

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Усова Сергея Олеговича «Гетероструктуры для светодиодов видимого диапазона и транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе квантоворазмерных слоев InGaN, InAlN и короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 («Физика полупроводников»)

### Актуальность темы диссертации

Полупроводниковые приборы на основе полупроводников III-N имеют широкую область применений для твердотельной оптоэлектроники и СВЧ электроники а, в перспективе, для создания фотогальванических элементов и приборов терагерцового диапазона. Твердые растворы InGaN являются прямозонными полупроводниками, энергия ширины запрещенной зоны которых в зависимости от содержания индия изменяется в интервале от 0,69 до 3,4 эВ, что соответствует излучению в диапазоне длин волн от 365 до 1800 нм. Гетероструктуры InGaN/GaN, широко используются для создания активных областей высокоэффективных и надежных светоизлучающих диодов ультрафиолетового, синего и зеленого диапазонов, которые позволили реализовать белые светодиоды с люминофорными покрытиями. Использование многокристалльных светодиодов, состоящих из нескольких светодиодов с люминофорами, обеспечивающими излучение в синем, зеленом, желтом и красном диапазонах, позволяет достичь высокого качества белого света с возможностью динамической регулировки параметров. Однако недостатком таких светодиодов с использованием люминофоров являются стоксовы потери при преобразовании света люминофорными покрытиями. Преодоление недостатков люминофорных светодиодов возможно за счет разработки технологии эпитаксиального роста гетероструктур, излучающих во всем видимом диапазоне длин волн. Это даст возможность, как исключить люминофорные покрытия, увеличив эффективность излучения, так и создать новый класс белых светодиодов – приборов с монокристаллической активной областью, содержащей несколько слоев InGaN, излучающих в различных спектральных диапазонах. Однако для получения светодиодов с длиной волны более ~530 нм, требуется осаждение слоев InGaN с высоким содержанием индия, что в полярных InGaN/GaN гетероструктурах, выращенных на подложках сапфира, сопровождается сильным падением эффективности излучения. Использование неполярных и полуполярных подложек GaN затруднено в силу высокой стоимости подложек и относительно малого размера. Кроме того, эпитаксиальный рост InGaN с высоким содержанием индия на таких подложках имеет свои технологические проблемы. Таким образом, поиск альтернативных путей решения проблемы реализации длинноволнового излучения в InGaN/GaN гетероструктурах, выращенных на традиционных подложках сапфира ориентации [0001], является актуальным направлением исследований.

Схожие проблемы наблюдаются при создании транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия. Гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN и InAlN/AlN/GaN, на основе которых в настоящее время изготавливают СВЧ транзисторы, требуют эпитаксиального роста слоев AlGaN с содержанием Al до 30-35% и InAlN с содержанием In в районе 25-30%. Различие в постоянных решетки AlN, InN и GaN приводит к сильным

механическим напряжениям в таких гетероструктурах, которые приводят к ухудшению их структурных и электрических свойств. Таким образом, требуется проведение исследования свойств таких гетероструктур и сопоставление полученных данных с условиями их синтеза, что может позволить преодолеть как технологические трудности, так и создать оптимальную конструкцию транзисторных гетероструктур.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что выбранная тема и направление исследований в диссертации С.О. Усова, являются актуальными, так как нацелены на решение перечисленных проблем за счет поиска новых подходов к созданию активных областей для повышения внешней квантовой эффективности излучения светодиодов видимого диапазона на основе InGaN/GaN и источников белого света на их основе, и улучшения характеристик транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе полупроводников III-N.

### **Структура диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, а также приведены положения, выносимые на защиту.

**Цель работы** заключалась в поиске новых способов управления фазовым распадом и процессом образования флуктуаций состава по индию, определяющих морфологию слоев InGaN и InAlN для создания активных областей светодиодов и транзисторов и улучшения их характеристик из всестороннего анализа структурных, оптических и электрических свойств гетероструктур на основе системы материалов InAlGaN с учетом технологических условий их роста методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений.

**В первой главе** дан литературный обзор, в котором рассмотрены основные режимы и методы эпитаксиального роста и наиболее важные области применения гетероструктур на основе InAlGaN: светоизлучающие диоды, распределенные брэгговские отражатели, НЕМТ транзисторы. Приведены физические свойства бинарных соединений GaN, InN и AlN и особенности фазового распада, происходящего в твердых растворах на их основе. Проанализированы основные причины, приводящие к снижению внешней квантовой эффективности светодиодов видимого диапазона. Приведены основные типы источников белого света на основе светодиодов и указаны преимущества использования светодиодов с монолитной активной областью на основе InGaN/GaN по сравнению со светодиодами с люминофорными покрытиями и многокристалльными (RGB) белыми светодиодами.

