маска фоторезиста с узкой мезой, осуществляется травление слоев гетероструктуры селективно до германиевой подложки в травителе на основе бихромата калия и бромистоводородной кислоты следующего состава: $K_2Cr_2O_7$ 80-110 г/л + HBr 80-110 г/л. Состав травителя подбирается для задания наиболее оптимальной скорости травления ~ 0.5 мкм/мин [А16]. На втором этапе создается маска фоторезиста с широкой мезой, с шириной на 15-30 мкм больше, чем на первом этапе. Боковая поверхность мезы многослойной структуры остается закрытой фоторезистом, не происходит травления слоев структуры. Следующим этапом осуществляется травление германиевой подложки на глубину превышающую залегание p - n перехода методом химического или электрохимического травления.

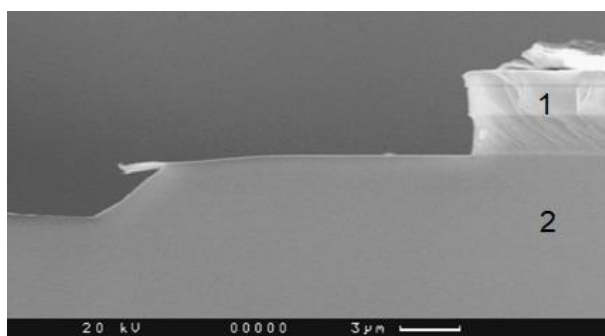


Рис. 3.20. Изображение СЭМ скола структуры ФЭП после травления меза-структуры в два технологических этапа: 1 – GaInP/GaInAs, 2 - германиевая подложка

Метод одностадийного химического травления

Снижение трудозатрат при изготовлении кристаллов ФЭП возможно при формировании меза-структуры в едином технологическом цикле с использованием одной маски.

Для проведения одностадийного химического травления мезы разработан состав травителя, в котором осуществляется неселективное травление, как слоев многослойной структуры, так и германиевой подложки. Травитель выполнен на основе бромистоводородной кислоты и перекиси водорода, следующего состава: $\text{HBr}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ в объемном соотношении 8:1:140 [А17]. Травитель является сильноразбавленным, что позволяет выровнять скорости травления слоев структуры и получить ровную вертикальную боковую поверхность мезы травления. Скорость травления структуры составляет 0.08-0.11 мкм/мин при температуре $T = 30\text{-}32\text{ }^\circ\text{C}$.

Важным аспектом травления в сильноразбавленном травителе является сохранение пропорционального соотношения объемов реагентов травителя, бромистоводородной кислоты и перекиси водорода, с площадью поверхности травления. В противном случае в процессе травления расходуется один из компонентов, состав травителя меняется, однородность процесса травления нарушается, происходит протравливание структуры по тонким слоям. Для решения проблемы протрава слоев структуры предложено увеличить объем травителя в соответствии с увеличением площади травления. На рис. 3.21 представлено изображение СЭМ одностадийного травления многослойной гетероструктуры ФЭП в травителе следующего состава $\text{HBr } 80\text{ мл} : \text{H}_2\text{O}_2\text{ } 8\text{ мл} : \text{H}_2\text{O } 1100\text{ мл}$, площадь структуры 22 см^2 .

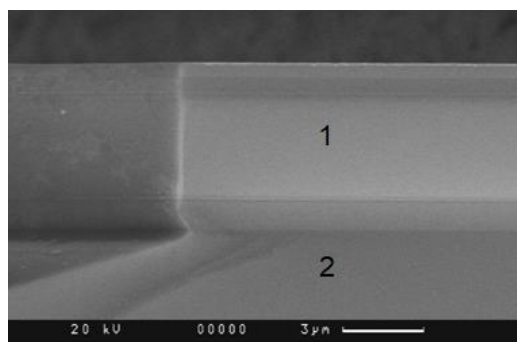


Рис. 3.21. Изображение СЭМ скола структуры ФЭП после одностадийного химического травления: 1 – GaInP/GaInAs, 2 – германиевая подложка.

Недостатком используемого травителя является очень низкая скорость травления, которая ведет к увеличению чувствительности к примесям в растворе и на поверхности обрабатываемой структуры. Также происходит выявление слоев структуры в разных кристаллографических плоскостях при использовании малого объема травителя, однако данное свойство травителя может быть использовано в исследовательских целях для диагностики отдельных слоев гетероструктуры.

Преимуществом данного метода травления является возможность проведения процесса в одном технологическом цикле с использованием одного травителя. Боковая поверхность мезы ровная, без протравов и уступов, обеспечивающая наилучшие условия пассивации боковой поверхности. Это особенно важно для утонённых эпитаксиальных структур толщиной ≤ 100 мкм.

Метод двухстадийного химического травления

Для увеличения скорости травления меза-структуры и надежности процесса разработана методика двухстадийного травления через одну маску фоторезиста. Травление многослойной структуры до германиевой подложки осуществляется в селективном травителе на основе бихромата калия и бромистоводородной кислоты, с высокой скоростью травления, порядка 5 мкм/мин. Травление германиевой подложки с одновременным выравниванием боковой поверхности мезы многослойной структуры проводится в полирующем сильноразбавленном травителе на основе бромистоводородной кислоты и

перекиси водорода, обладающим высокой однородностью травления всех слоев структуры (рис. 3.22).

Недостатком метода является высокая чувствительность сильноразбавленного травителя к примесям в растворе, что снижает надежность процесса и может приводить к снижению выхода годных элементов.

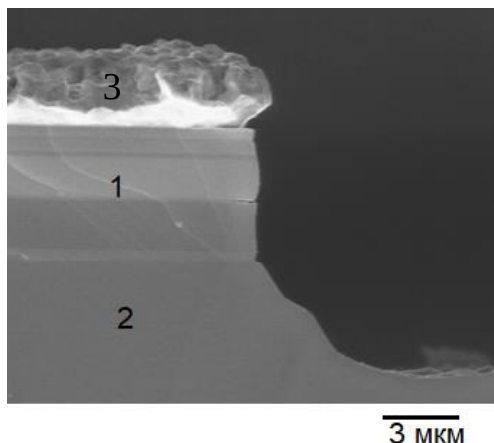


Рис. 3.22. Фотография СЭМ скола структуры ФЭП после двухстадийного химического травления: 1 – GaInP/GaInAs, 2 – германиевая подложка, 3 – контакт.

Преимуществом данной технологии травления является высокое качество боковой поверхности мезы, без существенных протравов и уступов по слоям структуры, что обеспечивает возможность надежной пассивации боковой поверхности мезы при нанесении защитного диэлектрического покрытия.

Метод двухстадийного химического и электрохимического травления

Наиболее надежным и технологичным является комбинация химического травления слоев гетероструктуры в травителе на основе бихромата калия и бромистоводородной кислоты ($K_2Cr_2O_7$ 80-110 г/л + HBr 80-110 г/л) с последующим травлением германиевой подложки методом электрохимического травления в слабощелочном травителе на основе глицерина (25-50 г/л глицерина и 0.2-21 г/л KOH) с использованием одной маски фоторезиста (рис. 3.23).

Недостатком метода является формирование уступа под слоями гетероструктуры при травлении германиевой подложки, что усложняет процесс

пассивации боковой поверхности мезы при осаждении слоя диэлектрического покрытия.

Преимуществом данного метода является высокая технологичность процесса с проведением травления по одной маске фоторезиста, а также высокое качество поверхности травления слоев гетероструктуры и германиевой подложки, что ведет к снижению токов утечки по боковой поверхности мезы.

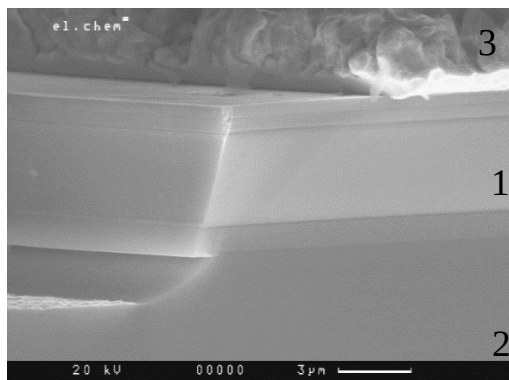


Рис. 3.23. Изображение СЭМ скола ФЭП после двухстадийного химического травления: 1 – GaInP/GaInAs, 2 – германиевая подложка, 3 – контакт.

3.4.2. Влияние методов формирования мезы на скорость поверхностной рекомбинации фотоэлектрических преобразователей

Для сравнения методов формирования меза-структуры проведены измерения темновых вольт-амперных характеристик (при прямом смещении) ФЭП на основе одной гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge, полученных при использовании технологии РИПТ и двухстадийного химического и электрохимического травления мезы [А18]. На темновых ВАХ ФЭП, изготовленных с использованием метода химического травления, наблюдаются токи утечки в диапазоне 10^{-8} - 10^{-7} А при напряжении $U = 0.5$ -1 В на большинстве исследованных элементов. В ФЭП, изготовленных с использованием технологии РИПТ достигнуты минимальные значения токов утечки, которые составляют менее 10^{-9} А при $U < 1$ В (рис. 3.24).

Скорость поверхностной рекомбинации прямо пропорциональна темновому току:

$$I_{нов.} = q \cdot V \cdot n_i \cdot P \cdot W_s \quad (29)$$

$I_{нов.}$ – поверхностная рекомбинация, q – заряд электрона, V – скорость поверхностной рекомбинации, n_i – собственная концентрация носителей, P – периметр p - n перехода, W_s – ширина области объемного заряда по периферии p - n перехода.

Таким образом, формирование мез GaInP/GaInAs/Ge структур традиционными методами химического травления приводит к разбросу значений темнового тока и избыточным токам поверхностной рекомбинации, из-за селективного травления твердых растворов по периферии кристаллов. Определено, что комбинация реактивного ионно-плазменного травления и химического удаления нарушенного слоя неселективна, обеспечивает единообразное формирование геометрии меза структур и ведет к уменьшению количества приповерхностных безызлучательных центров рекомбинации, снижая тем самым скорость поверхностной рекомбинации более чем на 2 порядка, что выявляется в особенностях прямой ветви ВАХ.

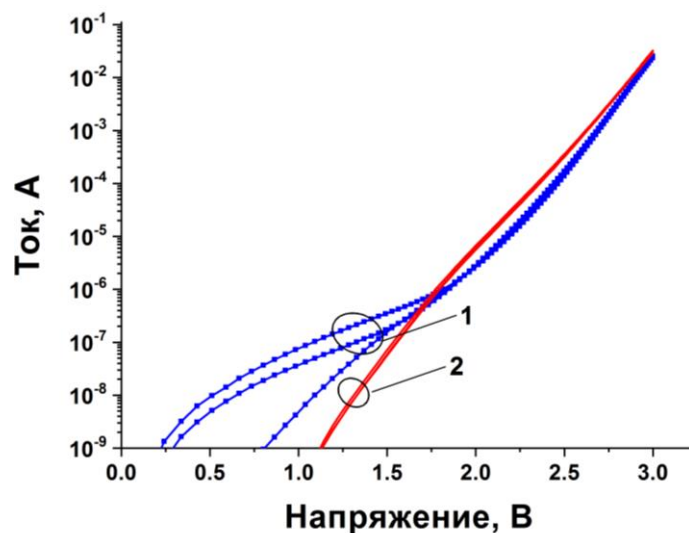


Рис. 3.24. Темновые ВАХ ФЭП после создания меза-структуры методами: 1 – химического и электрохимического травления, 2 – РИПТ с химическим удалением нарушенного слоя.

3.4.3. Снижение деградации характеристик фотоэлектрических преобразователей при воздействии факторов окружающей среды

Увеличение стойкости и снижение деградации параметров фотоэлектрических преобразователей достигнуто при пассивации меза-структуры диэлектрическими и защитными покрытиями на основе силикона, наносимых на плавный профиль периферийных меза-поверхностей.

В качестве диэлектрического покрытия использовалась плёнка нитрида кремния толщиной $1000 \text{ \AA}$, нанесённая методом низкотемпературного плазмоактивированного пиролиза силана (см. раздел 1.4). Использование нитрида кремния в качестве защитной маски обусловлено его высокими барьерными свойствами для диффузии молекул воды и кислорода, а также его низкой скоростью окисления. Выбор способа нанесения обусловлен тем, что при проведении плазмоактивированного пиролиза происходит наилучшее покрытие ступеней боковой поверхности мезы.

Еще одним важным элементом дополнительной защиты прибора является его герметизация. Она необходима для увеличения защиты ФЭП и снижения степени деградации фотоэлектрических параметров. Проведена разработка технологии герметизации элементов после их монтажа на теплоотводящую плату с использованием силикона марки Elastosil® S690 и защитного пкровного стекла толщиной 130-170 мкм [78-80]. Стекло защищает кристаллы ФЭП от частиц пыли и сопутствующих механических повреждений. Силикон надёжно герметизирует ФЭП, защищает фронтальную область элементов, а также выполняет функцию адгезива для приклеивания защитного стекла [A19]. Стекло и силикон имеют близкие коэффициенты преломления, что позволяет исключить дополнительные потери на отражение излучения от границы стекло-силикон.

Для анализа качества герметизации проведены исследования распределения электролюминесценции по поверхности до и после герметизации образцов ФЭП с использованием оптического микроскопа и цифровой фотокамеры, при пропускании заданного тока через ФЭП (10 мА). Равномерное

свечение ФЭП по всей фронтальной поверхности свидетельствует об отсутствии дефектов и утечек тока как при монтаже ФЭП на плату, так и при проведении процесса герметизации ФЭП путем нанесения слоя силикона и механического прижима защитного стекла.

Для анализа влияния пассивации и герметизации мезы на степень деградации параметров ФЭП при воздействии факторов окружающей среды были проведены испытания по термоциклированию элементов при повышенной до 85% влажности и перепадах температур от минус 40 °С до плюс 85 °С. После проведения термоциклирования на темновых ВАХ при прямом смещении ФЭП без защитных покрытий наблюдается значительное увеличение токов утечки до 10^{-2} А на большом количестве (более 25%) исследованных образцов (рис. 3.25, а); на ФЭП с защитным покрытием Si_3N_4 наблюдается увеличение токов утечек до 10^{-4} А на 15% элементов (рис. 3.25, б). Возрастание тока утечки может происходить из-за небольшой толщины слоя Si_3N_4 (100-150 нм), что приводит к снижению стойкости при длительном термоциклировании. Однако в рабочем диапазоне тока (более 10^{-4} А) ФЭП утечки не наблюдается, что свидетельствует о возможности использования защитного покрытия в технологии изготовления солнечных элементов.

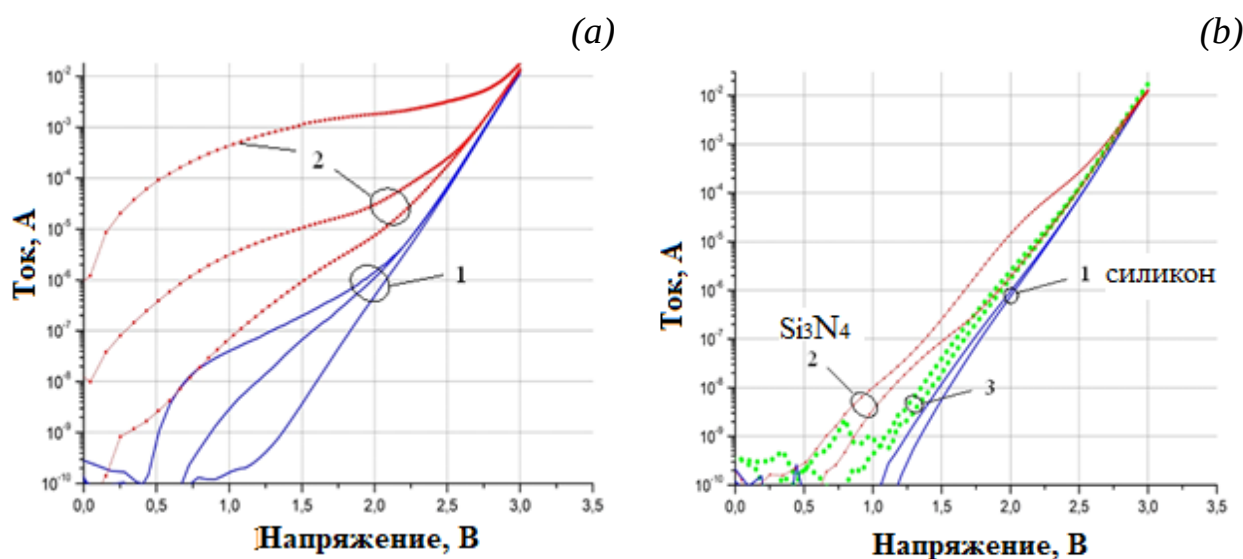


Рис. 3.25. Темновые ВАХ при прямом смещении ФЭП без защитного покрытия (а) и с защитными покрытиями (б) – с Si_3N_4 (2) и с дополнительной герметизацией силиконом (3) – до проведения процесса термоциклирования при повышенной влажности (1) и после (2,3).

На ВАХ ФЭП после их герметизации силиконом практически не наблюдается изменения токов утечек после проведения испытания по термоциклированию, что свидетельствует о высоком качестве и стойкости покрытия на основе Si_3N_4 +силикон к воздействию факторов окружающей среды (рис. 3.26).



Рис. 3.26. Влияние пассивации и герметизации меза-структуры на деградацию параметров ФЭП при воздействии факторов окружающей среды.

Вывод к разделу 3.4

Приведены исследования методов формирования меза-структуры ФЭП, изучены преимущества и недостатки различных технологических процессов. Разработаны методы травления мезы с использованием комбинированных методов на основе РИПТ, химического и электрохимического травления, выполнены исследования влияния методов формирования мез на фотоэлектрические параметры ФЭП. Значения токов утечки $< 10^{-7}$ А при $U < 1$ В для всех разработанных технологий свидетельствуют о высоком качестве боковой поверхности мезы и надежности технологического процесса ее формирования.

Использование технологии РИПТ является более дорогостоящим методом и требует проведения дополнительного процесса удаления нарушенного слоя. Преимуществом метода является снижение скорости поверхностной рекомбинации более чем на 2 порядка, высокая воспроизводимость параметров на большой площади обрабатываемой структуры (до 4 дюймов).

Преимуществом методов химического и электрохимического травления является низкая стоимость процесса, высокая технологичность и надежность при качественной разработке технологии.

Проведены исследования по снижению деградации параметров ФЭП к воздействию факторов окружающей среды при пассивации *p-n*-переходов путем осаждения пленок нитрида кремния и герметизации ФЭП слоем силикона и защитным покровным стеклом. Результаты испытаний на стойкость покрытий показали отсутствие деградации ФЭП в рабочем диапазоне токов (более 10^{-4} А) при повышенной влажности и значительных перепадах температур на 95% исследованных образцов.

3.5. Характеристики концентраторных каскадных фотоэлектрических преобразователей

По результатам проведенных исследований по формированию омических контактов, антиотражающего покрытия и травления меза-структуры изготовлены ФЭП с различной топологией. На рис. 3.27 приведены фотографии кристаллов ФЭП размером 2×2 мм² с диаметром фоточувствительной области 1.8 мм (*a*), 3.4×3.0 мм² с размером фоточувствительной области 2.8×2.8 мм² (*б*), предназначенных для преобразования концентрированного солнечного излучения.

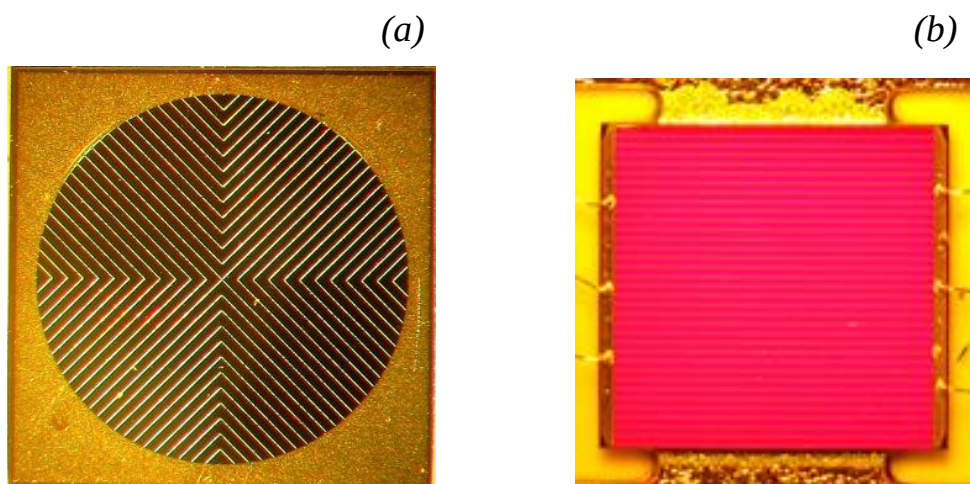


Рис. 3.27. Фотографии ФЭП различной топологии, *a* – 2×2 мм², *б* – 3.4×3.0 мм².

Для анализа проведенных исследований выполнены измерения фотоэлектрических характеристик изготовленных ФЭП на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge при преобразовании концентрированного солнечного излучения в диапазоне 1-3000 солнц.

На рис. 3.28 приведена спектральная характеристика ФЭП, рассчитаны плотности фототока для спектра AM1.5 (1000 Вт/м^2) отдельных субэлементов: $J_{Q\text{внеш}}(\text{GaInP}) = 14.1 \text{ мА/см}^2$; $J_{Q\text{внеш}}(\text{GaInAs}) = 14.0 \text{ мА/см}^2$; $J_{Q\text{внеш}}(\text{Ge}) = 20.5 \text{ мА/см}^2$. Принимая во внимание эти значения плотности фототока, следует особое внимание уделить снижению потерь на отражение поступающего излучения в области чувствительности верхних двух субэлементов GaInP и GaInAs в диапазоне длин волн 400-850 нм, так как они имеют близкие значения плотности фототока, которые существенно ниже, чем у Ge субэлемента. Для оптимизации фотоэлектрических параметров ФЭП проведены исследования и разработки технологии формирования АОП на основе слоев $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$, обеспечивающих минимальные значения коэффициента отражения (менее 3%) поступающего излучения в данном спектральном диапазоне (см. раздел 3.3).

