

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Европейцева Евгения Андреевича на тему:

«Кинетика экситонной фотолюминесценции в квантовых ямах в системе (Al,Ga,In)N», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников»

Рецензируемая диссертация посвящена исследованию оптических свойств эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на основе соединений нитрида галлия (AlInGaN), излучающих в ультрафиолетовой (УФ) и видимой областях спектра. Это направление исследований пользуется широким интересом уже более 20 лет из-за возможности изготовления на основе AlInGaN гетероструктур приборов видимой и УФ оптоэлектроники, а также СВЧ и силовой электроники.

Основная часть исследований, представленных в диссертации, направлена на экспериментальное изучение экситонных эффектов в КЯ AlGaN и InGaN. Экситонные эффекты в широкозонных материалах оказывают существенное влияние на скорость излучательной рекомбинации, однако, несмотря на обширные исследования AlInGaN структур, можно отметить нехватку экспериментальных данных об экситонных эффектах в литературе, особенно в структурах (Al,Ga)N/AlN, излучающих в УФ области спектра, поэтому **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Научная новизна работы обусловлена детальными исследованиями фотолюминесценции (ФЛ) ультратонких КЯ GaN/AlN и $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$, позволившими определить толщины КЯ, обеспечивающие максимальный внутренний квантовый выход излучения. Для нанокколонок с КЯ GaN/AlN впервые обнаружена локализация одиночных экситонов на флуктуациях потенциала.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. **Во введении** сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны методы исследований, обоснована актуальность выбранной темы, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященный результатам исследований излучательных свойств гетероструктур на основе AlInGaN. Рассмотрена структура экситонного спектра с учетом электрон-дырочного обменного взаимодействия, обсуждены температурные зависимости времени жизни экситонов в КЯ и квантовых точках, рассмотрено влияние пространственных флуктуаций локализирующего потенциала на спектр фотолюминесценции КЯ InGaN/GaN. Анализ литературы также приводится в каждой главе диссертации по тематике главы. Во **второй главе** описаны технологические приемы изготовления исследуемых образцов и используемые экспериментальные установки. Приведены результаты структурных исследований образцов методами растровой (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). В **третьей главе** рассмотрены оптические свойства ультратонких КЯ GaN/AlN. Проведены исследования температурных зависимостей и кинетики ФЛ, а также изучены оптические свойства одиночных нанокколонок, содержащих КЯ GaN/AlN. **Четвертая глава** посвящена исследованию КЯ $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$. Проведены расчеты энергии размерного квантования в таких КЯ и определены их оптимальные параметры (толщина и содержание Al) с точки зрения реализации максимальной эффективности излучения. В **пятой главе** исследованы оптические свойства микроколонок типа ядро-оболочка, содержащих КЯ $In_xGa_{1-x}N/GaN$ различной полярности и выявлены зависимости излучательных свойств КЯ с разной полярностью. В **заключении** перечислены все основные результаты, полученные в диссертации.

Практическая значимость проведённых исследований заключается в том, что их результаты могут быть использованы при разработке различных светоизлучающих приборов, работающих в УФ и видимом диапазонах длин волн. Полученная в работе информация о временах жизни и характере локализации экситонов в ультратонких КЯ GaN/AlN имеет важное значение для разработки на их основе источников излучения с длиной волны менее 270 нм, востребованных для дезинфекции различных поверхностей, воды и воздуха. Определённые в результате расчётов параметры КЯ $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ могут быть использованы при разработке УФ светодиодов, излучающих в диапазоне 260-330 нм, востребованном в хроматографии и медицине. Обнаруженные особенности излучения микроколонок типа ядро-оболочка с КЯ InGaN/GaN могут быть использованы при разработке монолитных белых светодиодов и других приборов оптоэлектроники.

Достоверность результатов диссертации подтверждается согласованностью экспериментальных данных, полученных различными методами, а также их согласием с теоретическими расчётами.

По представленной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. К методологическим недостаткам можно отнести отсутствие информации по плотности возбуждения при измерении ФЛ по практически всем приведенным экспериментальным данным, что не позволяет оценить плотность возбужденных носителей в КЯ, и, соответственно, вклад в ФЛ механизмов рекомбинации более высоких степеней, например, Оже-рекомбинации.
2. Эксперименты проводились при подбарьерном возбуждении, однако, спектры поглощения (или возбуждения) структур не были сняты и, таким образом, не понятно, происходит ли поглощение носителей только в КЯ или также в матрице AlN. Очевидно, что подобные измерения спектров поглощения на образцах с одиночной КЯ сильно затруднены, но помимо образцов с одиночными КЯ была выращена структура с множественными КЯ $100 \times \{\text{GaN}/\text{AlN}\}$, на которой такие исследования возможны.
3. С ростом температуры выброс носителей из слабо локализованных состояний (а возможно и транспорт носителей из состояний матрицы) может приводить к их захвату в состояния с большей энергией локализации, и, следовательно, к увеличению эффективности излучения и S-образной температурной зависимости максимума излучения. Таким образом, возникает вопрос, насколько сильно транспорт носителей влияет на температурное поведение ФЛ? Кроме того, для подтверждения вывода о роли именно рекомбинации через состояния темных экситонов было бы интересно провести исследования ФЛ тонких КЯ GaN/AlN в магнитном поле.
4. В пятой главе автор на основе сопоставления структурных и излучательных свойств микроколонок с КЯ InGaN/GaN делает вывод, что УФ, синяя и зелёная полосы ФЛ происходят из неполярных, полуполярных и полярных КЯ, соответственно. Разница в спектральном положении синей и УФ полос излучения объясняется квантоворазмерным эффектом Штарка, учитывая одинаковую толщину полуполярных и неполярных КЯ. Однако, включение индия в эпитаксиальные слои зависит как от полярности поверхности, так и от оптимальных технологических условий роста InGaN, которые могут

отличаться для поверхностей различной полярности. Таким образом, содержание индия и толщины КЯ в полярной, полуполярной и неполярной КЯ может быть различным. Проводились ли оценки таких эффектов в данной работе?

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижают высокий уровень диссертационной работы. Диссертация содержит большое количество нового материала и является законченным научным исследованием. Автореферат диссертации правильно отражает её основное содержание. Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в рецензируемых научных журналах и докладывались на российских и международных конференциях.

Заключение

Диссертация соответствует требованиям положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Европейцев Евгений Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников».

Официальный оппонент

Заместитель директора по научной работе
НТЦ Микроэлектроники РАН,
доктор ф.-м. наук

Цацульников Андрей Федорович

Подпись Цацульникова А.Ф. удостоверяю

Контактная информация.

Цацульников Андрей Федорович

НТЦ Микроэлектроники РАН

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

телефон +79219555864

email: andrew@beam.ioffe.ru