

На правах рукописи



Павлюченко Алексей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ И ВЫВОДА СВЕТА В
СВЕТОДИОДАХ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlInGaN**

Специальность:

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, с.н.с.

Гуревич С.А.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, проф.

Воробьев Л.Е.

СПбГПУ

доктор физико-математических наук, с.н.с.

Лебедев А.А.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ», Санкт-Петербург

Защита состоится " 16 " февраля 2012г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д002.205.02 при Учреждении Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

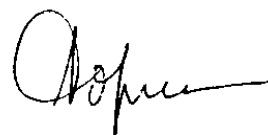
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2012г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы достигнут значительный прогресс в технологии эпитаксиального выращивания гетероструктур AlInGaN. Это привело к созданию эффективных светодиодов, работающих в видимой, синей и ближней ультрафиолетовой областях спектра. Такие светодиоды находят всё более широкое применение в системах индикации, подсветки, навигации и т.д. Однако, наиболее важная область применения – создание на основе синих светодиодов AlGaInN источников белого света, способных составить конкуренцию традиционным лампам накаливания, флуоресцентным и галогеновым лампам. Прогресс в данной области связан с разработкой эффективных мощных светодиодов, работающих при высоких плотностях токов накачки. Однако, на сегодняшний день эффективность мощных светодиодов на основе AlInGaN ограничена падением внутреннего квантового выхода электролюминесценции с ростом плотности тока накачки и низкой эффективностью вывода света из светодиодных кристаллов.

В гетероструктурах AlInGaN падение внутреннего квантового выхода с током приводит к уменьшению мощности излучения светодиодов, что особенно заметно при плотностях тока накачки в диапазоне 50 – 100 А/см². Таким образом, актуальной является задача исследования процессов генерации света в гетероструктурах AlInGaN и выявление причин падения внутреннего квантового выхода, препятствующего дальнейшему увеличению мощности излучения.

В светодиодах на основе гетероструктур AlInGaN, выращиваемых, как правило, на подложках из сапфира, эффективность вывода излучения ограничена эффектом полного внутреннего отражения генерируемого света на границах полупроводника с воздухом и с подложкой и поглощением излучения в отражающих или полупрозрачных контактах. Сильнее всего эти ограничения проявляются в кристаллах светодиодов AlInGaN большой

мощности и, соответственно, большой площади, что ставит решение проблемы вывода излучения в ряд наиболее актуальных задач. Повышение эффективности вывода генерируемого излучения может достигаться путём создания отражающих контактов и формирования оптических неоднородностей в структуре прибора, в частности, рассеивающего свет микрорельефа на одной из поверхностей эпитаксиальной гетероструктуры.

В целом, актуальными являются задачи разработки и оптимизации конструкций и технологии изготовления светодиодных гетероструктур AlInGaN, а также светодиодных кристаллов на их основе, направленные на достижение высоких значений эффективности и мощности излучения светодиодов.

Цель работы

Исследование процессов генерации и вывода света в светодиодных гетероструктурах AlInGaN, повышение внутренней и внешней квантовой эффективности светодиодов (спектральный диапазон 430-470 нм) при больших плотностях токов накачки (до 100 А/см²).

Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд задач:

- Выявить причины падения внутренней квантовой эффективности излучения в светодиодных гетероструктурах AlInGaN и предложить пути повышения квантовой эффективности при больших плотностях токов накачки.
- Разработать технологию формирования оптических неоднородностей в структуре светодиодного кристалла AlInGaN, обеспечивающих эффективное рассеяние генерируемого света и увеличение эффективности вывода излучения из светодиодного кристалла.
- Разработать методы формирования низкоомных прозрачных и отражающих контактов к слою p-GaN, позволяющие снизить оптические потери при выводе излучения из кристалла.