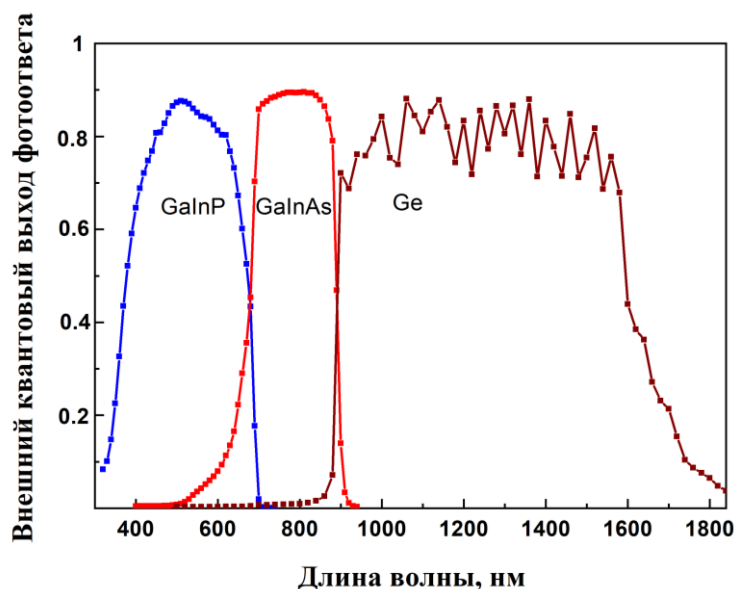


Рис. 3.28. Спектральная характеристика ФЭП на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge размером $3.4 \times 3.0 \text{ мм}^2$.

На рис. 3.29 представлены зависимости характеристик ФЭП: эффективности ($KПД$), фактора заполнения ВАХ (FF), напряжения холостого

хода (U_{xx}) – от кратности концентрирования солнечного излучения (AM1.5). Линейный рост напряжения холостого хода свидетельствует о термостабильности исследуемых элементов в процессе измерения. Контактная система оптимизирована на преобразование концентрированного излучения (200-500 солнц), в данном диапазоне достигнуты значения фактора заполнения $BAX\ FF > 85\%$ и КПД $> 36\%$.

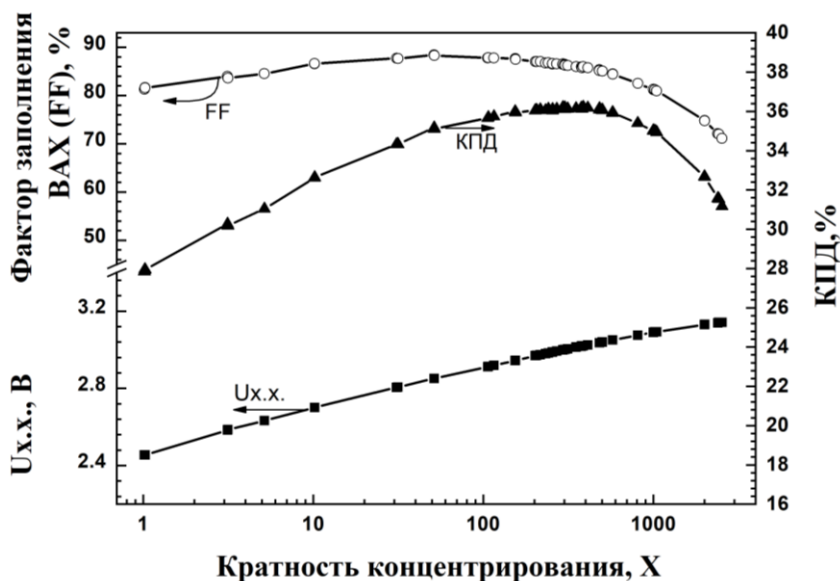


Рис. 3.29. Зависимость эффективности (КПД), фактора заполнения $BAX\ (FF)$, напряжения холостого хода (U_{xx}) $GaInP/GaInAs/Ge$ ФЭП (размером $3.4 \times 3.0\text{ мм}^2$) от кратности концентрирования солнечного излучения.

Выводы к главе 3

Проведены исследования и разработки технологии формирования ФЭП на основе гетероструктуры $GaInP/GaInAs/Ge$, выращенной методом МОС ГФЭ на германиевой подложке p -типа проводимости.

Исследованы различные контактные системы к $GaAs$ и Ge n - и p -типа проводимости. Минимальные значения удельного контактного сопротивления $2 \cdot 10^{-6}\text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к $GaAs$ n -типа проводимости достигнуты при формировании контактных систем на основе $Au(Ge)/Ni/Au$ и $Pd/Ge/Au$. Выявлено влияние типа и уровня легирования распыляемого германия при формировании контактной системы и на основе $Pd/Ge/Au$ к $GaAs$ n -типа проводимости, достигнуты значения контактного сопротивления $2 \cdot 10^{-6}\text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ после вжигания при

предельно низкой температуре 185 °С 60 мин при использовании n^+ -Ge ($3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Разработана новая контактная система на основе NiCr/Ag/Au к GaAs и Ge p -типа проводимости с низким контактным сопротивлением $(2-3) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к слою p -Ge и $(2-4) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к слою p -GaAs, обладающая хорошей адгезией слоев к поверхности гетероструктуры и низкой степенью диффузии материалов вглубь полупроводника.

Выполнены расчеты оптимальной конфигурации шин фронтального контакта трапецевидного сечения и проведена разработка технологии их формирования путем электрохимического осаждения контактных материалов на основе слоев Ag/Ni/Au. Достигнуто снижение оптических и омических потерь при изготовлении мощных ФЭП, предназначенных для преобразования сильно концентрированного солнечного излучения (более 300 солнц).

Проведены исследования формирования АОП на фоточувствительной области ФЭП. Достигнута высокая адгезия и качество осаждаемых слоев АОП на основе многослойных систем $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$, получен коэффициент отражения менее 3% в диапазоне длин волн 450-850 нм.

Предложено решение по подавлению поверхностной рекомбинации по периферии кристаллов ФЭП путем оптимизации методов травления мез GaInP/GaInAs/Ge структур с использованием комбинации реактивного ионно-плазменного и химического травления. Предложенный метод обеспечивает формирование плавного профиля периферийных меза-поверхностей, ведет к снижению скорости поверхностной рекомбинации и создает оптимальные условия для формирования сплошных диэлектрических защитных покрытий на основе Si_3N_4 и силикона. Пассивация меза-поверхностей обеспечивает подавление деградационных процессов при воздействии факторов окружающей среды (температуры, влажности), и ведет к увеличению выхода годных приборов до 95%.

В результате проведенных исследований изготовлены ФЭП на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge с КПД более 36% (AM1.5) при кратности концентрирования 200-500 солнц.

Глава 4. Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения ($\lambda=1300-1700$ нм) на основе GaSb структуры

Фотоэлектрические преобразователи на основе антимонида галлия используются в различных системах: при изготовлении каскадных солнечных элементов GaAs/GaSb [81, 82], в термофотоэлектрических генераторах [10], а также для преобразования лазерного излучения с длиной волны 1300-1700 нм [13, 83]. ФЭП ЛИ широко используются для беспроводной передачи энергии удаленному источнику, например, для дистанционного электропитания космических летательных аппаратов, при создании солнечных электростанций, в волоконно-оптических линиях связи, для зарядки бытовых приборов [84]. При длине волны лазерного излучения 1300-1700 нм наблюдаются минимальные оптические потери, а также минимальная дисперсия в оптических волокнах, что обоснует использование эффективного ФЭП на основе GaSb.

4.1. Омические контакты к GaSb *n*- и *p*-типа проводимости

Увеличение плотности мощности лазерного излучения, преобразуемого ФЭП, ведет к необходимости модификации резистивных свойств приборов, направленной на разработку контактных систем с низким контактным сопротивлением и высокой электрической проводимостью, обеспечивающих снижение последовательного сопротивления прибора и увеличение эффективности его работы.

Известно большое количество различных контактных систем, однако разработка приборов включает оптимизацию и согласование различных технологических методов, в совокупности обеспечивающих увеличение КПД, срок эксплуатации ФЭП и выход годных приборов. Формирование *p-n* перехода методом диффузии Zn через диэлектрическое покрытие, выполняющего также функцию антиотражающего покрытия, ведет к необходимости разработки технологии формирования контактных систем с минимальной глубиной диффузии (<20 нм) вглубь структуры при проведении термического отжига.

Снижение температуры вжигания при сохранении низкого удельного контактного сопротивления обеспечит снижение деградации ФЭП в процессе их изготовления и увеличит выход годных приборов за счет предотвращения локального шунтирования p - n перехода, формируемого на малой глубине от поверхности.

Исследование контактных систем проводилось на образцах GaSb p -типа проводимости, полученных методом диффузии Zn, с уровнем легирования 10^{20} см^{-3} . А также на подложках GaSb n -типа проводимости с уровнем легирования $(4-6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $(1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (измерено методом Холла, см. раздел 2.5). Перед напылением контактных систем проводилась предварительная обработка структур с использованием метода ионно-лучевого травления ионами аргона, обеспечивающего высокое качество и чистоту поверхности (см. раздел 1.4). Выполнены исследования следующих контактных систем: Cr/Au, Cr/Ag, Cr/Ag(Mn), NiCr/Ag/Au к GaSb p -типа проводимости, и Au(Ge)/Ni/Au, Au(Te)/Au, Au/Ni/Au к GaSb n -типа проводимости. Технология формирования контактов и измерения удельного контактного сопротивления методом LTLM подробно изложены в разделе 3.2.

При высоком уровне легирования p -GaSb ВАХ структур были линейны без проведения термического отжига контактных систем (таблица 4.1). Проведение дополнительного отжига в атмосфере H_2 при температуре 190-250 °C оказывает слабое влияние на величину удельного контактного сопротивления. Минимальное значение контактного сопротивления $(1-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к GaSb p -типа проводимости достигнуто при использовании новой разработанной системы на основе NiCr/Ag/Au. Преимуществом использования NiCr является высокая адгезия к поверхности полупроводника, а также низкая степень диффузионного обмена атомами с полупроводником (глубина проникновения не более 15 нм), что препятствуют диффузии серебра и золота в структуру GaSb и предотвращает шунтирование p - n перехода (см. раздел 3.2).

Измерения удельного контактного сопротивления и сопротивления растекания диффузионного слоя GaSb проведены с использованием метода

LTLM. Значение сопротивления растекания составило 22.2 Ом/квадрат, что свидетельствует о низком уровне резистивных потерь.

Таблица 4.1. Величина удельного сопротивления омических контактов к p^+ -GaSb.

Параметры отжига	Удельное переходное контактное сопротивление, Ом·см ²			
	Cr/Au	Cr/Ag	Cr/Ag(Mn)	NiCr/Ag/Au
H ₂ , 190 °C	(7-9)·10 ⁻⁶	(2-3)·10 ⁻⁵	(3-4)·10 ⁻⁵	(2-4)·10 ⁻⁶
H ₂ , 230-250 °C	(1-2)·10 ⁻⁵	(2-3)·10 ⁻⁵	(2-3)·10 ⁻⁵	(1-2)·10 ⁻⁶

При формировании омического контакта к слаболегированному ($4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) GaSb n -типа проводимости наблюдается образование потенциального барьера металл/полупроводник. Снижение данного потенциального барьера достигается при введении в контактную систему легирующей примеси, которая в процессе термического отжига дополнительно легирует приповерхностную область полупроводника и ведет к снижению удельного контактного сопротивления.

Проведено исследование зависимости удельного контактного сопротивления систем с легирующей примесью на основе Au(Ge)/Ni/Au, Au/Ni/Au и Au(Te)/Au от температуры термического отжига при разном уровне легирования n -GaSb. К слаболегированному GaSb ($4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) минимальное контактное сопротивление $(2-3) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ получено в системе на основе Au/Ni/Au при температуре отжига 300 °C. Увеличение степени легирования n -GaSb ($2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) позволяет существенно снизить значение контактного сопротивления до $(2-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при использовании контактной системы Au(Ge)/Ni/Au при температуре отжига 240-260 °C в атмосфере водорода (рис. 4.1, а). Снижение температуры отжига обеспечивается введением Ge в приповерхностную область полупроводника. Для контактной системы на основе Au(Te)/Au минимальное значение удельного контактного сопротивления $(2-3) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ достигнуто при более высокой температуре отжига 340 °C, что может быть обосновано слабой диффузией Te в полупроводник при более низких температурах (рис. 4.1, б).

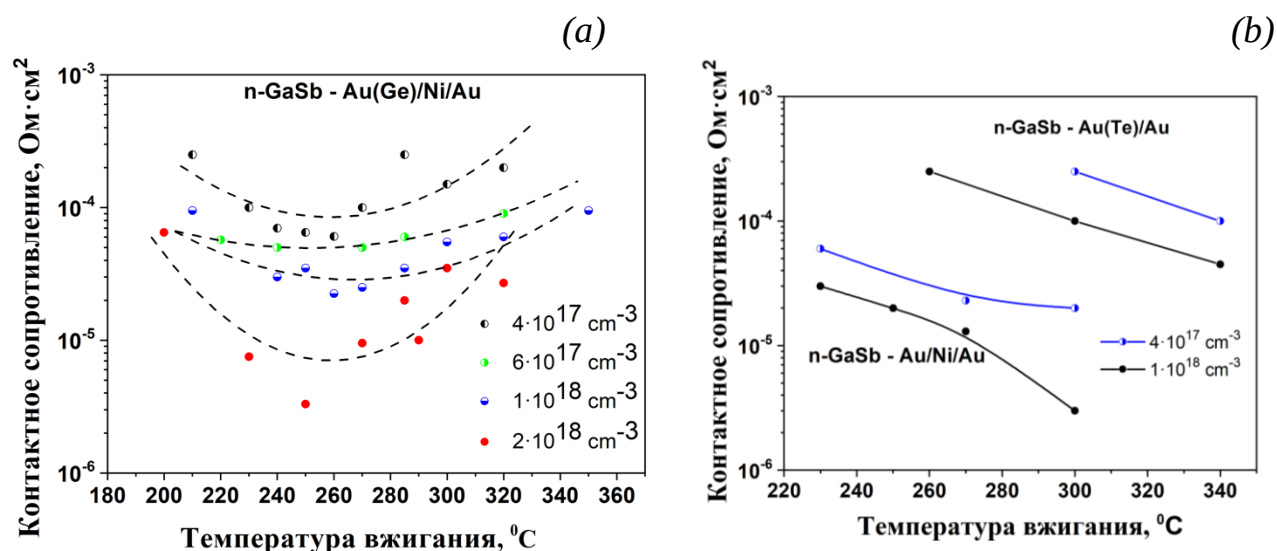


Рис. 4.1. Зависимость удельного сопротивления омических контактов к n-GaSb от температуры отжига при различной концентрации легирующей примеси подложки.

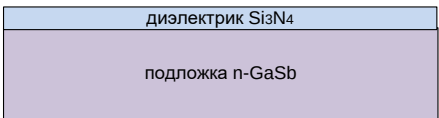
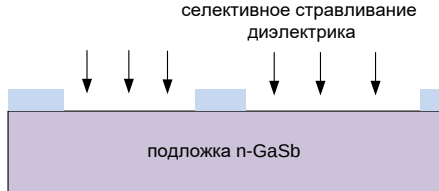
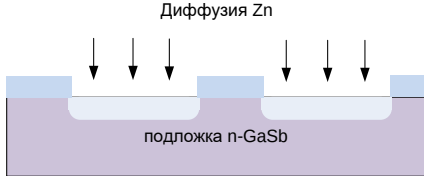
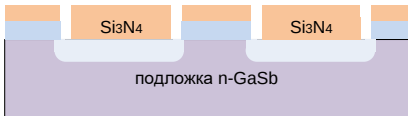
Для увеличения электрической проводимости фронтального и тыльного омических контактов проводится их электрохимическое утолщение путем осаждения контактных систем на основе Au/Ni/Au или Ag/Ni/Au. Выбор контактной системы обусловлен особенностью эксплуатации готовых приборов. Контактная система на основе Au/Ni/Au обладает высокой химической стойкостью к воздействию факторов окружающей среды и может применяться при изготовлении приборов, подверженных воздействию больших перепадов температур, влажности и радиации. При изготовлении мощных ФЭП наиболее актуальна контактная система на основе Ag/Ni/Au. Конфигурация контактных шин при этом может быть выполнена в виде усеченных "пирамид" с зеркальными боковыми гранями, что обеспечивает снижение омических и оптических потерь за счет отражения поступающего излучения от зеркальной поверхности контактных шин (см. раздел 3.1). При этом для преобразования излучения большей плотности тока (до 550 A/cm^2) контактные шины могут быть созданы большей ширины и/или с меньшим шагом без дополнительных потерь на затенение фоточувствительной области ФЭП (описание электрохимического утолщения контактов изложено в разделе 3.2).

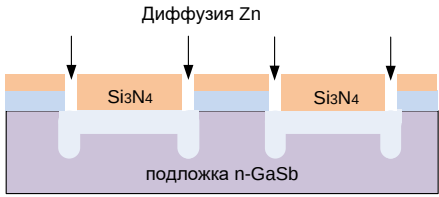
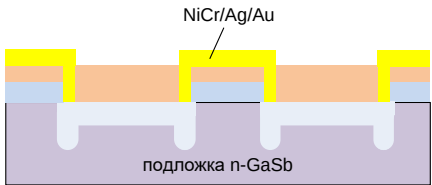
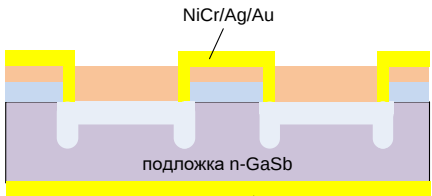
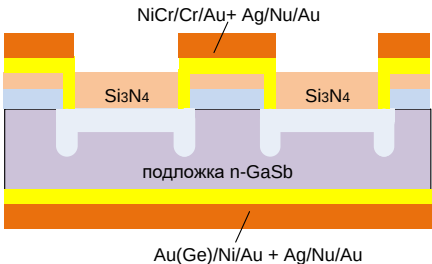
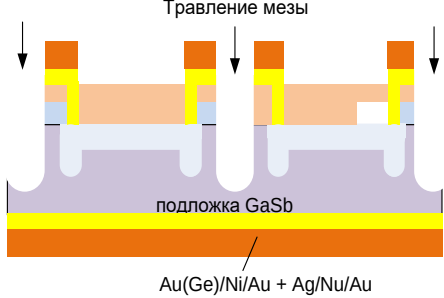
4.2. Исследование характеристик GaSb фотоэлектрических преобразователей

Проведена разработка конструкции ФЭП с размером фоточувствительной области от 30 мкм в диаметре для преобразования ЛИ различной плотности мощности в диапазоне длин волн 1300-1700 нм [A20].

В таблице 4.2. приведен технологический маршрут изготовления ФЭП ЛИ на основе структуры GaSb с диффузионным *p-n* переходом, выполненным методом двухстадийной диффузии Zn в подложку *n*-GaSb.

Таблица 4.2. Технологический маршрут изготовления ФЭП ЛИ на основе структуры GaSb.

Технологическая операция	Схема
Нанесение диэлектрического покрытия Si_3N_4 на подложку GaSb методом плазмо-активированного пиролиза	
Травление диэлектрического покрытия через окна в маске фоторезиста	
1-ая диффузия цинка для формирования фоточувствительной области с <i>p-n</i> переходом на малой глубине от поверхности (0.2-0.5 мкм)	
Нанесение АОП Si_3N_4 на фоточувствительную область ФЭП и под зону контактной площадки с использованием маски фоторезиста	

2ая диффузия цинка для заглубления p-n перехода под область омического контакта до глубины 1-1.5 мкм	 Диффузия Zn Si₃N₄ подложка n-GaSb
Напыление фронтального контакта NiCr/Ag/Au (толщиной 0.2-0.3 мкм) к GaSb p-типа проводимости через маску фоторезиста с предварительной очисткой поверхности структуры методом ИЛТ на глубину 0.01 мкм	 NiCr/Ag/Au подложка n-GaSb
Напыление тыльного контакта Au(Ge)/Ni/Au (толщиной 0.2-0.3 мкм) к GaSb n-типа проводимости с предварительной очисткой поверхности методом ИЛТ на глубину 0.02 мкм	 NiCr/Ag/Au подложка n-GaSb Au(Ge)/Ni/Au
Вжигание контактов в атмосфере H₂ при температуре 250 °С в течение 60 сек	
Электрохимическое осаждение гальванических слоев Ag/Ni/Au через маску фоторезиста	 NiCr/Cr/Au + Ag/Ni/Au Si₃N₄ подложка n-GaSb Au(Ge)/Ni/Au + Ag/Ni/Au
Травление меза-структуры через маску фоторезиста на глубину 15-20 мкм	 Травление мезы подложка GaSb Au(Ge)/Ni/Au + Ag/Ni/Au

По результатам проведенных исследований изготовлены образцы ФЭП ЛИ размером фоточувствительной области Ø30 мкм и 80 мкм (рис. 4.2, 4.3).

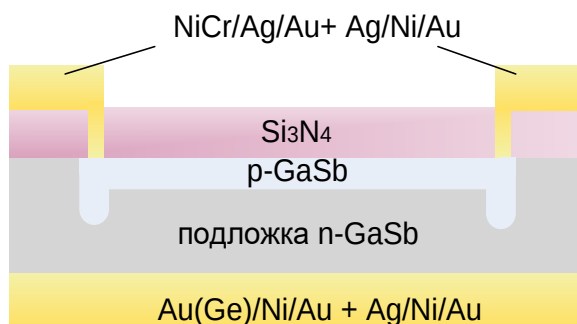


Рис. 4.2. Схематическое изображение скола ФЭП ЛИ Ø80 мкм на основе GaSb.

