

На правах рукописи

Усов Сергей Олегович

**ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА И
ТРАНЗИСТОРОВ С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ
КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СЛОЕВ InGaN, InAlN И КОРОТКОПЕРИОДНЫХ
СВЕРХРЕШЕТОК InGaN/GaN**

специальность

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в

Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологическом центре микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук и
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: **Цацульников Андрей Федорович**, кандидат физико-математических наук, и.о. зам. директора по научной работе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Сидоров Валерий Георгиевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), г. Санкт-Петербург

Мармалюк Александр Анатольевич, доктор технических наук, начальник НТЦ, Акционерное Общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (АО «НИИ «Полюс»), г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), г. Санкт-Петербург

Защита состоится " ____ " _____ 2016 г. в ____ час. на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе, адрес сайта: www.ioffe.ru

Отзывы о диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета. Д 002.205.02.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Достижения современной мощной СВЧ электроники и оптоэлектроники, особенно в части полупроводникового освещения, во многом связаны с развитием полупроводниковых гетероструктур на основе соединений нитридов III-группы (InAlGaN). Соединения в системе материалов InAlGaN являются прямозонными полупроводниками, ширина запрещенной зоны которых изменяется от 0.7 эВ до 6.2 эВ и перекрывает весь диапазон видимого света. Физические свойства нитридов III-группы, такие как теплопроводность, высокая термическая и химическая стабильность значительно превосходят свойства кремния и полупроводников III-AsP. На основе системы материалов InAlGaN созданы и широко используются высокоэффективные светоизлучающие диоды ультрафиолетового (УФ), синего и зеленого диапазонов, а также источники белого света как на основе люминофорных покрытий, так и RGB источники на основе смешивания излучения нескольких светоизлучающих диодов различного диапазона [1, 2]. Коммерчески доступные источники белого света на основе светодиодов уже превзошли лампы накаливания и сравнялись с флуоресцентными лампами по всем основным показателям [3]. Предложены перспективные монолитные источники белого света на основе нитридов III-группы, комбинирующие несколько активных слоев InGaN, излучающих при различных длинах волн, и представляющие собой новый класс светоизлучающих устройств, которые потенциально обладают более высокой эффективностью и надежностью, поскольку не требуют применения люминофоров и сложных систем управления как в случае RGB источников белого света.

Помимо оптоэлектронных применений большой прогресс наблюдается в области InAlGaN транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT). Большие значения энергий ширин запрещенной зоны, позволяющие достичь высоких напряжений пробоя, а, следовательно, высоких рабочих напряжений приборов, большие значения разрывов зон проводимости на гетерограницах AlGaN/GaN или InAlN/GaN, а также насыщенной скорости и концентрации электронов в двумерном канале дают возможность реализовать высокочастотные транзисторы большой мощности с параметрами, превосходящими достижимые в материальных системах III-As или Si [4, 5].

Однако, несмотря на значительные достигнутые успехи потенциал приборов на основе InAlGaN реализован далеко не полностью. Например, несмотря на то, что излучение соединений InAlGaN способно перекрыть весь видимый диапазон, эффективные источники света желто-зеленого и красного диапазонов до сих пор не

созданы. Создание перспективных НЕМТ транзисторов на основе гетеропереходов GaN/InAlN встречает серьезные технологические проблемы. Истоки данных проблем кроются в том, что все слои гетероструктур на основе InAlGaN являются несогласованными между собой по параметру решетки и до сих пор отсутствуют доступные по цене, размеру и качеству подложки GaN и AlN, что приводит к необходимости использовать для эпитаксии инородные подложки Al₂O₃ или SiC. Различие в параметрах кристаллической решетки слоев гетероструктур, приводит к возникновению значительных механических напряжений, например, в активной области InGaN/GaN светоизлучающих диодов особенно при высоком содержании индия, и соответственно к фазовому распаду InGaN, формированию дефектов, и снижению эффективности излучения в желто-зеленом и красном диапазонах. Таким образом, важной задачей современных исследований в данной области является изучение взаимосвязи структурных, электрофизических и оптических свойств гетероструктур на основе InAlGaN с технологическими условиями их синтеза для поиска методов эффективного технологического контроля над эффектами фазовой сепарации в квантоворазмерных слоях гетероструктур с целью подавления или использования данного эффекта в приборных структурах.

Цель работы заключалась в исследовании структурных, оптических и электрических свойств различных типов гетероструктур на основе системы материалов InAlGaN, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), для светоизлучающих диодов видимого диапазона и транзисторов с высокой подвижностью электронов с целью выявления новых подходов к созданию активных областей приборных структур, основанных на управлении упругими напряжениями и эффектом фазовой сепарации.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **основные задачи**:

1. Исследование оптических и структурных свойств квантоворазмерных слоев InGaN, имеющих островковую структуру и формирующихся в условиях присутствия водорода в реакторе установки ГФЭ МОС при росте слоев InGaN.
2. Изучение структурных и оптических свойств гетероструктур InGaN/GaN, выращенных методом ГФЭ МОС в режиме субмонослойного осаждения, при котором слой InGaN формируется с помощью нескольких циклов осаждения InGaN/GaN с эффективной толщиной каждого слоя менее одного монослоя.
3. Исследование свойств эпитаксиальных слоев InAlN, выращенных методом ГФЭ МОС с использованием горизонтальных реакторов различного размера и

планетарного реактора AIX2000 HT, с целью определения оптимальных условий роста, позволяющих подавить фазовую сепарацию, и получить слои InAlN с высоким кристаллическим качеством для последующего создания на их основе распределенных брэгговских отражателей (РБО) InAlN/GaN и GaN/AlN/InAlN гетероструктур для НЕМТ транзисторов.

4. Изучение композитных InGaN/GaN/InAlN гетероструктур, в которых слой InAlN выращивался в технологических условиях, приводящих к фазовой сепарации и формированию островков с большой шириной запрещенной зоны, которые стимулировали фазовый распад и формирование островков в узкозонных квантоворазмерных слоях InGaN, осажденных над островками InAlN.
5. Исследование влияния барьеров на основе короткопериодных сверхрешеток (КПСР) InGaN/GaN в активной области светодиодов синего и желто-зеленого диапазонов и монолитных белых светодиодов на их оптические свойства.