**Во второй главе** диссертации описаны методы получения образцов и методики измерения структурных, оптических и электрических свойств. Приведены блок-схемы и диапазоны параметров роста для трех использовавшихся установок: ГФЭ МОС с горизонтальными реакторами различного размера Epiquep VP-50 RP и Dragon-125 и полупромышленной установки AIX2000 HT с планетарным реактором. Перечислены методы и оборудование, которые использовались в работе для исследования структурных, оптических и электрических свойств гетероструктур на основе InAlGaN для светоизлучающих диодов и транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Главы с 3 по 5 являются оригинальными частями работы, в которых приведены полученные результаты исследований структурных, оптических и электрических свойств гетероструктур на основе системы материалов InAlGaN для светоизлучающих диодов и транзисторов с высокой подвижностью электронов.

**В третьей главе** диссертации представлены результаты исследований влияния водорода в реакторе установки ГФЭ МОС и режимов эпитаксиального роста на морфологию и

распределение содержания индия в слоях InGaN и образование островков из сплошного слоя InGaN. Исследование выращенных в азоте тонких слоев InGaN, содержащих In-обогащенные области (островки), показало, что прерывания роста после осаждения слоев в атмосфере, содержащей водород, приводит к конвертации слоя InGaN в GaN и к уменьшению размеров островков. Рост же InGaN слоев в водород-содержащей атмосфере приводит к росту однородного по содержанию индия слоя за счет подавления формирования In-обогащенных областей. Проведено исследование влияния прерываний роста после осаждения слоев InGaN на оптические свойства и эффективность излучения гетероструктур InGaN/GaN и светодиодов, излучающих в синем (430 - 500 нм) и желто-зеленом (530-550 нм) диапазонах длин волн. Показано, что прерывания роста в атмосфере азота в структурах синего диапазона слабо влияют на морфологию слоев InGaN, а прерывания в азот-водородной атмосфере приводят к образованию островков InGaN за счет локального травления сплошного слоя InGaN. Это вызывает коротковолновый сдвиг максимума излучения и увеличение эффективности излучения светодиодов, обусловленные локализацией носителей заряда в островках. Прерывания роста в гетероструктурах желто-зеленого диапазона не приводят к формированию островков InGaN, наблюдается только уменьшение содержания In и толщины слоя InGaN, сопровождаемые смещением пика излучения в сторону коротких длин волн. Получены гетероструктуры InGaN/GaN, выращенные в режиме субмонослойного роста методом ГФЭ МОС, аналогичном режиму, который ранее был успешно использован для получения квантовых точек InGaAs в гетероструктурах InGaAs/GaAs. Исследована зависимость структурных и оптических свойств субмонослойных гетероструктур InGaN/GaN/AlGaN, излучающих в синей области спектра, в зависимости от количества, эффективной толщины выращенных слоев и условий их роста.

**В четвертой** главе приведены результаты исследований гетероструктур на основе слоев InAlN. Из анализа структурных свойств толстых слоев InAlN, выращенных на установках ГФЭ МОС различного типа, были определены оптимальные условия эпитаксии, обеспечивающие подавление фазовой сепарации. Данные условия являются компромиссными между условиями роста InGaN и AlGaN и включают рост в атмосфере азота и концентрации аммиака не выше 40 %, температуру роста в интервале 820 - 880 °С и давление в реакторе ~200 мбар. Проведены исследования структурных свойств и спектров отражения распределенных брэгговских отражателей InAlN/GaN, которые после оптимизации условий их получения, толщин и составов слоев, показали значения коэффициента отражения более 99 % в интервале длин волн от 450 до 610 нм. Продемонстрированы светоизлучающие диоды, содержащие в активной области гетероструктуры InAlN/GaN/InGaN, излучающие в красной области спектра. Реализация однородных по составу слоев InAlN с содержанием индия около 17 % позволила получить InAlN/AlN/GaN гетероструктуры для НЕМТ транзисторов. На основе InAlN/AlN/GaN гетероструктур, показавших наиболее высокую подвижность и концентрацию носителей заряда в канале, получены тестовые структуры НЕМТ транзисторов, значения крутизны и тока насыщения которых превышают значения для AlGaN/AlN/GaN гетероструктур, что согласуется с более чем двукратным увеличением плотности электронов в канале в соответствии с результатами, полученными из моделирования.