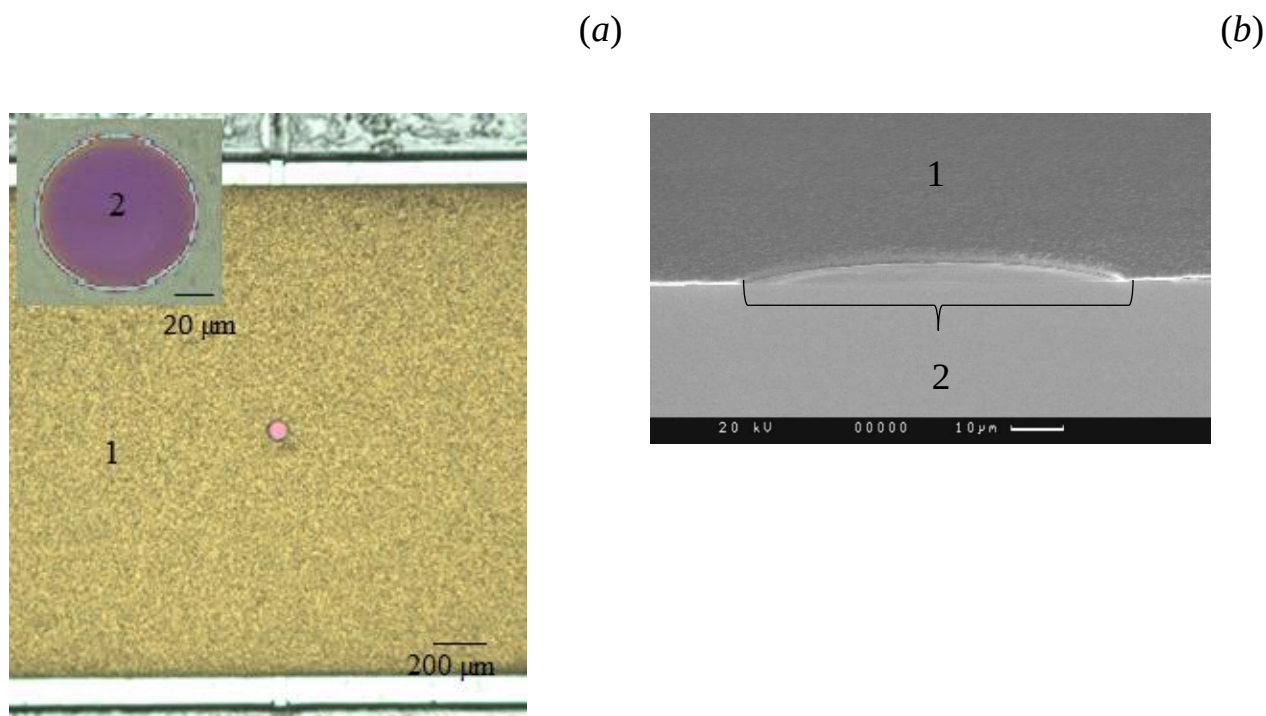


Рис. 4.3. Фотография, выполненная на оптическом микроскопе (a), и изображение СЭМ (b) ФЭП ЛИ Ø80 мкм на основе GaSb. 1 – металлический контакт, 2 – фоточувствительная область.

Увеличение плотности мощности преобразуемого ФЭП лазерного излучения достигнуто при разработке микроразмерных приборов. Размер в 30 мкм определяется минимальным вкладом потерь на сопротивлении растекания для ФЭП без контактов в пределах фоточувствительной области, что,

одновременно, отвечает практически нулевым оптическим потерям на ввод излучения. Увеличение площади фотоприемной поверхности ведет к росту резистивной составляющей, что требует использования контактной сетки для компенсации, а возникающие при этом оптические потери не позволяют добиваться предельных эффективностей для ФЭП. Таким образом, разработанная конструкция ФЭП с диаметром фоточувствительной области 30 мкм обеспечивает возможность преобразования ЛИ высокой плотности мощности при минимальных омических и оптических потерях.

Значения последовательного сопротивления (R_s) GaSb ФЭП с диаметром фоточувствительной области 30 мкм составило $0.14 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, а увеличение диаметра до 80 мкм привело к росту R_s до $0.22 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$, что свидетельствует о существенном росте резистивных потерь.

Выполнены измерения фотоэлектрических характеристик ФЭП ЛИ различной топологии при засветке лазерным излучением в диапазоне длин волн 1300-1700 нм с плотностью тока до 550 А/см^2 .

Для измерения спектральной фоточувствительности ФЭП микроразмерных приборов были изготовлены тестовые образцы размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$. При рабочей длине волны 1550 нм значения внутренней (SR_{inter}) и внешней (SR_{exter}) фоточувствительности ФЭП практически совпадают и равны $\sim 1 \text{ А/Вт}$. Снижение коэффициента отражения поступающего излучения до 0-2% достигнуто при оптимизации технологии формирования АОП на основе Si_3N_4 (рис. 4.4, а).

Фотоэлектрические характеристики ФЭП измерены при засветке непрерывным лазерным излучением ($\lambda=1550 \text{ нм}$) из оптического волокна диаметром 50 мкм с числовой апертурой 0.22. На рис. 4.4, б приведены характерные зависимости эффективности (КПД) и фактора заполнения ВАХ (FF) ФЭП ЛИ. Максимальные значения КПД достигнуты при плотности тока порядка $100\text{-}200 \text{ А/см}^2$ и составили 39.4% и 38.5% для элементов с диаметром фоточувствительной поверхности 30 мкм и 80 мкм соответственно. По зависимости напряжения от плотности тока видно, что ФЭП диаметром 80 мкм

нагревается при максимальной плотности тока. В то время как ФЭП диаметром 30 мкм не подвержен нагреву из-за существенно меньшей абсолютной мощности, что позволяет достичь напряжения холостого хода 0.605 В при плотности тока 550 A/cm^2 [A21].

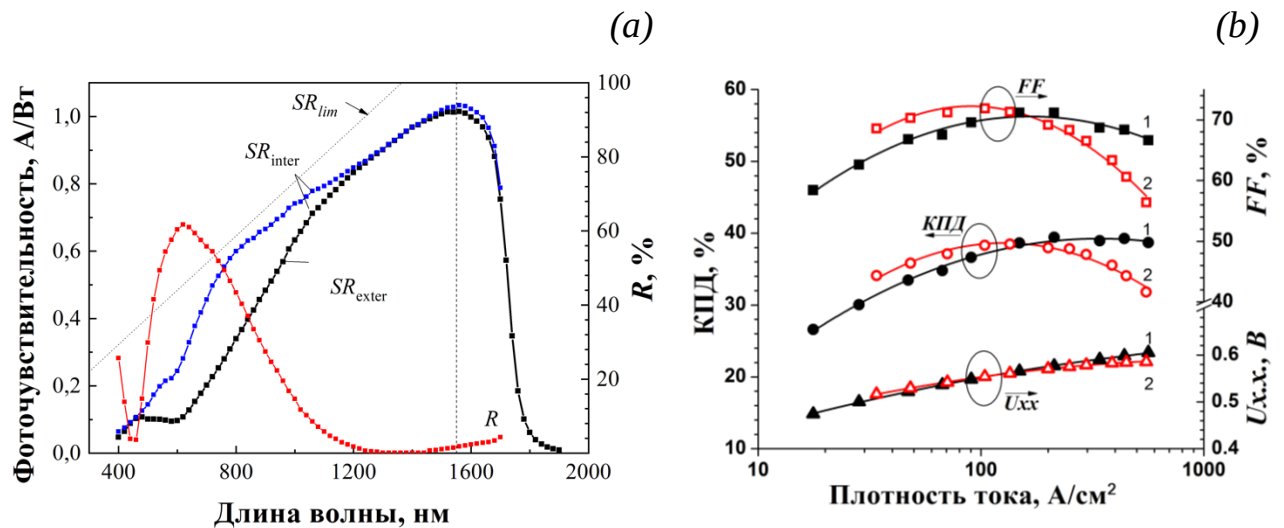


Рис. 4.4. Спектральная фоточувствительность тестовых образцов (a) и эффективность (КПД), фактор заполнения ВАХ (FF), напряжение холостого хода (U_{xx}) преобразования ЛИ (1550 нм) (b) ФЭП на основе GaSb с диаметром фоточувствительной области Ø30 мкм (1) и Ø80 мкм (2).

В результате проведенных исследований достигнуто увеличение КПД на несколько процентов при существенном увеличении плотности мощности преобразуемого ФЭП ЛИ. КПД разработанных приборов составил более 38% при плотности фототока вплоть до 550 A/cm^2 , что существенно превосходит результаты, достигнутые ранее (34% эффективности при плотности тока 100 A/cm^2). Преобразование высокой плотности мощности ЛИ (до 1.6 кВт/см^2) свидетельствует о существенном снижении омических потерь в разработанных ФЭП, достигнутого за счет разработанной топологии микроразмерных приборов и использования новых контактов с высокой электрической проводимостью.

Выводы к главе 4

Проведены исследования и разработки технологии формирования структуры ФЭП ЛИ на основе GaSb методом двухстадийной диффузии цинка. Достижение максимальных фотоэлектрических характеристик ФЭП

обеспечивается при формировании фоточувствительной области с p - n переходом на малой глубине от поверхности (0.2-0.5 мкм) и заглублении p - n перехода под областью омического контакта до 1-1.5 мкм.

Исследованы различные контактные системы к GaSb n - и p -типа проводимости. Минимальные значения удельного контактного сопротивления $(1-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к GaSb p -типа проводимости достигнуты при формировании контактной системы на основе NiCr/Ag/Au. К GaSb n -типа - $(2-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при использовании контактной системы на основе Au(Ge)/Ni/Au.

В результате проведенных исследований достигнуто снижение омических и оптических потерь при изготовлении микроразмерных ФЭП с диаметром фоточувствительной области $\varnothing 30$ мкм, обладающих КПД $> 38\%$ при плотности тока вплоть до 550 А/см^2 и обеспечивающих преобразование ЛИ с длиной волны 1550 нм с плотностью мощности до 1.6 кВт/см^2 .

Глава 5. Оптические свойства многослойного комбинированного отражателя.

Проведены исследования оптических свойств AlGaAs/GaAs гетероструктур с многослойным комбинированным тыльным отражателем при создании многопроходных ФЭП ЛИ (800-860 нм) и ИК СИД (850-940 нм). Гетероструктуры исследуемых приборов формируются методом МОС ГФЭ на поглощающих излучение GaAs подложках. Для снижения оптических потерь излучения, распространяющегося в сторону подложки, осуществляется формирование многослойного комбинированного отражателя между активной областью гетероструктуры и подложкой, включающего структурные слои и металлического отражателя. Известны различные системы металлических отражателей на основе слоев Ag, ITO/Ag, Ti/ITO/Ag, Ti/Au, Al/Au, Cu/Au, Ni/Au, обеспечивающие отражение $\approx 92-97\%$ поступающего излучения [11, 17]. Однако, потери 3-8% излучения могут существенно сказаться на характеристиках приборов из-за многократного переотражения излучения, что ведет к необходимости разработки новых конструкций отражателей, с коэффициентом отражения более 98-99%. Также требуется проведение дополнительных исследований для предотвращения деградации оптических свойств отражателей при изготовлении и эксплуатации приборов.

5.1. Конструкция комбинированного отражателя

Конструкция многослойного отражателя включает структурные слои, которые формируются непосредственно при эпитаксиальном росте гетероструктуры: брэгговский отражатель (БО) на основе 15 пар слоев $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ и дополнительный широкозонный слой $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ толщиной порядка 300 нм [А6]. Брэгговский отражатель отражает более 90% лучей, поступающих под углами, близкими к 90 угл. град. в спектральном диапазоне 820-880 нм в телесном угле с раскрытием ± 20 угл. град. (рис. 5.1).

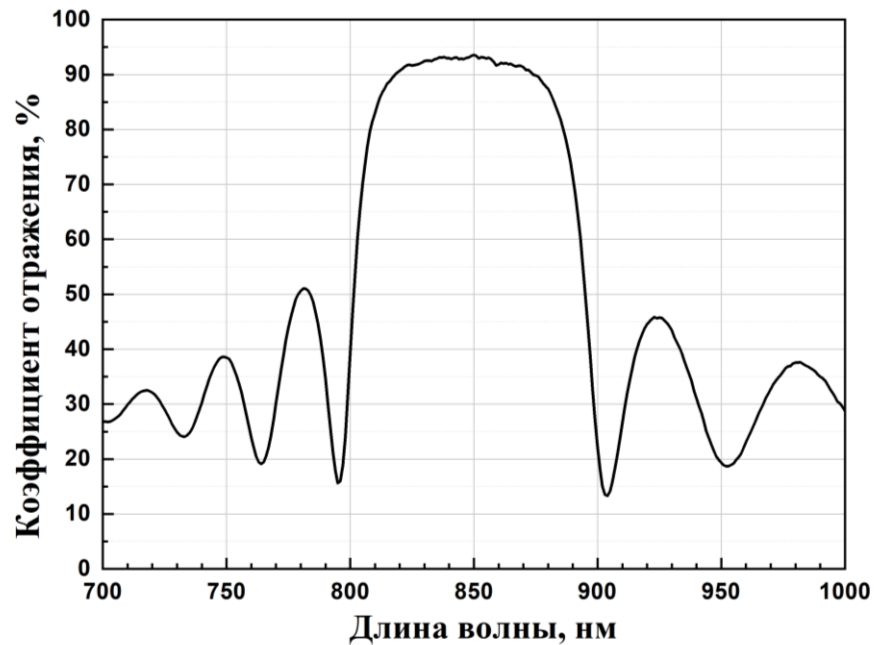


Рис. 5.1. Спектр отражения гетероструктуры AlGaAs/GaAs с брэгговским отражателем на основе слоев $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ и $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$.

Широкозонный слой $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм) имеет меньшее значение показателя преломления, по сравнению с прилегающим к нему узкозонным слоем структуры $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y < 0.2$), и, соответственно, отражает лучи, прошедшие сквозь БО, и поступающие на слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ под углами, при которых происходит полное внутренне отражение (~ 60 угл. град).

Комбинация БО и слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм) приводит к значительному росту доли отраженного излучения, распространяющегося в сторону поглощающей GaAs подложки.

Увеличение эффективности многослойного комбинированного отражателя достигается при формировании на поверхности гетероструктуры дополнительных слоев диэлектрика, адгезионного слоя, слоя металла с высоким коэффициентом отражения, барьерных слоев.

Формирование металлических слоев отражателя на основе слоев Ag или Au, обладающих коэффициентом отражения порядка 98% в исследуемом диапазоне длин волн (> 600 нм), между активной областью гетероструктуры и поглощающей излучение подложкой, позволяют существенно увеличить долю отраженного излучения [A5]. Формирование металлических слоев отражателя

осуществляется путем вакуумного термического или магнетронного напыления Ag или Au. Однако данные слои обладают низкой адгезией к полупроводниковым материалам, что ведет к отслаиванию отражателя. Увеличение адгезии достигается при нанесении подслоя адгезионных материалов, например, сплава NiCr. Коэффициент отражения от данного материала составляет порядка 50%, что требует проведения дополнительных исследований для оптимизации параметров адгезии и оптических свойств отражателя.

Некоторые этапы постростовых технологических процессов сопровождаются температурным отжигом, в частности формирование омических контактов осуществляется при температурах вжигания до 400 °С. При высоких температурах может проходить оплавление слоев металлического отражателя в поверхность полупроводниковой структуры, что сказывается на снижении оптических свойств отражателя. Для защиты и изоляции отражателя от полупроводника проводится дополнительное осаждение диэлектрического слоя на основе SiO_2 , MgF_2 , Si_3N_4 . Введение дополнительного диэлектрического слоя также увеличивает долю отраженного излучения, за счет отражения лучей, поступающих на отражатель под углами, при которых выполняется условие полного внутреннего отражения. При этом материал диэлектрического покрытия выбирается по параметру коэффициента преломления (n). Использование слоев с малым значением коэффициента преломления: SiO_2 ($n = 1.46$) или MgF_2 ($n = 1.38$) ведет к уменьшению угла полного внутреннего отражения, и, соответственно, к увеличению доли излучения, поступающего под углами большими, чем угол полного внутреннего отражения. Таким образом, слой диэлектрического покрытия выполняет защитную функцию и является дополнительным слоем отражателя, обеспечивающим увеличение доли отраженного излучения (рис. 5.2).

Для анализа оптических характеристик комбинированного отражателя было проведено исследование влияния толщины адгезионного слоя NiCr на величину коэффициента отражения излучения в диапазоне длин волн

300-1150 нм. Также выполнен сравнительный анализ оптических свойств отражателей на основе слоев Ag и Au.

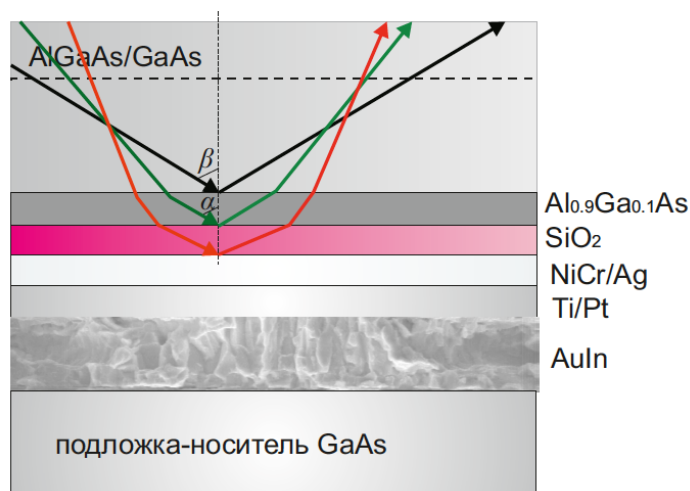


Рис. 5.2. Конструкция многослойного комбинированного отражателя и схематическое изображение хода лучей.

Для проведения исследования были изготовлены тестовые образцы: на предметное стекло проведено напыление несколько комбинаций отражателей:

- Si₃N₄ - Ag (без адгезионного слоя)
- Si₃N₄ - NiCr (0.5-1 нм) - Ag
- Si₃N₄ - NiCr (2 нм) - Ag
- Si₃N₄ - NiCr (0.5-1 нм) - Au.

Измерение коэффициента отражения проводилось при засветке отражателей через стекло. Коэффициент отражения для систем на основе серебра и золота с адгезионным подслоем 0.5-1 нм практически совпадают и составляют около 92-93% в диапазоне длин волны 600-1150 нм (рис. 5.3, а). Увеличение толщины слоя NiCr до 2 нм снижает коэффициент отражения до 90%. Анализ адгезии металлических слоев к поверхности полупроводника показал, что толщина слоя NiCr 0.5-1 нм является достаточной для обеспечения адгезии и формирования монолитного отражателя, и увеличение толщины данного слоя нецелесообразно из-за снижения оптических свойств отражателя. Следует учесть, что измерение коэффициента отражения проводилось со стороны стекла, что ведет к потере излучения на поглощении в стекле ($\sim 2\%$), и

на Френелевском отражении от границы стекло-воздух ($\sim 4\%$). Таким образом, расчетное значение коэффициента отражения от разработанного металлического отражателя NiCr (0.5-1 нм) - Ag и NiCr (0.5-1 нм) - Au составляет $\sim 98\%$, что подтверждается экспериментальными данными при засветке отражателя со стороны металла (рис. 5.3, b).

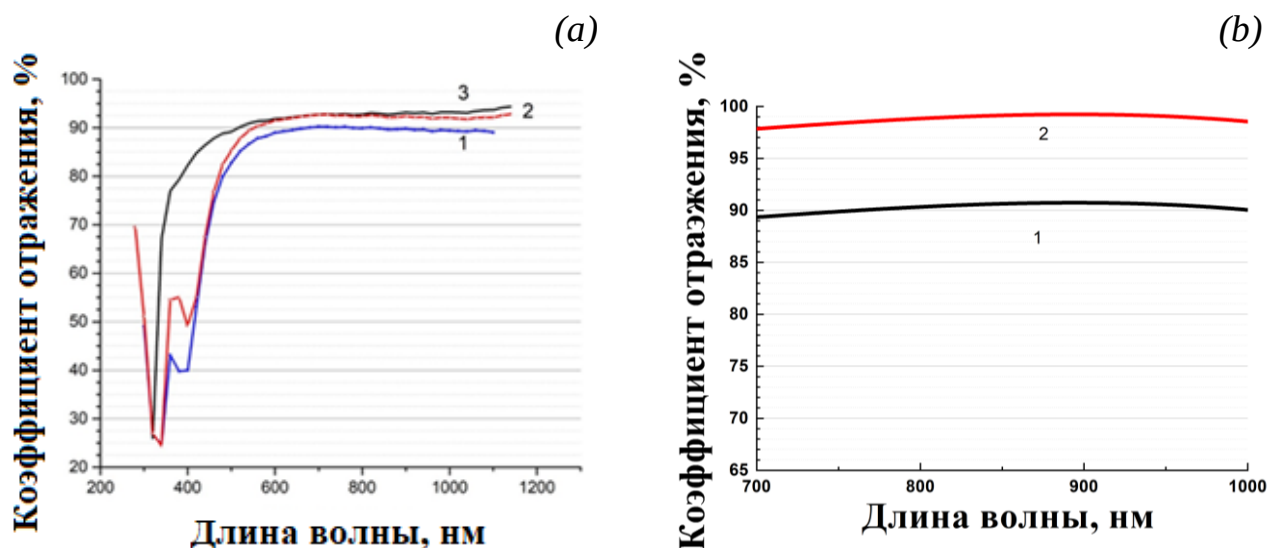


Рис. 5.3. Спектральная зависимость коэффициента отражения (при измерении через стекло) изотропного излучения для отражателей (a) на основе: 1 – Si_3N_4 -NiCr (2 нм)-Ag, 2 – Si_3N_4 - NiCr (0.5-1 нм)-Ag, 3 – Si_3N_4 -Ag; (b) на основе NiCr-Ag при измерении через стекло (1), со стороны Ag (2).

5.2. Расчет оптических параметров отражателей

Проведена разработка различных типов комбинированных отражателей с целью увеличения коэффициента отражения излучения, распространяющегося в сторону поглощающей GaAs подложки. Рассмотрены отражатели, состоящие из следующих комбинаций слоев:

Тип 1. Брэгговский отражатель из 15 пар слоев $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As} + \text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм)

Тип 2. Адгезионный слой NiCr (0.5 -1 нм) + отражающий слой Ag (150-200 нм).

Тип 3. Слой диэлектрика SiO_2 (300 нм) + NiCr (0.5-1 нм) + Ag (150-200 нм).

Тип 4. Широкозонный слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм) + SiO_2 (300 нм) + NiCr (0.5 - 1 нм) + Ag (150- 200 нм).

Выполнен расчет оптических свойств предложенных типов комбинированных отражателей. Рассмотрены два варианта расчета коэффициента отражения, обусловленного непосредственно оптическими свойствами отражателей и практической реализацией в конструкциях приборов.