Научная новизна полученных результатов:

1. Изучена зависимость морфологии квантоворазмерных слоев InGaN от содержания водорода в атмосфере реактора при росте InGaN или во время прерываний роста после осаждения тонкого (2-4 нм) слоя InGaN.
2. Впервые для InGaN/GaN гетероструктур исследован метод субмонослойного роста.
3. Впервые исследованы свойства слоев InAlN, выращенных в условиях, позволяющих подавить фазовую сепарацию, обусловленную различием условий роста In-содержащих и Al-содержащих слоев.
4. Впервые исследовано стимулированное формирование островков InGaN путем последовательного осаждения тонкого слоя InGaN над слоем InAlN, содержащим островки.
5. Показано, что использование в активной области светодиодов желто-зеленого диапазона КПСР InGaN/GaN под активным слоем InGaN с высоким содержанием индия, позволяет увеличить эффективность излучения в диапазоне длин волн от 530 до 560 нм.
6. Показано, что применение короткопериодной сверхрешетки InGaN/GaN в качестве барьерных слоев в активной области монолитных полихромных светодиодных гетероструктур позволяет улучшить транспорт носителей.

Научная и практическая значимость работы:

1. Предложен и реализован способ управления морфологией квантоворазмерных слоев InGaN с помощью добавки водорода в реактор в процессе роста InGaN или во время прерываний роста после осаждения InGaN, позволяющий получать, в

первом случае, более однородные по составу слои InGaN и, во втором случае, трансформировать сплошной слой InGaN в массив островков, что позволяет изменять длину волны и эффективность излучения светодиодов синего и зеленого диапазонов.

2. Изучены свойства слоев InAlN, выращенных в установках ГФЭ МОС с горизонтальными реакторами различного размера и планетарным реактором AIX2000 HT и определены оптимальные условия эпитаксиального роста высококачественных слоев InAlN, что позволило получить РБО InAlN/GaN, с коэффициентом отражения более 99 % в видимом интервале длин волн от 460 до 610 нм и HEMT транзисторы на основе гетероструктур GaN/AlN/InAlN с током насыщения 1600 мА/мм и крутизной 200 мС/мм.
3. Показано, что использование композитной InGaN/GaN/InAlN гетероструктуры в активной области светодиодов позволяет реализовать излучение в красной области спектра с длиной волны ~620 нм.
4. Показано, что активная область на основе квантоворазмерного слоя InGaN с высоким содержанием индия, осажденного на КПСР InGaN/GaN и последующий слой GaN, выращенный при пониженной температуре роста, позволяет реализовать излучение в желто-зеленом диапазоне длин волн 530-560 нм с внешней квантовой эффективностью, превышающей современный уровень.
5. Показано, что использование в активной области монолитного белого светодиода барьеров различной толщины на основе КПСР InGaN/GaN или GaN позволяет контролировать цветовые характеристики излучения за счет изменения соотношения интенсивностей излучения в различных областях спектра.

Положения, выносимые на защиту.

1. Присутствие водорода в атмосфере во время эпитаксиального роста InGaN обеспечивает формирование однородных по составу слоев, а при прерываниях роста после осаждения квантоворазмерного слоя InGaN приводит к морфологической трансформации сплошного слоя в массив островков.
2. Использование короткопериодной сверхрешетки InGaN/GaN и низкотемпературного слоя GaN под излучающим слоем InGaN в активной области светодиода позволяет повысить эффективность излучения в желто-зеленом диапазоне спектра.
3. Использование короткопериодной сверхрешетки InGaN/GaN в качестве барьера в активной области монолитного белого светодиода позволяет контролировать цветовые характеристики излучения.

4. Подавление фазовой сепарации в тонких слоях InAlN при оптимизированных условиях эпитаксиального роста позволяет получить однородные по составу слои, создать транзисторы, обладающие более высокими по сравнению с AlGaIn/GaN характеристиками, и распределенные брэгговские отражатели с рекордно высоким коэффициентом отражения во всем видимом диапазоне длин волн.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на 5-ой Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2016г.); 7-ой Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники (Москва, 2016г.); 10-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 23-25 Марта 2015г.); Школе-конференции с международным участием International School and Conference “Saint Petersburg OPEN 2016” (Saint Petersburg, 2016); 9-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 2013г.); 9-й Беларуско-Российский Семинар "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе" (Минск, 2013г.); 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9) (Glasgow, 2011); 8-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Санкт-Петербург, 2011г.); 8-ой Беларуско-Российский Семинар "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе", (Минск, 2011 г.); 7-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 2010г.); 12-ой Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2010г.); 15th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XV) (Incline Village, 2010г.); International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2010) (Tampa, 2010); 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2010) (Seoul, 2010); 13th European Workshop on Metalorganic Vapour Phase Epitaxy (Ulm, 2009); Конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-запада «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 2009г.); SPIE Photonics Europe 2008 (Strasbourg, 2008); 5-ой Всероссийской Конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы» (Москва, 2007г.).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 31 печатных работах, в том числе 13 в рецензируемых научных журналах и 4 в трудах научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материал изложен на 215 страницах, включая 74 рисунка и 11 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 254 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

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

Первая глава содержит обзор литературных данных о свойствах материалов нитридов III группы и твердых растворов на их основе. Описана роль системы материалов InAlGaN в современной полупроводниковой электронике и оптоэлектронике. Проведено сравнение свойств с другими полупроводниковыми системами для приборных применений. Изложена краткая история развития получения гетероструктур на основе нитридов III группы различными методами для светодиодов и транзисторов, перечислены направления дальнейшего развития и приведен прогноз предполагаемого изменения их характеристик. Приведено описание физических свойств и основных параметров бинарных соединений AlN, GaN и InN и подложек для эпитаксиального роста гетероструктур на основе системы материалов InAlGaN. Описаны характерные особенности режимов эпитаксиального выращивания квантоворазмерных слоев и квантовых точек на основе соединений нитридов III группы. Приведен обзор исследований по процессам описывающим особенности фазового распада, происходящего в твердых растворах InGaN и InAlN. Проанализированы основные причины, приводящие к снижению внешней квантовой эффективности светодиодов с активной областью на основе InGaN/GaN. Рассмотрены основные типы источников белого света на основе люминофорных покрытий, RGB источники белого света на основе смешения излучения нескольких светодиодов различных цветов, в том числе с люминофорным покрытием, и монолитные однокристалльные светодиоды с активной областью, содержащей квантоворазмерные слои InGaN, излучающие на различных длинах волн. Рассмотрены особенности роста гетероструктур InAlN/GaN для получения распределенных брэгговских отражателей и HEMT транзисторов. Проанализированы основные преимущества и недостатки транзисторных HEMT гетероструктур на основе InAlN/GaN по сравнению со структурами на основе AlGaN/GaN.

