

На правах рукописи

Смирнова Ирина Павловна

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaInN

Специальность:

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук С.А.Гуревич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук А. Н. Пихтин

доктор физико-математических наук О. М. Сресели

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Защита состоится "___" _____ 2007г. в ___ час. на заседании диссертационного совета К002.205.02 Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.26, ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

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

Автореферат разослан "___" _____ 2007г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



Г.С.Куликов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы достигнут значительный прогресс в технологии эпитаксиального выращивания гетероструктур AlGaInN, что привело к созданию на основе этих структур эффективных светодиодов, работающих в видимой, синей и ближней ультрафиолетовой областях спектра [1]. Такие светодиоды находят все большее широкое применение в системах индикации, подсветки, навигации и т.д. Наиболее важная область применения – создание на основе синих светодиодов AlGaInN источников белого света, способных составить конкуренцию традиционным лампам накаливания, флуоресцентным и галогеновым лампам.

В большинстве случаев эффективность использования светодиодных систем возрастает с ростом мощности излучения самих светодиодов. Для достижения значительной мощности излучения светодиода необходимо обеспечить высокую внутреннюю квантовую эффективность исходной гетероструктуры AlGaInN, а также создать условия для эффективного вывода генерируемого света из кристалла. Важная особенность гетероструктур AlGaInN состоит в том, что в них, как правило, наблюдается довольно резкий спад внутренней квантовой эффективности с увеличением плотности тока накачки. Поэтому высокая мощность излучения не может достигаться только путем увеличения плотности тока накачки, необходимо также использовать кристаллы светодиодов с большой площадью излучающей поверхности. В светодиодах на основе гетероструктур AlGaInN, чаще всего выращенных на подложках из сапфира, эффективность вывода излучения ограничена эффектом полного внутреннего отражения генерируемого света на границах полупроводника с воздухом и с подложкой. Наиболее эффективные способы повышения эффективности вывода генерируемого излучения состоят в создании отражающих контактов, формировании оптических неоднородностей в структуре прибора, в частности, рассеивающего свет микрорельефа на

поверхности кристалла. В кристаллах светодиодов AlGaInN большой мощности и, соответственно, большой площади, на первый план выходит также проблема однородности распределения тока накачки по площади p - n перехода. Решение этой проблемы требует использования специальной конфигурации контактов. Актуальной задачей является минимизация последовательного электрического сопротивления и создание условий для эффективного отвода тепла от активной области. Отмеченные проблемы могут быть наиболее эффективно решены при использовании обращенной (флип-чип) конструкции кристалла светодиода, в которой n - и p -контакты расположены с одной (лицевой) стороны и свет выводится через прозрачную сапфировую подложку.

Таким образом, разработка конструкций и технологии изготовления светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN, получение и исследование свойств низкоомных, отражающих и рассеивающих свет контактов к эпитаксиальным слоям GaN, направленные на достижение высоких значений эффективности и мощности излучения светодиодов, является актуальной задачей.

Цели работы

- Увеличение эффективности вывода излучения из кристаллов светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN ($\lambda = 430-470$ нм) путем оптимизации конструкции и технологии изготовления (применение флип-чип конструкции с двухуровневой меза-структурой).
- Разработка технологии получения и исследование характеристик низкоомных контактов к слоям GaN p - и n -типа проводимости; создание низкоомных контактов, обеспечивающих высокий коэффициент отражения света в синей области спектра.
- Создание и исследование оптических свойств диффузно-рассеивающего и диффузно-отражающего микрорельефа на поверхности кристаллов светодиодов AlGaInN с целью увеличения внешней квантовой эффективности излучения.

- Исследование возможности достижения предельно высокой удельной и абсолютной мощности излучения кристаллов синих светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN; разработка технологии изготовления кристаллов с площадью активной области $\sim 1 \text{ мм}^2$, работающих при плотности тока накачки более 100 А/см^2 и обеспечивающих мощность излучения свыше 500 мВт.

Научная новизна работы

- Показано, что по сравнению со стандартными конструкциями светодиодов на основе AlGaInN в кристаллах с контактными площадками на поверхности структуры (геометрия флип-чип) существенное увеличение внешней квантовой эффективности излучения может быть достигнуто благодаря применению двухуровневой меза-структуры и отражающих омических контактов к слоям GaN *p*- и *n*-типа проводимости.