Научная новизна работы состоит в следующем

- Впервые предложено использование короткопериодных сверхрешёток GaN/In_xGa_{1-x}N с туннельно-связанными квантовыми ямами в активной области светодиодной гетероструктуры AlInGaN для снижения темпа безызлучательной оже-рекомбинации, что позволило уменьшить падение внутренней квантовой эффективности с ростом плотности тока накачки.
- Впервые показано, что в результате подавления эффекта Штарка в светодиодных гетероструктурах AlInGaN с короткопериодными сверхрешётками в активной области спектральное положение максимума излучения слабо зависит от плотности тока накачки.
- Впервые экспериментально продемонстрировано, что наличие пористого слоя на границе GaN-сапфир приводит к существенному повышению внешней квантовой эффективности светодиодного кристалла на основе гетероструктуры AlInGaN.
- Показано, что использование слоя оксида индия-олова (ITO) в составе низкоомных прозрачного и высокотрежающего p-контактов позволяет существенно уменьшить оптические потери при выводе излучения из светодиодного кристалла.

Практическая ценность работы

- Разработана технология выращивания методом металлоорганической газофазной эпитаксии гетероструктур AlInGaN с короткопериодной сверхрешёткой в активной области, позволяющая увеличить внутренний квантовый выход и мощность излучения светодиодов при высоких плотностях токов накачки, а также повысить стабильность спектральных характеристик излучения.
- Разработан способ формирования рассеивающего пористого слоя на границе GaN-сапфир в процессе выращивания светодиодной гетероструктуры AlInGaN

методом металлорганической газофазной эпитаксии, применение которого позволяет существенно увеличить эффективность вывода света из светодиодного кристалла.

- Разработана технология получения низкоомных прозрачного и высокоотражающего контактов к p-GaN, что позволяет повысить эффективность вывода света из светодиодного кристалла.

Разработанные технологии и способы успешно применяются в условиях серийного производства синих и белых светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN в ЗАО «ЭПИЦЕНТР» и ЗАО «ИФ «ТЕТИС» (г. Санкт-Петербург).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение короткопериодных сверхрешёток GaN/In_xGa_{1-x}N с туннельно связанными квантовыми ямами в активной области светодиодной гетероструктуры AlInGaN позволяет в 2.5 раза уменьшить величину падения квантовой эффективности при плотности тока 100 А/см².
2. Применение короткопериодных сверхрешёток GaN/In_xGa_{1-x}N с туннельно связанными квантовыми ямами в активной области светодиодной гетероструктуры AlInGaN приводит к стабилизации спектрального положения максимума полосы излучения в широком диапазоне плотностей токов накачки.
3. Увеличение толщины низкотемпературного буферного слоя GaN и длительности последующего высокотемпературного отжига приводит к формированию на границе GaN-сапфир пор толщиной порядка 100 нм и размерами 300-1000 нм в плоскости слоя. Наличие таких пор обеспечивает рассеяние генерируемого излучения, что приводит к повышению эффективности вывода света из светодиодного кристалла на 20%.

4. Применение прозрачных р-контактов на основе плёнок ITO для светодиодных кристаллов мезапланарной конструкции обеспечивает увеличение внешнего квантового выхода в 2.5 раза по сравнению с кристаллами с полупрозрачными металлическими контактами.
5. Применение высокоотражающих р-контактов на основе плёнок ITO/Ag в светодиодных кристаллах мезапланарной конструкции приводит к увеличению внешней квантовой эффективности на 20% по сравнению с кристаллами с р-контактом на основе плёнок Ni/Ag

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на IX Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (СПб, 2007); «Международной зимней школе по физике полупроводников» (Зеленогорск, 2008); 5-й, 6-й, 7-й, 8-й Всероссийских конференциях «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (М., 2007,2010;СПб, 2008,2011), международных конференциях 8th и 9th International Conferences on Nitride Semiconductors (Jeju Island, Korea 2009; SECC, Glasgow 2011), международной конференции 3rd International Symposium on Growth of III-Nitrides (Montpellier, 2010), международной конференции International Workshop on Nitrides (Florida,USA, 2010)

Публикации

По результатам исследований, вошедших в диссертационную работу, опубликовано 17 научных работ, список которых приведён в конце автореферата.