**В пятой** главе приведены результаты исследования структурных и оптических свойств гетероструктур InGaN/GaN для светодиодов синего и желто-зеленого диапазонов, а также светодиодов с монокристаллической активной областью. Установлено, что использование в активной области светодиода варизонной короткопериодной сверхрешетки InGaN/GaN с переменным составом и толщиной 24 нм между активными слоями и блокирующим слоем р-AlGaN

позволяет повысить эффективность излучения в синем диапазоне (440 – 460 нм). Использование в активной области светодиодной гетероструктуры желто-зеленого диапазона трехпериодной InGaN/GaN сверхрешетки толщиной 24 нм под активным слоем InGaN с высоким содержанием индия обеспечивает высокую эффективность излучения в диапазоне длин волн 530 - 565 нм. Показано, что использование в активной области монолитного светодиода в качестве барьера между слоями InGaN с различным содержанием индия тонкого барьера GaN (8 нм) позволяет достичь максимальной эффективности излучения белого света с коррелированной цветовой температурой (КЦТ) более 10000 К. А при использовании в качестве данного барьера сверхрешетки InGaN/GaN позволяет обеспечить эффективный транспорт носителей заряда между активными слоями и реализовать белое излучение с КЦТ в диапазоне 5000-10000 К в зависимости от тока, протекающего через светодиодную структуру.

На основе проведенных исследований получен ряд, обладающих **научной новизной и практической ценностью** результатов.

1. Продемонстрировано управление морфологией слоев InGaN в процессе эпитаксиального роста, которое позволяет получать либо однородные по содержанию индия слои InGaN при их росте в азот-водородной атмосфере методом ГФЭ МОС или формировать массивы островков при росте InGaN в атмосфере азота и последующем прерывании роста в азот-водородной атмосфере.
2. Получены методом субмонослойного осаждения In-обогащенные области в гетероструктурах InGaN/GaN/AlGaIn, излучающие в синем диапазоне.
3. Определен компромиссный диапазон условий эпитаксиального роста между InGaN и AlGaIn, который позволил получить однородные по содержанию индия слои InAlN: температура роста 820-880 °С, давление в реакторе 200 мбар, рост в атмосфере азота и концентрация аммиака не выше 40 %.
4. Получены распределенные брэгговские отражатели InAlN/GaN с большим числом периодов с коэффициентом отражения более 99 % в диапазоне длин волн от 460 до 610 нм, содержащие слои InAlN с содержанием индия около 18%, выращенные при оптимизированных условиях.
5. Использование однородных по индию слоев InAlN в качестве барьеров в гетероструктурах InAlN/AlN/GaN позволило создать транзисторы с высокой подвижностью электронов с током насыщения 1600 мА/мм и крутизной 200 мС/мм.
6. Показано, что использование композитной InGaN/GaN/InAlN гетероструктуры, содержащей слой InGaN, осажденный на слой InAlN, выращенный в условиях фазовой сепарации, в активной области светодиодных гетероструктур, позволяет за счет образования InGaN островков с высоким содержанием индия реализовать излучение в красной области спектра с длиной волны излучения ~620 нм.
7. Установлено, что использование InGaN/GaN короткопериодной сверхрешетки между излучающим квантоворазмерным слоем InGaN и областью легирования р-типа увеличивает эффективность излучения в синем диапазоне длин волн.
8. Увеличение эффективности излучения светодиодов, излучающих в желто-зеленом диапазоне длин волн, было реализовано при использовании в активной области слоя InGaN с высоким содержанием индия, осажденного на 3-х периодную InGaN/GaN КПСР толщиной 24 нм.

9. Проведено детальное изучение конструкция активной области монолитного белого светодиода и зависимости цветовых характеристик от толщины и типа барьера (или слой GaN или InGaN/GaN серхрешетка), разделяющего квантоворазмерные слои InGaN, излучающие в синей (430 - 450 нм) и желто-зеленой (560 - 570 нм) областях спектра. Получены дихромные монолитные белые светодиоды с коррелированной цветовой температурой ~5000 К с координатами цветности, находящимися в области (холодного) белого света.

