

На правах рукописи

АРАКЧЕЕВА Екатерина Михайловна

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ
СОЕДИНЕНИЙ $A^{III}B^V$, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО
ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Специальность:

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2008

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
С.А.Гуревич.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
О.М.Сресели,
кандидат физико-математических наук Д.А.Бауман

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Защита состоится " ____ " _____ 200__ г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д002.205.02 Учреждения Российской академии наук 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 " ____ " _____ 200__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Л.М.Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время трудно представить современную физику твердого тела без полупроводниковых гетероструктур. Электронные и оптоэлектронные приборы на основе гетероструктур $A^{III}B^V$, например, биполярные и полевые транзисторы, светодиоды, лазеры широко используются во многих областях техники. Значительное улучшение характеристик будущего поколения оптоэлектронных приборов на основе гетероструктур может быть достигнуто при использовании микроструктур. Например, при использовании микрорезонаторов могут быть получены инжекционные лазеры со сверхнизким порогом генерации. Микроструктуры фотонных кристаллов позволяют эффективно управлять распространением световых потоков в интегральных оптических схемах.

В настоящее время одним из основных методов формирования полупроводниковых микроструктур является реактивное ионное травление. При создании микроструктур технология реактивного ионного травления должна обеспечивать достаточно высокую скорость травления, заданный профиль получаемых элементов, а также низкую плотность дефектов в приповерхностной области структур.

Одна из областей, где полупроводниковые микроструктуры оказываются наиболее эффективными – это светоизлучающие приборы на основе нитридов III группы. Такие приборы перекрывают диапазон длин волн излучения от ультрафиолетового до видимого и наряду с использованием в системах записи, обработки и отображения информации они могут служить экономичными и долговечными источниками освещения, максимально согласованными по спектру с чувствительностью глаза человека. В связи с ограниченными возможностями химического травления, на сегодняшний день, реактивное

ионное травление остается единственным методом получения приборов и микроструктур на основе нитридов III группы.

Для получения опто- и микроэлектронных полупроводниковых приборов с субмикронными размерами элементов чрезвычайно перспективным является метод наноимпринта. Преимуществами метода наноимпринта по сравнению с традиционными литографическими методами является простота и отсутствие дорогостоящих технологических операций, таких как электронно-лучевая литография. Метод наноимпринта является перспективным и дешевым литографическим методом для промышленного изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем с высоким (до 10 нм) разрешением.

Основная цель данной работы заключалась в разработке технологии получения полупроводниковых микроструктур на основе соединений $A^{III}B^V$ с помощью метода реактивного ионного травления. Исследования процессов реактивного ионного травления полупроводников GaAs, InAs, GaN, InP, Si и гетероструктур на их основе в различных режимах, в смесях различных газов проводились с целью выяснения потенциальных возможностей метода в технологии получения современных оптоэлектронных приборов. Разрабатывалась технология реактивного ионного травления, обеспечивающая заданную глубину, минимальные изменения размеров элементов при формировании микроструктур, контролируемый профиль травления (вертикальные или наклонные боковые стенки), низкую плотность дефектов в приповерхностной области.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- Исследовать процессы реактивного ионного травления гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs с массивами квантовых точек InAs и выяснить потенциальные возможности метода для создания приборных наногетероструктур на этих материалах;

- Разработать технологию получения светоизлучающих микроструктур и фотонных кристаллов на основе гетероструктур $A^{III}B^V$ и исследовать оптические свойства полученных структур;
- Разработать технологию получения светодиодных структур на основе нитридов III группы;
- Разработать технологию нанопринта.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Определены основные закономерности процессов реактивного ионного травления полупроводниковых наногетероструктур InGaAs/GaAs, AlGaInN/GaN, в том числе содержащих массивы квантовых точек InAs/InGaAs, для создания микроструктур с заданным рельефом и размерами.
2. Установлено, что при формировании методом реактивного ионного травления светоизлучающих микроструктур с массивами квантовых точек InAs/InGaAs в активной области режимы глубокого травления выбраны таким образом, что поверхностная рекомбинация существенно не снижает интенсивность фотолюминесценции.
3. При исследовании спектров отражения и фотолюминесценции периодических микроструктур, полученных методом реактивного ионного травления, показано, что такие структуры являются двумерными фотонными кристаллами.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработанная технология реактивного ионного травления нитридов III группы позволяет получать светодиоды AlGaInN/GaN с характеристиками, не уступающими мировому уровню: максимальная выходная мощность 550 мВт, максимальная внешняя квантовая эффективность 26%. Разработанная технология используется в ЗАО “Светлана-Оптоэлектроника” в условиях

серийного производства светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN/GaN.

2. С использованием метода реактивного ионного травления изготовлены образцы инжекционных лазеров с распределенным Брэгговским отражателем на основе периодической микроструктуры полупроводник/воздух со следующими характеристиками: коэффициент отражения 0.73, пороговый ток 30 мА, плотность порогового тока 830 Асм^{-2} , максимальная выходная мощность 80 мВт. Разработанная технология перспективна для создания эффективных излучателей в системах оптической связи и интегральных оптических схемах.
3. Разработана технология получения штампов на основе Si для наноимпринта - нового перспективного и дешевого метода промышленного изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем с высоким разрешением (до 10 нм). Методом наноимпринта изготовлены полупроводниковые микроструктуры с минимальными размерами элементов до 100 нм.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Реактивное ионное травление гетероструктур InGaAs/GaAs в газовых смесях на основе Cl_2 , BCl_3 и Ar, а также травление InP в смеси CH_4 , H_2 и Ar позволяет реализовать микроструктуры с глубиной рельефа до нескольких микрон и минимальными линейными размерами до 100 нм.
2. Реактивное ионное травление гетероструктур AlGaInAs/GaAs с квантовыми точками InAs в активной области при соотношении газовых потоков $\text{Cl}_2: \text{BCl}_3: \text{Ar} = 1: 4: 16 \text{ см}^3/\text{мин}$, давлении газовой смеси в реакторе 1 Па и напряжении автосмещения 200 В позволяет получать эффективные светоизлучающие микроструктуры с размерами элементов от 0.2 до 3 мкм, в которых поверхностная безызлучательная рекомбинация существенно не снижает интенсивность фотолюминесценции.