Тип 1. Брэгговский отражатель, состоящий из 15 пар слоев $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, обеспечивает отражение 90% излучения в телесном угле (δ) с раскрытием ± 20 угл. град. Коэффициент отражения излучения от БО составляет:

$$R_{\text{БО}} = 2 \cdot \delta / 180 \cdot 90\% = 20\% \quad (30)$$

Дополнительно к БО вводится широкозонный слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ толщиной 300 нм, обеспечивающий отражение латеральных лучей, поступающих на этот слой под углами большими, чем угол полного внутреннего отражения ($\beta \sim 60$ угл. град). Коэффициент отражения излучения от слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ составляет:

$$R_{\text{AlGaAs}} = 2 \cdot (90 - \beta) / 180 = 33.3\% \quad (31)$$

Данные слои отражателя формируются сплошными в ходе эпитаксиального выращивания структуры и точечными контактами не затеняются.

$$R_{\text{отр}_1} = R_{\text{БО}} + R_{\text{AlGaAs}} = 53.3\% \quad (32)$$

Тип 2. Коэффициент отражения от металлического отражателя NiCr (0.5- 1 нм) – Ag (150-200 нм) составляет $\sim 98\%$ (R_{Ag}). Таким образом, коэффициент отражения излучения, распространяющегося в сторону отражателя, обусловленный только оптическими свойствами отражателя составляет:

$$R_{\text{отр}_2_{\text{опт}}} = R_{\text{Ag}} = 98\% \quad (33)$$

Однако при практической реализации приборов, формирование металлического отражателя на поверхности гетероструктуры, выполняется не сплошным. Для обеспечения электрической проводимости проводится формирование точечных контактов диаметром 10 мкм с шагом 75 мкм,

затеняющих 2% отражателя (D). Коэффициент отражения излучения, распространяющегося в сторону отражателя, обусловленный практической реализацией приборов, составляет:

$$R_{\text{отр}_2\text{пр}} = R_{\text{Ag}} \cdot (100\% - D) = 96\% \quad (34)$$

Тип 3. Дополнительно к металлическому отражателю NiCr (0.5-1 нм) – Ag (150-200 нм) вводится слой диэлектрика SiO₂ (300 нм) с коэффициентом преломления $n=1.46$. Угол полного внутреннего отражения излучения (α), распространяющегося от активной области гетероструктуры AlGaAs/GaAs, от слоя SiO₂ составляет 23 угл. град. Излучение распространяется в сторону тыльного отражателя с углом раскрытия 180 угл. град. Доля излучения, отраженного от слоя SiO₂ (R_{SiO_2}), в телесном угле с раскрытием $\pm (90-\alpha)$ угл. град. составляет:

$$R_{\text{SiO}_2\text{опт}} = 2 \cdot (90-\alpha) / 180 = 74.4\% \quad (35)$$

Остальное излучение, лежащее в телесном угле с раскрытием ± 23 угл. град., отражается от металлического отражателя NiCr-Ag:

$$R_{\text{NiCr-Ag_опт}} = 2 \cdot \alpha / 180 \cdot R_{\text{Ag}} = 25\% \quad (36)$$

Практическое формирование отражателя SiO₂+NiCr+Ag осуществляется не сплошным (точечные контакты затеняют 2% площади (D)).

$$R_{\text{SiO}_2\text{пр}} = 2 \cdot (90-\alpha) / 180 \cdot (100\% - D) = 73\% \quad (37)$$

Остальное излучение отражается от металлического отражателя NiCr-Ag с затенением 2%:

$$R_{\text{NiCr-Ag_пр}} = 2 \cdot \alpha / 180 \cdot R_{\text{Ag}} \cdot (100\% - D) = 24.5\% \quad (38)$$

Суммарный коэффициент отражения излучения, обусловленный оптическими свойствами отражателя:

$$R_{\text{отр}_3\text{опт}} = R_{\text{SiO}_2\text{опт}} + R_{\text{NiCr-Ag_опт}} = 99.4\% \quad (39)$$

Суммарный практический коэффициент отражения (с затенением точечными контактами):

$$R_{\text{отр}_3\text{пр}} = R_{\text{SiO}_2\text{пр}} + R_{\text{NiCr-Ag_пр}} = 97.5\% \quad (40)$$

Тип 4. Дополнительно к отражателю $\text{SiO}_2+\text{NiCr}+\text{Ag}$ вводится широкозонный слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ толщиной 300 нм, обеспечивающий отражение латеральных лучей, поступающих на этот слой под углами большими, чем угол полного внутреннего отражения ($\beta \sim 60$ угл. град). Данный слой формируется сплошным в ходе эпитаксиального выращивания структуры и точечными контактами не затеняется.

Коэффициент отражения излучения от слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (R_{AlGaAs}):

$$R_{\text{AlGaAs}} = 2 \cdot (90 - \beta) / 180 = 33.3\% \quad (41)$$

Излучение, лежащее в телесном угле с раскрытием $\pm (90 - \alpha) - (90 - \beta)$ угл. град., не отражающееся от слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ отражается от слоя SiO_2 :

$$R_{\text{SiO}_2_опт} = 2 \cdot ((90 - \alpha) - (90 - \beta)) / 180 = 41.1\% \quad (42)$$

С учетом затенения 2%:

$$R_{\text{SiO}_2_пр} = 2 \cdot ((90 - \alpha) - (90 - \beta)) / 180 \cdot (100\% - D) = 40.2\% \quad (43)$$

Остальное излучение, лежащее в телесном угле с раскрытием ± 23 угл. град., отражается от металлического отражателя NiCr-Ag :

$$R_{\text{NiCr-Ag_опт}} = 2 \cdot \alpha / 180 \cdot R_{\text{Ag}} = 25\% \quad (44)$$

С учетом затенения 2%:

$$R_{\text{NiCr-Ag}} = 2 \cdot \alpha / 180 \cdot R_{\text{Ag}} \cdot (100\% - D) = 24.5\% \quad (45)$$

Суммарный коэффициент отражения оптический и практический:

$$R_{\text{отр}_4_опт} = R_{\text{AlGaAs}} + R_{\text{SiO}_2_опт} + R_{\text{NiCr-Ag_опт}} = 99.4\% \quad (46)$$

$$R_{\text{отр}_4_пр} = R_{\text{AlGaAs}} + R_{\text{SiO}_2_пр} + R_{\text{NiCr-Ag_пр}} = 98.0\%. \quad (47)$$

Результаты расчетов оптических свойств комбинированных отражателей различных конструкций приведены на гистограмме (рис. 5.4).

Данный расчет является оценочным, однако, он подтверждается экспериментальными данными при измерении оптических характеристик отражателей (рис. 5.3, b), а также расчетом по методу матриц Абелеса для ТМ и ТЕ поляризованного света* [85] (рис. 5.5).

*Расчет по методу матриц Абелеса выполнен В.М. Емельяновым.

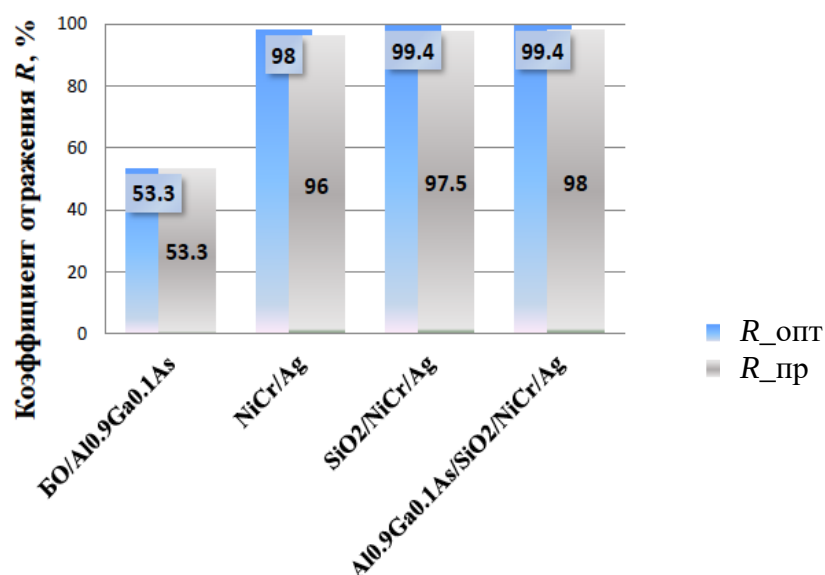


Рис. 5.4. Оптические свойства отражателей различных конструкций без учета затенения точечными контактами $R_{\text{опт}}$ (синий) и с затенением 2% $R_{\text{пр}}$ (серый).

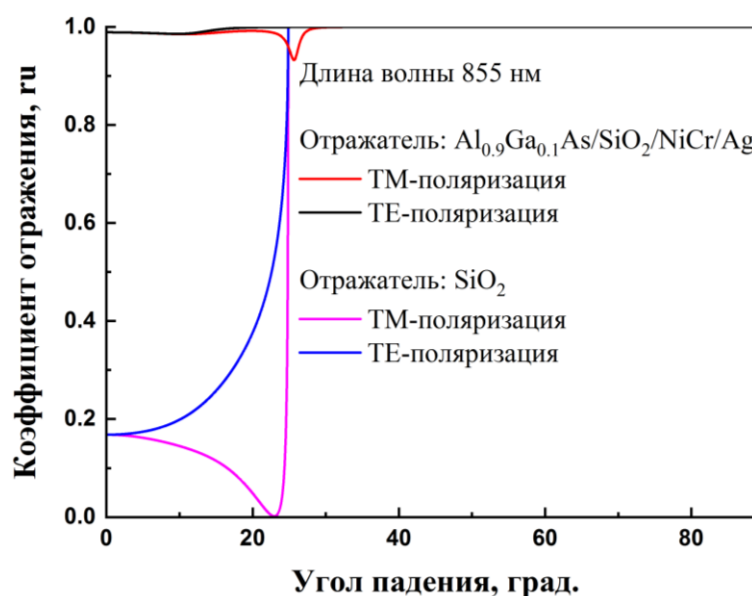


Рис. 5.5. Расчет оптических свойств отражателей по методу матриц Абелеса для ТМ и ТЕ поляризованного света без учета затенения точечными контактами.

Разработка комбинированных отражателей позволяет существенно увеличить долю отраженного излучения, распространяющегося в сторону поглощающей GaAs подложки. Увеличение коэффициента отражения на несколько процентов позволяет существенно снизить оптические потери в многопроходных структурах за счет многократного переотражения излучения.

5.3. Влияние диффузии индия на характеристики комбинированного отражателя.

Формирование комбинированного отражателя осуществляется при переносе гетероструктуры на подложку-носитель GaAs с использованием соединения Au-In. Сплавление гетероструктуры и подложки-носителя осуществляется за счет диффузии индия в слой золота, осажденный на поверхность отражателя гетероструктуры, толщиной 2-3 мкм (см. раздел 2.4). Было обнаружено, что диффузия индия может проходить через золото, затрагивать металлические слои отражателя и ухудшать его оптические свойства. Проведение измерений коэффициента отражения от комбинированного отражателя на основе слоев диэлектрик-NiCr(0.5-1 нм)-Ag, нанесенного на стекло и закрытого слоями золота и индия толщиной по 2 мкм после нагрева до 200 °С в течении 30 мин показало снижение значений коэффициента отражения до 83-84% (рис. 5.6, линия 1) при измерении со стороны стекла.

Для защиты металлических слоев отражателя от диффузии индия разработана система барьерных слоев, формируемых между слоями отражателя и слоем индия.

Для анализа оптических свойств комбинированного отражателя было проведено дополнительное исследование: на стекле формировались слои отражателя, наносились слои Au и In толщиной по 2 мкм, осаждались барьерные слои и проводился термический отжиг при температуре 200 °С в течении 30 мин. Рассмотрены следующие системы отражателей и барьерных слоев:

- NiCr (0.5-1 нм) - Ag (без барьерного слоя)
- NiCr (0.5-1 нм) - Ag + NiCr (20 нм)
- NiCr (0.5-1 нм) - Ag + Ti (50 нм)
- NiCr (0.5-1 нм) - Ag + Ti (50 нм) - Pt (50 нм)

Первый слой NiCr является адгезионным, слой серебра – металлический слой отражателя, слои NiCr (20 нм), Ti (50 нм), Pt (50 нм) – барьерные слои.

Измерение коэффициента отражения проводилось со стороны стекла в диапазоне длин волн 700-1000 нм. Использование NiCr в качестве барьерного слоя (рис. 5.6, линия 2) привело к значительному снижению коэффициента отражения даже по сравнению с отражателем без барьерного слоя, что может быть объяснено дополнительной диффузией хрома в слой отражателя. Максимальное значение коэффициента отражения 89-90% в диапазоне длин волн 700-1000 нм получено при использовании барьерных слоев на основе Ti (50 нм) + Pt (50 нм) (рис. 5.6, линия 4). Данные значения коэффициента отражения полностью соответствуют значениям, полученным для комбинированного отражателя до диффузии индия (рис. 5.3, *b*, линия 1). Небольшое снижение коэффициента отражения (на 2%) получено при использовании барьерного слоя из Ti (50 нм) (рис. 5.6, линия 3).

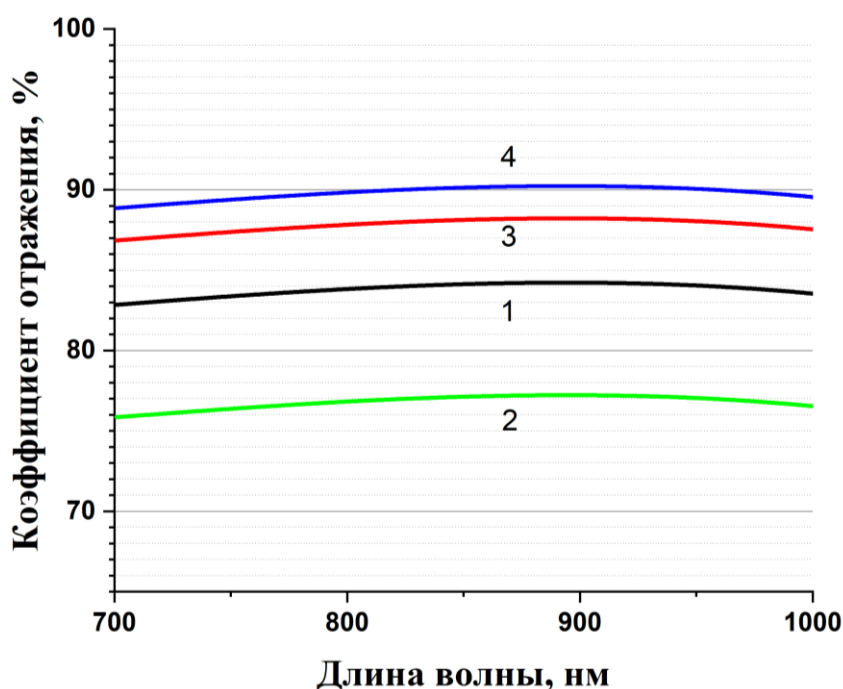


Рис. 5.6. Зависимость коэффициента отражения (после диффузии индия, при измерении через стекло) от отражателя на основе NiCr-Ag при использовании разных барьерных слоев: 1 – без барьерного слоя, 2 - NiCr (20 нм), 3 – Ti (50 нм), 4 – Ti (50 нм) + Pt (50 нм).

Выводы к главе 5

Проведены исследования и разработка систем многослойных комбинированных отражателей на основе брэгговского отражателя, слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм), слоя диэлектрика, адгезионного слоя NiCr, металлического слоя Ag или Au, барьерных слоев.

Рассмотрены различные варианты диэлектрических покрытий для защиты и изоляции отражателя от материала полупроводника на основе слоев SiO_2 , MgF_2 , Si_3N_4 . Проведен анализ влияния толщины адгезионного слоя NiCr на оптические характеристики металлических отражателей на основе Ag или Au. Установлено, что снижение толщины NiCr до 0.5 нм обеспечивает формирование монолитного отражателя без ухудшения оптических свойств. Выполнено исследование влияния диффузии индия при переносе гетероструктуры на подложку-носитель на оптические свойства комбинированного отражателя. Разработана система барьерных слоев на основе Ti (50 нм) + Pt (50 нм), обеспечивающая надежную защиту металлических слоев отражателя.

Выполнен расчет оптических свойств различных типов комбинированных тыльных отражателей: $\text{BO} + \text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$; NiCr+Ag; $\text{SiO}_2 + \text{NiCr} + \text{Ag}$; $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As} + \text{SiO}_2 + \text{NiCr} + \text{Ag}$. Достигнуто значение коэффициента отражения ИК излучения от комбинированного отражателя 99.4%. При практической реализации приборных структур для увеличения электрической проводимости проводится формирование точечных контактов в структуре отражателя, с коэффициентом затенения 2%. Коэффициент отражения излучения, распространяющегося в сторону комбинированного отражателя составил 98% в разработанных конструкциях приборов.

Глава 6. Фотоэлектрические преобразователи и светоизлучающие диоды на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур с комбинированным отражателем

6.1. Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения (800-860 нм) прямого и инвертированного роста

ФЭП ЛИ широко используются в волоконно-оптических линиях связи и других оптоэлектронных системах беспроводной передачи информации и энергии по лазерному лучу.

В спектральном диапазоне 800-860 нм наибольшую эффективность имеют ФЭП на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур. Максимальные теоретические значения КПД мощных ФЭП ЛИ с длиной волны 800-860 нм превышают 85% при плотности излучения более 100 Вт/см² [86]. Практически достигнутые значения КПД для ФЭП на основе GaAs, составляют: КПД = 55% при плотности мощности лазерного излучения $P = 36 \text{ Вт/см}^2$ [86], КПД = 54% при $P = 800-1000 \text{ Вт/см}^2$ [87, A22] и КПД = 60% при $P = 10 \text{ Вт/см}^2$ [88]. Показана возможность достижения значения КПД вплоть до 68.9% при преобразовании ИК излучения мощностью 11 Вт/см² при встраивании в гетероструктуру AlGaAs/GaAs ФЭП отражателя [7].

Основной задачей данного исследования является разработка мощных ФЭП ЛИ, обеспечивающих высокоэффективное преобразование большой плотности мощности поступающего излучения $P = 100-500 \text{ Вт/см}^2$. В ходе проведения исследования рассмотрены конструкции ФЭП на основе гетероструктур прямого и инвертированного роста, подробно описанные в разделе 2.3.

6.1.1. Снижение омических и оптических потерь фотоэлектрических преобразователей

Проведены исследования по модификации резистивных свойств AlGaAs/GaAs гетероструктур, направленных на снижение омических потерь ФЭП ЛИ. Выполнена разработка топологии приборов с малым диаметром

фоточувствительной области (500 мкм) и высокой плотностью контактных шин (от 50 мкм) (рис. 6.1). Используются разработанные контактные системы на основе NiCr/Ag/Au к GaAs *p*-типа проводимости и Pd/Ge/Au к GaAs *n*-типа проводимости, обеспечивающие снижение удельного контактного сопротивления до $(1-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, с электрохимическим наращиванием слоев Ag/Ni/Au для увеличения электрической проводимости контакта [A23- A25]. (см. раздел 3.2).

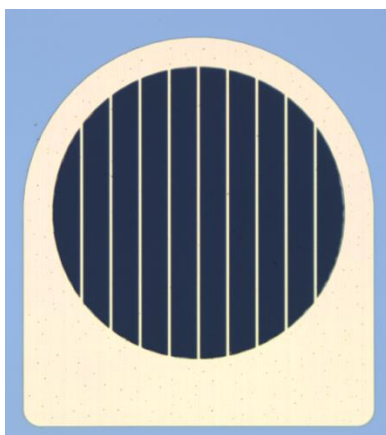


Рис. 6.1. Фотография ФЭП ЛИ с диаметром фоточувствительной области 500 мкм с шагом контактных шин 50 мкм.

Снижение оптических потерь на ввод ЛИ в ФЭП достигнуто за счет ряда эффектов:

- создание контактных шин в виде усеченных "пирамид" с зеркальными боковыми гранями, отражающими излучение, поступающее на поверхность контактных шин, на фоточувствительную область (см. раздел 3.1);
- снижение коэффициента отражения излучения заданной длины волны от поверхности ФЭП ЛИ при формировании АОП;
- встраивание в конструкцию ФЭП многослойного комбинированного отражателя $\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}/\text{Ti}/\text{Pt}$, обеспечивающего возврат в активную область непоглощенного излучения [A1, A26].

Проведены исследования по оптимизации формирования АОП, обеспечивающего снижение коэффициента отражения в диапазоне длин волн 800-860 нм. Исследованы разные варианты однослойных и многослойных АОП

на основе $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$, Si_3N_4 , SiO_2 , Ta_2O_5 (рис. 6.2). Минимальный коэффициент отражения $< 0.5\%$ в исследуемом диапазоне длин волн (800-860 нм) достигнут при формировании двуслойного АОП на основе $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$.

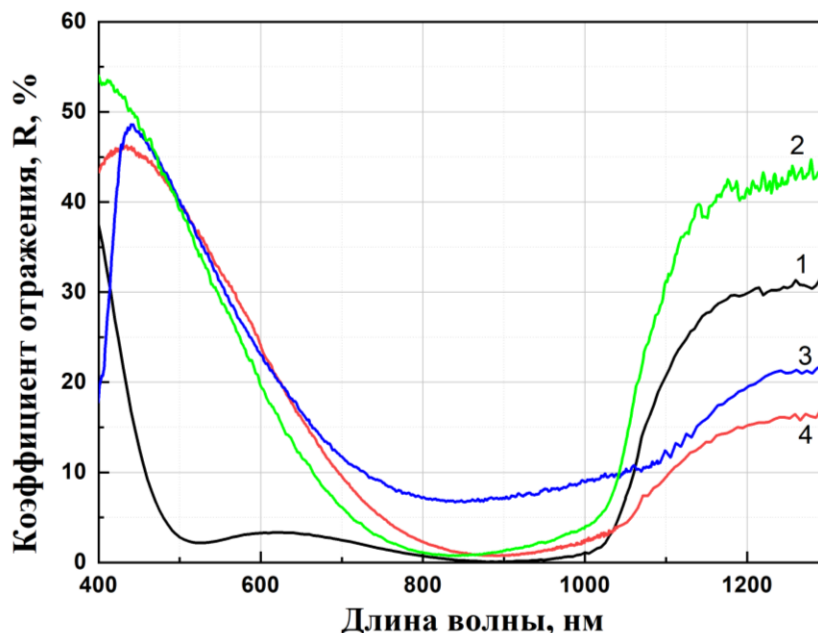


Рис. 6.2. Спектральная зависимость коэффициента отражения излучения для подложки GaAs с АОП на основе: 1- $\text{TiO}_x/\text{SiO}_2$, 2 – Si_3N_4 , 3 – SiO_2 , 4 – Ta_2O_5 .

Проведена разработка технологии изготовления ФЭП на основе гетероструктуры инвертированного роста, включающая этапы формирования комбинированного отражателя, перенос гетероструктуры на подложку-носитель и удаление ростовой подложки GaAs (см. раздел 2.4). Данная конструкция ФЭП обеспечивает снижение потерь преобразования лазерного излучения за счет отражения излучения, прошедшего через p - n -переход без поглощения, от комбинированного отражателя обратно в сторону активной области и его преобразование в электроэнергию.