### **Новизна и практическая значимость результатов, полученных в диссертационной работе**

Предложен способ управления морфологией слоев InGaN в активной области, определяющей длину волны и эффективность излучения светодиодов на основе InGaN/GaN, который позволяет получать либо однородные по составу слои InGaN при подаче водорода при росте, либо трансформировать сплошной слой InGaN в массив островков при прерываниях роста после осаждения методом ГФЭ МОС. Впервые для InGaN/GaN гетероструктур исследован метод субмонослойного роста и получены обогащенные индием области в гетероструктурах InGaN/GaN/AlGaN синего диапазона. Определены условия эпитаксиального роста методом ГФЭ МОС, позволяющие получить слои InAlN высокого качества за счет подавления фазовой сепарации. Получены распределенные брэгговские отражатели с коэффициентом отражения более 99 % в диапазоне длин волн от 460 до 610 нм. Достигнута эффективность излучения в диапазоне длин волн от 530 до 560 нм, превышающая современный уровень за счет использования в активной области светодиода желто-зеленого диапазона КПСР InGaN/GaN и низкотемпературного слоя GaN под активным слоем InGaN. Показано, что применение сверхрешеток InGaN/GaN и барьеров GaN различной толщины позволяет контролировать цветовые характеристики излучения за счет изменения транспорта носителей заряда между слоями InGaN с различным содержанием индия в активной области монолитного светодиода.

**Достоверность результатов, научных положений и выводов** хорошо обоснована и подтверждается подробным анализом литературных источников по теме диссертационной работы, большим объемом проведенной экспериментальной работы и воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, хорошим согласием экспериментальных данных с результатами моделирования, использованием большого количества стандартных методик измерений структурных, оптических и электрических свойств образцов гетероструктур на основе InAlGaN, реализацией светодиодов желто-зеленого диапазона с эффективностью превышающей современный уровень, дихромных белых монолитных светодиодов с коррелированной цветовой температурой излучения в интервале от 5000 до 10000 К и транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе InAlN/AlN/GaN, широкой апробацией работы на отечественных и международных конференциях и публикацией результатов в рецензируемых журналах.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Диссертация не лишена ряда ошибок и опечаток, которые, тем не менее, не искажают общий смысл работы или относятся к оформлению диссертации.

2. Несмотря на обширный экспериментальный материал, хотелось бы услышать мнение автора относительно случаев, в которых формирование обогащенных индием островков в квантовых ямах InGaN целесообразно с практической точки зрения, а когда данный эффект требует подавления.
3. При рассмотрении гетероструктур InAlN/AlN/GaN для транзисторов с высокой подвижностью электронов не совсем очевидна целесообразность нанесения защитных пассивирующих слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , поскольку значения удельной проводимости и концентрации носителей для структур, выращенных без и с пассивирующим слоем, близки.
4. При изучении влияния условий эпитаксиального роста методом ГФЭ МОС на морфологию и распределение содержания индия в слоях InAlN были определены условия, позволяющие подавить фазовую сепарацию. Следовало бы более подробно указать, какими экспериментальными данными подтвержден фазовый распад в слоях InAlN.
5. В ряде случаев, сравнение приборных характеристик образцов дано в относительных единицах, что затрудняет оценку практической ценности предлагаемых подходов.

Сделанные замечания не ставят под сомнение основные результаты и выводы диссертационной работы и не снижают общую положительную оценку работы в целом.

#### **Оценка диссертации в целом.**

Оценивая работу в целом можно сказать, что диссертация С.О. Усова «Гетероструктуры для светодиодов видимого диапазона и транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе квантоворазмерных слоев InGaN, InAlN и короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN» является научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном и методическом уровне, содержит новые важные научные результаты, ряд из которых был получен впервые, в актуальном направлении физики полупроводников, представляющем ценность для разработки и получения гетероструктур на основе системы материалов InAlGaN для высокоэффективных светодиодов видимого диапазона, источников белого света на их основе и транзисторов с высокой подвижностью электронов. Представленные к защите положения являются обобщением экспериментальных результатов, полученных автором в ходе выполнения исследований, обладают научной новизной и практической значимостью и в полной мере представлены в работах. Основные результаты диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях, посвященных физике и технологии полупроводников. По теме работы опубликовано 13 научных статей в ведущих рецензируемых отечественных и международных журналах и 4 в трудах конференций. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно и правильно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

#### **Заключение**

Тема и содержание настоящей диссертации соответствуют специальности 01.04.10 «Физика полупроводников». По актуальности, новизне и практической значимости результатов работа соответствует критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным Постановлением Правительства «О порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 года №842.

Автор диссертации, Усов Сергей Олегович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - «физика полупроводников».

Официальный оппонент,  
начальник НТЦ  
АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»,  
доктор технических наук

Мармалюк Александр Анатольевич

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс»  
им. М.Ф. Стельмаха»  
117342, Москва, ул. Введенского, 3, стр. 1.  
тел.: (495) 333-92-45,  
e-mail: almarm@mail.ru

Подпись официального оппонента Мармалюка Александра Анатольевича заверяю:

Заместитель генерального директора  
по экономике и финансам  
АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Михневич Алексей Викторович

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.