3. Реактивное ионное травление лазерных структур InGaAs/GaAs в том же режиме (Cl_2 : BCl_3 : Ar = 1: 4: 16 $\text{см}^3/\text{мин}$; давлении 1 Па, напряжение автосмещения 200 В) позволяет получать микролазеры с глубоко протравленным (до 3 мкм) распределенным Брэгговским отражателем на основе периодической структуры полупроводник/воздух, работающие на длине волны 970 нм, с характеристиками: коэффициент отражения 0.73, плотность порогового тока 830 Асм^{-2} и максимальная выходная мощность 80 мВт.
4. В спектрах отражения и фотолюминесценции периодических микроструктур с гексагональной решеткой отверстий (период элементов 1160 нм и диаметр отверстий 670 нм), сформированных методом реактивного ионного травления, проявляются угловые зависимости интенсивностей, характерные для фотонных кристаллов.
5. Сочетание многослойных металлических (Ni, Au) и резистивных масок (PI 35ES, AZ 5214, AZ 4562) при реактивном ионном травлении структур AlGaInN/GaN в режиме: Cl_2 : BCl_3 : Ar = 6: 10: 11 $\text{см}^3/\text{мин}$, давление газовой смеси в реакторе 1 Па и напряжение автосмещения равное 150 В позволяет получить глубокое (до 6 мкм) травление с заданным профилем и гладкими боковыми стенками и создать на этой основе светодиоды с характеристиками: максимальная выходная мощность 550 мВт, максимальная внешняя квантовая эффективность 26%.
6. Создание методом реактивного ионного травления рассеивающего свет микрорельефа на поверхности светодиодных гетероструктур AlGaInN/GaN с удаленной подложкой ("lift-off"), а также на поверхности подложки SiC позволяет увеличить внешнюю квантовую эффективность светодиодов на 25-30%.
7. Реактивное ионное травление кремния в потоке SF_6 со скоростью 10 $\text{см}^3/\text{мин}$ при давлении газа в реакторе 0.6 Па и напряжении автосмещения 200 В обеспечивает получение штампов для наноимпринта с гладкими

вертикальными стенками, которые используются для изготовления микроструктур фотонных кристаллов.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на 4-м Всероссийском совещании "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы" 2000 г., на 29-ой Неделе науки Санкт-Петербургского Государственного Технического Университета 2001 г., на 4-м Белорусско-Российского семинаре "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе" Минск, Беларусь 2002 г., на международной конференции "4th International Conference on Transparent Optical Networks: ICTON 2002", Варшава, Польша 2002 г., на 11-й, 12-й и 13-й международной конференции "Nanostructure: Physics and Technology", С.-Петербург 2003, 2004 и 2005 гг., на международной конференции "5th International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes: ISBLLED-2004" Gyeongju, Korea 2004 г., на 2-й, 3-й, 4-й, 5-й и 6-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", Санкт-Петербург 2003, 2005 и 2008 гг. Москва 2004 и 2007 гг.

Исследования в данном направлении были поддержаны Российским Фондом Фундаментальных Исследований (грант РФФИ N01-02-17853), INTAS (грант №99-928), а также персональным грантом Конкурсного Центра Фундаментального Естествознания г. С.-Петербурга.

Публикации. По результатам исследований, выполненных в диссертационной работе, опубликовано 36 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 143 страницы, в том числе 76 страниц основного текста, 57 рисунков на 57 страницах и 3 таблицы. Список литературы включает в себя 67 наименований. Во введениях к каждой главе содержатся обзоры литературы по соответствующим проблемам.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе описывается технология изготовления и некоторые оптические свойства микроструктур на основе полупроводников GaAs и InP. Рассматриваются особенности метода реактивного ионного травления применительно к формированию микроструктур на современных полупроводниковых материалах и твердых растворах на их основе, в том числе содержащие массивы квантовых точек.

Первая глава состоит из введения и 3 разделов. Во введении обсуждается перспективность использования микроструктур (микростолбиков, фотонных кристаллов) для создания светоизлучающих приборов, а также перспективность применения квантовых точек в активной области таких структур.

В разделе 1.1 рассматривается технология получения полупроводниковых светоизлучающих микроструктур. Технология изготовления микроструктур и периодических микроструктур (фотонных кристаллов) включает оптическую и электронную литографию, химическое и реактивное ионное травление. Полупроводниковые гетероструктуры на основе GaAs с квантовыми точками InAs/InGaAs в активной области выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber 32P. Электронно-литографический процесс осуществлялся на микроскопе JSM-50A, снабженным программируемым генератором засветки, и на сканирующем электронном микроскопе CamScan Series 4-88 DV100, имеющем более высокое разрешение. Технология изготовления микролазеров с распределенным Брэгговским отражателем на основе периодической структуры полупроводник/воздух аналогична технологии получения микроструктур, но содержит дополнительные технологические операции, связанные с необходимостью формирования диэлектрика и контактов.