Особенностью этапов формирования ФЭП с отражателем является необходимость формирования фронтального омического контакта после переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель. Режимы формирования фронтального контакта не должны вызывать дефектов ни в гетероструктуре, ни на границе раздела металл-полупроводник. Это особенно

важно при использовании металлической несущей подложки из-за разницы коэффициентов теплового расширения материала гетероструктуры и подложки-носителя. Снижение температуры вжигания системы гетероструктура/подложка-носитель ведет к исключению деградации как активной области ФЭП, так и оптических свойств отражателя, что обеспечивает увеличение эффективности и выхода годных приборов. Для снижения эффекта температурной деградации приборов проведены исследования по формированию низкотемпературного контакта к слою GaAs *n*-типа проводимости на основе слоев Pd/Ge/Au, обеспечивающего удельное контактное сопротивление $(1-3) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ при температуре вжигания 185 °С (см. раздел 3.2).

Основной сложностью технологического процесса изготовления кристаллов ФЭП с комбинированным отражателем является процесс переноса тонких слоев гетероструктуры на подложку-носитель, что ведет к необходимости контроля монолитности монтажа. Методом сканирующей (растровой) электронной микроскопии было обнаружено возникновение дефектов сплавления в виде пор в соединении Au-In (рис. 6.3, *a*). Оптимизация процесса монтажа при варьировании температуры, времени и атмосферы сплавления позволила формировать монолитные соединения Au-In (рис. 6.3, *b*).

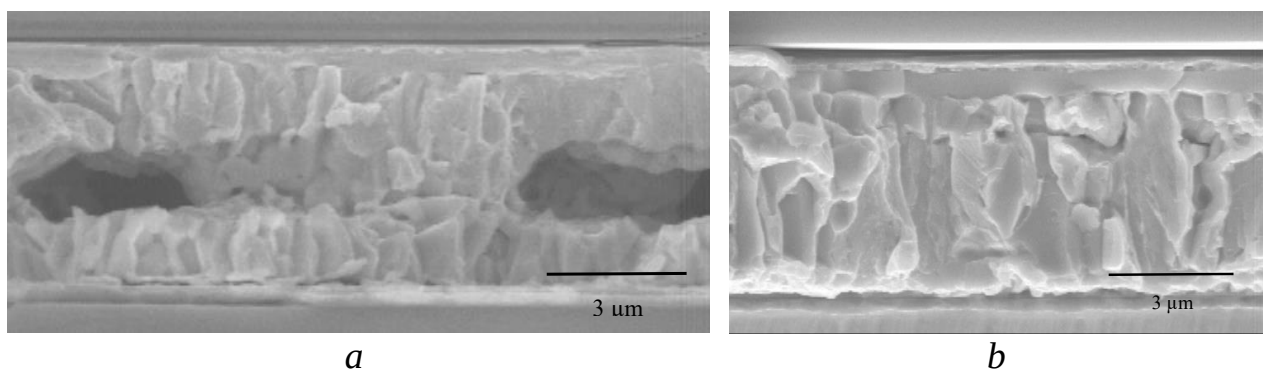


Рис. 6.3. Изображение СЭМ скола гетероструктуры ФЭП после переноса на подложку-носитель GaAs: *a* – с порами в сплаве Au-In, *b* – монолитное сплавление.

Выполнен анализ влияния микродефектов сплавления гетероструктуры и подложки-носителя в образцах ФЭП с отражателем. При монолитном

сплавлении (без дефектов) значение фактора заполнения ВАХ (FF) составило 87% при мощности ЛИ 60-170 Вт/см², при увеличении мощности ЛИ вплоть до 550 Вт/см² наблюдается падение FF до 79% (рис. 6.4, линия 1), что свидетельствует о достаточно низком уровне резистивных потерь. Однако в образцах ФЭП, в которых зарегистрировано образование микродефектов в Au-In сплаве наблюдается значительное снижение фактора заполнения ВАХ до 74% с ростом мощности ЛИ (до 500 Вт/см²) (рис. 6.4, линия 2). Также наличие дефектов сплавления сказывается на падении напряжения холостого хода (U_{xx}), что свидетельствует об ухудшении теплоотвода от ФЭП.

Максимальное значение КПД = 59-60% достигнуто в ФЭП при высокой плотности мощности лазерного излучения 70-300 Вт/см² ($\lambda = 808$ нм), что обусловлено минимальными резистивными потерями, сниженными в разработанной топологии приборов и за счет использования низкоомных контактных систем. При этом вплоть до плотностей мощности 500 Вт/см² сохраняется эффективность более 56%.

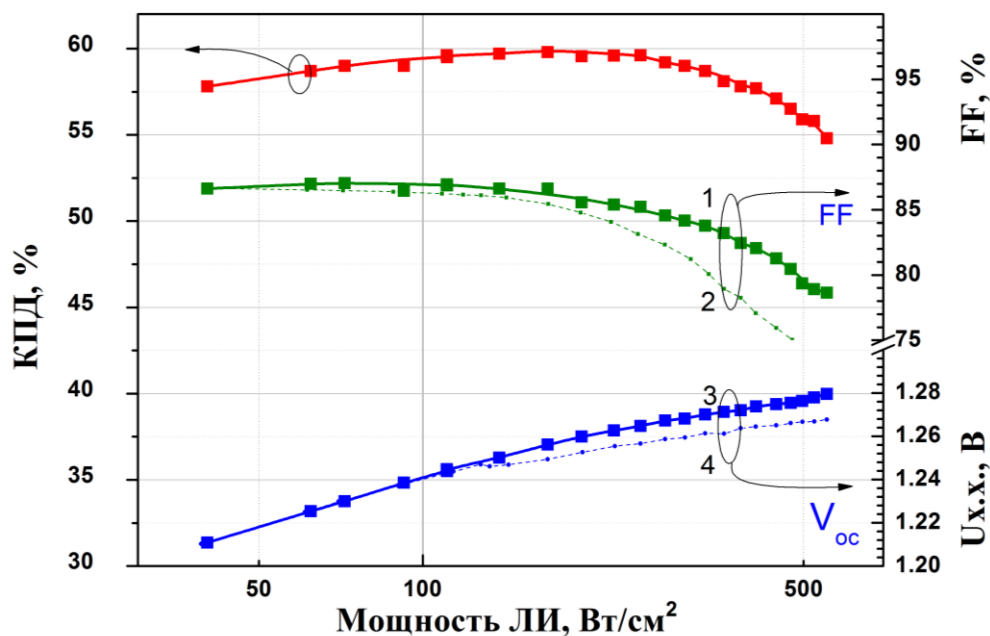


Рис. 6.4. Зависимость фактора заполнения (FF) нагрузочной ВАХ, напряжения холостого хода (U_{xx}), и эффективности (KPD) от плотности мощности ЛИ ($\lambda = 808$ нм) для AlGaAs/GaAs ФЭП с многослойным комбинированным отражателем. 1,3 – без дефектов сплавления, 2,4 – с микродефектами.

Особенность конструкций ФЭП, оптимизированной для мощного ЛИ (>200 Вт/см²), ведет к снижению величины внешней фоточувствительности (SR_{ext}): $SR_{ext} = 0.55$ А/Вт при $\lambda = 850$ нм по сравнению с максимальным теоретическим значением: $SR_{lim} = 0.7$ А/Вт (рис. 6.5). Основной причиной низкой величины SR_{ext} в разработанных ФЭП являются оптические потери на ввод лазерного излучения из-за большой плотности контактных шин (шириной 6 мкм при шаге 50 мкм). Такая плотность контактных шин обеспечивает снижение вклада сопротивления растекания, что ведет к достижению относительно высокой эффективности ФЭП при плотностях мощности ЛИ вплоть до 550 Вт/см², однако не является оптимальной при преобразовании ЛИ меньшей плотности мощности (до 100 Вт/см²).

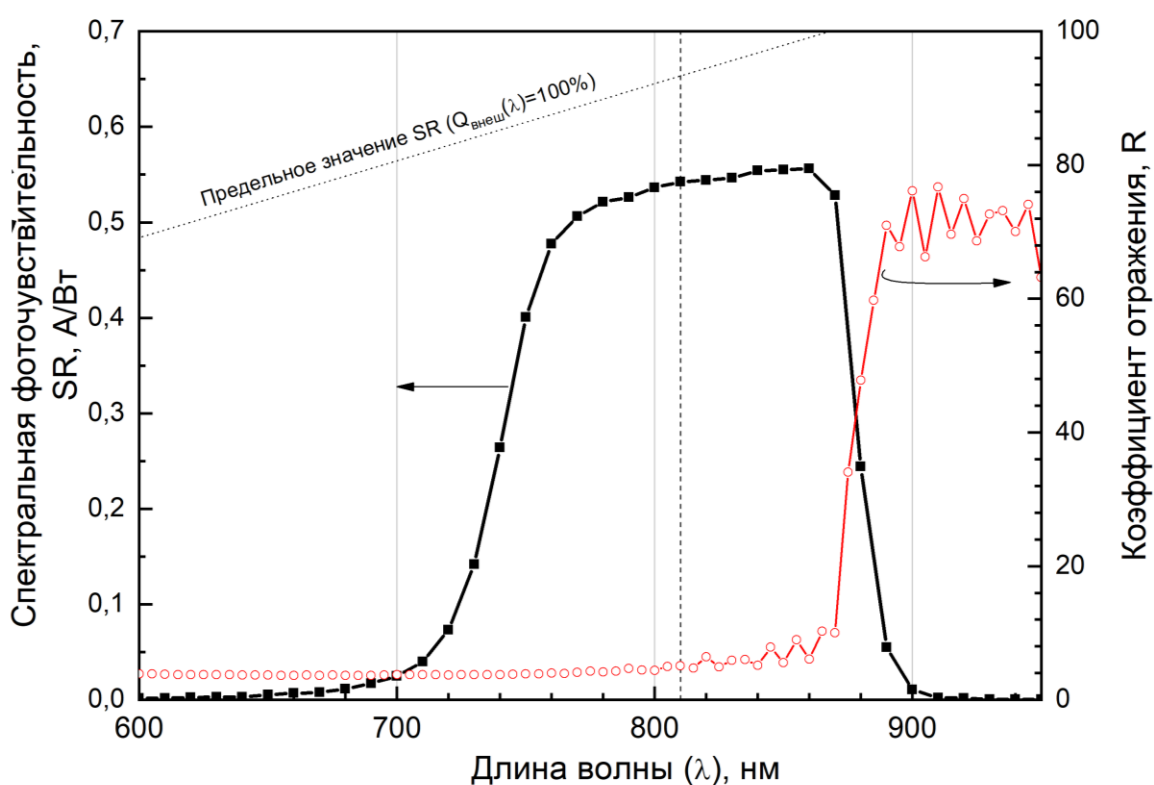


Рис. 6.5. Спектральная зависимость внешней фоточувствительности и коэффициента отражения AlGaAs/GaAs ФЭП с отражателем (шаг шин 50 мкм).

6.1.2. Влияние комбинированного отражателя на характеристики фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

Оценки влияния конструкции ФЭП с отражателем и без на характеристики приборов проводились для двух типов гетероструктур: прямого и инвертированного роста.

Создание структуры ФЭП без отражателя требует прецизионной оптимизации толщин активной области (базы и эмиттера) с точки зрения обеспечения полного поглощения излучения с одной стороны, и сбора неосновных носителей заряда, образованных вдали от p - n перехода, с другой стороны. Это в свою очередь ведет к повышенным требованиям к обеспечению высоких значений диффузионных длин неосновных носителей заряда, особенно в области баз ФЭП.

Толщина активной области инвертированной гетероструктуры была практически в 2 раза меньше относительно структуры прямого роста. В этом случае полное поглощение длинноволнового $\lambda \approx 800$ -860 нм излучения обеспечивалось за счет его двойного прохождения в слоях: при непосредственном вводе в структуру в направлении комбинированного отражателя и при отражении от него. Структуры ФЭП со встроенным отражателем не требуют такой точной оптимизации конструкции и менее чувствительны к значениям диффузионных длин неосновных носителей заряда. Кроме того, ФЭП с тонкой активной областью должны иметь лучшую радиационную стойкость.

На основе гетероструктур изготавливались 3 типа ФЭП:

- прямого роста без отражателя (рис. 6.6, *a*);
- инвертированного роста без отражателя (рис. 6.6, *b*);
- инвертированного роста с отражателем (рис. 6.6, *c*).

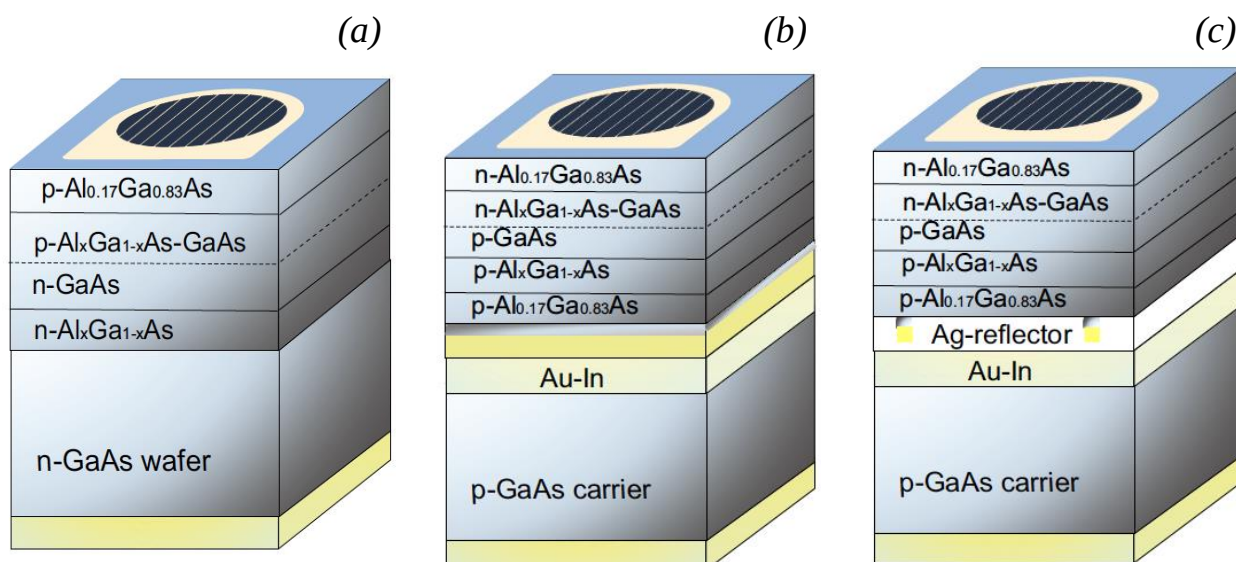


Рис. 6.6. Схематическое изображение ФЭП на основе: *a* – прямой гетероструктуры, *b* – инвертированного роста без отражателя, *c* – инвертированного роста с отражателем.

Анализ влияния конструкции на параметры ФЭП на основе структуры прямого роста без отражателя (рис. 6.6, *a*) и инвертированного роста с отражателем (рис. 6.6, *c*) показал улучшение фотоэлектрических характеристик за счет встраивания в конструкцию прибора отражателя. Наблюдается увеличение значений внешней фоточувствительности на 0.046 А/Вт при преобразовании ЛИ с длиной волны 808 нм (таблица 6.1). Небольшое падение фактора заполнения ВАХ на 1% обусловлено увеличением вклада сопротивления растекания, связанного с формированием тыльного точечного контакта в конструкции ФЭП с отражателем. Увеличение напряжения холостого хода обусловлено поглощением отраженного излучения. Увеличение эффективности ФЭП с отражателем составило более 2%.

Таблица 6.1 – Параметры ФЭП на основе прямой структуры без отражателя и инвертированной структуры с отражателем для ЛИ $\lambda=808$ нм.

Структура	SR_{ext} , А/Вт	FF_{max} , %	Max.Efficiency, % (E_{LR} , Вт/см ²)	$U_{x.x.}$, В ($E_{LR}=500$ Вт/см ²)
Прямая (без отражателя)	0.524	88	57.9 (192)	1.265
Инвертированная (с отражателем)	0.570	87	60 (170)	1.277

Для наглядной демонстрации эффекта возврата в активную область непоглощенного излучения проведен сравнительный анализ ФЭП на основе гетероструктуры инвертированного роста без отражателя (рис. 6.6, *b*) и с комбинированным отражателем (рис. 6.6, *c*). Для снижения оптических потерь на ввод излучения в ФЭП при проведении данного эксперимента проведена оптимизация топологии приборов с диаметром фоточувствительной области 500 мкм с шагом контактной сетки 125 мкм (при ширине шин 6 мкм). Гетероструктура инвертированного роста является неоптимальной для изготовления ФЭП без отражателя из-за малой толщины активной области, что ведет к небольшому спаду спектральной фоточувствительности в диапазоне длин волн 840-860 нм, обусловленным неполным поглощением излучения (рис. 6.7, *a*). При формировании ФЭП с комбинированным отражателем наблюдается увеличение спектральной фоточувствительности до 0.585 А/Вт при длине волны ЛИ 850 нм. Поглощение излучения, отраженного от комбинированного отражателя, сказывается также на увеличении напряжения холостого хода (на 0.16 В). В результате прирост КПД ФЭП составил 6% при работе с мощным 50-100 Вт/см² лазерным излучением (рис. 6.7, *b*).

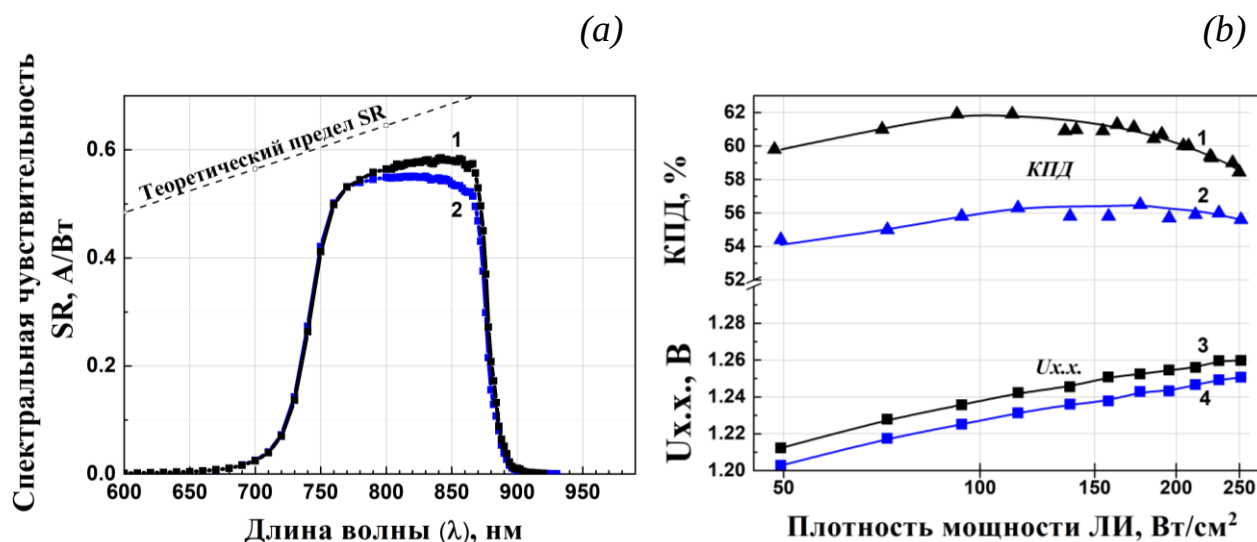


Рис. 6.7. Спектральная зависимость внешней фоточувствительности (*a*) и эффективность (*КПД*) (*b*) ФЭП ЛИ ($\lambda=850$ нм) с шагом шин 125 мкм на основе инвертированной AlGaAs/GaAs структуры. 1, 3 – с отражателем; 2, 4 – без отражателя.

6.1.3. Анализ соотношения оптических и омических потерь для преобразования лазерного излучения различной плотности

Эффективностью преобразования ЛИ различной плотности мощности можно управлять изменяя соотношение омических и оптических потерь. Преобразование высокой плотности мощности ведет к необходимости снижения резистивных потерь, достигаемого при уменьшении вклада сопротивления растекания, контактного сопротивления и последовательного сопротивления прибора в целом. Достижение максимальной эффективности при меньших значениях плотности мощности лазерного излучения возможно при снижении оптических потерь на ввод излучения в ФЭП.

Таким образом, разработка конструкции ФЭП с диаметром фоточувствительной области 500 мкм с оптимизированной контактной системой с шагом шин 125 мкм и с многослойным комбинированным отражателем позволило достигнуть рекордных значений КПД = 62% ($\lambda = 850$ нм) для плотности мощности 100 Вт/см². Увеличение плотности контактных шин (шаг 50 мкм) обеспечило эффективное (КПД > 56%) преобразование излучения в диапазоне мощностей вплоть до 550 Вт/см² (таблица 6.2, рис. 6.8) [A1, A27]. Это является максимальным достигнутым значением для ФЭП ЛИ в указанном диапазоне освещенностей.

Таблица 6.2. Параметры ФЭП на основе прямой структуры без отражателя и инвертированной структуры с отражателем для ЛИ $\lambda=850$ нм.

Структура	Шаг контактной сетки, мкм	SR_{ext} , А/Вт	FF_{max} , %	Max.Efficiency, % (E_{LR} , Вт/см ²)	$U_{x.x.}$, В ($E_{LR} = 500$ Вт/см ²)
Прямая (без отражателя)	50	0.541	88	59.2 (360)	1.261
Инвертированная (с отражателем)	50	0.556	87	60.3 (180)	1.277
	125	0.585	85	61.9 (100)	1.277

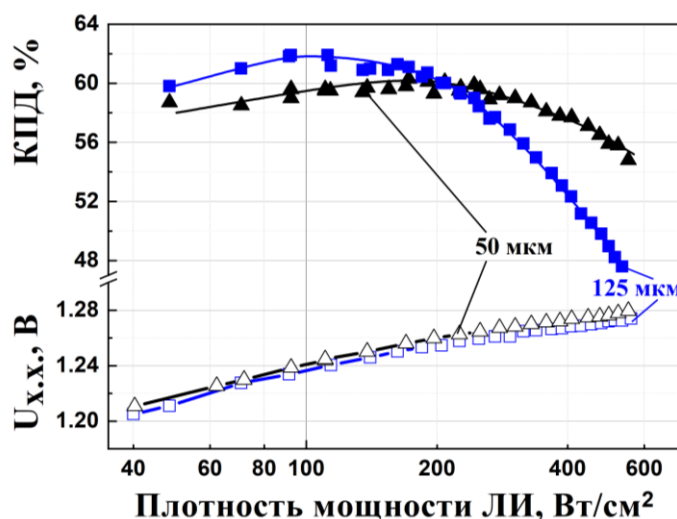


Рис. 6.8. Зависимость эффективности ($KПД$) и напряжения холостого хода ($U_{хх}$) ФЭП с шагом шин 50 и 125 мкм на основе AlGaAs/GaAs структуры с отражателем от плотности мощности лазерного излучения ($\lambda=850$ нм).