- Предложены оригинальные системы омических контактов к слою *n*-GaIn на основе Ti/Au и Ti/Ag, обеспечивающие удельное контактное сопротивление $< 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ без применения высокотемпературного отжига (контакт Ti/Ag является отражающим).

- Показано, что создание рассеивающего свет микрорельефа на поверхности кристалла светодиода AlGaInN ведет к значительному увеличению эффективности излучения, при этом величина эффективности практически не зависит от размера кристалла.

- Впервые на отдельном кристалле светодиода AlGaInN осуществлена операция лазерного удаления (lift-off) сапфировой подложки с последующим созданием рассеивающего свет микрорельефа на поверхности *n*-GaIn.

- Предложена новая конструкция кристалла светодиода AlGaInN высокой мощности с площадью активной области 1 мм^2 . Применение двухуровневой разводки контактов позволило обеспечить равномерное распределение тока накачки по поверхности кристалла и достичь значения выходной оптической мощности 550 мВт.

Практическая ценность работы

- Разработана технология получения омических контактов к *n*-GaN на основе двухслойной металлизации Ti/Au и Ti/Ag, обеспечивающая удельное контактное сопротивление $< 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² без применения высокотемпературного отжига, а также технология омического контакта к слою *p*-GaN на основе Ni/Ag с удельным сопротивлением $< 1 \cdot 10^{-3}$ Ом·см². Контакты Ti/Ag и Ni/Ag обладают высоким коэффициентом отражения (~0,85) в синей области спектра. Разработанная технология может использоваться при изготовлении различных оптоэлектронных и электронных приборов на основе гетероструктур AlGaInN.
- Разработана конструкция и технология изготовления синих светодиодов AlGaInN средней мощности (конструкция с двухуровневой меза-структурой), работающих в непрерывном режиме при комнатной температуре и обеспечивающих выходную мощность излучения 150 мВт (ток накачки 800А, максимальная внешняя квантовая эффективность 33%, дифференциальное сопротивление 1.8 Ом).
- Разработана оригинальная конструкция и технология изготовления синих светодиодов AlGaInN высокой мощности (конструкция с двухуровневой разводкой контактов). Максимальная мощность излучения в непрерывном режиме составляет 550 мВт (рабочая площадь – 1 мм², ток накачки – до 2 А, максимальная внешняя квантовая эффективность – 26%, тепловое сопротивление – 9-10 К/Вт, рекордно низкое дифференциальное сопротивление – 0.67 Ом).
- На основе разработанных кристаллов высокой мощности изготовлены белые светодиоды (кристалл синего светодиода, покрытый люминофором) с максимальной эффективностью излучения 33 Лм/Вт.
- Разработанная технология изготовления высокоэффективных синих и белых светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN используется в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника» в условиях серийного производства.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Омические контакты к n -GaN с низким удельным контактным сопротивлением, $< 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см², могут быть получены на основе двухслойных металлизаций Ti/Au и Ti/Ag без применения отжига при условии предварительной обработки поверхности полупроводника ионами Ag в плазме ВЧ разряда непосредственно перед напылением металлов.
2. В кристаллах светодиодов AlGaInN, применение отражающего p -контакта на основе Ni/Ag, вместо стандартного полупрозрачного p -контакта Ni/Au, обеспечивает однородное распределение тока накачки по активной области, ведет к значительному уменьшению последовательного сопротивления прибора и более чем двукратному возрастанию внешней квантовой эффективности излучения.
3. Для увеличения внешней квантовой эффективности излучения светодиодов AlGaInN флип-чип конструкции целесообразно использовать отражающий n -контакт на основе Ti/Ag.
4. Создание диффузно-отражающего p -контакта позволяет увеличить внешнюю квантовую эффективность кристалла светодиода AlGaInN в 1,5 раза.
5. Применение операции лазерного удаления сапфировой подложки с последующим созданием рассеивающего микрорельефа на поверхности слоя n -GaIn приводит к возрастанию внешней эффективности светодиода AlGaInN на 25-30%.
6. Применение флип-чип конструкции светодиода на основе AlGaInN с двухуровневой разводкой контактов позволяет получить высокую однородность распределения тока накачки по активной области и высокую мощность излучения (до 550мВт).