Вторая глава содержит описание методов эпитаксиального роста и методик экспериментального исследования структурных, оптических и электрических свойств гетероструктур InAlGaN, и светоизлучающих диодов и транзисторов с высокой подвижностью на их основе. Эпитаксиальное выращивание гетероструктур, исследованных в данной работе, проводилось методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) на трех установках: модернизированной лабораторной установке Epiquip VP-50 RP с горизонтальным реактором размером 1×2”,

стандартной промышленно-ориентированной установке AIX2000 HT с планетарным реактором размером 6×2", и установке Dragon-125 с горизонтальным реактором размером 3×2", 1×3" или 1×100 мм, полностью разработанной и изготовленной сотрудниками научных групп НТЦ микроэлектроники РАН и ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Для каждой установки приведены описание блок-схемы и достижимые диапазоны параметров роста.

Дано описание оборудования и методов экспериментального исследования структурных, оптических и электрических свойств методами рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения, растровой электронной микроскопии (РЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), вторичной ионной масс спектроскопии (ВИМС), измерения эффекта Холла методом Ван-дер-Пау, фото- и электролюминесценции (ФЛ и ЭЛ), спектроскопии оптического отражения. Дано описание установки для измерения ток-мощностных характеристик светодиодов, предназначенной для оценки величины внешней квантовой эффективности (ВКЭ) излучения для сравнения между собой различных светодиодных гетероструктур.

Третья глава посвящена изучению эффекта фазовой сепарации в квантоворазмерных слоях InGaN. Изложены результаты исследований свойств квантоворазмерных слоев InGaN, выращенных в условиях присутствия водорода в атмосфере реактора во время эпитаксиального роста InGaN и во время прерываний роста после осаждения InGaN, на локальную фазовую сепарацию. Рассмотрены два типа объектов: In-обогащенные островки InGaN, имеющие размеры несколько нанометров (КТ) и расположенные внутри слоев InGaN, и двумерные, при определенных условиях формирования изолированные, островки InGaN, имеющие латеральные размеры десятки нанометров [A2, A5, A9, A12]. Проведено изучение изменения морфологии слоев InGaN в зависимости от времени прерывания роста и концентрации водорода. Установлено, что присутствие водорода непосредственно во время роста тонких слоев InGaN приводит к подавлению формирования In-обогащенных КТ (Рис. 1а,б) и росту однородных по составу слоев. С другой стороны, рост InGaN в атмосфере азота с последующими прерываниями роста после осаждения InGaN в атмосфере, содержащей водород, приводит к уменьшению общего количества индия в слое, уменьшению размеров КТ за счет конвертации слоя InGaN в GaN и, к некоторому увеличению максимального содержания индия в таких КТ. При значительных длительностях прерываний и/или большом содержании водорода сплошной слой InGaN трансформируется в массив изолированных островков, имеющих размеры 10-20 нм (Рис. 1в). Исследование структур синего-зеленого диапазона (430 - 500 нм), выращенных при различных прерываниях роста после осаждения слоя InGaN, показало, помимо формирования больших островков (Рис. 1 в, г), следующие изменения

оптических свойств. Прерывания роста в атмосфере азота приводят к коротковолновому сдвигу линии излучения и увеличению ВКЭ, но слабо изменяют морфологию слоя InGaN. Использование водорода при прерываниях вызывает образование островков и, помимо коротковолнового сдвига излучения и возрастания ВКЭ, приводит к уширению спектра излучения и, в случае светодиодных структур, к смещению максимума токовой зависимости ВКЭ в область меньших токов. Данные эффекты обусловлены локализацией носителей в островках и подавлением латерального транспорта носителей заряда к областям безызлучательной рекомбинации.

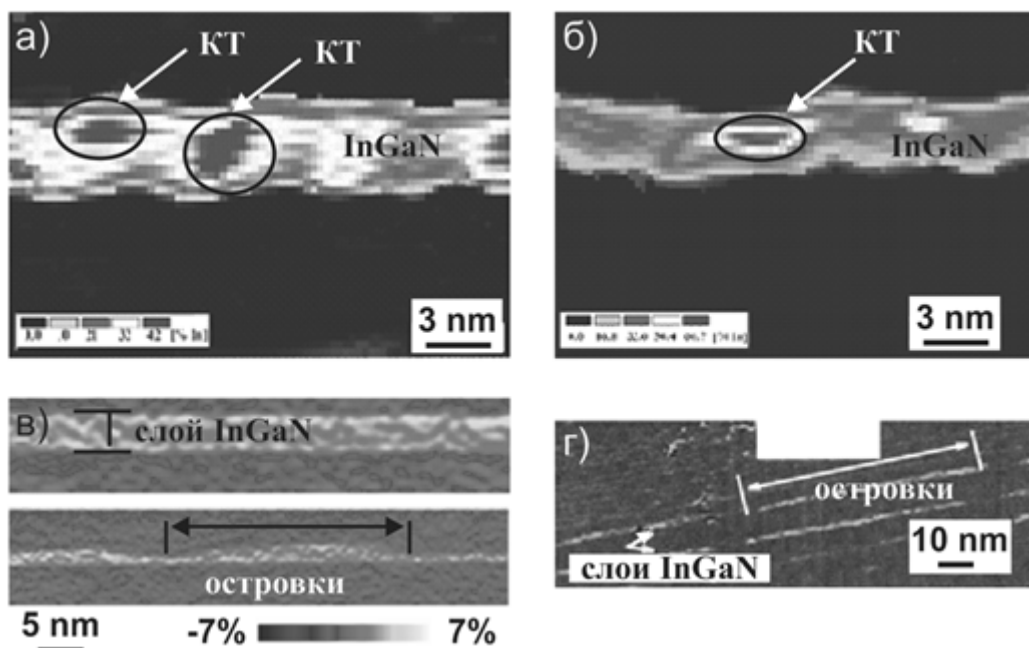


Рис. 1. Карты распределения локальной концентрации индия в слоях InGaN, выращенных а) в атмосфере азота и б) с добавкой водорода во время эпитаксиального процесса, полученные с использованием методики цифрового анализа (DALI) изображений ПЭМ [A5]. Изображения распределения локальных деформаций кристаллической решетки, полученные с помощью обработки изображений ПЭМ методом геометрических фаз, слоев InGaN, выращенных в) в атмосфере азота (рисунок в) сверху), с прерываниями роста в присутствии водорода (рисунок в) снизу) [A2] и г) активной области светодиодной гетероструктуры синего диапазона, содержащей три слоя InGaN, выращенных с применением прерываний роста в присутствии водорода [A9].