Выводы к разделу 6.1

Проведены исследования и разработаны конструкции AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей мощного лазерного излучения. Выполнены исследования по снижению омических потерь ФЭП путем разработки и оптимизации контактных систем n - и p -типа проводимости, разработки различных топологий прибора, обеспечивающих снижение резистивных потерь. Проведена модификация оптических свойств AlGaAs/GaAs гетероструктур для снижения оптических потерь ФЭП. Разработана конструкция приборов с многослойным комбинированным отражателем SiO₂/NiCr/Ag/Ti/Pt. Исследовано влияние монолитности сплавления структуры при переносе на подложку-носитель на параметры ФЭП: выяснено, что образование микродефектов сплавления сказывается на падении фактора заполнения ВАХ и напряжения холостого хода.

Проведен анализ влияния конструкции ФЭП на параметры приборов, достигнуто увеличение внешней фоточувствительности, напряжения холостого хода, эффективности и радиационной стойкости в приборах с комбинированным отражателем. Достигнуты рекордные значения $KПД > 62\%$ для ФЭП при

плотности мощности ЛИ ($\lambda=850$ нм) $P = 100$ Вт/см² и КПД $> 56\%$ при предельной $P = 550$ Вт/см².

6.2. Увеличение эффективности вывода излучения из кристаллов инфракрасных (850 нм и 930 нм) светоизлучающих диодов.

Инфракрасные светоизлучающие диоды широко используются в качестве излучателей для оптических датчиков в беспроводных устройствах, в системах ночного видения, в воздушных дронах и т.д. [89, 90]. Разработки новых конструкций приборов, обеспечивающих более эффективный вывод генерируемого излучения из кристалла, обусловлены повышенными требованиями к оптической мощности излучателей. Разработка гетероструктур с множественными квантовыми ямами, встроенными структурными отражателями на основе слоев брэгговского отражателя [91, 92, A28], дополнительными металлическими слоями на основе Ag или Au позволяет достичь больших значений выходной оптической мощности ИК СИД [12, 16, A6].

Формирование многослойного комбинированного отражателя в ИК СИД с длиной волны излучения < 900 нм необходимо проводить непосредственно между активной областью и GaAs подложкой, поглощающей излучение в данном диапазоне длин волн. При изготовлении ИК СИД с длиной волны излучения > 900 нм возможно проведение двух технологических решений:

- формирование отражателя между активной областью и GaAs подложкой;
- формирование отражателя на тыльной стороне GaAs подложки.

В первом варианте излучение, генерированное в активной области СИД и распространяющееся в сторону подложки, отражается от отражателя, потери излучения на поглощение в подложке отсутствуют. Во втором варианте, происходит частичное поглощение излучения, распространяющегося в сторону подложки, на свободных носителях легированной подложки GaAs. Доля излучения, прошедшего через подложку, отражается от комбинированного

отражателя в сторону световыводящей поверхности СИД. Подробно приведенные конструкции рассмотрены в разделе 6.2.5.

Увеличение интенсивности вывода излучения достигается также при оптимизации технологии формирования фронтальной световыводящей поверхности ИК СИД. Основными методами являются текстурирование поверхности, осаждение просветляющего покрытия и формирование оптического элемента, а также комбинирование данных методов [A29]. Формирование текстурированной световыводящей области увеличивает площадь поверхности для вывода излучения и изменяет угол отражения, повышая вероятность выхода излучения при многократном отражении. Формирование просветляющего покрытия на поверхности повышает долю выходящего излучения за счет разницы показателей преломления. Корпусирование кристаллов СИД заключается в формировании на световыводящей поверхности оптического элемента, изготовленного из оптически прозрачного материала, одновременно обеспечивающего защиту кристалла СИД (рис. 6.9). Использование материала оптического элемента со значением показателя преломления ниже, чем у полупроводника, но выше чем у воздуха ($1 < n < 3$), понижает угол полного внутреннего отражения и повышает эффективность вывода излучения из кристалла [29], что дает полуторакратный прирост внешней квантовой эффективности СИД.

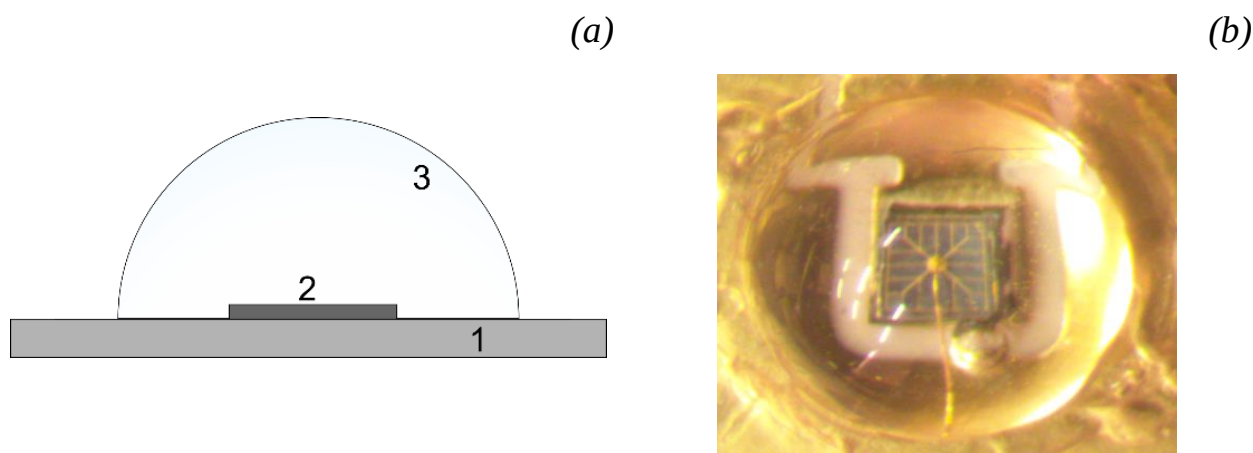


Рис. 6.9. Схематическое изображение (a) и фотография (b) ИК СИД, смонтированного на керамическое теплоотводящее основание, с силиконовой полусферой. 1 – теплоотводящее основание, 2 – кристалл СИД, 3 – оптический элемент.

6.2.3. Влияние методов текстурирования световыводящей поверхности на интенсивность электролюминесценции инфракрасных светоизлучающих диодов

Увеличение эффективности вывода излучения из кристалла возможно при формировании специфического профиля световыводящей поверхности текстурированием, обеспечивающим увеличение площади для выхода излучения, а также изменение угла отражения излучения и увеличение процента вывода излучения в многопроходных структурах. Текстурирование проводится с использованием методов химического или реактивного ионно-плазменного травления поверхности гетероструктуры на основе AlGaAs/GaAs [93, 94], либо микрорельеф формируется непосредственно в диэлектрическом покрытии, нанесенном на световыводящую поверхность. Текстурирование методом РИПТ проводится в плазме трихлорида бора (BCl_3) через маску из сфер полистирола. Метод химического травления осуществляется с использованием широкого спектра химических реактивов либо через маску фоторезиста, либо непосредственно через маску фронтального омического контакта.

Формирование гетероструктуры ИК СИД прямого роста завершается кристаллизацией слоя твердого раствора $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной 4-6 мкм и контактного слоя $p\text{-GaAs}$. Формирование текстурированной поверхности проводится непосредственно в слое $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, при этом контактный слой, поглощающий излучение, должен быть удален в местах свободных от омического контакта.

Проведена разработка текстурирования световыводящей поверхности методом РИПТ: сначала стравливается контактный слой GaAs для вскрытия нижележащего слоя твердого раствора $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$. Далее формируется маска из сфер полистирола путем переноса их с поверхности 40% раствора этилового спирта, обеспечивающего увеличение смачиваемости поверхности и равномерности распределения сфер, проводится оптимизация диаметра сфер в кислородной плазме и непосредственно травление $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ в плазме BCl_3 со

скоростью порядка 1-1.2 мкм/мин. Вид текстурированной поверхности представлен на рис. 6.10, высота пирамид составила 0.2-0.4 мкм, что обеспечило максимальное увеличение интенсивности электролюминесценции на длине волны 850 нм.

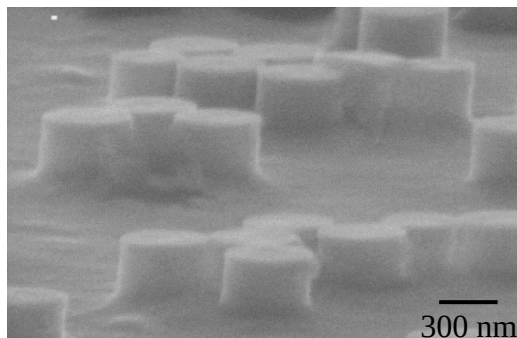


Рис. 6.10. Изображение СЭМ скола гетероструктуры AlGaAs/GaAs после текстурирования поверхности в плазме BCl₃.

Разработан ряд химических травителей для проведения текстурирования методом химического травления: на основе азотной кислоты различной концентрации и на основе плавиковой кислоты, фтористого аммония и перекиси водорода. Травление слоя Al_{0.2}Ga_{0.8}As в разбавленной азотной кислоте (HNO₃ 20–25%) осуществляется со скоростью 0.5-0.7 мкм/сек на глубину 2-3 мкм одновременно со стратификацией контактного слоя, высота пирамид при этом составляет 1-2.5 мкм (рис. 6.11, а). Высокая скорость травления приводит к снижению задания точности профиля текстурированной поверхности, а изменение концентрации HNO₃ при этом ведет к нарушению баланса окислителя и восстановителя в растворе, препятствует протеканию химических реакций, что сказывается на плотности расположения пирамид на поверхности гетероструктуры.

Проведена разработка и исследование травителя на основе плавиковой кислоты, фтористого аммония и перекиси водорода (NH₄F:HF:H₂O₂ в соотношении массовых частей 42:6:8). При травлении в данном составе в течении 20-30 сек происходит формирование полусфер высотой 0.2-0.5 мкм, при дальнейшей обработке до 60-100 сек фронтальная поверхность полусфер

сглаживается и образуются усеченные "пирамиды", с основанием порядка 1-2 мкм. Причем при проведении травления с промежуточной промывкой образца, происходит формирование неупорядоченных пиков (рис. 6.11, *b*). Скорость травления p^+ -Al_{0.2}Ga_{0.8}As составляет 0.8-1.2 мкм/мин, что позволяет проводить контролируемое текстурирование поверхности с формированием пиков различной высоты 0.2-1 мкм.

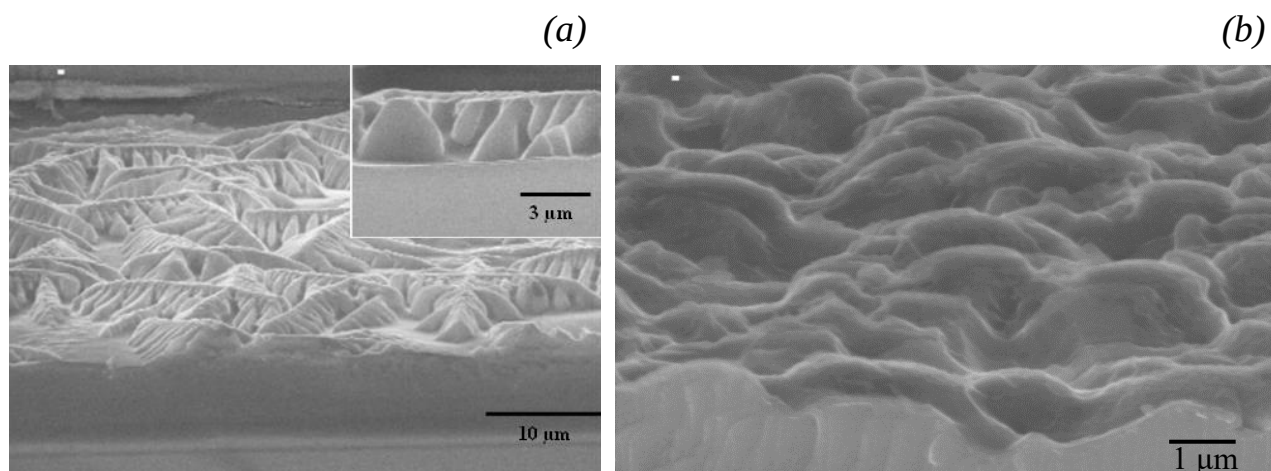


Рис. 6.11. Изображение СЭМ скола гетероструктуры AlGaAs/GaAs после текстурирования поверхности в разбавленной азотной кислоте (*a*) и в травителе HF:NH₄F:H₂O₂ в режиме с промежуточным промыванием (*b*).

Для анализа и сравнения методов текстурирования проведены измерения интенсивности электролюминесценции (см. раздел 2.5) для ИК СИД (850 нм) без обработки световыводящей поверхности, с текстурированием в плазме BCl₃, в травителе на основе плавиковой кислоты, фтористого аммония и перекиси водорода (рис. 6.12). Использование травителя на основе разбавленной азотной кислоты ведет к существенному увеличению сопротивления растекания – более чем в 1.6 раза, деградации параметров ИК СИД при несущественном увеличении интенсивности электролюминесценции. При текстурировании светодиода в плазме BCl₃ весьма затруднительно обеспечить равномерное травление поверхности гетероструктуры через маску из сфер полистирола. Максимальное увеличение интенсивности электролюминесценции на 20% достигнуто при высоте пиков 0.2 мкм. Использование травителя на основе плавиковой кислоты, фтористого аммония и перекиси водорода позволяет проводить формирование

пиков высотой 0.2-0.5 мкм различной конфигурации. Максимальное увеличение интенсивности электролюминесценции на 25% достигнуто при текстурировании в $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}_2$ в течении 30 сек, хотя и ведет к небольшому увеличению сопротивления растекания тока [A29].

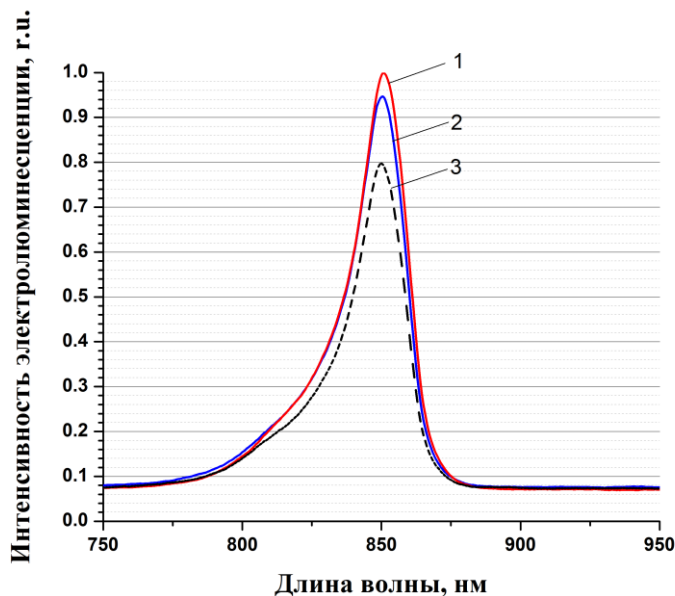


Рис. 6.12. Зависимость интенсивности электролюминесценции от методов текстурирования поверхности ИК СИД: 1 – текстурирование в травителе $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}_2$, 2 – текстурирование в плазме BCl_3 , 3 – без текстурирования.

6.2.4. Влияние состава комбинированных отражателей на параметры инфракрасных (850 нм) светоизлучающих диодов

Изготовлены ИК СИД площадью 1 мм^2 (рис. 6.13) с различной комбинацией отражателей:

- на основе гетероструктуры прямого роста с внутренними структурными отражателями: БО и слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм);
- на основе гетероструктуры инвертированного роста с многослойным комбинированным отражателем из слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм), слоя диэлектрика SiO_2 , адгезионного слоя NiCr (0.5 нм), металлического слоя Ag без барьерных слоев и с барьерными слоями Ti (50 нм)+ Pt (50 нм).



Рис. 6.13. Фотография ИК СИД площадью $1 \times 1 \text{ мм}^2$ с различной топологией контактной сетки.

Выполнен монтаж кристаллов СИД на теплоотводящие основания из металлизированной алюмо-оксидной теплопроводящей электроизолирующей керамики, сформирован оптический элемент на поверхности кристаллов.

Проведен сравнительный анализ влияния конструкции ИК СИД на характеристики приборов. Измерения ватт-амперных характеристик (ВАХ) СИД (рис. 6.14) осуществлялись в импульсном ($\tau_{\text{имп}} = 5\text{-}300 \text{ мкс}$) режиме. Импульсный режим позволял проводить испытания до плотностей тока $100\text{-}500 \text{ А/см}^2$ в разработанных СИД. Измеренные величины последовательного сопротивления приборов площадью 1 мм^2 составили $R = 0.08 \text{ Ом}$ в СИД на основе прямой структуры и $R = 0.16 \text{ Ом}$ в СИД на основе инвертированной структуры с отражателем, полученных переносом структуры на подложку-носитель GaAs. Большие значения последовательного сопротивления в структурах СИД с отражателем обусловлены увеличением вклада сопротивления растекания при формировании тыльного точечного контакта. Формирование СИД на основе прямой структуры позволяет существенно снизить последовательное сопротивление приборов, однако низкая эффективность отражателя на основе структурных слоев ведет к существенному снижению эффективности работы прибора. Таким образом, увеличение последовательного сопротивления в 2 раза на структурах СИД с отражателем нивелируется существенным увеличением степени отражения генерированного излучения от многослойного комбинированного отражателя.

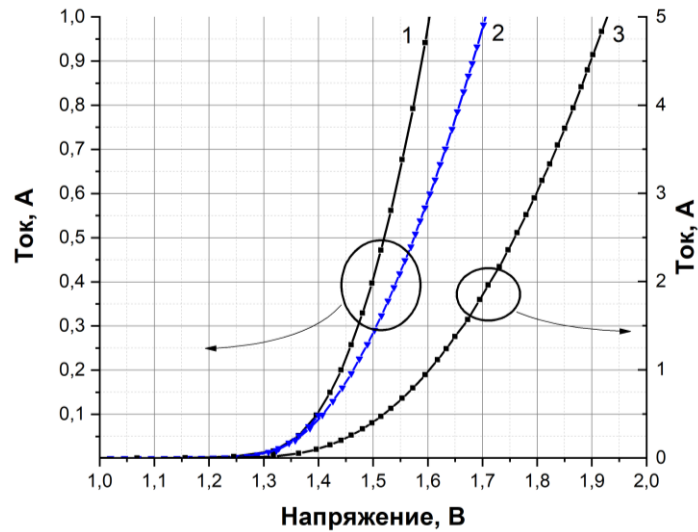


Рис. 6.14. ВАХ ИК СИД: 1,3 – СИД на основе прямой структуры; 2 – СИД на основе инвертированной структуры с отражателем.

Существенное влияние на параметры СИД с комбинированным отражателем оказывает конструкция отражателя. Введение барьерных слоев Ti+Pt увеличивает коэффициент отражения всего на несколько процентов в приборных структурах (см. главу 5). Однако, в многопроходных ИК СИД, где генерированное в активной области излучение распространяется равномерно во все стороны, даже небольшое увеличение оптических свойств отражателя ведет к существенному возрастанию внешней квантовой эффективности (рис. 6.15).

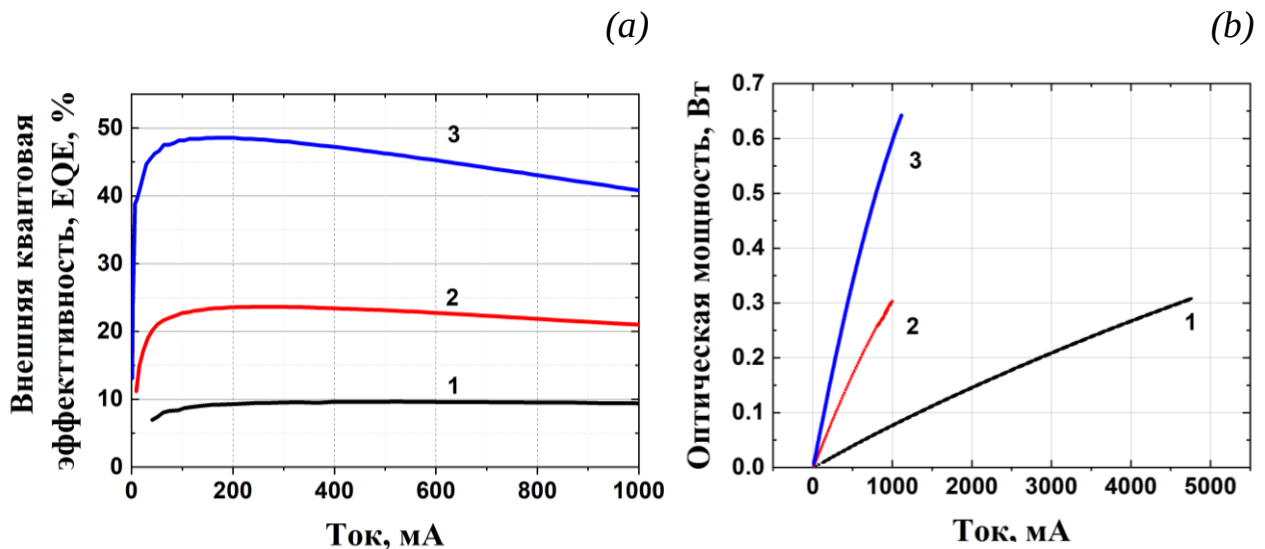


Рис. 6.15. Токзовые зависимости внешней квантовой эффективности (EQE) (a) и оптической мощности (b) ИК СИД (850 нм) на основе: 1 – прямой структуры с $\text{BO}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$; 2, 3 – инвертированной структуры с отражателем $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}$; 3 – с дополнительными барьерными слоями Ti+Pt.

Значения внешней квантовой эффективности (EQE) и оптической мощности ($P_{изл.}$) в разработанных СИД (площадью 1 мм^2) составили (рис. 6.15):

- $EQE = 9-9.5\%$ в диапазоне токов $0.2-1 \text{ А}$ и $P_{изл.} = 300 \text{ мВт}$ при токе 4.5 А в СИД на основе прямой структуры со структурными отражающими слоями БО и $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ (300 нм);

- $EQE = 23\%$ при токе 0.2 А , $EQE = 17\%$ при токе 1 А , $P_{изл.} = 250 \text{ мВт}$ при токе $I = 1 \text{ А}$ в СИД на основе инвертированной структуры с отражателем $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}$;

- $EQE = 48\%$ в диапазоне токов $0.1-0.3 \text{ А}$, $EQE = 40\%$ при токе 1 А , $P_{изл.} = 600 \text{ мВт}$ при токе 1 А получены в СИД на основе инвертированной структуры с отражателем $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}$ с барьерными слоями $\text{Ti}+\text{Pt}$.