Личный вклад автора заключается в выращивании светодиодных гетероструктур методом металлорганической газофазной эпитаксии, проведении измерений, обсуждении результатов, подготовке статей к публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитированной литературы. Диссертация содержит 103 страницы текста, включая 47 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 82 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена оптимизации активной области светодиодных гетероструктур AlInGaN с целью увеличения внутреннего квантового выхода электролюминесценции при высоких плотностях токов накачки. Вначале рассматриваются основные механизмы падения эффективности с ростом плотности тока накачки, такие как перегрев активной области, наличие локализованных состояний в активной области, снижение коэффициента инжекции и конкуренция процессов излучательной рекомбинации и безызлучательной оже-рекомбинации. Далее рассматривается стандартная светодиодная гетероструктура с несколькими квантовыми ямами InGaN (~3 нм) в активной области, разделёнными толстыми барьерами (~10 нм). На основе одномерной численной модели, позволяющей проводить анализ инжекции и транспорта носителей в гетероструктуре, показано, что в стандартных структурах падение эффективности может быть объяснено конкуренцией процессов излучательной и оже-рекомбинации. Численная модель реализована в программном продукте SiLENSe производства ООО "Группа СТР" - ООО "Софт-Импакт", (www.str-soft.com/products/SimuLED). Исследовано влияние числа квантовых ям в активной области стандартной гетероструктуры на падение внутреннего квантового выхода с током накачки. Показано, что увеличение числа квантовых ям в активной области не приводит к снижению концентрации носителей, поскольку эффективная инжекция носителей происходит только в ближайшую к p-n-переходу квантовую яму. По

результатам расчётов в качестве решения данной проблемы предложено использование короткопериодной сверхрешётки (КПСР) = GaN/In_xGa_{1-x}N с туннельно прозрачными барьерами (толщина 2-3 нм) для обеспечения однородного заполнения квантовых ям и снижения концентрации носителей в активной области. Приведены результаты моделирования гетероструктур с различными параметрами активной области: число и ширина квантовых ям, толщина барьеров.

В третьей части главы приведены результаты экспериментов по выращиванию светодиодных гетероструктур и созданию светодиодных кристаллов и светодиодов на их основе. Показано, что применение КПСР в

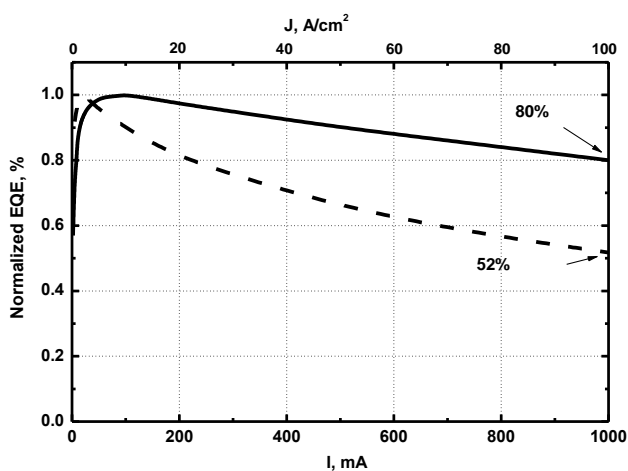


Рис.1. Нормализованная зависимость внешней квантовой эффективности от плотности тока накачки для стандартных светодиодных гетероструктур (штриховая линия) и гетероструктур с короткопериодной сверхрешёткой в активной области (сплошная линия)

активной области светодиодной гетероструктуры позволяет снизить падение внешнего квантового выхода таких светодиодов по сравнению со светодиодами на основе стандартной гетероструктуры (рис. 1). Результаты исследования спектральных характеристик светодиодов с КПСР в активной области показывают высокую стабильность спектрального положения полосы излучения при изменении тока накачки в широком диапазоне. Для изготовленных на

основе гетероструктур с КПСР белых светодиодов с активной площадью 1 мм² получены значения светового потока 75 лм при токе 350 мА. Полученные характеристики белых светодиодов находятся на уровне лучших достижений ведущих производителей, таких как Cree, SemiLED, Lumileds.

