

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
аналитического приборостроения
Российской академии наук
(ИАП РАН)

Проф. В.Е.Курочкин

«_12_» _____ июля 2016г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертационной работе 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», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Актуальность темы диссертации

В настоящее время многие достижения современной электроники и оптоэлектроники связаны с развитием полупроводниковых гетероструктур в системе материалов InAlGaN. Уникальные свойства данной системы материалов, такие как высокие теплопроводность и термическая стабильность, превосходят подобные параметры традиционных полупроводниковых материалов: кремния, соединений на основе GaAs и InP. Гетероструктуры InAlGaN лежат в основе изготовления светодиодов УФ, синего и зеленого диапазонов. Использование синих светодиодов с люминофорным покрытием позволило создать белые светодиоды с эффективностью, значительно превышающей эффективность ламп накаливания и люминесцентных ламп. Новое перспективное поколение источников белого света на основе смешивания излучения нескольких светодиодов различного цвета (RGB источники) позволило создавать системы с интеллектуальным управлением цветовыми параметрами (smart light). Кроме оптоэлектроники все больше применений находят транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе гетероструктур InAlGaN. Большие величины ширины запрещенной зоны позволяют достичь высоких напряжений пробоя и больших рабочих напряжений. Возможность создания транзисторов с высокой мощностью в данной системе

материалов обусловлена большими разрывами зон проводимости на гетерограницах AlGa_N/Ga_N и InAlN/GaN, высокими значениями насыщенной скорости электронов и концентрации электронов в двумерном канале.

Однако, несмотря на значительный прогресс в развитии физики и технологии полупроводниковых приборов на основе InAlGa_N их возможности реализованы далеко не полностью, а некоторые важные физические аспекты работы таких приборов все еще остаются невыясненными. Например, до сих пор не созданы эффективные светодиоды на основе InAlGa_N, излучающие в желто-зеленом и красном диапазонах, несмотря на то, что по величине энергии ширины запрещенной зоны соединение InGa_N способно перерыть весь видимый и частично ИК диапазон. Большинство проблем приборов на основе InAlGa_N связано с тем, что все слои гетероструктур являются несогласованными между собой по параметру решетки, а рост гетероструктур, в силу высокой стоимости подложек Ga_N, чаще всего производится на инородных подложках сапфира или SiC. Данное обстоятельство приводит к возникновению значительных механических напряжений в слоях гетероструктур, особенно в InGa_N с высоким содержанием индия, что вызывает формирование дефектов и снижает эффективность излучения. Аналогичные проблемы наблюдаются и для AlGa_N/Ga_N, и InAlN/GaN гетероструктур для НЕМТ транзисторов.

В связи с этим диссертационная работа С.О. Усова, посвященная исследованию новых подходов к созданию активных областей приборных гетероструктур (светодиодов и НЕМТ транзисторов) на основе InAlGa_N, основанных на управлении упругими напряжениями и эффектом фазовой сепарации, является актуальной и соответствует основным тенденциям развития физики полупроводниковых гетероструктур. Работа сконцентрирована на изучении структурных, оптических и электрических свойств различных типов гетероструктур, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), который в настоящее время является промышленным методом изготовления гетероструктур InAlGa_N.

В работе изучены оптические и структурные свойства квантоворазмерных слоев InGa_N, имеющих островковую структуру, которые были сформированы в условиях присутствия водорода при росте InGa_N в реакторе установки ГФЭ МОС. Исследованы свойства короткопериодных сверхрешеток InGa_N/Ga_N, сформированных методом конвертации InGa_N в Ga_N в атмосфере реактора, содержащей водород. На основе полученных результатов по росту квантоворазмерных слоев InGa_N и короткопериодных сверхрешеток InGa_N/Ga_N изучены новые типы гетероструктур для светодиодов синего и желто-зеленого диапазонов, а также монолитных светодиодов с высокой эффективностью излучения. Исследованы свойства гетероструктур InGa_N/Ga_N, выращенных в режиме субмонослойного осаждения, в котором

слой InGaN формируется с помощью нескольких циклов осаждения InGaN-GaN с эффективной толщиной осаждения в каждом цикле менее одного монослоя. Исследованы свойства эпитаксиальных слоев InAlN, выращенных использованием горизонтальных реакторов различного размера и планетарного реактора, с целью определения оптимальных условий роста, позволяющих подавить фазовую сепарацию, и получить слои InAlN с высоким кристаллическим качеством. На основе полученных результатов были впервые созданы распределенные брэгговские отражатели InAlN/GaN с коэффициентом отражения более 99% во всем видимом диапазоне длин волн, а также оптимизированы условия роста гетероструктур GaN/AlN/InAlN для HEMT транзисторов, что позволило реализовать большой ток насыщения.

Основные научные результаты, их новизна и практическая значимость

Диссертационная работа содержит важные в научном и практическом отношении результаты для определения свойств гетероструктур на основе системы материалов InAlGa₂N, развития технологии их эпитаксиального роста, получения светоизлучающих диодов на основе InGa₂N/GaN и транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур InAlN/AlN/GaN.