Для детального исследования влияния водорода на структурные свойства InGaN были проведены исследования прерываний роста с подачей водорода в атмосферу реактора во время роста толстых слоев InGaN [A5, A14]. Показано, что в широких пределах изменения времени прерывания от 10 до 160 секунд наблюдается конвертация слоя InGaN в GaN, причем глубина конвертации изменяется от 1 до 2 нм во всем

диапазоне времен прерываний, что обусловлено формированием на поверхности тонкого слоя GaN, блокирующего дальнейшую конвертацию. Проведенные исследования показывают, что формирование больших островков во время прерываний роста после осаждения тонких (2-3 нм) слоев InGaN обусловлено локальным травлением слоя InGaN. Локальность травления, по-видимому, вызвана неоднородным распределением атомов индия в слое, приводящем к увеличению глубины/скорости травления в областях с большей концентрацией индия. Подавление формирования КТ InGaN при подаче водорода непосредственно во время роста может быть объяснено малой энергией связи In-N по сравнению с Ga-N, приводящей к быстрому травлению In-обогащенных областей при росте слоя InGaN [6].

Изучение влияния прерываний роста на формирование слоев InGaN высокого состава в активной области светодиодных гетероструктур желто-зеленого диапазона 530-550 нм [A2, A5] показало, что прерывания роста в присутствии водорода в данном случае приводят к уменьшению толщины слоя InGaN и содержания в нем индия, но формирования протяженных островков размером десятки нанометров не наблюдается. Обнаружены сильный коротковолновый сдвиг положения максимума ЭЛ в синюю область спектра и сильное смещение максимума токовой зависимости ВКЭ в область меньших токов.

Были исследованы структурные и оптические свойства структур InGaN/GaN, выращенных методом субмонослойного осаждения [A3]. Данный метод впервые применялся для роста InGaN и при его использовании квантоворазмерный слой InGaN толщиной ~ 3 нм формировался с помощью нескольких циклов осаждения InGaN-GaN с эффективной толщиной материалов в каждом цикле менее одного монослоя. После осаждения InGaN в атмосфере азота в каждом цикле проводилось прерывание роста с подачей в атмосферу реактора водорода. Из анализа данных ПЭМ было установлено, что распределение атомов индия в слоях InGaN, выращенных в субмонослойном режиме, является неоднородным. Было показано, что применение субмонослойного режима позволяет управлять профилем индия при росте слоя InGaN и стимулировать формирование в нем In-обогащенных областей.

В четвертой главе приведены результаты исследования структурных, оптических и электрических свойств слоев InAlN и гетероструктур различного типа (распределенных брэгговских отражателей (РБО) и гетероструктур для НЕМТ транзисторов), содержащих слои InAlN. Из анализа свойств слоев InAlN было показано, что компромиссные между индий- и алюминий-содержащими нитридами условия эпитаксиального роста (температура роста в интервале от 820 до 880 °С, давление в реакторе 200 мбар, рост в

атмосфере азота и концентрация аммиака не выше 40 %), обеспечивают высокое качество слоев с содержанием индия в диапазоне от 7 до 17 % без фазовой сепарации. Данный анализ проведен для слоев InAlN, выращенных в реакторах установок ГФЭ МОС различного размера и типа.