Вторая глава посвящена разработке технологии создания пористых рассеивающих слоёв на границе GaN-сапфир. В первой части главы

рассмотрены основные факторы, ограничивающие эффективность вывода света из светодиодного кристалла и описанные в литературе способы увеличения коэффициента вывода света. Большая разница показателей преломления на границах гетероструктуры с подложкой/воздухом приводит к тому, что значительная доля генерируемого излучения оказывается запертой в плоскопараллельном волноводе, образованном границами гетероструктуры. Рассматриваются различные способы создания рассеивающих свет структур на обеих границах эпитаксиальной гетероструктуры. Наиболее эффективными из них являются использование профилированных подложек сапфира, лазерное отделение сапфировой подложки с последующим растравливанием микрорельефа на n-поверхности гетероструктуры. Однако, все упоминаемые в литературе методы создания рассеивающих поверхностей значительно усложняют процесс производства светодиодных кристаллов на до- или постростовой стадии. Предлагаемый в данной работе метод создания рассеивающей свет структуры на границе GaN-сапфир не предполагает введения дополнительных операций в технологию производства кристалла, а является модификацией стандартного ростового процесса.

Во второй части главы рассматривается методика выращивания слоёв GaN на сапфировой подложке с применением низкотемпературного буферного слоя. Данная методика была предложена Акасаки и с некоторыми модификациями является стандартным способом выращивания низкодефектных эпитаксиальных слоёв GaN на сапфировой подложке. Основные стадии стандартного процесса включают: нанесение аморфного слоя GaN при температуре $\sim 530^\circ\text{C}$, отжиг при температуре $\sim 1100^\circ\text{C}$, приводящий к формированию кристаллических зародышей вюрцитной фазы, разрастание зародышей и планаризация поверхности.

Предлагаемая модификация ростового процесса заключается в увеличении толщины низкотемпературного буферного слоя GaN, времени последующего отжига и разрастания зародышей. Экспериментально исследованы различные режимы нанесения и последующего отжига

низкотемпературного буферного слоя. Показано, что в результате увеличения толщины буферного слоя и длительности отжига на границе GaN-сапфир образуются поры толщиной порядка 100 нм и размерами 300-1000 нм в плоскости слоя (рис 2.).

В качестве экспресс метода *in situ* контроля процесса образования пор предложено использовать метод рефлектометрии, позволяющий оценить эффективность рассеяния света по уменьшению амплитуды осцилляций, обусловленных интерференцией света в эпитаксиальном слое непосредственно в процессе роста. Показано, что применение пористого буферного слоя позволяет увеличить коэффициент вывода света из светодиода на 20% по сравнению с диодами на основе гетероструктур, выращенных в стандартном процессе (рис 3.).

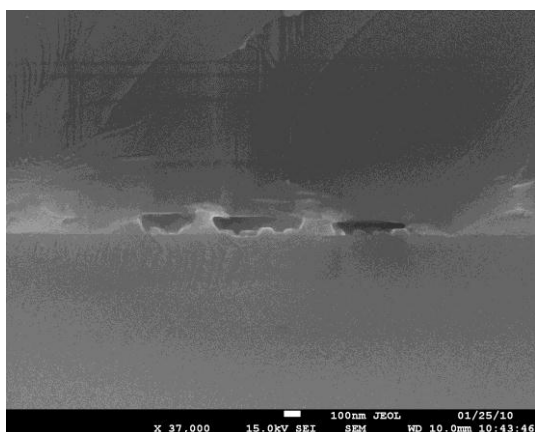


Рис.2. РЭМ изображение скола пластины на границе GaN-сапфир

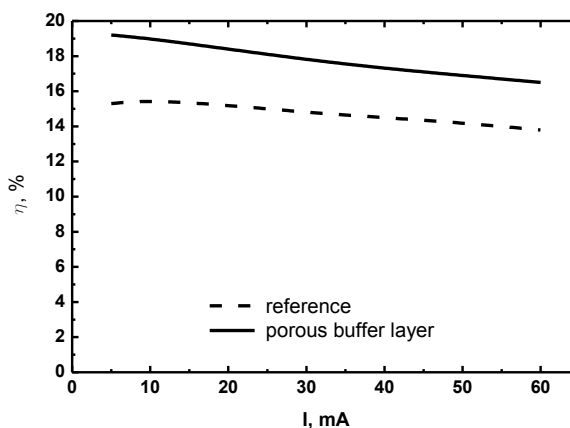


Рис.3. Увеличение внешнего квантового выхода за счёт применения пористого буферного слоя