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 12-й международной конференции "*Nanostructures: Physics and Technology*", Санкт-

Петербург 2004 г.; на 2-й, 3-й, 4-й и 5-й Всероссийской конференции *"Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы"*, Санкт-Петербург 2003г. и 2005г., Москва 2004г. и 2007г.; на 5-й международной конференции *"International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes: ISBILLED-2004"* Gyeongju, Korea 2004 г; на 5-й международной конференции *"International Conference on Solid State Lighting"*, Bellingham, USA 2005, а также на научных семинарах лаборатории полупроводниковой квантовой электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН.

Результаты работы успешно применяются в условиях серийного производства синих и белых светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника».

Публикации

По результатам исследований, вошедших в диссертационную работу, опубликовано 15 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 153 страницы, в том числе 80 страниц основного текста, 63 рисунка на 63 страницах и 2 таблицы. Список литературы включает в себя 83 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первой главе** рассматриваются различные конструкции светодиодов на основе квантово-размерных гетероструктур AlGaInN, выращенных на разных типах подложек. Проанализированы преимущества и недостатки этих конструкций с точки зрения их использования для создания эффективных

светодиодов высокой мощности, работающих в синей области спектра, а также источников белого света на базе синих светодиодов, покрытых люминофором.

Показано, что для решения проблем эффективного вывода излучения из кристалла и эффективного отвода тепла от его активной области наиболее перспективно применение обращенной (флип-чип) конструкции, в которой обе контактные площадки расположены со стороны эпитаксиальных слоев, а вывод излучения происходит через прозрачную сапфировую подложку [2]. В этой конструкции контактные площадки используются для последующего монтажа кристалла на теплоотвод по способу “флип-чип”, в качестве контакта к слою p -GaN используется комбинация металлов с высокой отражающей способностью. При флип-чип монтаже минимизируется тепловое сопротивление между активной областью светодиода и теплоотводом, т.к. тепло от p - n перехода отводится через тонкий слой GaN, а не через сапфировую подложку. На основе работ по моделированию оптических [3] и электрических свойств [4] светодиодных кристаллов предлагается оригинальная флип-чип конструкция излучающего кристалла с двухуровневой меза-структурой. При такой конструкции кристалла первое травление проводится для вскрытия площадок под нанесение n -контакта, а второе травление (до сапфировой подложки) по всему контуру светоизлучающего кристалла осуществляется с целью повышения эффективности вывода света из кристалла за счет дополнительного отражения света от боковых стенок меза-структуры. Рассмотрены основные элементы технологии изготовления этих кристаллов и светодиодов средней мощности (работающие при токе накачки 400-800мА) на их основе. Экспериментально показано, что наличие глубокой меза-структуры приводит к возрастанию внешней квантовой эффективности излучающего кристалла на 10-15%.

Вторая глава посвящена разработке технологии получения и исследованию свойств низкоомных омических контактов к эпитаксиальным слоям GaN n - и p -типа проводимости.

Для нанесения металлических слоев использовались установка магнетронного/термического напыления SCM-450 (фирма Alcatel) и установка электронно-лучевого/магнетронного напыления производства фирмы Torr, США. В обеих установках предусмотрена возможность предварительной очистки поверхности образца путем травления в плазме Ar при рабочем давлении $10^{-1} \div 10$ Па, причем в установке фирмы Torr при низкой мощности ВЧ разряда (менее 50 Вт). В процессе напыления металлов подложкодержатель с образцами мог нагреваться до температуры 300°C. Для проведения отжига контактов была специально разработана установка, позволяющая проводить процесс в атмосфере чистого N₂, при давлении близком к атмосферному, при температурах от 300°C до 900°C.