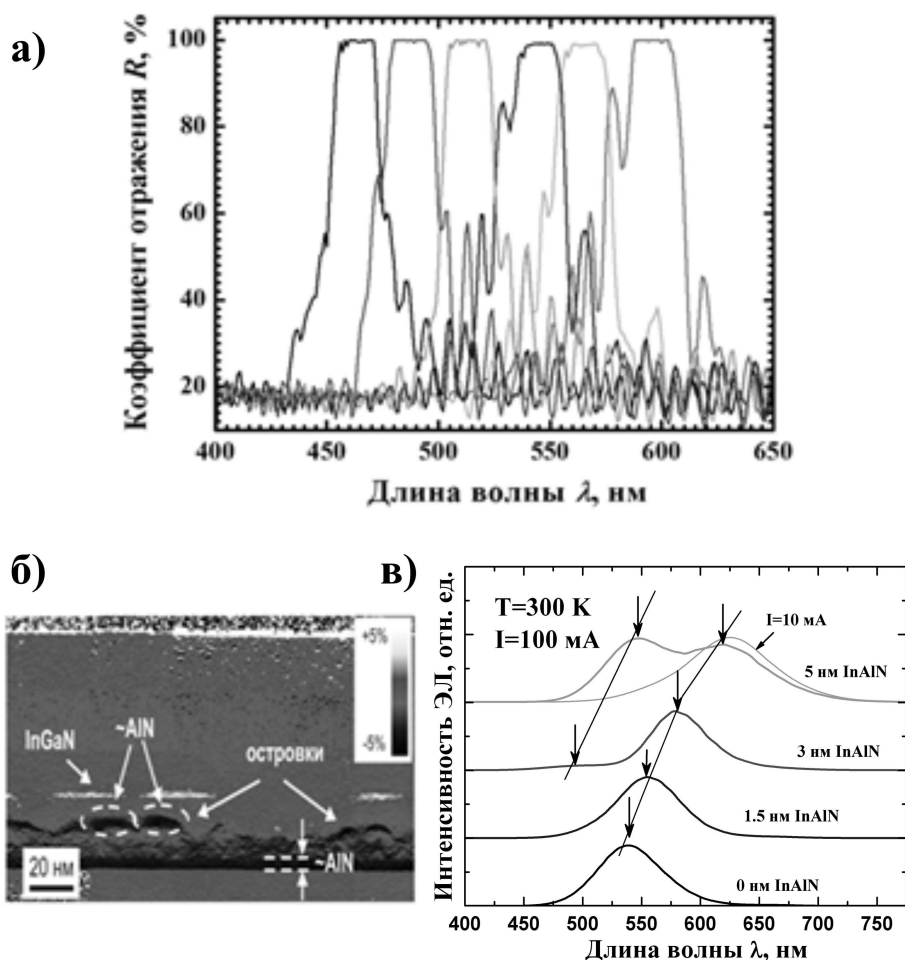


Рис. 2. а) Экспериментальные спектры отражения образцов, содержащих РБО с 57 периодами слоев InAlN/GaN [A7, A17]. б) Распределение деформации в вертикальном направлении относительно недеформированной решетки GaN, полученные с помощью метода анализа геометрических фаз изображений ПЭМ высокого разрешения в композитной гетероструктуре InAlN/GaN/InGaN [A4, A8]. в) Спектры ЭЛ светодиодных структур с активной областью на основе композитных гетероструктур InAlN/GaN/InGaN с различной толщиной слоя InAlN (цифры у спектров) при величине тока 100 мА [A4].

Исследованы оптические и структурные свойства распределенных брэгговских отражателей InAlN/GaN, выращенных при различных параметрах роста и имеющих различные толщины и период [A7, A17]. Проведенная по результатам исследований оптимизация условий роста, направленная на снижение количества дефектов, позволила впервые получить РБО InAlN/GaN с высоким структурным качеством, демонстрирующие экспериментальные значения коэффициента отражения более 99 % во всем видимом

диапазоне длин волн от 450 до 610 нм (Рис. 2а). Исследованы структурные и оптические свойства светодиодных гетероструктур синего диапазона, в которых InGaN/GaN активная область осаждалась на поверхность РБО. Показано увеличение ВКЭ излучения таких светодиодных структур по сравнению со светодиодными структурами без РБО.

Предложен способ стимулирования фазовой сепарации в тонком слое InGaN путем его осаждения на поверхность островков InAlN, сформированных в слое InAlN, выращенном в условиях фазового распада. Исследованы композитные InGaN/GaN/InAlN гетероструктуры, и показано формирование в них массива изолированных островков InGaN [A4, A8]. Изучена зависимость структурных свойств островков InAlN от толщины осаждаемого слоя InAlN и технологических условий его роста, включая прерывания роста InAlN в водороде. Показано, что при толщине слоя InAlN равной 2 нм формирование островков не происходит и наблюдается сплошной слой InGaN. При увеличении толщины слоя InAlN до 9 и 18 нм происходит формирование островков InAlN и трансформация слоя InGaN в массив изолированных островков с латеральными размерами ~ 30 нм, высотой 2-3 нм и средним содержанием In - 20-22 % (Рис. 2б). Проведено исследование структурных и оптических свойств светодиодных структур синего и зеленого диапазонов, содержащих в активной области композитные InGaN/GaN/InAlN гетероструктуры. Показано, что применение композитной InGaN/GaN/InAlN гетероструктуры позволило сдвинуть максимум длины волны излучения с ~540 нм до ~620 нм (Рис. 2в) и, таким образом, реализовать излучение в красной области спектра.

На основе полученных результатов по синтезу InAlN проведен анализ свойств гетероструктур InAlN/AlN/GaN для полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов [A13, A17]. Исследованы зависимости их свойств от условий эпитаксиального роста и определены оптимальные значения толщин и содержания индия в барьерном слое InAlN. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений характеристик транзисторных НЕМТ гетероструктур на основе AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN.

Пятая глава посвящена исследованию структурных и оптических свойств светодиодов с активной областью на основе короткопериодных сверхрешеток (КПСР) InGaN/GaN и квантоворазмерных слоев InGaN/GaN, излучающих в синем, желто-зеленом диапазонах длин волн и монолитных белых светодиодов, содержащих в активной области несколько квантоворазмерных слоев InGaN, излучающих в синем и желто-зеленом диапазонах, смешивание излучения которых дает белый свет. Используемые КПСР InGaN/GaN, были сформированы путем циклических прерываний при росте толстого слоя InGaN и конвертацией во время этих прерываний InGaN в GaN в водородсодержащей атмосфере реактора.

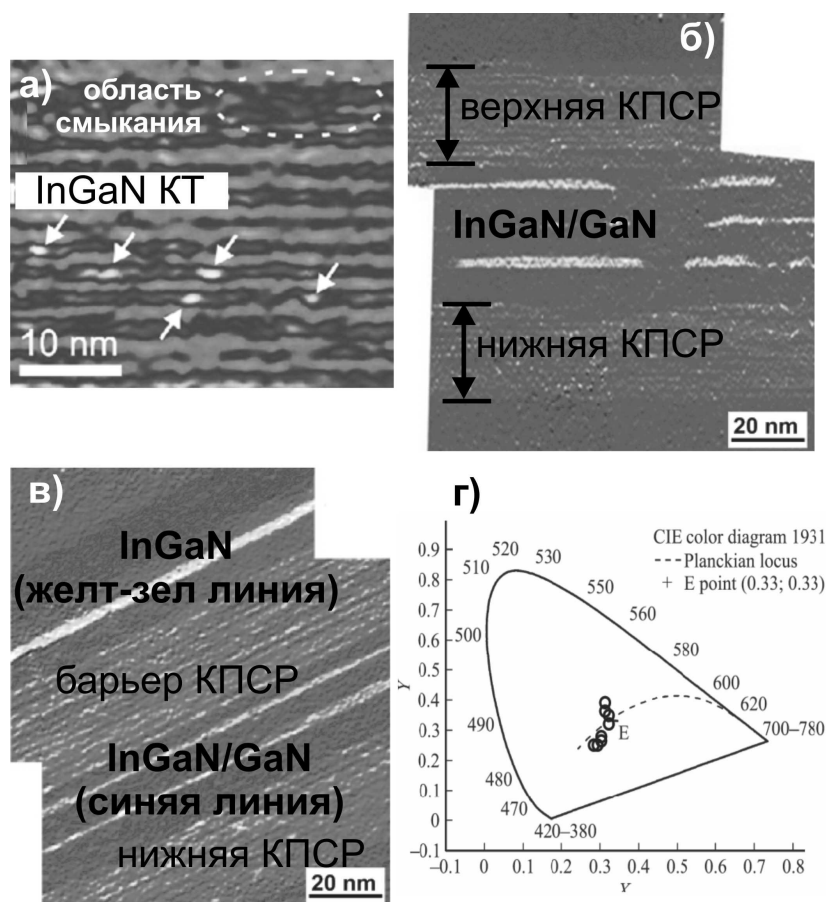


Рис. 3. Изображения а) области КПСР InGaN/GaN [A16] (темные слои – InGaN, светлые слои – GaN, стрелки – КТ InGaN, область смыкания слоев InGaN обозначена пунктиром), б) активной области синей [A16] и в) монолитной белой светодиодной гетероструктуры, полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения с использованием метода анализа геометрических фаз [A16]. г) Цветовая диаграмма МКО 1931 г. Точками отмечены координаты цветности при различных величинах тока для спектров электролюминесценции исследованных образцов. [A6].