По результатам измерений вольтамперных и ватт-амперных характеристик ИК СИД могут быть сделаны следующие выводы: максимальная величина внешней квантовой эффективности достигается в СИД на основе инвертированной структуры с многослойным комбинированным отражателем $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}/\text{Ti}/\text{Pt}$.

6.2.5. Конструкции инфракрасных (930 нм) светоизлучающих диодов

При разработке конструкции ИК СИД с длиной волны излучения 930 нм существенным является механизм потерь в легированной (акцепторами или донорами) подложке GaAs при поглощении на свободных носителях. При этом намеренное уменьшение степени легирования подложки с точки зрения прибора приведет к возрастанию резистивных потерь, что негативно скажется на его эффективности [А30].

Для анализа степени пропускания легированными подложками GaAs n - и p -типа проводимости излучения в исследуемом диапазоне длин волн были выполнены измерения коэффициента пропускания от зеркальной поверхности подложек без просветляющего покрытия (рис. 6.16). Исследование показало, что коэффициент пропускания GaAs n -типа проводимости с уровнем легирования $(4-6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (измерено методом Холла, см. раздел 2.5) составил $43-44\%$ на

длине волны 930 нм, а GaAs *p*-типа проводимости 7-8%. Коэффициент отражения от полированной поверхности GaAs составляет порядка 40% [95]. Однако даже пропускание просветлённой подложки *n*-GaAs не превышает 84%, что ведет к существенному снижению внешней квантовой эффективности при формировании ИК СИД (930 нм) на основе ростовой подложки GaAs.

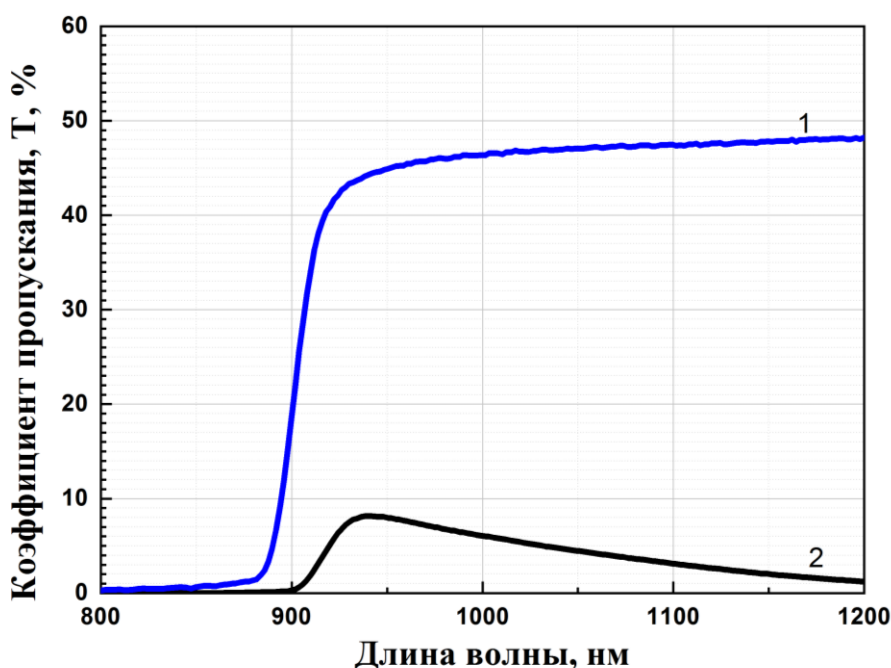


Рис. 6.16. Спектральная зависимость коэффициента пропускания излучения легированными подложками $(4-6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ GaAs *n*- (1) и *p*- (2) типа проводимости.

Для анализа влияния конструкции ИК СИД (930 нм) на характеристики приборов были рассмотрены следующие варианты:

- ИК СИД на основе инвертированной гетероструктуры с удаленной ростовой подложкой и комбинированным отражателем $\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}$ с барьерными слоями Ti+Pt, встроенным между активной областью и подложкой-носителем (рис. 6.17, а).

- ИК СИД на основе прямой гетероструктуры, выращенной на подложке GaAs *n*-типа проводимости с разным уровнем легирования подложки (с концентрацией донорной примеси $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\sim 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), с многослойным

комбинированным отражателем $\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}$ сформированным на тыльной стороне ростовой подложки (рис. 6.17, *b*);

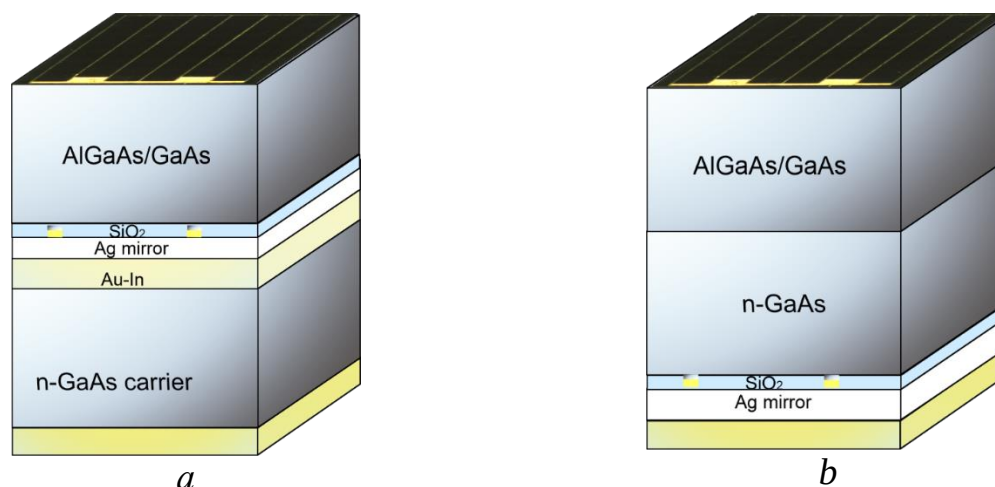


Рис. 6.17. Схематическое изображение ИК СИД с комбинированным отражателем между активной областью и подложкой-носителем (*a*) и на тыльной стороне ростовой подложки (*b*).

Таким образом, обе приведенные конструкции СИД включают комбинированный отражатель. Однако, в конструкции с удаленной ростовой подложкой, отражатель расположен между активной областью и подложкой-носителем, и излучение, распространяющееся в сторону подложки, отражается от тыльного отражателя с коэффициентом отражения порядка 98% (см. главу 5). При рассмотрении конструкции ИК СИД без удаленной ростовой подложки, излучение, генерированное в активной области и распространяющееся в сторону отражателя, частично поглощается в подложке *n*-GaAs. Как было рассмотрено выше, снижение коэффициента отражения от отражателя даже на несколько процентов оказывает существенное влияние на величину внешней квантовой эффективности в многопроходных структурах.

Проведен анализ влияния конструкции ИК СИД (930 нм) на величину внешней квантовой эффективности и оптической мощности (рис. 6.18).

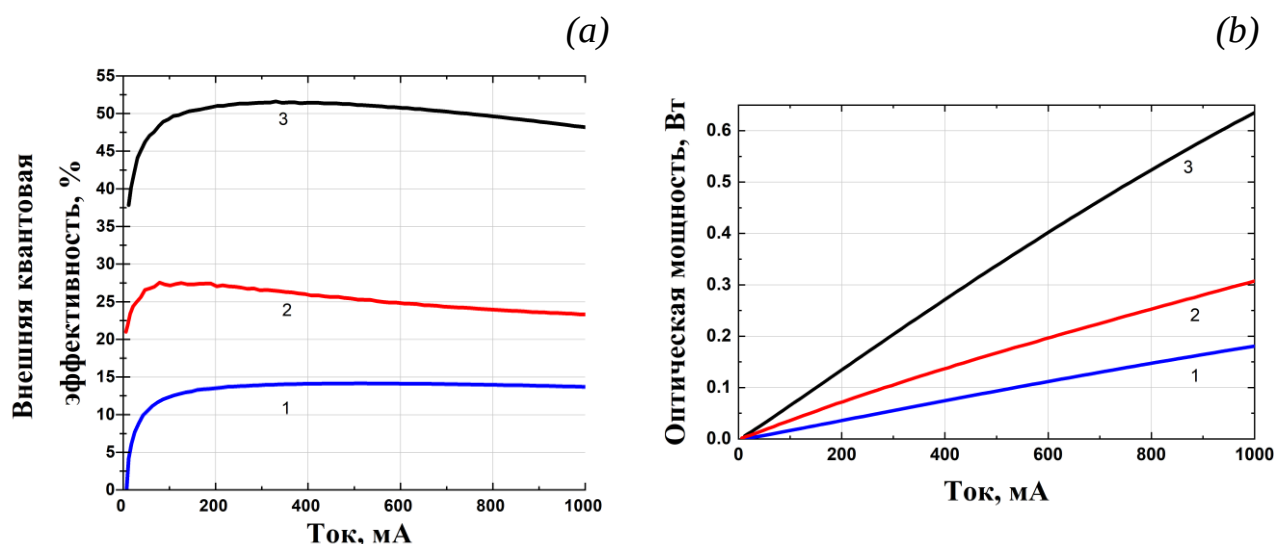


Рис. 6.18. Токовые зависимости внешней квантовой эффективности (а) и оптической мощности (б) ИК СИД (930 нм) на основе: 1 - прямой структуры на *n*-GaAs сильно легированной подложке ($4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$); 2 - на основе прямой структуры на *n*-GaAs слабо легированной подложке ($5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$); 3 - на основе инвертированной структуры с удаленной ростовой подложкой.

Значения внешней квантовой эффективности (EQE) в разработанных СИД (площадью 1 мм^2) составили:

- EQE = 13-14% в диапазоне токов 0.15-1 А и $P_{\text{изл.}} = 180 \text{ мВт}$ при токе 1 А в СИД на основе прямой структуры на *n*-GaAs подложке с концентрацией примеси $\sim 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;

- EQE = 25-27% в диапазоне токов 0.05-0.5 А и $P_{\text{изл.}} = 300 \text{ мВт}$ при токе 1 А в СИД на основе прямой структуры на *n*-GaAs с концентрацией донорной примеси $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;

- EQE = 50-51% в диапазоне токов 0.1-0.7 А и $P_{\text{изл.}} = 630 \text{ мВт}$ при токе 1 А получены в СИД на основе инвертированной структуры с удаленной ростовой подложкой.

Результаты исследований показали, что сдвиг края поглощения легированной подложки GaAs оказывает существенное влияние на оптические свойства отражателя и, соответственно, на эффективность работы приборов. Удаление ростовой подложки GaAs *n*-типа проводимости позволяет увеличить

величину внешней квантовой эффективности практически в 2 раза, а значение оптической мощности почти в 4 раза.

Выводы к разделу 6.2

Выполнены исследования влияния конструкций и технологий ИК (850 нм и 930 нм) СИД на основе квантово-размерных гетероструктур с БО в комбинации со слоем $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, а также ИК СИД с многослойным комбинированным отражателем, полученных методом переноса $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ гетероструктуры на подложку-носитель с последующим травлением подложки.

В ИК СИД (850 нм) максимальная внешняя квантовая эффективность $\text{EQE} = 48\%$ достигнута при плотности тока $10\text{--}20 \text{ А/см}^2$, величина оптической мощности излучения составила $P_{\text{изл.}} = 600 \text{ мВт}$ при токе 1 А в приборах с многослойным комбинированным отражателем $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{SiO}_2/\text{NiCr}/\text{Ag}/\text{Ti}/\text{Pt}$.

В ИК СИД (930 нм) максимальная внешняя квантовая эффективность $\text{EQE} = 51\%$ достигнута при плотности тока $10\text{--}70 \text{ А/см}^2$, величина оптической мощности излучения составила $P_{\text{изл.}} = 630 \text{ мВт}$ при токе 1 А в СИД на основе инвертированной структуры с многослойным комбинированным отражателем, встроенным в конструкцию прибора между активной областью гетероструктуры и подложкой-носителем.

Для каждого типа исследованных СИД может быть определена своя область применения. ИК СИД малой площади на основе прямой структуры со структурными отражающими слоями, изготавливаемые по простой планарной постростовой технологии, могут найти применение в оптоэлектронных интегральных СВЧ схемах. Высокоэффективные мощные ИК СИД ($P_{\text{изл.}} > 600 \text{ мВт}$), включающие многослойный комбинированный отражатель могут использоваться, например, для ИК подсветки и в охранных системах.

Заключение

Основные результаты работы:

1. Выполнен расчет конфигурации контактных шин трапецевидного сечения с зеркальными боковыми гранями, отражающими излучение к фоточувствительной области ФЭП. Разработана технология формирования контактных шин согласно рассчитанной конфигурации путем электрохимического осаждения слоев серебра. Для ФЭП СИ на основе GaInP/GaInAs/Ge структуры получен прирост внешнего квантового выхода фотоответа субэлементов на 2-3% и обеспечена возможность преобразования сильноконцентрированного СИ (до 3000 солнц) без существенного падения эффективности фотопреобразователя.
2. Разработана новая контактная система на основе слоев NiCr/Ag/Au с удельным контактным сопротивлением $(1-2) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к слоям GaAs и GaSb *p*-типа проводимости и $(2-4) \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ к *p*-Ge, обладающая низкой степенью диффузии в материал полупроводника (менее 15 нм) и хорошей адгезией.
3. Показано, что создание меза-структуры каскадных ФЭП методами реактивного ионно-плазменного и химического травления обеспечивает подавление поверхностной рекомбинации на 2 порядка, а пассивация мезы диэлектрическими защитными покрытиями на основе Si₃N₄ и силикона уменьшает деградацию параметров при воздействии факторов окружающей среды (температуры, влажности) и увеличивает выход годных приборов до 95%.
4. Для GaSb ФЭП ЛИ со структурой, получаемой двухстадийной диффузией цинка в подложку, снижено удельное контактное сопротивление при использовании новой контактной системы на основе NiCr/Ag/Au и увеличена электрическая проводимость контакта при электрохимическом наращивании слоев Ag/Ni/Au. При использовании разработанной контактной системы и за счет оптимизации конструкции ФЭП ЛИ впервые превышен порог в 38% по эффективности преобразования излучения высокой плотности мощности (до 1.6 кВт/см^2) в приборах с диаметром фоточувствительной области Ø30 мкм.

5. Разработан новый многослойный комбинированный "тыльный" отражатель, предотвращающий потери, связанные с поглощением излучения в подложке и способствующий его возврату в активную область, для ФЭП ЛИ и ИК СИД на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур, включающий широкозонный слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, слой диэлектрика с минимальным коэффициентом преломления (SiO_2), адгезионный слой (NiCr), металлический слой с высоким коэффициентом отражения (Ag), барьерные слои (Ti+Pt). Расчетное значение коэффициента отражения для ИК излучения (800-940 нм) составило более 99%. Экспериментально подтверждено снижение оптических потерь при сохранении свойств гетероструктур ФЭП ЛИ и ИК СИД.
6. Снижены омические и оптические потери при изготовлении мощных ФЭП ЛИ (800-860 нм) на основе AlGaAs/GaAs гетероструктуры с многослойным комбинированным отражателем. Достигнуто рекордное значение КПД $> 62\%$ при плотности мощности лазерного излучения ($\lambda = 850$ нм) $P = 100$ Вт/см², КПД $> 56\%$ при высокой плотности мощности $P = 550$ Вт/см².
7. Увеличена эффективность вывода излучения из кристаллов ИК (850-940 нм) СИД на основе AlGaAs/GaAs гетероструктуры с квантовыми ямами и многослойным комбинированным отражателем. Максимальная внешняя квантовая эффективность (EQE) ИК СИД (850 нм) составила более 48% при плотности тока 10-20 А/см², значение оптической мощности превысило 600 мВт при токе 1 А.

Публикации по теме диссертации

- A1. N. A. Kalyuzhnyy, A. V. Malevskaya, S. A. Mintairov, M. A. Mintairov, M. V. Nakhimovich, R. A. Salii, M. Z. Shvarts, V. M. Andreev. Photovoltaic AlGaAs/GaAs devices for conversion of high-power density laser (800–860 nm) radiation // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2023. – Vol. 262, no 112251.
- A2. А. В. Малевская, Н. Д. Ильинская, Ю. М. Задиранов, А. А. Блохин, Д. А. Малевский, П. В. Покровский. Постростовые технологии каскадных фотоэлектрических преобразователей на основе АЗВ5-гетероструктур // *Журнал Технической Физики*. – 2022. – Т. 92, № 1. – С. 108–112.
- A3. S. A. Levina, V. M. Emelyanov, A. V. Malevskaya, E. D. Filimonov, M. Z. Shvarts. The external quantum efficiency of multijunction solar cells with built-in 1D photonic crystals // *Международная конференция физика. СПб. Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1135, 1, no 012075.
- A4. V. P. Khvostikov, S. V. Sorokina, O. A. Khvostikova, N. S. Potapovich, A. V. Malevskaya, M. V. Nakhimovich, M. Z. Shvarts. GaSb Photovoltaic Cells for Laser Power Conversion // 15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, CPV 2019. AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2149, no 050007.
- A5. А. В. Малевская, Н. А. Калюжный, Д. А. Малевский, С. А. Минтаиров, А. М. Надточий, М. В. Нахимович, Ф. Ю. Солдатенков, М. З. Шварц, В. М. Андреев. Инфракрасные (850 нм) светодиоды с множественными квантовыми ямами InGaAs и “тыльным” отражателем // *Физика и Техника Полупроводников*. – 2021. – Т. 55, № 8. – С. 699–703.
- A6. А. В. Малевская, Н. А. Калюжный, Р. А. Салий, Ф. Ю. Солдатенков, М. В. Нахимович, Д. А. Малевский. Влияние свойств тыльного отражателя на характеристики инфракрасных светоизлучающих диодов на основе

AlGaAs/GaAs гетероструктуры // Письма в Журнал Технической Физики. – 2024. – Т. 50, № 18. – С. 22–26.

- A7. S. A. Levina, E. D. Filimonov, A. V. Malevskaya, V. M. Emelyanov, M. A. Mintairov, N. A. Kalyuzhnyy, V. V. Evstropov, M. Z. Shvarts. Light Budget in MJ SC at Temperature Tuning // 15Th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, CPV 2019. AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2149, no 080004.
- A8. S. A. Levina, E. D. Filimonov, A. V. Malevskaya, M. Z. Shvarts. Bragg reflectors as a light trap in multijunction solar cells. // 20-я Всероссийская. молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, опто- и наноэлектронике. Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1199, 1, no 012033.
- A9. В. М. Андреев, Н. Д. Ильинская, А. В. Малевская, В. Д. Румянцев. Солнечный фотоэлектрический субмодуль // Патент РФ № 2442244. – 2012.
- A10. A. V. Malevskaya, F. Yu. Soldatenkov, R. V. Levin, N. A. Kalyuzhnyy, M. Z. Shvarts. Low Temperature Ohmic Contact for High-Power AlGaAs/GaAs Photovoltaic Converters // Vacuum. – 2025. – Vol. 233, no 114030.
- A11. А. В. Малевская, Ф. Ю. Солдатенков, Р. В. Левин, Н. С. Потапович. Влияние режимов формирования контактной системы Pd/Ge/Au к n-GaAs на ее электрические характеристики // Письма в Журнал Технической Физики. – 2023. – Т. 49, № 3. – С. 15–18.
- A12. Ф. Ю. Солдатенков, А. В. Малевская. Фотоэлектрический преобразователь // Патент РФ № 2756171. – 2021.
- A13. A. V. Malevskaya, D. A. Malevski, N. D. Il`inskaya. Effect of bus-bar material and configuration on the efficiency of GaInP/GaAs/Ge solar cells // 17-я Всероссийская. молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, опто- и наноэлектронике. Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 690, 1, no 012039.

- A14. А. В. Малевская, Н. Д. Ильинская, Д. А. Малевский, П. В. Покровский. Электрохимическое осаждение контактных материалов в постростовой технологии фотоэлектрических преобразователей // Физика и Техника Полупроводников. – 2022. – Т. 56, № 3. – С. 376–379.
- A15. А. В. Малевская, Н. Д. Ильинская, Д. А. Малевский, П. В. Покровский. Способ изготовления омических контактов фотоэлектрического преобразователя // Патент РФ № 2756198. – 2021.
- A16. А. В. Малевская, Н. Д. Ильинская, В. М. Андреев. Разработка методов жидкостного травления разделительной меза-структуры при создании каскадных солнечных элементов // Письма в Журнал Технической Физики. – 2019. – Т.45, № 24. – С. 14–16.
- A17. V. S. Kalinovsky, E. A. Grebenshikova, P. A. Dmitriev, N. D. Il`inskaya, E. V. Kontrosh, A. V. Malevskaya, A. A. Usikova, V. M. Andreev. Photoelectric characteristics of InGaP/Ga(In)As/Ge solar cells fabricated with a single-stage wet chemical etching separation process // AIP Conference Proceedings. – 2014. – Vol.1616. – P. 326–330.
- A18. А. В. Малевская, Ю. М. Задиранов, Д. А. Малевский, П. В. Покровский, Н. Д. Ильинская, В. М. Андреев. Плазмохимическое и жидкостное травление в постростовой технологии каскадных солнечных элементов на основе гетероструктуры GaInP/GaInAs/Ge // Письма в Журнал Технической Физики. – 2021. – Т. 47, № 3. – С. 14–17.
- A19. А. В. Малевская, Д. А. Малевский, П. В. Покровский, В. М. Андреев. Исследование методов пассивации и защиты каскадных солнечных элементов // Письма в Журнал Технической Физики. – 2020. – Т.46, № 19. – С. 35–37.
- A20. В. П. Хвостиков, С. В. Сорокина, О. А. Хвостикова, А. В. Малевская. Мощный преобразователь узкополосного излучения для длины волны

- 1550 нм. // Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики. Сборник трудов Российской конференции. – 2021. – С. 106–107.
- A21. В. П. Хвостиков, А. В. Малевская, П. В. Покровский, О. А. Хвостикова, Ф. Ю. Солдатенков, М. В. Нахимович. Микроразмерные GaSb фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения высокой плотности // Письма в Журнал Технической Физики. – 2025. – Т. 51, № 4. – С. 50–53.
- A22. В. М. Андреев, В. С. Калиновский, Н. А. Калюжный, Е. В. Контрош, А. В. Малевская, С. А. Минтаиров, М. З. Шварц. Мощный субнаносекундный модуль на основе p-i-n AlGaAs/GaAs-фотодиодов // Письма в Журнал Технической Физики. – 2024. – Т. 50, № 19. – С. 3-6.
- A23. V. P. Khvostikov, A. N. Panchak, O. A. Khvostikova, P. V. Pokrovskiy, A. V. Malevskaya. Optimizing the size of vertical-junction GaAs PV cells with AlGaAs gradient waveguide // IEEE Electron Device Letters. – 2024. – Vol. 45, № 8. – P. 1417–1420.
- A24. V. P. Khvostikov, N. S. Potapovich, N. A. Kalyuzhnyy, S. V. Sorokina, S. A. Mintairov, O. A. Khvostikova, N. Kh. Timoshina, A. A. Usikova, A. V. Malevskaya, N. Yu. Davidyuk, A. S. Vlasov, V. M. Andreev. GaAs Photovoltaic Converters and Arrays for wireless power transmitting systems // Proceedings of the 29 European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – 2014. – P. 80–83.
- A25. А. В. Малевская, В. С. Калиновский, Н. Д. Ильинская, Д. А. Малевский, Е. В. Контрош, М. З. Шварц, В. М. Андреев. Влияние структуры омических контактов на характеристики GaAs/AlGaAs фотоэлектрических преобразователей // Журнал Технической Физики. – 2018. – Т. 88, № 8. – С. 1211–1215.
- A26. В. М. Андреев, Н. А. Калюжный, С. А. Минтаиров, Р. А. Салий, А. В. Малевская, Ф. Ю. Солдатенков, А. А. Блохин, С. А. Левина, М. В.