В качестве контакта к слою *n*-GaN была рассмотрена система Ti/Al/Ti/Au (25нм/120нм/60нм/100нм). Для исследования электрических характеристик и определения удельного сопротивления *n*-контактов применялась методика TLM (Transmission Line Method). Была исследована зависимость удельного сопротивления *n*-контакта от температуры отжига. Минимальное удельное сопротивление было получено при температуре отжига 700°C и времени 5мин и составило $1 \cdot 10^{-5}$ Ом·см². Однако, было установлено, что даже при 700°C наблюдалось частичное ухудшение излучательных характеристик светодиодов, а дальнейшее увеличение температуры отжига приводило к полной деградации светодиодной гетероструктуры AlGaInN. Поэтому, с целью уменьшения контактного сопротивления при отсутствие отжига *n*-контакта, было изучено влияние параметров предварительной обработки поверхности полупроводника в ВЧ плазме Ar на удельное сопротивление *n*-контакта, а именно, зависимость от давления Ar, мощности ВЧ разряда и времени травления. Показано, что для всех исследованных режимов травления, контакт к *n*-GaN является омическим. Для определения величины удельного сопротивления контактов было взято минимальное значение контактного сопротивления *n*-контакта, измеренного методом TLM, и проведен численный

расчет, учитывающий трехмерное растекание тока в структуре. Минимальное удельное сопротивление $1 \cdot 10^{-4}$ Ом см² было достигнуто при мощности ВЧ разряда 75Вт, давлении Ar 1Па и времени травления 2мин. Была также отмечена тенденция уменьшения контактного сопротивления с уменьшением мощности ВЧ разряда, однако в используемой установке SCM-450 (Alcatel) при мощностях менее 75Вт нельзя достичь стабильного разряда.

Оптимизация технологии нанесения контакта к слою *n*-GaN проводилась на установке электронно-лучевого напыления. При отжиге контактов низкое контактное сопротивление достигается за счет диффузии Al к границе GaN и образования TiAlN. Однако, было показано, что уже при 700°C наблюдается деградация светодиодной структуры AlGaInN, тогда как применение очистки в аргоновой плазме позволяет значительно снизить контактное сопротивление даже в отсутствие отжига. Таким образом, в отсутствие отжига контактное сопротивление определяется состоянием поверхности *n*-GaN и свойствами металла, лежащим непосредственно на поверхности полупроводника, т.е. Ti, а значит, отпадает необходимость нанесения Al. По этой причине, в качестве *n*-контакта нами было предложено использовать двухслойную систему Ti/Au (25нм/120нм) без последующего отжига. Было также исследовано влияние параметров обработки поверхности *n*-GaN в ВЧ плазме Ar на удельное сопротивление *n*-контакта Ti/Au. Подбор режимов травления (мощность разряда 10-12Вт, время травления 30мин, давление Ar 1Па) позволил получить удельное сопротивление $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см² для *n*-контактов на основе Ti/Au без отжига. Влияния толщины слоя Ti (в диапазоне 3-30 нм) на удельное сопротивление *n*-контакта и его адгезию отмечено не было.

В качестве отражающего контакта к слою *p*-GaN исследованы различные двухслойные комбинации металлов: Ni/Ag, Pt/Ag, Ni/Al, Ni/Au. Показано, что лучшими отражающими свойствами обладают комбинации Ni/Ag(4нм/220нм) и Pt/Ag(4нм/220нм). Однако показано, что светодиодные кристаллы с отражающим контактом Ni/Ag имеют лучшие вольт-амперные характеристики (ВАХ), чем кристаллы с контактом Pt/Ag. Проведено сравнение кристаллов с

отражающим *p*-контактом Ni/Ag(4нм/220нм) и полупрозрачным *p*-контактом Ni/Au(4нм/4нм). Показано, что отражающий контакт обеспечивает более низкое последовательное сопротивление прибора, большую однородность распределения тока и увеличение внешней квантовой эффективности светодиода более чем в два раза.

Было исследовано влияние температуры отжига в атмосфере N₂ отражающего *p*-контакта Ni/Ag на ВАХ кристаллов, а также зависимость от температуры нагрева образцов во время нанесения металлов контакта. Поскольку ионное травление, при котором в приповерхностном слое образуются радиационные дефекты, неприменимо для очистки поверхности *p*-GaN, было рассмотрено влияние различных видов предварительной химической обработки поверхности *p*-GaN на ВАХ и внешнюю эффективность кристаллов. Показано, что химическая обработка в кипящем растворе HNO₃:HCl (1:3), нагрев образцов во время напыления металлов до 300°C и, как следствие этого, применение прямой фотолитографии для формирования контактных площадок обеспечивают снижение работы выхода приповерхностной области *p*-GaN и уменьшение прямого падения напряжения на светодиоде до 2.8В при токе накачки 20мА. Численное моделирование растекания электрического тока в структуре светодиода (из-за высокого сопротивления слоя *p*-GaN гетероструктуры AlGaInN невозможно определить сопротивление контактов к этому слою методом TLM) позволило заключить, что удельное контактное сопротивление полученного *p*-контакта составляет менее 10^{-3} Ом см^2 .