Среди наиболее важных результатов, имеющих научную новизну, можно указать следующие:

1. Показано, что изменением атмосферы в реакторе (азот или азот-водородная смесь) непосредственно во время эпитаксиального роста InGa₂N можно управлять структурными свойствами квантоворазмерных слоев InGa₂N, обеспечивая их сплошной (как в случае квантовой ямы) или островковый рост. Данный подход позволяет также создавать короткопериодные сверхрешетки InGa₂N/GaN с толщинами слоев около 1 нм. Было показано, что использование полученных квантоворазмерных слоев InGa₂N, содержащих островки размером несколько десятков нанометров, и короткопериодных сверхрешеток InGa₂N/GaN в активной области светодиодных гетероструктур позволяет реализовать высокую эффективность излучения в синем и желто-зеленом диапазонах (540-560 нм), а также создать дихромные безлюминофорные белые светодиоды.
2. Использование субмонослойного режима эпитаксиального роста InGa₂N позволяет так же, как и в случае изменения атмосферы в реакторе, *in-situ* управлять структурными свойствами InGa₂N/GaN активной области светодиодных гетероструктур, обеспечивая повышение эффективности излучения.
3. Найденные компромиссные между InGa₂N и AlGa₂N условия эпитаксиального роста слоев InAlN и их зависимость от типов эпитаксиальных реакторов позволяют создавать различные новые типы гетероструктур, что было продемонстрировано с помощью создания

распределенных брэгговских отражателей InAlN/GaN, имеющих коэффициент отражения более 99 % в видимом диапазоне длин волн 460 - 610 нм, разработки InAlN/AlN/GaN НЕМТ транзисторов с током насыщения 1600 мА/мм и крутизной 200 мС/мм, и создания композитных InGaN/GaN/InAlN гетероструктур с длиной волны излучения до 620 нм.

4. Подробно изучена конструкция монолитного белого светодиода, содержащего квантоворазмерные слои InGaN, излучающие в синей и желто-зеленой областях спектра, разделенные барьерами различного типа: слоем GaN или короткопериодной сверхрешеткой InGaN/GaN. Показано, что изменение толщины и типа барьера влияет на эффективность и цветовые параметры излучения.

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

Обоснованность научных положений и выводов подтверждается тщательной проработкой методики эксперимента и подтверждается достаточной воспроизводимостью и согласием полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами и данными, имеющимися в литературе. Достоверность и надежность результатов подтверждается многочисленными экспериментальными результатами, полученными в данной работе. Результаты работы опубликованы в авторитетных реферируемых журналах и докладывались на различных международных и всероссийских конференциях.

Практическое значение имеют предложенный и реализованный способ управления морфологией квантоворазмерных слоев InGaN с помощью изменения газовой атмосферы в реакторе, позволяющий получать, как более однородные по составу слои InGaN, так и трансформировать сплошной слой InGaN в массив островков, что позволяет изменять длину волны и эффективность излучения светодиодов синего и зеленого диапазонов. Выявленные

оптимальные условия эпитаксиального роста методом ГФЭ МОС высококачественных слоев InAlN позволяют получать РБО InAlN/GaN, с коэффициентом отражения более 99 % в интервале длин волн от 460 до 610 нм и транзисторы с высокой подвижностью электронов на основе гетероструктур GaN/AlN/InAlN, обладающие высокими значениями тока насыщения и крутизны. Важное практическое значение имеет предложенная конструкция светодиодной активной области на основе квантоворазмерного слоя InGaN с высоким содержанием индия, осажденного на короткопериодную сверхрешетку InGaN/GaN и последующий слой GaN, выращенный при пониженной температуре роста, которая позволяет реализовать излучение в желто-зеленом диапазоне длин волн 530-560 нм с внешней квантовой эффективностью, превышающей современный уровень. Результаты по исследованию оптических свойств монокристаллических светодиодов в зависимости от конструкции активной области позволяют разработать методы контроля цветовых характеристик излучения.

Таким образом, результаты, полученные в диссертационной работе Усова С.О., можно рекомендовать к использованию в учреждениях Российской Академии Наук и на предприятиях электронной промышленности, занимающихся разработкой и производством светоизлучающих диодов и транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе III-нитридов.

По материалам диссертации имеются следующие замечания.

1. В работе не отражено, как предложенные методы управления фазовым распадом в слоях InGaN для получения обогащенных индием областей влияют на плотность дислокаций в активной области светодиодных гетероструктур InGaN/GaN.
2. В чем преимущество использования монокристаллической активной области для получения белого света по сравнению с источниками белого света на основе преобразования излучения синего лазера с помощью люминофорных покрытий?
3. В чем практическая целесообразность применения полупроводниковых распределенных брэгговских отражателей в конструкции синих светодиодов по сравнению с использованием металлических отражателей?

Указанные замечания не являются принципиальными, не затрагивают основные результаты и не снижают высокую оценку диссертации.

Диссертационная работа С.О. Усова является актуальным, законченным, выполненным на высоком научно-методическом уровне исследованием. Достоверность, научная новизна и практическая значимость результатов не вызывают сомнений. Основные результаты своевременно опубликованы в ведущих международных и отечественных журналах и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях. В опубликованных статьях автора и автореферате в полной мере отражено содержание диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к оформлению диссертаций. По

актуальности темы, новизне и степени обоснованности результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их научной и практической значимости диссертационная работа 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» полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Усов Сергей Олегович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Доклад по материалам диссертации 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» был заслушан, отзыв обсужден и утвержден на научном семинаре лаборатории 211 Приборов и методов эпитаксиальных нанотехнологий ИАП РАН, протокол № 1 от 11 июля 2016 года.

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией Приборов и методов эпитаксиальных нанотехнологий
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук

Д.ф.-м.н.

Цырлин Георгий Эрнстович

Адрес: Рижский пр., 26., Санкт-Петербург, 190103

Телефон: (812)9056907

E-mail: george.cirlin@mail.ru

Подпись заверяю

Начальник отдела кадров

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук

Шванова Елена Юрьевна

Адрес: Рижский пр., 26., Санкт-Петербург, 190103

Телефон: (812)3630736

E-mail: elenashvanova@yandex.ru