В разделе 1.2 обсуждается методика реактивного ионного травления. Вначале рассматриваются механизмы сухого травления и типичная конфигурация установки реактивного ионного травления. Отмечены ключевые параметры процесса реактивного ионного травления: состав газовой смеси, отвечающей за химические реакции на поверхности образца, давление в рабочей камере, мощность высокочастотного разряда. Травление происходит за счет бомбардировки ионами поверхности образца, что приводит к распылению материала с поверхности, за счет химических реакций на поверхности или при комбинации этих двух механизмов [1]. Рассматривается зависимость механизмов травления от давления и напряжения смещения, и их влияние на профиль травления и морфологию поверхности образца. Оптимизация процессов травления с высокими скоростями травления и высокой анизотропией предполагает достижение равновесия между химическим и физическим механизмами травления. В работе использовалась установка для реактивного ионного травления в радиочастотной плазме диодного типа - RDE- 300 - производства французской фирмы "Alcatel" с компьютерным управлением. В работе приведены градуировочные кривые зависимости глубины травления от таких параметров, как давление газа, скорости подачи газовых компонент, напряжение смещения и от времени травления, для основных полупроводниковых материалов. Приведены результаты по выбору масок для травления: металлов и полимеров, обеспечивающих минимальный уход заданных размеров и глубину. Также подробно обсуждается выбор газовых реагентов и химические процессы реактивного ионного травления материалов $A^{III}B^V$.

Приведены результаты по оптимизации процесса травления полупроводниковых структур на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs и InP. Представлены графики зависимостей скоростей травления GaAs и InP от напряжения автосмещения, а также зависимости угла наклона стенки микроструктуры от давления газовой смеси в камере. Параметры травления микроструктур выбирались, исходя из необходимости получения

вертикального профиля и низкой плотностью дефектов в приповерхностной области. Для травления микроструктур на основе GaAs через никелевую маску был выбран оптимальный режим: соотношение газовых компонентов Cl_2 : BCl_3 : Ar = 1: 4: 16 стандартизированных $\text{см}^3/\text{мин}$, давление газовой смеси в реакторе 1 Па (реактор предварительно откачивается до 5×10^{-4} Па) и напряжение автосмещения равно 200 В. Средняя скорость травления GaAs в таком режиме составила ~ 0.21 мкм/мин. Для травления структур на основе InP не использовались хлорсодержащие газовые смеси, а применялись метан-водородные смеси из-за низкой летучести InCl_x продуктов реакций при комнатной температуре. Для травления микроструктур на основе InP был выбран следующий оптимальный режим: соотношение газовых компонентов CH_4 : H_2 : Ar = 6: 3: 5 $\text{см}^3/\text{мин}$, давление газовой смеси в реакторе 0.7 Па и напряжение автосмещения равно 200 В. Средняя скорость травления в таком режиме составила ~ 0.03 мкм/мин.

В разделе 1.3 обсуждаются результаты исследований оптических свойств различных микроструктур, технология получения которых описана в разделе 1.1. Выясняется влияние процесса реактивного ионного травления на оптические свойства микроструктур с размерами от 0.2 до 3 мкм. Описан эксперимент, позволяющий выделить вклад безызлучательной поверхностной рекомбинации на травленной поверхности в фотолюминесценцию. Было установлено, что при температуре 20 К интегральная интенсивность ФЛ микроструктур (плотность накачки $10 \text{ Вт}/\text{см}^2$) оказалась одинаковой, что говорит о том, что реактивное ионное травление не ведет к существенному снижению удельной эффективности ФЛ. При температуре 300 К интегральная интенсивность ФЛ микроструктур наименьших размеров (0.2 мкм) только в 3 раза меньше, чем для нетравленной структуры. Это говорит о незначительном вкладе поверхностной безызлучательной рекомбинации в общее падение интегральной интенсивности ФЛ с температурой, что в свою очередь свидетельствует о низкой плотности дефектов, вносимых реактивным ионным травлением, в приповерхностной области. Наши результаты доказывают, что

метод реактивного ионного травления может эффективно использоваться для создания микроструктур светоизлучающих приборов, работающих при комнатной температуре.