Применение прецизионного метода электронно-лучевого испарения металлов позволило более точно контролировать толщины наносимых слоев и исследовать зависимость внешней квантовой эффективности кристалла от толщины слоя Ni в отражающем *p*-контакте Ni/Ag. Показано, что уменьшение этой толщины от 4.5нм до 1.5нм позволяет заметно (на 20%) повысить внешнюю эффективность светодиода при незначительном ухудшении его ВАХ.

В данной главе представлены также оптические и электрические характеристики разработанных флип-чип светодиодов средней мощности. Впервые для светодиодов флип-чип конструкции предложено использовать отражающий контакт к области n -GaN. На рис.1 показано, что применение отражающего n -контакта Ti/Ag(2нм/220нм) приводит к существенному увеличению внешней квантовой эффективности светодиодов.

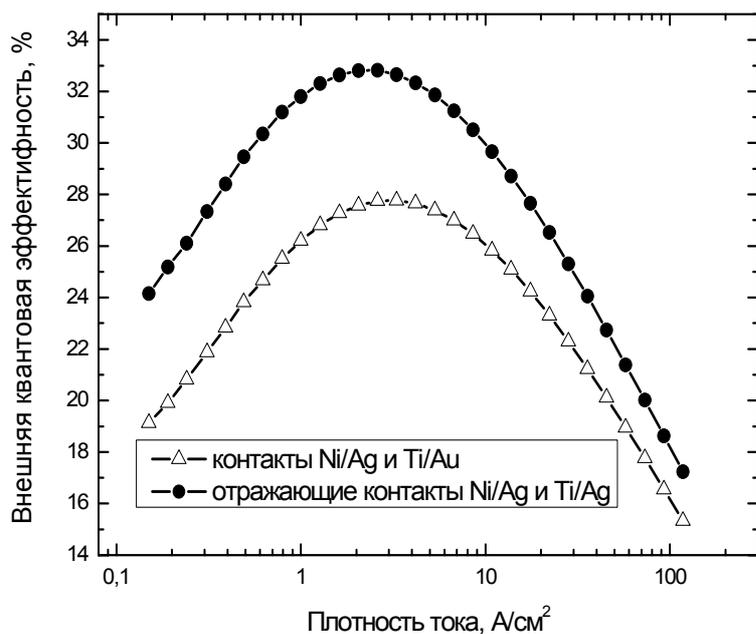


Рис 1. Сравнение оптических характеристик светодиодов флип-чип конструкции с p -контактом Ni/Ag(1.5нм/220нм) и n -контактами Ti/Au(25нм/120нм) и Ti/Ag(2нм/220нм).

В третьей главе рассматривается создание диффузно-рассеивающих поверхностей на границах полупроводник/подложка и полупроводник/металл. С этой целью исследовано химическое травление в поверхности p -GaN в концентрированном растворе H_3PO_4 . Выявлена взаимосвязь между исходным микрорельефом структуры и возможностью создания диффузно-рассеивающего рельефа. Показано, что при оптимальных режимах травления поверхности p -GaN в концентрированном растворе H_3PO_4 , нанесении на нее контакта на основе Ni/Ag, для которого слой Ag наносился магнетронным методом, и последующем отжиге контакта в вакууме формируется диффузно-отражающий p -контакт на границе металл/полупроводник. Для количественной оценки рассеивающей способности p -контактов была проведена серия прямых экспериментов по измерению диаграмм рассеяния на них лазерного излучения. Приведены основные характеристики светодиодов с

диффузно-отражающим контактом к слою p -GaN и получено увеличение внешней квантовой эффективности светодиодов в 1.5 раза.

В данной главе также представлены результаты по удалению сапфировой подложки (lift-off) на готовом светодиодном кристалле, смонтированном флип-чип монтажом на кремниевой плате. Для создания рассеивающей поверхности после проведения операции lift-off применялось реактивное ионное травление поверхности n -GaN в газовой смеси $Cl_2:Ar$. Показано, что в результате этого увеличение внешней эффективности излучающего кристалла составило 25-30%. Светодиоды, изготовленных из этих кристаллов устойчиво работали в диапазоне токов накачки до 300мА, достигая оптической мощности 110мВт.