В третьей главе рассматривается технология создания низкоомных прозрачных и высокоотражающих р-контактов на основе плёнок оксида индия-олова (Indium Tin Oxide, или ИТО). В первой части главы рассматриваются различные конструкции светодиодных кристаллов. В зависимости от конструкции светодиодного кристалла и способа монтажа вывод света может осуществляться либо через полупрозрачные/прозрачные контакты, либо через прозрачную подложку. В светодиодных кристаллах с выводом света через полупрозрачные р-контакты поглощение света в

материале контакта приводит к значительному снижению коэффициента вывода света. Показано, что коэффициент пропускания плёнок Ni/Au(4нм/4нм), применявшихся ранее в качестве полупрозрачных контактов к р-слою, составляет не более 45% .

Одним из возможных подходов к решению проблемы поглощения света в полупрозрачных контактах является применение в качестве контактных слоёв плёнок ITO, соединения, содержащего 90 весовых % In_2O_3 и 10 весовых % SnO_2 . Отличительной чертой этого твёрдого раствора является высокая оптическая прозрачность тонких слоёв материала при одновременной электропроводности. Показано, что нанесение плёнок ITO толщиной 200 нм методом электронно-лучевого испарения на холодную подложку приводит к образованию плёнки с коэффициентом пропускания на длине волны 450 нм менее 1%. Однако, в результате отжига происходит кристаллизация материала плёнки и значительное увеличение коэффициента пропускания. Исследовано влияние режимов напыления и отжига на коэффициент пропускания и проводимость плёнок ITO. Получены плёнки ITO толщиной 200 нм с коэффициентом пропускания 90% на длине волны 450 нм, которые применялись в качестве прозрачных проводящих контактов. Применение плёнок ITO позволило увеличить внешний квантовый выход светодиодных кристаллов в 2.5 раза (рис 4.).

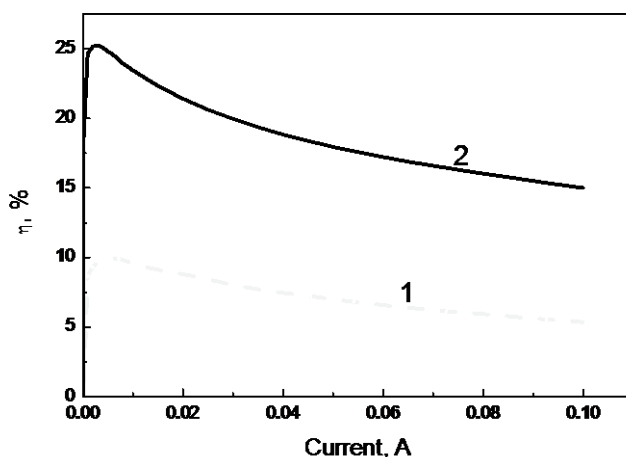


Рис.4. Внешний квантовый выход светодиодов с выводом света через (1) полупрозрачный р-контакт Ni/Au (2) прозрачный р-контакт ITO

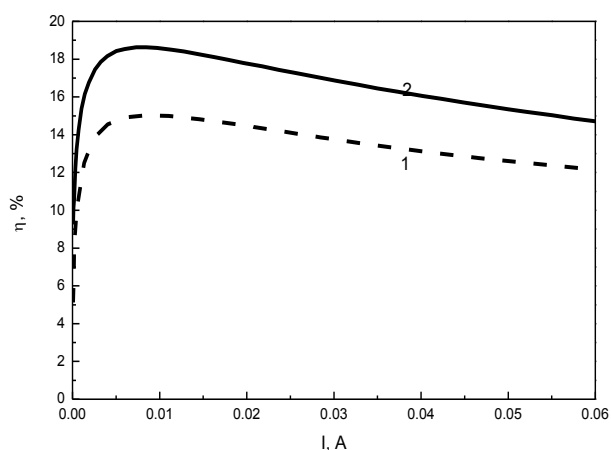


Рис.5. Внешний квантовый выход светодиодных кристаллов с выводом света через прозрачную подложку (1) отражающий р-контакт Ni/Ag (2) высокоотражающий р-контакт ITO/Ag

