

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **МАЛЕВСКОЙ Александры Вячеславовны** «Модификация оптических и резистивных свойств каскадных  $\text{AlGaAs/GaAs}$  фотоэлектрических преобразователей и  $\text{AlGaAs/GaAs}$  светоизлучающих диодов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

Каскадные гетероструктурные фотоэлектрические преобразователи являются перспективными приборами для преобразования солнечной энергии за счет высоких значений эффективности, особенно при работе с концентрированным излучением. Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения находят все более широкое применение в системах передачи энергии через пространство (в космосе и в атмосфере) и по волоконно-оптическим каналам с акцентом на повышение мощности принимаемых и преобразуемых энергетических сигналов. Инфракрасные светоизлучающие диоды необходимы в устройствах видео наблюдения, охранных системах и других. Для развития указанных актуальных направлений необходимо совершенствовать как ростовые технологии гетероструктур, так и постростовые методы их обработки, разрабатывать новые конструкции приборов, в совокупности обеспечивая повышение эффективности преобразования мощных оптических сигналов.

Направленность диссертационной работы А.В. Малевской на разработку постростовых методов обработки гетероструктур, модификацию их фотоэлектрических, оптических и резистивных свойств в полной мере отвечает потребностям текущего технологического этапа развития силовой фотоелектроники. Представленные результаты анализа влияния различных технологических методик на оптические, омические и рекомбинационные характеристики фотоэлектрических преобразователей и светоизлучающих диодов и предложенные новые конструкции эффективных приборов подтверждают научную и практическую ценность работы.

Работа состоит из введения, шести глав основного содержания и заключения, содержит 171 страницу, включая 70 рисунков и 10 таблицы. Список цитированной литературы включает 95 наименований.

Первая глава диссертации содержит обзор литературы, посвященной фотоэлектрическим преобразователям и светоизлучающим диодам. В ней описаны история развития и принцип действия оптоэлектронных приборов. Приведены основные методы формирования структур и методы постростовой технологии изготовления приборов на их основе.

Вторая глава диссертационной работы включает описание и особенности структур исследуемых приборов: GaInP/GaInAs/Ge фотоэлектрического преобразователя солнечного излучения, GaSb и AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения, ИК светоизлучающих диодов. Описаны принципы формирования приборов на основе гетероструктур инвертированного роста со встроенным многослойным отражателем. Приведены описания методов исследования гетероструктур: сканирующей (растровой) электронной микроскопии, рамановского рассеяния света, фото- и электролюминесценции, метода Холла, позволяющие оценивать качество как непосредственно ростовой структуры, так и постростовых методик их обработки.

Результаты проведенных автором исследований по снижению омических, оптических и рекомбинационных потерь при изготовлении каскадных фотоэлектрических преобразователей приведены в третьей главе. Разработана конструкция приборов с контактными шинами трапецевидного сечения с зеркальными боковыми гранями, обеспечивающими отражение поступающего на область контакта солнечного излучения в сторону фоточувствительной поверхности прибора, снижая тем самым оптические потери. Определены контактные системы к полупроводниковым слоям *n*- и *p*-типа проводимости и предложены технологические методы их формирования, что обеспечило снижение резистивных потерь на контактном сопротивлении разрабатываемых приборов. Исследованы методы подавления поверхностной рекомбинации по периферии кристаллов фотоэлектрических преобразователей. Установлены источники влияния постростовых методик обработки гетероструктур на фотоэлектрические характеристики приборов, решены задачи формирования плавных периферийных меза-областей приборов. Успешность решений подтверждена данными по приросту значений внешнего квантового выхода фотоответа субэлементов каскадного фотопреобразователя на 2-3%, сниженными токами поверхностной рекомбинации, лучшей стабильностью энергетических параметров фотопреобразователей при воздействии эксплуатационных факторов.

В четвертой главе основное внимание уделено исследованиям GaSb фотоэлектрических преобразователей с диффузионным *p-n* переходом. Рассмотрено влияние материалов омических контактов на характеристики приборов, разработана конструкция микроразмерных фотопреобразователей с диаметром фоточувствительной области от 30 мкм, позволяющих преобразовывать лазерное излучение высокой плотности мощности ( $1.6 \text{ кВт/см}^2$ ) с рекордной эффективностью 38%.

Пятая глава посвящена исследованиям оптических свойств AlGaAs/GaAs гетероструктур с многослойным комбинированным

отражателем. Рассмотрены различные конструкции отражателей, выполнен расчет их оптических свойств, определены комбинации материалов, при использовании которых максимально эффективно реализуются процессы переотражения излучения и снижаются оптические потери для световых потоков, распространяющихся в сторону поглощающей подложки.