В четвертой главе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования распределения тока накачки по активной области светоизлучающих кристаллов. Рассмотрена численная модель растекания тока в кристаллах светодиода, основанная на вычислении потенциалов и токов в трехмерной линейной сетке сопротивлений путем решения системы линейных уравнений Кирхгоффа. Результаты численного моделирования сопоставляются с экспериментальными данными, полученными методом сканирования ближнего поля излучения кристалла светодиода. На основании анализа теоретических и экспериментальных данных предложена оригинальная конструкция излучающего кристалла большой площади (1мм^2), использующая двухслойную металлизацию через промежуточный диэлектрик. Рассмотрены конструкция и технология изготовления этого кристалла. Особое внимание уделено оптимизации процесса нанесения диэлектрика. Показано, что введение H_2 в аргоновую плазму при нанесении плёнок SiO_2 приводит к заметному улучшению свойств пленок диэлектрика, осаждаемых методом магнетронного распыления.

В данной главе подробно обсуждаются оптические, электрические и тепловые характеристики разработанных синих светодиодов высокой мощности. Приведено экспериментальное распределение температуры по

поверхности излучающего кристалла, измеренное при помощи специально разработанной методики, в которой проводилось сравнение локальных спектральных характеристик излучения светодиода в непрерывном режиме работы и режиме коротких импульсов.

На рис.2 приведено сравнение характеристик разработанного синего светодиода высокой мощности с параметрами лучшего коммерческого светодиода серии Luxeon III Star фирмы “Lumileds”.

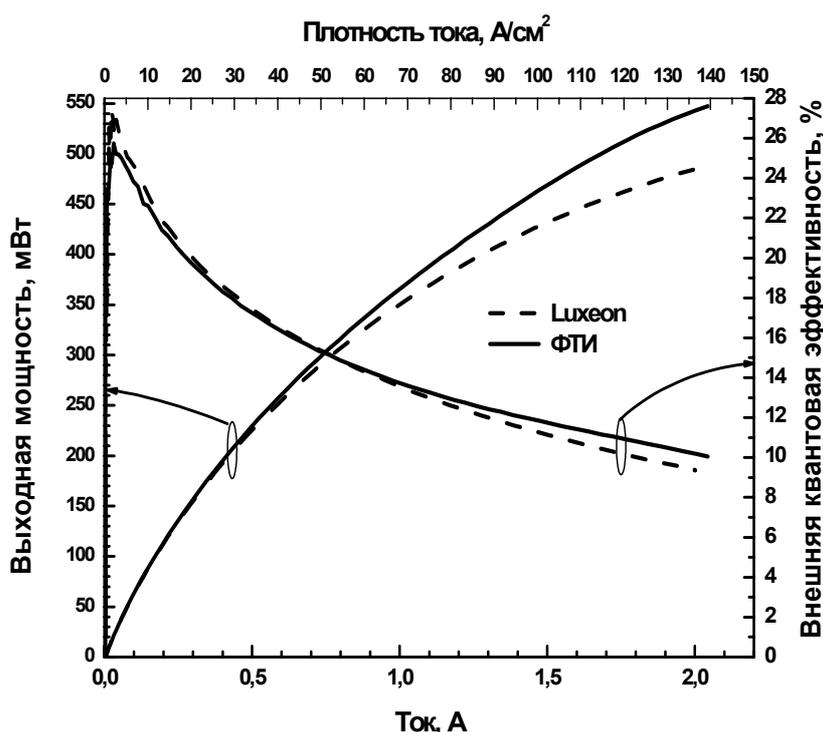


Рис 2. Оптические характеристики синих светодиодов высокой мощности (сплошные кривые) и их сравнение с характеристиками светодиодов “Luxeon™” (пунктирные кривые).