Нахимович, М. З. Шварц. Фотоэлектрический преобразователь // Патент РФ № 2805290. – 2023.

- A27. А. В. Малевская, Н. А. Калюжный, Д. А. Малевский, А. А. Блохин, М. В. Нахимович, Н. Д. Ильинская. Формирование световыводящей поверхности инфракрасных (850 nm) светоизлучающих диодов // Журнал Технической Физики. – 2024. – Т. 94, № 6. – С. 888–893.
- A28. А. В. Малевская, Н. А. Калюжный, Ф. Ю. Солдатенков, Р. В. Левин, Р. А. Салий, Д. А. Малевский, П. В. Покровский, В. Р. Ларионов, В. М. Андреев. Исследование технологии изготовления мощных ИК (850 nm) светодиодов, получаемых методом переноса AlGaAs-GaAs-гетероструктуры на подложку-носитель // Журнал Технической Физики. – 2023. – Т. 93, № 1. – С. 170–174.
- A29. А. В. Малевская, Н. Д. Ильинская, Н. А. Калюжный, Д. А. Малевский, Ю. М. Задиранов, П. В. Покровский, А. А. Блохин, А. В. Андреева. Исследование методов текстурирования светодиодов на основе гетероструктур AlGaAs/GaAs // Физика и Техника Полупроводников. – 2021. – Т. 55, № 11. – С. 1086–1090.
- A30. Р. А. Салий, А. В. Малевская, Д. А. Малевский, С. А. Минтаиров, А. М. Надточий, Н. А. Калюжный. Управление параметрами InGaAs квантовых ям в активной области светодиодов ближнего ИК диапазона (850-940 nm) // Оптика и Спектроскопия. – 2024. – Т. 132, № 11. – С. 1146–1149.

Список литературы

- [1] Handbook on Concentrator Photovoltaic Technology / ed. by C. Algora, I. Rey-Stolle. – New York, US: John Wiley & Sons, 2016. – P. 59–244, 339–432, 589–684.
- [2] G.C. Schwartz, K.V. Srikrishnan. Hadbook of semiconductor interconnection technology / Boca Raton: CRC Press, 2006. – 536 p.

- [3] Renewable Energy Market Analysis: GCC 2019 / Abu Dubai: International Renewable Energy Agency. – 2019. – 154 p.
- [4] World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway / Abu Dubai: International Renewable Energy Agency. – 2023. – 258 p.
- [5] Angus McCrone. Energy, Vehicles, Sustainability – 10 Predictions for 2020 / Bloomberg NEF. – 2020.
- [6] C. Algora, I. Garcia, M. Delgado, R. Pena, C. Vazquez, M. Hinojosa, I. Rey-Stolle. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light // *Joule*. – 2022. – Vol. 6, №. 2. – P. 340-368.
- [7] H. Helmers, E. Lopez, O. Höhn, D. Lackner, J. Schön, M. Schauerte, M. Schachtner, F. Dimroth, and A.W. Bett. 68.9% Efficient GaAs-Based Photonic Power Conversion Enabled by Photon Recycling and Optical Resonance // *Physic Status Solidi. Rapid Research Letters*. – 2021. Vol. 15, no 2100113.
- [8] V. Khvostikov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, N. Potapovich, M. Shvarts, S. Sorokina, A. Luque, V. Andreev. AlGaAs/GaAs Photovoltaic Converters For High Power Narrowband Radiation // *AIP Conference Proceedings. Proceedings of the 10th International Conference on Concentrating Photovoltaics (cpv-10)*. – 2014. – Vol. 1616. – P. 21– 24.
- [9] Y. Zheng, G. Zhang, Zh. Huan, Y. Zhang, G. Yuan, Q. Li, G. Ding, Zh. Lv, W. Ni, Y. Shao, X. Liu, J. Zu. Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges // *Space Solar Power and Wireless Transmission*. – 2024. – Vol. 1, №1. – P. 17–26.
- [10] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, М.В. Нахимович, М.З. Шварц. Термофотоэлектрические GaSb-преобразователи излучения инфракрасных селективных эмиттеров // *Физика и Техника Полупроводников*. – 2021. – Т. 55, № 10. – С. 955-958.

- [11] H.-J. Lee, G.-H. Park, J.-S. So, J.-H. Kim, H.-G. Kim, L.-K. Kwac. Optical characteristics of light-emitting diodes with high transparent conductive film at low temperatures // *Current Applied Physics*. – 2021. – Vol. 22. – P. 36–42.
- [12] H.-J. Lee, L.-K. Kwac. Study on combined reflectors for improving efficiency of high power near- infrared emitters // *Journal Luminescence*. – 2022. – Vol. 250, no 119086.
- [13] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, Ф.Ю. Солдатенков, Н.Х. Тимошина. Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения для длин волн $\lambda \approx 1550$ нм на основе GaSb // *Физика и Техника Полупроводников*. – 2015. – Т. 49, № 8. – С. 1104–1107.
- [14] *Concentrator Photovoltaics* / Eds. Luque A., Andreev V. Springer Ser. in Optical Sciences. – 2007. – Vol. 130. – 346 p.
- [15] *Solar Cells: From Materials to Device Technology* / Eds. S. K. Sharma, Khuram Ali. Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – 354 p.
- [16] H.-J. Lee, G.-H. Park, J.-S. So, Ch.-H. Lee, J.-H. Kim, L.-K. Kwac. Heat-resistant reflectors for enhanced 850-nm near infrared light-emitting diode efficiency // *Infrared Physics & Technology*. – 2021. – Vol. 118, no 103879.
- [17] H.-J.Lee, I.-K. Jang, D.-K. Kim, Y.-J. Cha, S.W. Cho. Enhanced Light Output Power on Near-Infrared Light-Emitting Diodes with TITO/Ag Multilayer Reflector // *Micromachines*. – 2022. – Vol. 13, № 5. – P. 695.
- [18] У. Смит. Письмо Латимер Кларк // *Wharf Road*. – 1873.
- [19] W.G. Adams, R.E. Day. The action of light of selenium // *Philosophical Transsaction. Royal Society*. – 1877. – Vol. 25. P. – 113–117.
- [20] A.F. Ioffe, A.V. Ioffe // *Physics Z. Soviet Union*. – 1935. – Vol. 7. – P. 343.
- [21] Н.А. Горюнова. Автореферат диссертации, ЛГУ–ФТИ, 1951 г.
- [22] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, М.Б. Каган, И.И. Протасов, В.Г. Трофим. Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов p-Al_xGa_{1-x}As - n-GaAs // *Физика и Техника Полупроводников*. – 1970. – Т.4. – С. 2378.

- [23] Green M.A., Dunlop E.D., Yoshita M., Kopidakis N., Bothe K., Siefert G., Hao X. Solar cell efficiency tables (Version 63) // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2024. – Vol. 32. – P. 3–13.
- [24] Н. А. Паханов, В. М. Андреев, М. З. Шварц, О. П. Пчеляков. Современные архитектуры и технологии высокоэффективных солнечных элементов на гетероструктурах III-V для космического и наземного применения // Автометрия. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 93–112.
- [25] В.М. Андреев. Каскадные солнечные батареи космического и наземного применения // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – Т. 21, № 4. – С. 27–280.
- [26] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников // М.: Наука, 1977. – 678 с.
- [27] В.М. Андреев. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – Т. 7. – С. 93–98.
- [28] Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент // Пер. с 163 англ. под ред. М.М. Колтуна – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
- [29] E.F. Shubert. Light-emitting diodes // New York, US: Cambridge University Press, 2003. – 313 p.
- [30] Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, Н.Ю. Давидюк, Н.С. Дубровская, Б.В. Егоров, Л.М. Коган, Б.В. Пушный, И.Т. Рассохин, В.Е. Чехимова, Л.Т. Чичуа. Светодиоды меза-конструкции на основе двойных гетероструктур в системе AlAs-GaAs // Журнал Технической Физики. – 1977. – Т. 47. – С. 1772–1778.
- [31] Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, Н.Ю. Давидюк, Б.В. Пушный, Л.Т. Чичуа. Гетеросветодиоды с внешним квантовым выходом $\eta_e \cong 40\%$ (300K) // Письма в Журнал Технической Физики. – 1977. – Т. 3. С. 657–661.

- [32] В.П. Гермогенов В.П. Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники / Учебное пособие. – Томск: Изд. Дом Томского гос. унив., 2015. – 272 с.
- [33] В.Е. Бахрушин. Получение и физические свойства слаболегированных слоев многослойных композиций / Запорожье. ГУ "ЗИГМУ", 2001. – 247 с.
- [34] А.И. Курносов, В.В. Юдин. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / М.: «Высшая школа», 1986. – 402 с.
- [35] В.М. Андреев, Л.М. Долгинов, Д.Н. Третьяков. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов / М.: «Сов.радио», 1975. – 45 с.
- [36] V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, N.S. Potapovich, O.A. Khvostikova, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts. Modification of Photovoltaic Laser-Power ($\lambda=808$ nm) Converters Grown by LPE // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52, №3. – P. 366–370.
- [37] M. Milanova, V. Khvostikov. Growth and doping of GaAs and AlGaAs layers by low-temperature liquid-phase epitaxy // Journal of Crystal Growth. – 2000. – Vol. 219, №3. – P. 193–198.
- [38] В.Г. Дубровский. Теоретические основы технологии полупроводниковых наноструктур / СПб: Университет ИТМО, 2019. – 225 с.
- [39] Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE): Growth, Materials Properties, and Application / Eds. Stuart Irvine, Peter Capper. Wiley Ser. in Material for Electronic and Optoelectronic Applications. – 2020.
- [40] V.M. Lantratov, V.M. Emelyanov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.Z. Shvarts. Improvement of radiation resistance of Multijunction GaInP/Ga(In)As/Ge solar cells with application of Bragg reflectors // Advanced Sciences and Technologies. – 2010. – Vol. 74. – P. 225–230.
- [41] Mikhail E. Levinshtein. Semiconductor technology / A Wiley-Interscience publication, USA, 1997.

- [42] Microlithography. Science and Technology / 2rd. ed., ed. by Bruce W. Smith, Kazuaki Suzuki. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 864 с.
- [43] У. Моро. Микролитография / М.: Мир, 1990. – 605 с.
- [44] H.J. Levinson. Principles of lithography / 3rd ed. Washington: SPIE, 2010. – 504 p.
- [45] А.В. Белый. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
- [46] В. Ширипов, С. Насточкин, Е. Хохлов, Т. Бояренко, С. Марышев. Реактивное магнетронное распыление тонких пленок Cu(In,Ga)Se_2 // Наноиндустрия. – 2010. – Т. 4. – С. 24–27.
- [47] А. Иванов, Б. Смирнов. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование / Наноиндустрия. – 2012 – Т. 6, в.36. – С. 28–34.
- [48] Д.И. Соловецкий. Механизмы плазмохимического травления материалов / Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Книга III. М.: Наука, 2000. – 346 с.
- [49] В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко. Фокусированный ионный пучок как технология локального прецизионного травления // Вакуумная техника и технология. – 2008. – Т. 18, № 3. – С. 191–195.
- [50] М.А. Кузнецова, В.В. Лучинин, А.Ю. Савенко. Ионно-лучевая технология сверхлокального препарирования интегральных схем // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Серия «Физика твёрдого тела и электроника». – 2006. – № 2. – С. 28–35.
- [51] Андреев В.М, Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Л.: Наука, 1989. – 310 с.
- [52] Mathieu de Lafontaine, Erwine Pargon, Camille Petit-Etienne, Guillaume Gay, Abdelatif Jaouad, Marie-Josée Gour, Maïté Volatier, Simon Fafard, Vincent

- Aimez, Maxime Darnon / Solar Energy Materials and Solar Cells. Elsevier. – 2019. – Vol. 195. – P. 49–54.
- [53] Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts. Chapter 8. III–V Solar Cells and Concentrator Arrays / В книге (сборнике): High-Efficient Low-Cost Photovoltaics. Recent Developments. Second Edition. Springer Series in Optical Sciences. – 2020. – Vol. 140. – P. 133–174.
- [54] В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. Многопереходные солнечные элементы с брэгговскими отражателями на основе структур GaInP/GaInAs/Ge // Физика и Техника Полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 12. – С. 1649–1654.
- [55] С.А. Минтаиров, В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, М.З. Шварц, В.М. Андреев. Увеличение фототока Ga(In)As-субэлемента в многопереходных солнечных элементах GaInP/Ga(In)As/Ge // Письма в Журнал Технической Физики. – 2019. – Т. 45, № 24. – С. 41–43.
- [56] P. Bai, Y. Zhang, T. Wang, Zh. Shi, X. Bai, Ch. Zhou, Y. Xie, L. Du, M. Pu, Zh. Fu, J. Cao, X. Guo and W. Shen. Cryogenic characteristics of GaAs-based near-infrared light emitting diodes // Semiconductor Science and Technology. – 2020. – Vol. 35, №3. – no 035021.
- [57] T. Kato, H. Susawa, M. Hirotsu, T. Saka, Y. Ohashi, E. Shichi and S. Shibata. GaAs/GaAlAs surface emitting IR LED with Bragg reflector grown by MOCVD // Journal of Crystal Growth. – 1991. – Vol. 107. – P. 832–835.
- [58] S.-Y. Lee, E. Lee, J.-H. Moon, B. Choi, J.-T. Oh, H.-H. Jeong, T.-Y. Seong, and H. Amano. Damage-Free Plasma Etching to Enhance Performance of AlGaInP-Based Micro-Light Emitting Diode // IEEE Photonics Technology Letters. – 2020. – Vol. 32, № 17. – С. 1041–1044.
- [59] Ch.C. Lee, Ch.Y.Wang, G. Matijasevic. Au-In bonding below the eutectic temperature // IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 16, № 3. – P. 311–316.

- [60] Y.-Ch. Sohn, Q. Wang, S.-J. Ham, B.-G. Jeong, K.-D. Jung, M.-S. Choi, W.-B. Kim, Ch.-Y. Moon. Wafer-level low temperature bonding with Au-In system // Proceedings - Electronic Components and Technology Conference. – 2007. – P. 633–637.
- [61] Д. Брандон, В. Каплан. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / М.: Техносфера, 2006. – 384 с.
- [62] Ю.А. Быков, С.Д. Карпухин. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ. Аппаратура, принцип работы, применение / Ред. Ю.А. Быкова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 44 с.
- [63] Беккер Ю. Спектроскопия / М.: Техносфера, 2009. – 527 с.
- [64] В. Ф. Агекян. Фотолюминесценция полупроводниковых кристаллов // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – С. 101–107.
- [65] Е.В. Кучис. Методы исследования эффекта Холла / М.: Сов. Радио, 1974.
- [66] В.П. Афанасьев, Е.И. Теруков, А.А. Шерченков. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния / СПб: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.
- [67] A. Zekry, A.Y. Al-Mazroo. A distributed SPICE-model of a solar cell // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1996. – Vol. 43, №5. – P. 691–700.
- [68] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник // Физика и Техника Полупроводников. – 2007. – Т. 41, № 11. – С. 1281–1308.
- [69] H.H. Berger. Models for contacts to planar devices // Solid State Electronics. – 1972. – Vol. 15. – P. 145–158.
- [70] D. M. Mitin, F. Yu. Soldatenkov, A. M. Mozharov, A. A. Vasil'ev, V. V. Neplokh, I. S. Mukhin. Annealing atmosphere influence on contact resistivity of ohmic Pd/Ge/Au contact to n-GaAs // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. – 2018. – Vol. 9, № 6. – P. 789–792.

- [71] P. H. Hao, L. C. Wang, Fei Deng, S. S. Lau, and J. Y. Cheng. On the low resistance Au/Ge/Pd ohmic contact to n-GaAs // Journal of Applied Physics. – 1996. – Vol. 79, №8. – P. 4211–4215.
- [72] L. C. Wanga, P. H. Hao, J. Y. Cheng, F. Deng, and S. S. Lau. J. Ohmic contact formation mechanism of the Au/Ge/Pd/n-GaAs system formed below 200°C // Journal of Applied Physics. – 1996. – Vol. 79, № 8. – P. 4216–4220.
- [73] Ю.А. Константинов. Антиотражающие покрытия для солнечных батарей Науч. исследования: от теории к практике // Материалы IV Междунар. научно-практической конференции. Чебоксары: ЦНС ”Интерактив плюс“. – 2016. – С. 198–200.
- [74] Н.А. Калюжный Н.А., А.С. Гудовских, В.В. Евстропов, В.М. Лантратов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, В.М. Андреев. Германиевые субэлементы для многопереходных фотоэлектрических преобразователей GaInP/GaInAs/Ge // Физика и Техника Полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 11. – С. 1568–1676.
- [75] F.F. Chen, J.P. Chang. Lecture Notes on Principles of Plasma Processing / New York, Kluwer/Plenum, 2002. – 249 p.
- [76] Т.В. Свистова. Лучевые и плазменные технологии / Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 278 с.
- [77] В.А. Батенков. Электрохимия полупроводников / Барнаул: Изд-во Алтайского университета, 2002. – 53 с.
- [78] Mohamed Shaik Honnurvali; Naren Gupta; KengGoh; Tariq umar; Needa Nazeema. Study of Photovoltaics (PV) Performance Degradation Analysis in Oman // International Journal of Sustainable Energy Development (IJSED). – 2019. – Vol. 6, № 2. – P. 334–343.
- [79] M. Velderrain. Choosing a silicone encapsulant for photovoltaic applications // AIP Conference Proceedings. – 2011. – Vol. 1407, № 1. – P. 79–83.

- [80] F. Eltermann. Degradation study on optical materials for concentrator photovoltaics // AIP Conference Proceedings. – 2012. – Vol. 1447. – P. 276–280.
- [81] В.М. Андреев, С.В. Сорокина, Н.Х. Тимошина, В.П. Хвостиков, М.З. Шварц. Солнечные элементы на основе антимонида галлия // Физика и Техника Полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 5. – С. 695-699.
- [82] A.W. Bett, S.Keser, O. Stollwerc, O.V. Sulima, W. Wettling. GaSb photovoltaic cells for laser power conversion // Proc. 25 IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Washington, USA, 1996. – P. 133.
- [83] V. P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, R.V. Levin, B.V. Pushnyi, N.K. Timoshina, V.M. Andreev. GaSb laser-power ($\lambda=1550$ nm) converters: Fabrication method and characteristics // Semiconductors. – 2016. – Vol. 50, № 10. – P. 1338–1343.
- [84] J.T. Howell, M.J. O'Neill, R.L. Fork. Advanced Receiver/Converter Experiments for Laser Wireless Power Transmission // Proc. 5th Wireless Power Transmission Conference together with 4th International Conference on Solar Power from Space. Granada, Spain, 2004. – P. 187.
- [85] В. М. Емельянов. Математическое моделирование и исследование характеристик многопереходных АЗВ5 фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения: диссертация на канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / СПб. 2011. – 214 с.
- [86] E. Oliva, E. Dimroth, A.W. Bett. GaAs converters for high power densities of laser illumination // Progress in Photovoltaics. Research and Applications. – 2008. – Vol. 16. – P. 289–295.
- [87] А.Н. Паньчак, П.В. Покровский, Д.А. Малевский, В.Р. Ларионов, М.З. Шварц. Высокоэффективное преобразование лазерного излучения высокой плотности // Письма в Журнал Технической Физики. – 2019. – Т. 45, № 2. – С. 26–28.

- [88] В.П. Хвостиков, Н.А. Калюжный, С.А. Минтаиров, С.В. Сорокина, Н.С. Потапович, В.М. Емельянов, Н.Х. Тимошина, В.М. Андреев. Фотоэлектрический преобразователь лазерного излучения на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs // Физика и Техника Полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 9. – С. 1242–1246.
- [89] A.G. Entrop, A. Vasenev. Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 132. – P. 63–68.
- [90] M. Kitamura, T. Imada, S. Kako, Y. Arakawa, Y. Jpn. Time-of-Flight Measurement of Lateral Carrier Mobility in Organic Thin Films // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 43. – P. 2326–2329.
- [91] S.-Ch. Ahn, B.-T. Lee, W.-Ch. An, D.-K. Kim, I.-K. Jang, J.-S. So, Hyung-Joo Lee. Optimum conditions of the distributed bragg reflector in 850 nm GaAs infrared light-emitting diodes // Journal of Korean Physical Society. – 2016. – Vol. 69, № 1. – P. 91–95.
- [92] L. Han, M. Zhao, X. Tang, W. Huo, Zh. Deng. Luminescence study in InGaAs/AlGaAs multi-quantum-well light emitting diode with p–n junction engineering // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127, №8. – no 085706.
- [93] R. Windisch, B. Dutta, M. Kuijk, A. Knobloch, S. Meinlschmidt, S. Schoberth, P. Kiesel, G. Borghs, G.H. Döhler, P. Heremans. 40% efficient thin-film surface-textured light-emitting diodes by optimization of natural lithography // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2000. – Vol. 47, № 7. – P. 1492–1498.
- [94] J. Rybczynski, U. Ebels, M. Giersig. Large-scale, 2D arrays of magnetic nanoparticles // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2003. – Vol. 219. P. 1–6.
- [95] H.C. Casey, D.D. Sell, K.W. Wecht. Concentration dependence of the absorption coefficient for n- and p-type GaAs between 1.3 and 1.6 eV // Journal of Applied Physics. – 1975. – Vol. 46, № 1. – P. 250–257.