В третьей части главы рассматривается оптимизация отражающего контакта к р-слою GaN в светодиодных кристаллах мезапланарной конструкции с выводом света через прозрачную подложку. Ранее для мощных светодиодов данной конструкции нами был разработан отражающий контакт к слою р-GaN на основе комбинации металлов Ni/Ag (1.5/220 нм), обладающей высоким коэффициентом отражения в сине-фиолетовой области спектра. В данной работе рассматривается применение плёнок ITO в качестве прозрачного проводящего подслоя вместо слоя Ni. Показано, что плёнки ITO/Ag (2.5/220нм) обладают коэффициентом отражения на 16% выше, чем плёнка Ni/Ag(1.5/220нм). Показано, что применение отражающего контакта к р-слою GaN на основе Ag с применением ITO в качестве прозрачного проводящего подслоя позволяет существенно, на 20%, повысить эффективность вывода света. (рис. 5)

В **заклучении** сформулированы основные результаты диссертации.

1. Установлено, что наиболее важным фактором, определяющим падение внутренней квантовой эффективности излучения гетероструктур AlInGaN при больших плотностях тока накачки, является безызлучательная оже-рекомбинация.
2. Предложена и экспериментально реализована светодиодная гетероструктура, содержащая короткопериодную сверхрешётку с туннельно связанными квантовыми ямами в активной области, позволяющая в 2.5 раза уменьшить величину падения внутренней квантовой эффективности при плотности тока накачки 100А/см^2 .
3. На основе светодиодных гетероструктур с короткопериодными сверхрешётками в активной области (длина волны излучения 450 нм) изготовлены светодиодные кристаллы мезапланарной конструкции с активной площадью 1 мм^2 . Внешняя квантовая эффективность изготовленных корпусированных светодиодов составила $\eta_{\text{max}}=40\%$ в максимуме и $\eta_{\text{р.т.}}=36\%$ при рабочем токе 350 мА.

4. Показано, что применение короткопериодных сверхрешёток GaN/In_xGa_{1-x}N в активной области светодиодной AlInGaN гетероструктуры приводит к стабилизации спектрального положения максимума полосы излучения в широком диапазоне плотностей токов накачки.
5. Разработан способ получения рассеивающего свет рельефа на границе GaN-сапфир в процессе выращивания гетероструктур AlInGaN методом металлорганической газофазной эпитаксии, обеспечивающий увеличение коэффициента вывода света из светодиодной гетероструктуры и прирост внешнего квантового выхода изготовленных светодиодных кристаллов на 20%.
6. Разработана технология изготовления прозрачных р-контактов на основе плёнок ITO для светодиодных кристаллов мезапланарной конструкции. В изготовленных кристаллах увеличение внешнего квантового выхода достигает 2.5 раз по сравнению с кристаллами с полупрозрачными металлическими контактами.
7. Разработана технология изготовления высокоотражающих р-контактов на основе плёнок ITO/Ag для светодиодных кристаллов мезапланарной конструкции. В изготовленных кристаллах увеличение внешней квантовой эффективности составляет 20% по сравнению с кристаллами с р-контактом на основе плёнок Ni/Ag.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих работах:

1. Павлюченко А.С., Рожанский И.В., Закгейм Д.А., Проявление инжекционного механизма падения эффективности светодиодов на основе AlInGaN в температурной зависимости внешнего квантового выхода// 2009, ФТП, **43**, вып. 10, 1391-1395
2. Л.К. Марков, И.П. Смирнова, А.С. Павлюченко, Е.М. Аракчеева, М.М. Кулагина, «Отражающий р-контакт на основе тонких пленок ITO для флип-чип светодиодов AlGaInN»// 2009, ФТП, т.43, 11 1564-1569