Также рассмотрены характеристики источников белого света, изготовленных на основе синих кристаллов большой площади.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

1. Разработана технология получения низкоомных омических контактов к слоям GaN *n*- и *p*-типа для светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN. Удельное сопротивление контакта к слою *n*-GaN на основе Ti/Au составило $<5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Разработанный отражающий контакт к слою *p*-GaN на основе Ni/Ag одновременно обеспечивает равномерное распределение тока по структуре и высокий коэффициент отражения (85% в диапазоне длин волн 430-470 нм). Удельное сопротивление *p*-контакта составило $<10^{-3}$ Ом·см².

2. Предложена оптимизированная конструкция и разработана технология изготовления кристаллов светодиода средней мощности синего спектрального диапазона ($\lambda_{\text{peak}}=430\text{-}470\text{nm}$) на основе квантово-размерных гетероструктур AlGaInN на сапфировых подложках. Изготовлены образцы синих светодиодов, работающие в непрерывном режиме при токах накачки до 800А с максимальной выходной мощностью 150мВт и максимальной внешней квантовой эффективностью 33%. Дифференциальное сопротивление светодиодов в диапазоне токов 400-800мА составило 1.8Ом.
3. Получен рассеивающий микрорельеф на поверхности *p*-GaN и предложена технология создания диффузно-отражающего контакта к слою *p*-GaN. Для светодиодов с диффузно-отражающего *p*-контактом получено увеличение внешней эффективности в 1,5 раза.
4. Впервые на готовом светодиодном кристалле осуществлена операция лазерного удаления (lift-off) сапфировой подложки и разработана методика создания рассеивающего микрорельефа на поверхности *n*-GaN. Это позволило увеличить внешнюю квантовую эффективность кристалла на 25-30%. Светодиоды устойчиво работали в диапазоне токов накачки до 300мА, достигая оптической мощности 110мВт.
5. Предложена оригинальная конструкция и разработана технология изготовления кристалла светодиода высокой мощности с площадью активной области 1mm^2 , излучающего в диапазоне длин волн 430-470нм. Применение двухуровневой разводки контактов через промежуточный слой диэлектрика позволило получить рекордно низкое значение сопротивления светодиодов 0.67Ом и высокую однородность распределения тока накачки по активной области. Светодиоды работали в непрерывном режиме в диапазоне токов накачки 0-2А. Максимальная выходная оптическая мощность составила 550 мВт, максимальная внешняя квантовая эффективность – 26 %, тепловое сопротивление светодиода – 9-10 К/Вт.
6. На основе разработанного кристалла высокой мощности были изготовлены белые светодиоды с эффективностью 33 Лм/Вт.

7. Результаты работы применяются в условиях серийного производства синих и белых светодиодов на основе AlGaInN в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника».

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих работах:

1. С.А.Гуревич, Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, Е.М.Аракчеева, Е.М.Танклевская, А.Л.Закгейм, Е.Д.Васильева, Г.В.Иткинсон, "Высокомощные (70мВт) синие светодиоды на основе меза-структуры AlGaInN с отражающими контактами", Тезисы докладов 2-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 116 (Санкт-Петербург, 2003).
2. С.А.Гуревич, Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, Е.М.Аракчеева, Е.М.Танклевская, А.Л.Закгейм, Е.Д.Васильева, Г.В.Иткинсон, "Высокомощные (70мВт) синие светодиоды на основе меза-структуры AlGaInN с отражающими контактами", "Светодиоды и лазеры" 1-2, 12 (2003).
3. I.P.Smirnova, D.A.Zakheim, I.V.Rozhanskii, M.M.Kulagina, E.M. Arakcheeva, S.A.Gurevich, A.L.Zakheim, E.D.Vasil'eva, G.V.Itkinson, "Large area InGaN/GaN MQW based LED with two-level contact topology for high-power applications", *Proc. of International Symposium: "Nanostructures: Physics and Technology"*, St.-Petersburg, p. 99 (2004)
4. D.A.Zakheim, I.P.Smirnova, E.M.Arakcheeva, M.M.Kulagina, S.A.Gurevich, V.W.Lundin, A.F.Tsatsulnikov, A.V.Sakharov, A.F.Fomin, A.L.Zakheim, E.D.Vasil'eva and G.V.Itkinson, "Fabrication of high-power flip-chip blue and white LEDs operating under high current density", Тезисы к *"The 5th International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes: ISBLLED-2004"*, pp. 34-35 (Gyeongju, Korea, 2004).
5. Г.А.Онушкин, А.Л.Закгейм, Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В. Рожанский, А.Ф.Цацульников, В.В.Лундин, "Исследование микроэлектролюминесцентных характеристик мощных AlGaInN меза-планарных светодиодов". Тезисы докладов 3-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 96 (Москва, 2004).
6. Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, Е.М.Аракчеева, М.М.Кулагина, С.А.Гуревич, А.Л.Закгейм, Е.Д.Васильева, Г.В.Иткинсон, "Основные элементы технологии изготовления светодиодов большой мощности на основе AlGaInN", Тезисы докладов 3-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 138 (Москва, 2004).
7. А.Л.Закгейм, Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский, Е.М.Аракчеева, М.М.Кулагина, С.А.Гуревич, Е.Д.Васильева, Г.В.Иткинсон, "Высокомощные синие (350мВт) и белые (60лм) меза-