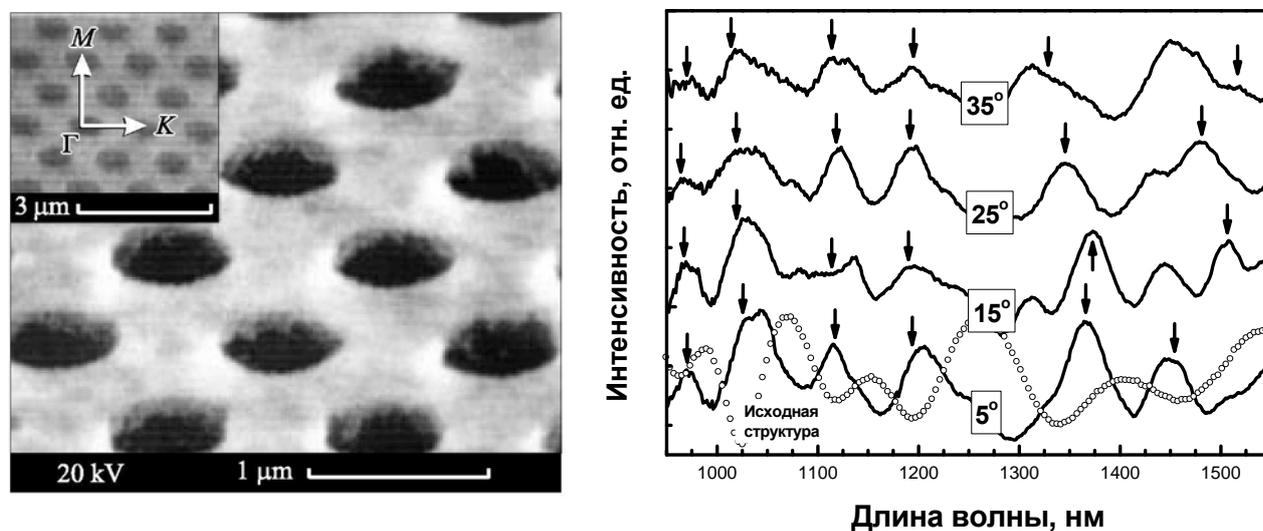


Рис 1. Снимок РЭМ двумерного полупроводникового фотонного кристалла с гексагональной решеткой отверстий. На вставке указаны направления симметрии Γ - K и Γ - M . Спектры отражения структуры этого фотонного кристалла, измеренные для света с ТМ-поляризацией, падающего вдоль направления Γ - K в диапазоне углов $5 - 35^\circ$, и исходной структуры при 5° .

Представлены результаты исследований микроструктур с гексагональной решеткой отверстий (период элементов 1160 nm и диаметр отверстий 670 nm - рис. 1). Спектры оптического отражения измерялись при комнатной температуре в диапазоне длин волн $1000 \div 1600 \text{ nm}$. Угол падения света θ варьировался с помощью вращения образца относительно оптической оси. Отраженный луч детектировался германиевым фотодиодом при угле 2θ . Исследования угловых зависимостей фотолюминесценции были проведены при комнатной температуре с фиксированным углом падения лазерного луча 55° относительно нормали к образцу. Фотолюминесценция возбуждалась Ar^+ лазером (514 nm) и детектировалась охлаждаемым германиевым фотодиодом. Угол регистрации варьировался в пределах $5 \div 35^\circ$. Установлено, что угол

падения лазерного луча не влияет на форму спектров фотолюминесценции. При исследовании спектров отражения при различных углах падения света (рис. 1) и фотолюминесценции периодических микроструктур, полученных методом реактивного ионного травления, показано, что такие структуры являются двумерными фотонными кристаллами.

Характеристики микролазера с 3 периодами распределенных Брэгговских отражателей полупроводник/воздух (рис. 2) были измерены при накачке импульсами тока с длительностью 100 нс и частотой следования 10 кГц при комнатной температуре. Микролазер продемонстрировал низкий пороговый ток - 30 мА и максимальную выходную мощность 80 мВт. Полуширина линии излучения составила всего 2 нм. Коэффициент отражение, определенный сравнением выходной мощности от Брэгговского отражателя и сколотой грани, получился равным 73 %.

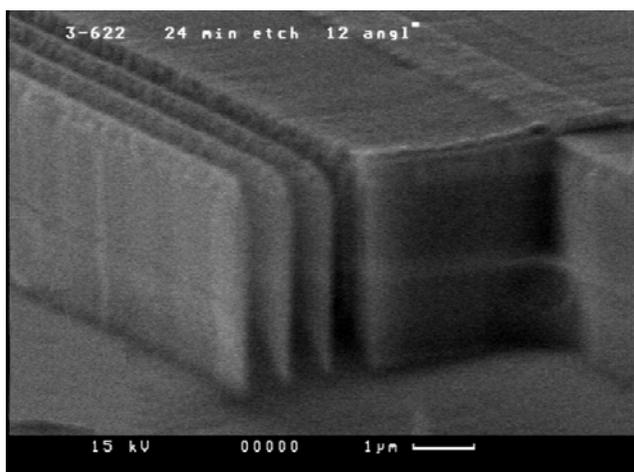


Рис 2. Снимок РЭМ микролазера с глубоко протравленным распределенным Брегговским отражателем полупроводник/воздух.

Вторая глава посвящена светодиодам на основе нитридов III группы и разработке метода реактивного ионного травления AlGaInN/GaN.

В разделе 2.1 описывается конструкция и технология получения светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN/GaN. Эффективным с точки зрения вывода света из кристалла является применение обращенной конструкции (флип-чип) светодиодного кристалла [2]. При этом, обе контактные площадки к материалу n- и p-типа проводимости располагались с лицевой стороны и кристалл монтировался на теплоотвод лицевой стороной, вывод света осуществляется через подложку. В качестве контакта к слою p-

GaN использовался высокоотражающий контакт на основе Ni/Ag. N-контакт Ti/Al/Ti/Au наносился методом магнетронного распыления металлов в атмосфере Ar. Технология изготовления светодиодного кристалла включала 2 процесса реактивного ионного травления: первое - на глубину порядка 0.5 мкм для вскрытия площадок под нанесение *n*-контакта, второе - на глубину 5-6 мкм (до сапфировой подложки) по всему контуру светоизлучающего кристалла. Было показано, что в светодиодах с отражающим контактом вытравливание глубокой мезы до подложки (на глубину 5-6 мкм) вокруг всей активной области светодиода позволяет повысить эффективность вывода света на ~10-15% по сравнению с кристаллом без глубокой мезы, а оптимальным углом наклона боковых стенок мезы является угол ~45-60°.