В шестой главе приводятся исследования по снижению оптических и омических потерь в фотоэлектрических преобразователях и ИК светоизлучающих диодах на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур инвертированного роста при включении оптических отражателей в конструкцию приборов. Представлены рекордные значения эффективности 62% при преобразовании лазерного излучения с плотностью мощности 100 Вт/см<sup>2</sup> и более 56% при плотности мощности до 550 Вт/см<sup>2</sup>. Выполнен анализ влияния состава отражателей на внешнюю квантовую эффективность и оптическую мощность светоизлучающих диодов, показана возможность многократного уменьшения оптических потерь при использовании высокоэффективного оптического отражателя (с коэффициентом отражения более 99%).

В заключении сформулированы основные результаты работы, заключающиеся в исследовании и разработке новых контактных систем и оптических отражателей, а также методов формирования меза-структур, подавляющих рекомбинационные процессы по периферии кристаллов. Также приведены рекордные характеристики фотоэлектрических преобразователей и светоизлучающих диодов, полученных с использованием разработанных методов.

**Научная новизна и практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке новых методик постростовой обработки гетероструктур каскадных фотоэлектрических преобразователей, включающих формирование новых контактных систем, обеспечивающих снижение омических потерь за счет перераспределения поступающего на поверхность элемента излучения. Исследование методов формирования меза-структур с использованием химического, электрохимического и плазмохимического методов травления, а также их комбинации, позволившие снизить рекомбинационные потери по периферии кристаллов. Немаловажным результатом также считаю разработку оптических отражателей, включающих уникальный набор слоев как непосредственно структурных, так и диэлектрических и металлических, обеспечивающих отражение более 99% излучения. Также практическая значимость заключается в разработке новых конструкций приборов (фотоэлектрических преобразователей и светоизлучающих диодов) обладающих повышенной эффективностью и надежностью работы.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием современных методов исследования, большим количеством приведенных результатов измерений, подтверждённых расчетными данными там, где это необходимо.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

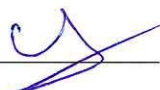
1. В главе 3 рассмотрены различные контактные системы к Ge p-типа проводимости (NiCr/Ag/Au, Ag(Mn)/Ni/Au и Au). Почему не обсуждаются другие варианты, включающие, например, слои Au/Ga, Au/In, Al/Ge которые широко используются в технологии полупроводниковых приборов?
2. В пункте 3.2.5. эффективность работы «пирамидальных» контактных шин подтверждается увеличением значений внешнего квантового выхода фотоответа на 2-3%. Однако на рисунке 3.13 такое увеличение показано только для GaInP и GaInAs субэлементов, тогда как для Ge каскада данное увеличение не очевидно и нет никаких пояснений относительно «селективности» свойств Ag зеркальных поверхностей.
3. Наблюдается несоответствие данных по удельному контактному сопротивлению системы Pd/Ge/Au к GaAs n-типа проводимости, приведенных на рис. 3.8 и в таблице 3.4 для температуры отжига 400 °C.
4. По рис. 6.10: неоднородное распределение полистирольных сфер обычно связано с их подвижностью в процессе реактивного ионно-плазменного травления. Проводилось ли их спекание для фиксации путем термической обработки?

Основные результаты диссертации были доложены на 8 конференциях и опубликованы в 30 печатных работах, в том числе в 20 статьях в рецензируемых журналах.

Автореферат и публикации в полной мере отражают содержание диссертационной работы, оформление автореферата соответствует требованиям ВАК РФ.

Работа представляет собой законченное исследование в области физики полупроводников. По своему объему, актуальности, новизне и значимости полученных результатов диссертация Малевской Александры Вячеславовны «Модификация оптических и резистивных свойств каскадных A3B5 фотоэлектрических преобразователей и AlGaAs/GaAs светоизлучающих диодов», **соответствует** требованиям положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

19.05.2025 г.  Гудовских Александр Сергеевич

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» (г. Санкт-Петербург).

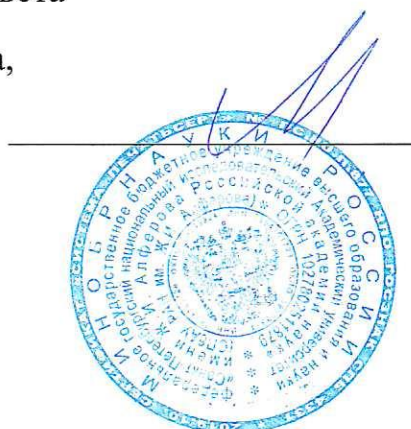
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д.8, корп. 3, лит. А, <https://spbau.ru/>  
тел. 8(911)7822435, e-mail: gudovskikh@spbau.ru

Подпись официального оппонента д.т.н. в.н.с. Гудовских А.С. заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета

Академического университета,

профессор



А.А. Липовский