Рентгеноструктурный анализ и анализ изображения ПЭМ высокого разрешения выращенных образцов показал возможность получения КПСР с числом периодов до 60 и толщинами отдельных слоев GaN и InGaN около 1 нм. Было установлено, что при таком способе формирования КПСР распределение индия в слоях InGaN неоднородно, наблюдается формирование локальных In-обогащенных областей размером ~2-4 нм и отдельных участков, в которых происходит смыкание соседних слоев InGaN (Рис. 3а) и образование областей с локально увеличенной толщиной InGaN. Это приводит к тому, что спектры ФЛ КПСР со средним содержанием индия составляющим ~10 % и толщинами слоев GaN и InGaN ~1 нм, измеренные в интервале температур от 8 до 300 К, демонстрируют два максимума с положениями пиков при 2.753 эВ и 2.95 эВ,

соответствующие излучению из разделенных слоев КПСР и областей в которых происходит смыкание соседних слоев InGaN, причем длинноволновая полоса становится доминирующей при комнатной температуре. Исследование КПСР с числом периодов от 6 до 60 показало, что интенсивность ФЛ из областей смыкания растет с увеличением числа периодов КПСР [A9, A10].

Как было показано в ранее опубликованных работах [7, 8], использование InGaN/GaN КПСР, осажденной под активными слоями InGaN/GaN (нижняя КПСР) в светодиодных структурах синего диапазона позволяет уменьшить образование дефектов в активных слоях InGaN, подавить латеральный транспорт носителей заряда и предотвратить утечку дырок в область проводимости n-типа, что в результате позволило увеличить ВКЭ излучения. В представленной работе было исследовано влияние барьера на основе КПСР InGaN/GaN между активными слоями InGaN, выращенными с прерываниями роста, и областью р-легирования (верхняя КПСР) на характеристики светодиодных структур синего диапазона (Рис. 3б). Было показано, что использование достаточно толстой (толщиной 24 нм) верхней КПСР InGaN/GaN приводит к увеличению эффективности излучения по сравнению с GaN барьером. Данный эффект объясняется улучшением инжекции дырок в активную область в случае использования КПСР и, следовательно, возможностью увеличить расстояние между активной областью и областью р-легирования, что уменьшает концентрацию атомов Mg, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации, в активной области [A9]. Использование варизонной КПСР, в которой содержание индия уменьшается по направлению от активного слоя InGaN к блокирующему слою р-AlGaN, позволяет еще примерно в 2 раза увеличить ВКЭ излучения.

Проведены исследования взаимосвязи структурных и оптических свойств светодиодных гетероструктур желто-зеленого диапазона, содержащих в активной области КПСР InGaN/GaN и высокосоставный квантоворазмерный слой InGaN толщиной 3-4 нм. Исследовано влияние КПСР с различным числом периодов на ВКЭ светодиодов и показано, что добавление нижней КПСР приводит к росту ВКЭ и уширению спектра ЭЛ. Было показано, что, в отличие от гетероструктур синего диапазона, добавление верхней КПСР над излучающим слоем InGaN высокого состава вызывает значительное падение ВКЭ, что обусловлено увеличением общего содержания индия и образованием дефектов. Данный вывод подтверждается значительным снижением ВКЭ излучения при увеличении числа активных слоев InGaN. На основании проведенных исследований оптических свойств была определена оптимальная конструкция активной области светодиодов желто-зеленого диапазона, содержащая нижнюю 3-х периодную КПСР и один

квантоворазмерный слой InGaN [A11, A15, A16]. Измерения параметров светодиодов, излучающих в диапазоне длин волн от 530 до 565 нм, выращенных на планарной подложке и собранных в флип-чип геометрии, показали, что полученные значения ВКЭ соответствовали лучшим мировым параметрам, а значения ВКЭ светодиодов, излучающих на длине волны 560 нм, на момент исследований превышали мировой уровень [A11].

На основе полученных результатов по созданию светодиодных гетероструктур, излучающих в синем (440-460 нм) и желто-зеленом (540-560 нм) диапазонах, были изучены свойства светодиодных гетероструктур с монокристаллической активной областью [A1, A6, A14], содержащих квантоворазмерные слои InGaN с различным содержанием индия, излучающие в диапазонах 440-460 нм и 540-560 нм и разделенные барьером на основе КПСР для обеспечения эффективного транспорта носителей заряда (Рис. 3в). Смешивание излучения в указанных диапазонах позволяет получить белый свет, а соотношение интенсивностей и ширины линий синего и желто-зеленого диапазонов определяют цветовые параметры излучения. На Рис. 3 в и г приведены изображения ПЭМ активной области исследованной монокристаллической светодиодной гетероструктуры и цветовые координаты излучения при различных величинах тока. В качестве барьера между слоями InGaN с различным содержанием индия использовалась 12-ти периодная КПСР InGaN/GaN. Изучение влияния толщины и типа барьера (КПСР или слой GaN) между активными слоями InGaN на оптические свойства показало, что максимальная ВКЭ излучения достигается в случае тонкого барьера GaN толщиной ~8 нм. Однако, в спектре такой гетероструктуры синяя полоса является доминирующей, что приводит к высокому значению коррелированной цветовой температуры (КЦТ) более 10000 К, соответствующей очень холодному, голубоватому свету. Увеличение толщины барьера GaN до 12 и 24 нм приводит, с одной стороны, к увеличению интенсивности желто-зеленой полосы, но, с другой стороны, к значительному падению ВКЭ. Замена GaN барьеров на КПСР InGaN/GaN с толщинами слоев ~1 нм и такой же общей толщиной (6 и 12 периодов, соответственно) реализует более оптимальный баланс интенсивностей синего и желто-зеленого излучения, обеспечивая КЦТ в диапазоне 5000-10000 К в зависимости от тока через структуру, и увеличивает ВКЭ излучения. Измерения параметров собранных монокристаллических дихромных белых светодиодов, изготовленных из выращенных на планарных подложках гетероструктур, показали, что в случае тонкого GaN барьера, ВКЭ излучения составляет ~10 %, светоотдача 15-20 лм/Вт, цветовая температура 9500-10000 К. На время проведения исследований достигнутые показатели являлись рекордными, превышающими мировой уровень для источников белого света данного типа [A1, A6, A10, A14, A16].