В разделе 2.2 подробно обсуждается методика реактивного ионного травления гетероструктур на основе GaN. Проводилась работа по выбору химических реагентов, типа маски, а также оптимизации параметров плазмы с целью получения режима травления с заданным профилем и гладкими боковыми стенками, с достаточно высокой скоростью и обеспечивающим низкую плотность дефектов в приповерхностной области. Было установлено, что реактивное ионное травление GaN в хлорсодержащей смеси (Cl_2 : BCl_3 : Ar = 6: 10: 11 $\text{см}^3/\text{мин}$, при давлении в камере - 1 Па и относительно небольшой энергии распыляющих ионов - 150 В) происходит с на порядок большей скоростью (~ 90 нм/мин), чем в метан-водородной смеси (H_2 : CH_4 : Ar в соотношении 10: 5: 5, при давлении - 0,7 Па и при напряжении - 200 В). Поэтому дальнейшее травление структур на основе нитридов III группы проводилось в хлорсодержащей смеси.

Представлены графики зависимостей скорости травления GaN от мощности разряда, отношения ухода GaN/резист от мощности разряда, от давления газовой смеси в реакторе, от количества Ar и BCl_3 . Установлено, что для наименьшего ухода резиста оптимальная мощность разряда составляет 30 Вт, давление газовой смеси 1 Па, а соотношение газовых потоков Cl_2 : BCl_3 : Ar = 6: 10: 11 $\text{см}^3/\text{мин}$.

Приведены результаты исследований по выбору масок для реактивного ионного травления с заданным профилем травления и для глубокого (до 6 мкм) травления гетероструктур AlGaInN/GaN. Использовались маски из различных фоторезистов, металлов, а также многослойные маски на их основе. По результатам работы представлена таблица зависимостей отношения ухода GaN/маска и угла травленной стенки от материала маски, а также способа ее получения. Наилучшее сочетание вертикального профиля травления и гладкого края было получено при использовании трехслойной маски с промежуточным слоем из напыленного золота. Вертикальный профиль травления GaN получается также при травлении через однослойную маску из никеля. Однако представляет интерес глубокое травление (до 6 мкм) GaN с углом наклона травленной стенки 45-60°. Отношение ухода GaN/резист является ключевым фактором при травлении нитрида галлия на большую глубину. Для резистивных масок наилучшее отношение ухода GaN/резист наблюдалось для резиста TI 35ES, при этом с помощью различных процессов задубливания можно получать разнообразные углы наклона травленной стенки в GaN.

В разделе 2.3 приведены характеристики светодиодов AlGaInN/GaN, такие как зависимость выходной оптической мощности и внешнего квантового выхода излучения светодиодов от тока накачки, измеренные в непрерывном режиме. Максимальная выходная оптическая мощность составила более 150 мВт при токе 800 мА, а максимальный квантовый выход – около 21% при токе 10 мА. Дифференциальное последовательное сопротивление светодиодов в диапазоне токов 400-800 мА составляет 1.8 Ом. На основе разработанной технологии реактивного ионного травления были созданы светодиоды AlGaInN высокой мощности (конструкция с двухуровневой разводкой контактов) со следующими характеристиками: максимальная выходная мощность 550 мВт, максимальная внешняя квантовая эффективность 26% (рис. 3).

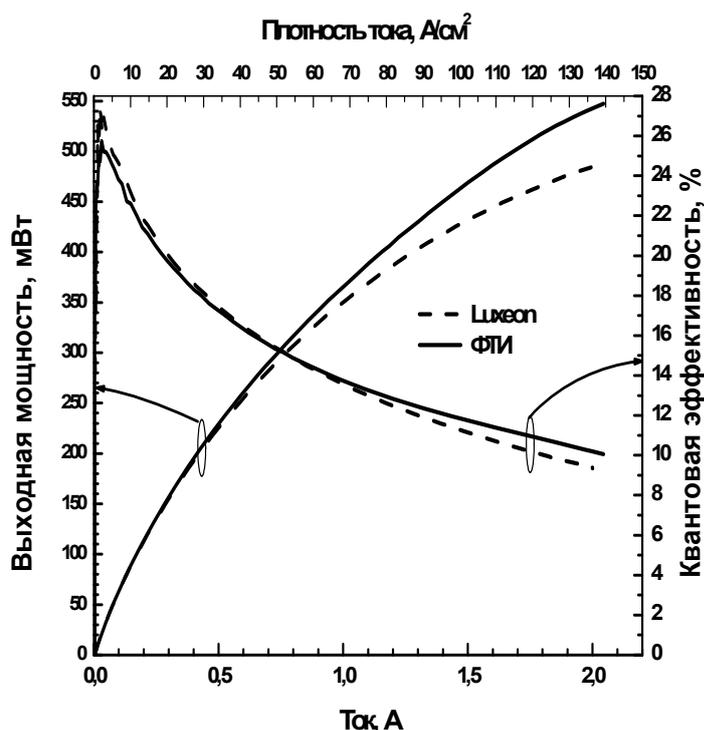


Рис 3. Характеристики светодиодов AlGaInN/GaN высокой мощности (сплошные кривые) и их сравнение с характеристиками коммерческих светодиодов “Luxeon™” (пунктирные кривые).

В разделе 2.4 рассмотрено создание рассеивающего свет микрорельефа с помощью метода реактивного ионного травления на границах полупроводник/воздух и подложка/воздух для повышения внешней квантовой эффективности светодиодов на основе гетероструктур AlGaInN. Эксперименты показали, что микрорельеф поверхности n-GaN чувствителен к соотношению парциальных давлений рабочих газов Cl_2 и BCl_3 , а также мощности разряда. Преобладание Cl_2 способствует развитию микрорельефа, а большое содержание BCl_3 в плазме наоборот приводит к сглаживанию поверхности травления. При травлении в обычной газовой смеси $Cl_2: BCl_3: Ar = 6: 10: 11$, но при большой мощности разряда (60 Вт) также выявлено появление микрорельефа - пирамидок, шириной $0.3 \div 0.5$ мкм. Эти разработки использовались для создания светодиодов с удаленной сапфировой подложкой (lift-off). Для создания микрорельефа на обратной поверхности подложки SiC наносился сплошной тонкий фоторезист марки AZ5214 толщиной ~ 1 мкм, задубленный при температурах $90^\circ C$, $110^\circ C$ и $150^\circ C$. Варьировались мощность разряда, давление газового потока, а также время травления. Наблюдалось 2 типа наиболее характерного микрорельефа: так называемый