3. Zakheim D.A., Pavluchenko A.S., Bauman D.A., Blue LEDs – way to overcome efficiency droop // Phys. Status Solidi (C), vol. 8, issue 7-8, 2340–2344 (2011)
4. Бер Б.Я., Богданова Е.В., Грешнов А.А., Закгейм А.Л., Казанцев Д.Ю., Карташова А.П., Павлюченко А.С., Черняков А.Е., Шабунина Е.И., Шмидт Н.М., Якимов Е.Б., Влияние уровня легирования кремнием и характера наноструктурной организации на падение с током внешней квантовой эффективности InGaN/GaN-светодиодов //2011, ФТП, т.45, 3, 425-431
5. И.П.Смирнова , Л.К.Марков, А.С.Павлюченко, М.В.Кукушкин, «AlGaInN-светодиоды с прозрачным р-контактом на основе тонких пленок ITO» // ФТП, 2012, 46, вып. 3, 384-388
6. Закгейм Д. А., Павлюченко А.С., Лундин В.В. , Способы повышения квантовой эффективности светодиодных гетероструктур AlInGaN на высоких плотностях тока накачки // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 5-й всероссийской конференции, М., 2007. стр. 53
7. Павлюченко А.С., Закгейм Д.А., Бауман Д.А., Температурная зависимость эффективности инжекции в светодиодных гетероструктурах на основе AlInGaN // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 6-й всероссийской конференции, СПб. 2008, стр. 108
8. Смирнова И.П., Марков Л.К., Аракчеева Е.М., Кулагина М.М., Павлюченко А.С., Флип-чип светодиоды AlGaInN с р-контактом на основе пленок ITO // // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 6-й всероссийской конференции, СПб. 2008, стр. 115
9. Zakheim D.A., Pavluchenko A.S., Bauman D.A., In situ method of improving blue LED light extraction efficiency // The 8th international conference on nitride semiconductors, Korea 2009, p. 1389
10. Павлюченко А.С., Закгейм Д.А., Бауман Д.А., Создание пористой структуры на границе GaN-сапфир для оптимизации вывода света из

- светодиодного кристалла // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 7-й всероссийской конференции, М. 2010, стр. 21
11. Закгейм Д.А., Павлюченко А.С., Бауман Д.А., Мощные синие светодиоды – пути повышения эффективности // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 7-й всероссийской конференции, М., 2010 стр. 105
 12. Богданова Е.В., Бер Б.Я., Грешнов А.А., Закгейм А.Л., Зегря Г.Г., Казанцев Д.Ю., Соколова З.Н., Павлюченко А.С., Черняков А.Е., Шмидт Н.М., Якимов Е.Б., Вклад оже-рекомбинации в падение внешней квантовой эффективности синих светодиодов на основе квантовых ям InGaN // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 7-й всероссийской конференции, М., 2010 стр. 109
 13. Закгейм А.Л., Закгейм Д.А., Мизеров М.Н., Павлюченко А.С., Черняков А.Е., Особенности работы высокомоощных InGaN светодиодов в широком температурно-токовом диапазоне // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 7-й всероссийской конференции, М., 2010 стр. 143
 14. Павлюченко А.С., Закгейм Д.А., Бауман Д.А., Булашевич К.А., Хохлев О.В., Карпов С.Ю., Минимизация падения эффективности с ростом тока накачки в синих светодиодах на основе нитрида галлия // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 8-й всероссийской конференции, СПб., 2011 стр. 43
 15. Павлюченко А.С., Закгейм Д.А., Черняков А.Е., Температурные зависимости квантовой эффективности электролюминесценции // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 8-й всероссийской конференции, СПб., 2011 стр. 55
 16. Шмидт Н.М., Бер Б.Я., Закгейм А.Л., Закгейм Д.А., Казанцев Д.Ю., Павлюченко А.С., Черняков А.Е., Особенности спектров электролюминесценции синих светодиодов на основе короткопериодных

- InGaN/GaN решеток // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы 8-й всероссийской конференции, СПб., 2011 стр. 57
17. In situ method of improving blue LED light extraction efficiency. D. A. Zakheim, A. S. Pavluchenko, D.A. Bauman // Theses of 8th International Conference on Nitride Semiconductors, Jeju Island, Korea, 2009