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Показано, что использование водорода во время роста InGaN методом ГФЭ МОС и прерываний роста после осаждения квантоворазмерных слоев InGaN позволяет получать как более однородные по содержанию индия слои, так и трансформировать сплошной слой InGaN в массив островков, что дает возможность управлять морфологией и составом слоев InGaN в активных областях светодиодных гетероструктур.
2. Показано, что субмонослойный режим эпитаксиального роста InGaN с использованием прерываний роста в водородсодержащей атмосфере реактора позволяет с помощью управления временной диаграммой подачи материалов формировать In-обогащенные области и изменять оптические свойства InGaN/GaN гетероструктур.
3. Исследованы свойства слоев InAlN, выращенных при различных условиях методом ГФЭ МОС, и показано, что однородные по распределению индия слои формируются при условиях роста компромиссных между InGaN и AlGaN: температура роста 820-880 °С, давление в реакторе 200 мбар, рост в атмосфере азота и концентрация аммиака не выше 40 %. Исследованы свойства РБО InAlN/GaN, выращенных при оптимальных условиях, и показана возможность реализации коэффициента отражения более 99 % в видимом диапазоне длин волн 460-610 нм, и получения светодиодов синего диапазона, содержащих легированный кремнием РБО под InGaN/GaN активной областью, демонстрирующих высокую ВКЭ излучения. На основе проведенной оптимизации роста InAlN получены InAlN/AlN/GaN НЕМТ транзисторы с током насыщения 1600 мА/мм и крутизной 200 мС/мм.
4. Показано, что применение композитной InGaN/GaN/InAlN гетероструктуры в активной области светодиодных структур позволяет реализовать излучение в красной области спектра с длиной волны излучения ~620 нм.
5. Показано, что использование в светодиодных гетероструктурах синего диапазона в качестве барьера между InGaN/GaN активной областью и областью р-легирования КПСР InGaN/GaN позволяет улучшить структурное качество активной области и повысить ВКЭ излучения.
6. Исследованы зависимости оптических свойств светодиодных гетероструктур желто-зеленого диапазона, содержащих в активной области квантоворазмерный слой InGaN высокого состава, осажденный на КПСР InGaN/GaN, от толщин слоев

и числа периодов КПСР и определены их оптимальные значения, позволяющие реализовать высокую ВКЭ излучения.

7. На основании исследований свойств светодиодных гетероструктур синего и желто-зеленого диапазона детально исследована конструкция белого монолитного светодиода, содержащего квантоворазмерные слои InGaN, излучающие в синей и желто-зеленой областях спектра, разделенные барьерами различного типа GaN или КПСР InGaN/GaN. Показано, что изменение толщины и типа барьера влияет на ВКЭ и цветовые параметры излучения, причем использование КПСР в качестве барьера позволяет повысить ВКЭ и получить излучение с координатами цветности, соответствующими области естественного (холодного) белого света с коррелированной цветовой температурой ~5000 К.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [A1] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Сеницын М.А., Черкашин Н.А., Карпов С.Ю. Исследование влияния дизайна активной области монокристаллических многоцветных светодиодных гетероструктур на спектры и эффективность их излучения // Физика и Техника Полупроводников. 2015. - Т. 49. №11. - С. 1563-1568.
- [A2] Tsatsulnikov A. F., Lundin W. V., Sakharov A. V., Nikolaev A. E., Zavarin E. E., Usov S. O., Yagovkina M. A., Hütch M. J., Korytov M., Cherkashin N. Formation of Three-Dimensional Islands in the Active Region of InGaN Based Light Emitting Diodes Using a Growth Interruption Approach // Science of Advanced Materials. 2015. - V.7. - P. 1629-1635.
- [A3] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Мусихин Ю.Г., Усов С.О., Мизеров М.Н., Черкашин Н.А. Гетероструктуры InGaN/GaN, выращенные методом субмонослойного осаждения // Физика и Техника Полупроводников. 2012. - Т. 46. №10. - С. 1357-1362.
- [A4] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Рожавская М.М., Усов С.О., Брунков П.Н., Сеницын М.А., Дадыдов Д.В., Мизеров М.Н., Черкашин Н.А. Композитные InGaN/GaN/InAlN-гетероструктуры, излучающие в желто-красной области спектра // Физика и Техника Полупроводников. 2012. - Т. 46. №10. - С. 1304-1308.
- [A5] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Сизов В.С., Усов С.О., Мусихин Ю.Г., Gerthsen D. Влияние водорода на локальную фазовую сепарацию в тонких слоях InGaN и свойства светодиодных структур на их основе // Физика и Техника Полупроводников. 2011. - Т. 45. №2. - С. 274-279.
- [A6] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Крыжановская Н.В., Сеницын М.А., Сизов В.С., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Монокристаллический белый светодиод с активной областью на основе квантовых ям InGaN, разделенных короткопериодными InGaN/GaN сверхрешетками // Физика и Техника Полупроводников. 2010. - Т. 44. №6. - С. 837-840.
- [A7] Усов С.О., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Николаев А.Е., Сеницын М.А., Трошков С.И., Леденцов Н.Н. Структурные и оптические