“тонкий” (частые столбики, шириной ~ 150 нм и высотой 400 нм) и пирамидки (основание ~ 800 нм, высота 1 мкм). “Тонкий” микрорельеф наблюдался при травлении резиста, задубленного при 110°C и 150°C, в режиме травления: мощность 40 Вт, давление 1 Па, поток SF₆ - 20 см³/мин и время процесса 20 минут. Пирамидки получались у образцов с резистом, задубленным при 110°C и 150°C, в режиме: мощность 25 Вт, давление 1 Па, поток SF₆ - 20 см³/мин и время травления 80 минут. Для оценки влияния микрорельефа на внешнюю квантовую эффективность были изготовлены флип-чип светодиоды по стандартной технологии с микрорельефом на обратной стороне подложки SiC.

Показано, что применение метода по удалению сапфировой подложки (lift-off) с микрорельефом, созданным на слое n-GaN методом реактивного ионного травления, позволяет увеличить внешнюю эффективность излучающего кристалла на 25-30%. Было продемонстрировано, что предложенная методика получения рассеивающего свет микрорельефа на обратной стороне подложки SiC с помощью реактивного ионного травления позволяет увеличить внешнюю квантовую эффективность светодиодов более чем на 25%.

В третьей главе рассматривается получение микроструктур методом наноимпринта.

В начале обсуждаются преимущества и перспективность метода наноимпринта для изготовления полупроводниковых микроструктур. Описывается принцип метода наноимпринта: изготовление штампа, печать рисунка в полиметилметакрилате (ПММА) с помощью штампа и непосредственно перенос рисунка на подложку с использованием метода реактивного ионного травления [3].

Описывается технология изготовления штампов на основе Si для фотонных кристаллов с помощью интерференционной фотолитографии, основанной на экспонировании фоторезиста интерференционной картиной в виде полос, возникающей при интерференции двух лучей от He-Cd лазера (длина волны 442 нм), и реактивного ионного травления. Был разработан

метод реактивного ионного травления Si в газовой смеси на основе SF₆. Установлено, что скорость травления кремния возрастает как при увеличении напряжения автосмещения, так и при увеличении процентного содержания газа SF₆ в смеси SF₆/Ar. Исходя из предъявлявшихся к штампам требований: гладкая поверхность, а также вертикальные и гладкие стенки микроструктур, нами был подобран следующий режим: поток SF₆ - 10 см³/мин; давление газа в реакторе 0.6 Па и напряжение автосмещения равное 200 В. Средняя скорость травления Si в таком режиме составила ~ 140 нм/мин. Таким образом были изготовлены штампы из Si, с помощью которых методом наноимпринта были получены двумерные полимерные (на основе ПММА) фотонные кристаллы.

Представлена технология формирования микроструктур на подложке GaAs путем переноса имеющегося в ПММА рисунка (полученного методом импринта) на большую глубину с сохранением разрешения, которая включала в себя реактивное ионное травление и напыление слоя Ni. Были получены микроструктуры (шириной до 100 нм и глубиной до 1 мкм), которые имели очень гладкие и почти вертикальные боковые стенки.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

- 1 Разработана комплексная технология реактивного ионного травления для получения микроструктур на основе GaAs с квантовыми точками InAs/InGaAs в активной области (фотонных кристаллов, микролазера с распределенным Брэгговским отражателем в виде периодической структуры полупроводник/воздух) с контролируемым профилем травления и низкой плотностью дефектов в приповерхностной области.
- 2 С использованием метода реактивного ионного травления получены микролазеры с распределенным Брэгговским отражателем на основе периодической структуры полупроводник/воздух со следующими характеристиками: коэффициент отражения 0.73, пороговый ток 30 мА, плотность порогового тока 830 Асм⁻², максимальная выходная мощность 80 мВт.

- 3 Разработана методика реактивного ионного травления нитридов III группы с использованием резистивных, металлических и комбинированных масок. Продемонстрирован режим формирования вертикального профиля травления, а также режим глубокого (более 5 мкм) травления GaN. В результате получены светодиоды AlGaInN/GaN с характеристиками, не уступающими мировому уровню: максимальная выходная мощность 550 мВт, максимальная внешняя квантовая эффективность 26%.
- 4 Разработана технология создания рассеивающего свет микрорельефа различного характера на обратной стороне подложки SiC с использованием масок из тонкого фоторезиста и реактивного ионного травления, позволившая увеличить внешнюю квантовую эффективность светодиодов AlGaInN/GaN более чем на 25%.
- 5 Разработана технология реактивного ионного травления Si, с помощью которой получены штампы для наноимпинта - нового перспективного и дешевого метода промышленного изготовления полупроводниковых приборов и интегральных схем с высоким разрешением (до 10 нм). Методом наноимпинта изготовлены микроструктуры на основе GaAs с минимальными размерами элементов до 100 нм. Показано, что сочетание реактивного ионного травления и метода наноимпинта может эффективно использоваться для создания полупроводниковых микроструктур.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих работах:

1. Е.М.Рамушина, В.И.Скопина, Е.М.Танклевская, "Реактивное ионное травление нитрида галлия", Тезисы Докладов 4-го Всероссийского совещания "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 91 (Санкт-Петербург, 2000).
2. Е.М.Рамушина, С.А.Гуревич, "Реактивное ионное травление III-нитридов", Тезисы к 29-ой Неделе науки Санкт-Петербургского Государственного Технического Университета, ч.6, стр. 109 (Санкт-Петербург, 2001).
3. M.V.Maximov, V.V.Volovik, C. M. Sotomayor Torres, E.M.Ramushina, V.I.Skopina, E.M.Tanklevskaya, V.M.Ustinov, S.A.Gurevich, Zh.I.Alferov, N.N.Ledentsov, D.Bimberg, "Impact of Carrier Lateral Transport and Surface Recombination on the PL Efficiency of Mesas with Self-Organized Quantum Dots",

Тезисы к “International Workshop on Microcavity Light Sources” (Paderborn, Germany, 2001);

4. M.V.Maximov, B.V.Volovik, C. M. Sotomayor Torres, E.M.Ramushina, V.I.Skopina, E.M.Tanklevskaya, S.A.Gurevich, V.M.Ustinov, Zh.I.Alferov, N.N.Ledentsov and D.Bimberg, "Impact of Carrier Lateral Transport and Surface Recombination on the PL Efficiency of Mesas with Self-Organized Quantum Dots", *Phys. stat. sol. (a)* 188, No.3, 955-959 (2001).

5. А.Е.Губенко, Г.Б.Венус, И.М.Гаджиев, Е.М.Рамушина, Г.А.Забоев, Е.Л.Портной, "Перестраиваемый генератор терагерцового излучения на основе гетеролазера с нерезонансным дифракционным выводом", Тезисы докладов 4-ого Белорусско-Российского семинара "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе", стр. 130 (Минск, Беларусь, 2002).

6. А.Е.Gubenko, G.B.Venus, I.M.Gadzhiev, E.M.Ramushina, G.A.Zaboev and E.L.Portnoi, "Tunable Dual-wavelength Grating-coupled Surface-emitting Diode Laser for THz Frequency Optoelectronics", Тезисы к "4th International Conference on Transparent Optical Networks: ICTON 2002", V.2, pp. 81-83 (Warsaw, Poland, 2002).

7. M.V.Maximov, E.M.Ramushina, V.I.Skopina, E.M.Tanklevskaya, B.A.Solov'ev, Yu.M.Shernyakov, I.N.Kaiander, M.A.Kaliteevski, S.A.Gurevich, N.N.Ledentsov, V.M.Ustinov, Zh.I.Alferov, C. M. Sotomayor Torres and D.Bimberg, "Edge-emitting InGaAs/GaAs lasers with deeply etched semiconductor/air distributed Bragg reflector mirrors", *Semicond. Sci. Technol.* 17, L69-L71 (2002).

8. 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).

9. В.В.Лундин, А.В.Сахаров, А.И.Бесюлькин, Е.Е.Заварин, А.Ф.Цацульников, С.А.Гуревич, Е.М.Аракчеева, Е.М.Танклевская, Н.Н.Леденцов, Jim Y.Chi, Ru Chin Tu, "Формирование зарощенных мезаполосковых III-N структур с помощью комбинации сухого и жидкостного травления с последующим заращиванием", Тезисы докладов 2-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 135 (Санкт-Петербург, 2003).

10. Е.М.Аракчеева, "Получение и исследование лазерной генерации в полупроводниковых структурах с фотонными кристаллами", Тезисы докладов "Итогового семинара по физике и астрономии по результатам конкурса грантов 2002 года для молодых ученых Санкт-Петербурга", стр. 21 (Санкт-Петербург, 2003).

11. I.M.Gagjiev, G.B.Venus, A.E.Gubenko, N.D.Il'inskaya, S.I.Nesterov, E.M.Araktcheeva and E.L.Portnoi, "1.2 W CW and 13.5 W pulse grating-coupled surface-emitting lasers at 970 nm", Тезисы к 11th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", pp. 25-26 (St. Petersburg, Russia, 2003).

12. 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).
13. В.В.Лундин, А.В.Сахаров, А.И.Бесюлькин, Е.Е.Заварин, А.Ф.Цацульников, С.А.Гуревич, Е.М.Аракчеева, Е.М.Танклевская, Н.Н.Леденцов, Jim Y.Chi, Ru Chin Tu, "Формирование зарощенных мезаполосковых III-N структур с помощью комбинации сухого и жидкостного травления с последующим заращиванием", "Светодиоды и лазеры" **1-2**, 80 (2003).
14. A.S.Usikov, D.V.Tsvetkov, M.A.Mastro, A.I.Pechnikov, V.A.Soukhoveev, Y.V.Shapovalova, O.V.Kovalenkov, G.H.Gainer, S.Yu.Karpov, V.A.Dmitriev, B.O'Meara, S.A.Gurevich, E.M.Arakcheeva, A.L.Zakhgeim and H.Helava "Indium-free violet LEDs grown by HVPE", Phys. stat. sol. (c), Vol.0, No.7, 2265–2269 (2003).
15. V.A.Shalygin, L.E.Vorobjev, V.Yu.Panevin, D.A.Firsov, S.Hanna, H.Knieling, A.Seilmeier, E.M.Arakcheeva, N.V.Kryzhanovskaya, A.G.Gladyshev, A.E.Zhukov and V.M.Ustinov" Excited state photoluminescence in stepped InGaAs/AlGaAs quantum wells under picosecond excitation", International Journal of Nanoscience, **2**, No.6, 427-435 (2003).
16. 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).
17. 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).
18. 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).
19. I.P.Smirnova, D.A.Zakheim, I.V.Rozhansky, 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", Тезисы к 12th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", pp. 99-100 (St. Petersburg, Russia, 2004).
20. 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", Phys. stat. sol. (c), Vol. 1, No. 10, 2401-2404 (2004).