- планарные светодиоды на основе AlGaInN квантово-размерных гетероструктур", Тезисы докладов 3-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 139-140 (Москва, 2004).
8. D.A.Zakheim, I.P.Smirnova, E.M.Arakcheeva, M.M.Kulagina, S.A. Gurevich, I.V.Rozhansky, V.W.Lundin, A.F.Tsatsulnikov, A.V.Sakharov, A.V.Fomin, A.L.Zakheim, E.D.Vasil'eva, G.V.Itkinson, "Fabrication of high-power flip-chip blue and white LEDs operating under high current density", *Physica status solidi (c)*, Vol. 1, No. 10, 2401-2404 (2004).
 9. Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский, С.А.Гуревич, М.М.Кулагина, Е.М.Аракчеева, Г.А.Онушкин, А.Л.Закгейм, Е.Д.Васильева, Г.В.Иткинсон, "Высокомощные синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN", *ФТП*, **39**, вып. 7, стр. 885-889 (2005).
 10. И.П.Смирнова, Д.А.Закгейм, М.М.Кулагина, Л.К.Марков, "Создание рассеивающего р-контакта в светодиодах на основе AlGaInN". Тезисы докладов 4-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 134 (Санкт-Петербург, 2005).
 11. Л.К.Марков, Д.А.Закгейм, Е.М.Аракчеева, И.П.Смирнова, М.Р. Рымалис, "Синие светодиоды меза-планарной конструкции на основе AlGaInN гетероструктур с удаленной сапфировой подложкой", Тезисы докладов 4-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 130 (Санкт-Петербург, 2005).
 12. А.Л.Закгейм, Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский, Г.А. Онушкин, С.А.Гуревич, Е.Д.Васильева, Г.В.Иткинсон. "Тепловые характеристики мощных AlInGaN светодиодов", Тезисы докладов 4-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 128 (Санкт-Петербург, 2005).
 13. V.K. Malyutenko, O.Yu. Malyutenko, A.V.Zinovchuk, A.L.Zakheim, D.A.Zakheim, I.P.Smirnova, S.A.Gurevich "Remote temperature mapping of high-power InGaN/GaN MQW flip-chip design LEDs", Fifth International Conference on Solid State Lighting, *Proc.of SPIE* **5941**, 59411K-1 (SPIE, Bellingham, WA, USA 2005)
 14. И.П.Смирнова, Л.К.Марков, Д.А.Закгейм, Е.М.Аракчеева, М.Р. Рымалис "Синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN с удаленной сапфировой подложкой", *ФТП*, **40**, вып. 11, 1397-1401 (2006)
 15. И.П.Смирнова, Д.А.Закгейм, М.М.Кулагина, Е.М.Аракчеева "Оптимизация технологии изготовления отражающих контактов в флип-чип светодиодах большой мощности на основе AlGaInN", Тезисы докладов 5-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 63 (Москва, 2007).

Цитированная литература.

- [1] M.Yamada, T.Mitani, Y.Narukawa, *et.al. Jpn.J.Appl.Phys.* **41**, L1431 (2002)
- [2] J. Wierer, D. Steigewald, *et.al. Appl.Phys.Lett.* **78**, 3379 (2001)

- [3] V.A.Zabelin, D.A.Zakheim, S.A.Gurevich *IEEE J. of Quantum Electronics* **40**, No 12, 1675 (2004)
- [4] Д.А.Закгейм, И.П.Смирнова, И.В.Рожанский и др., *ФТП* **39**, 885 (2005)