- свойства InAlN/GaN распределенных брегговских отражателей // Физика и Техника Полупроводников. 2010. - Т. 44. №7. - С. 981-985.
- [A8] Цацульников А.Ф., Заварин Е.Е., Крыжановская Н.В., Лундин В.В., Сахаров А.В., Усов С.О., Брунков П.Н., Гончаров В.В., Черкашин Н.А., Hutch M. Формирование композитных квантовых точек InGaN/GaN/InAlN // Физика и Техника Полупроводников. 2010. - Т. 44. №10. - С. 1382-1386.
- [A9] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Черкашин Н.А., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Мизеров М.Н., Hee Seok Park, Hutch M., Hue F. Варизонная активная область на основе короткопериодных InGaN/GaN сверхрешеток для мощных светоизлучающих диодов диапазона 440-470 нм // Физика и Техника Полупроводников. 2010. - Т. 44. №1. - С. 96-100.
- [A10] Крыжановская Н.В., Лундин В.В., Николаев А.Е., Цацульников А.Ф., Сахаров А.В., Павлов М.М., Черкашин Н.А., Вальковский Г.А., Яговкина М.А., Усов С.О. Исследования оптических и структурных свойств короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN для активной области светоизлучающих диодов // Физика и Техника Полупроводников. 2010. - Т. 44. №6. - С. 875-863.
- [A11] Лундин В.В., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Сизов В.С., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Цацульников А.Ф. Высокоэффективные InGaN/GaN/AlGaIn светодиоды с короткопериодной InGaN/GaN сверхрешеткой для диапазона 530-560 nm // Письма в Журнал Технической Физики. 2010. - Т. 36. №22. - С. 89-95.
- [A12] Usov S.O., Tsatsulnikov A.F., Lundin V.V., Sakharov A.V., Zavarin E.E., Sizov D.S., Musikhin Yu.G., Bert N.A., Arakcheeva E.M., Ledentsov N.N. Analysis of the local indium composition in an ultrathin InGaIn layers // Semicond. Sci. Technol. 2007. - V. 22. - P. 528-532.
- [A13] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Яговкина М.А., Устинов В.М., Черкашин Н.А. Эпитаксиальный рост гетероструктур GaN/AlN/InAlN для НЕМТ транзисторов в горизонтальных МОС-гидридных реакторах различных конструкций // Физика и Техника Полупроводников. 2016. - Т. 50. №9. - С. 1263-1269.

Труды конференций и тезисы докладов:

- [A14] Effect of stimulated phase separation on properties of blue, green and monolithic white LEDs / A. F. Tsatsulnikov, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, E. E. Zavarin, S. O. Usov, A.

- E. Nikolaev, V. S. Sizov, A. L. Zakgeim, M. N. Mizerov, N. A. Cherkashin, and M. Hytch // 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9) (Glasgow, UK, 10-15 July, 2011) // *Physica Status Solidi (c)*. 2012. - V. 9(3). - P. 774-777.
- [A15] Single quantum well deep-green LEDs with buried InGaN/GaN short-period superlattice / W.V. Lundin, A.E. Nikolaev, A.V. Sakharov, E.E. Zavarin, G.A. Valkovskiy, M.A. Yagovkina, S.O. Usov, N.V. Kryzhanovskaya, V.S. Sizov, P.N. Brunkov, A.L. Zakgeim, A.E. Cherniakov, N.A. Cherkashin, M.J. Hytch, E.V. Yakovlev, D.S. Bazarevskiy, M.M. Rozhavskaya, A.F. Tsatsulnikov // 15th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XV) (Incline Village, Nevada, USA, 23-28 May, 2010) // *Journal of Crystal Growth*. 2011. - V. 315(1). - P. 267-271.
- [A16] InGaN/GaN Short-Period Superlattices: Synthesis, Properties, Applications / A. F. Tsatsulnikov, W. V. Lundin, A. V. Sakharov, E. E. Zavarin, S. O. Usov, A. E. Nikolaev, N. V. Kryzhanovskaya, V.S. Sizov, A. E. Chernyakov, A. L. Zakgeim, N.A. Cherkashin, M. Hytch // *Proceedings of IWN2010* (Florida, USA, 19-24 September, 2010) // *Physica Status Solidi (c)*. 2011. - V. 8(7 - 8). - P. 2308-2310.
- [A17] Optoelectronic structures with InAlN layers grown by MOVPE / A. V. Sakharov, W. V. Lundin, E. E. Zavarin, M. A. Sinitsyn, S. O. Usov, A. E. Nikolaev, S. I. Troshkov, M. A. Yagovkina, D. V. Davydov, N. A. Cherkashin, M. Hytch J., F. Hue, P. N. Brunkov, A. F. Tsatsulnikov // *Proceedings of ICPS2010* (Seoul, Korea, 25-30 July, 2010) // *AIP Conf. Proc.* 2011. - V. 1399. - P. 107-108.

Список цитируемой литературы.

- [1] A.C. Sparavigna Light-Emitting Diodes in the Solid-State Lighting Systems // *International Journal of Sciences*. 2014. - V. 3(11). - P. 9-17.
- [2] C. Lecuyer T. Ueyama, The logics of materials Innovation The Case of Gallium Nitride and Blue Light Emitting Diodes // *Historical Studies in the Natural Sciences*. 2013. V. 43(3). P. 243-280.
- [3] Department of Energy [Электронный ресурс] // Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications [сайт]. [2012.] URL: <http://www.energy.gov/eere/ssl/downloads/energy-savings-forecast-solid-state-lighting-general-illumination-applications> (дата обращения 20.05.2016).

- [4] Мальцев П.П., Федоров Ю.В. Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России // «Интеграл»: Нанотехнологии и наноматериалы. 2013. - Т. 3. №71. - С. 25-29.
- [5] The High-Electron Mobility Transistor at 30: impressive accomplishments and exciting prospects / J. A. del Alamo // Proceedings of International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology (CS MANTECH) (Palm Springs, USA, 16-19 May, 2011) // Proceedings CS MANTECH. 2011. - P. 17-22.
- [6] A.F. Tsatsulnikov, W.V. Lundin Stimulated formation of InGaN quantum dots / Edited by Ameenah Al-Ahmadi // State-of-the-Art of Quantum Dot System Fabrications. Croatia. InTech, 2012. P. 141-160.
- [7] Сизов В.С., Цацульников А.Ф., Сахаров А.В., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Черкашин Н.А., Nuytch M.J., Николаев А.Е., Минтаиров А.М., Yan He, Merz J.L. Использование короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN в светодиодах синего диапазона // Физика и Техника Полупроводников. 2010. - Т. 44. №7. - С. 955-961.
- [8] Сизов В.С. Особенности формирования InGaN/(In,Al)GaN активной области для светоизлучающих приборов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10 / Сизов Виктор Сергеевич. – СПб., 2010. – 23 с.