21. Е.М.Аракчеева, А.В.Нащекин, В.А.Соловьев, Е.М.Танклевская, М.В.Максимов, С.Г.Конников, С.А.Гуревич, Н.Н.Леденцов, "Технология получения полупроводниковых микрорезонаторов и фотонных кристаллов", ЖТФ, **75**, вып. 2, стр. 78-81 (2005).

22. 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).

23. Е.М.Аракчеева, Е.М.Танклевская, С.И.Нестеров, М.В.Максимов, С.А.Гуревич, J.Seekamp, С.М.Sotomayor Torres, "Получение фотонных кристаллов в структурах на основе полупроводников и полимеров с использованием метода нанопринта", ЖТФ, **75**, вып. 8, стр. 80-84 (2005).

24. A.V.Nashchekin, E.M.Arakcheeva, S.A.Blokhin, M.V.Maximov, E.M.Tanklevskaya, O.A.Usov, S.G. onnikov, N.N.Ledentsov, A.E.Zhukov, V.M.Ustinov, "Fabrication and optical properties of 2D PhCs with active area based on InAs/InGaAs QDs", Тезисы к 13th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", pp. 117-118 (St. Petersburg, Russia, 2005).

25. Д.С.Сизов, Г.А.Онушкин, В.С.Сизов, Г.А.Михайловский, Е.М.Аракчеева, Е.Е.Заварин, В.В.Лундин, А.Ф.Цацульников, Н.Н.Леденцов, "Исследование инжекции носителей в InGaN/GaN светодиодах и роль утечек в ВАХ и эффективности излучения", Тезисы докладов 4-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 96-97 (Санкт-Петербург, 2005).

26. 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. 130-131 (Санкт-Петербург, 2005).

27. С.А.Блохин, Н.В.Крыжановская, А.Г.Гладышев, Н.А.Малеев, А.Г.Кузьменков, Е.М.Аракчеева, Е.М.Танклевская, А.Е.Жуков, А.П.Васильев, Е.С.Семенова, М.В.Максимов, Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов, Э.Шток, Д.Бимберг, "Оптические исследования микродисков на основе субмонослойных квантовых точек InGaAs с асимметричным волноводом, сформированным методом селективного окисления", ФТП, **40**, вып. 4, стр. 482-487 (2006).

28. Е.М.Аракчеева, М.В.Максимов, Е.М.Танклевская, С.А.Гуревич, "Микролазер с глубоко протравленными распределенными брэгговскими отражателями", Изв. РАН, сер. физ., т.70, 3, стр.361-363 (2006).

29. Крыжановская Н.В., Блохин С.А., Гладышев А.Г., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Аракчеева Е.М., Танклевская Е.М., Жуков А.Е., Васильев А.П., Семенова Е.С., Максимов М.В., Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Шток Э., Бимберг Д., "Лазерная генерация на длине волны 1.3 мкм при комнатной

температуре в микродиске с квантовыми точками", ФТП, **40**, вып. 9, стр. 1128-1132 (2006).

30. Блохин С.А., Усов О.А., Нащекин А.В., Аракчеева Е.М., Танклевская Е.М., Конников С.Г., Жуков А.Е., Максимов М.В., Леденцов Н.Н., Устинов В.М., "Оптические исследования двумерного фотонного кристалла с квантовыми точками InAs/InGaAs в качестве активной области", ФТП, **40**, вып. 7, стр. 833-838 (2006).

31. 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, стр. 1397-1401 (2006).

32. 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).

33. Blokhin S.A., Maximov M.V., Usov O.A., Nashchekin A.V., Arakcheeva E.M., Tanklevskaya E.M., Gurevich S.A., Konnikov S.G., Zhukov A.E., Ledentsov N.N., Ustinov V.M., "Variable-angle optical reflectivity and angle-resolved photoluminescence studies of 2D active photonic crystal based on quantum dots", Int. J. Nanoscience, v.6, 3-4, pp. 197-201 (2007).

34. Usov S.O., Tsatsulnikov A.F., Lundin V.V., Sakharov A.V., Zavarin E.E., Sizov D.S., Musikhin Y.G., Bert N.A., Arakcheeva E.M., Ledentsov N.N., "Analysis of the local indium composition in ultrathin InGaIn layers", Semicond. Sci. Technol., v.22, pp. 528-532 (2007).

35. И.П.Смирнова, Л.К.Марков, Е.М.Аракчеева, М.М.Кулагина, А.С.Павлюченко, "Флип-чип светодиоды AlGaInN с р-контактом на основе пленок ИТО", Тезисы докладов 6-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 115 (Санкт-Петербург, 2008).

36. Е.М.Аракчеева, И.П.Смирнова, Л.К.Марков, Д.А.Закгейм, М.М.Кулагина, "Флип-чип светодиоды на основе гетероструктур AlGaInN, выращенных на подложках SiC", Тезисы докладов 6-й Всероссийской конференции "Нитриды Галлия, Индия и Алюминия - структуры и приборы", стр. 67 (Санкт-Петербург, 2008).

Цитированная литература.

[1] R.J.Shul, S.J.Pearton, *Handbook of advanced plasma processing techniques*, Springer, 2000

[2] J.Wierer, D.Steigewald, *et.al. Appl.Phys.Lett.* **78**, 3379 (2001)

[3] S.Y. Chou, P.R. Krauss, and P.J. Renstrom. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 4129 (1996)