

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Европейцева Евгения Андреевича  
«Кинетика экситонной фотолюминесценции в квантовых ямах  
в системе (Al,Ga,In)N»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Квантовые ямы на основе АЗ-нитридных соединений находят все большее применение в науке и технике. Широкозонные соединения AlGa(In)N являются основной системой материалов для создания источников среднего ультрафиолетового излучения, востребованных, в частности, для анализа содержания вредных веществ в окружающей среде и для обеззараживания различных сред. Кроме того, в настоящее время активно развивается технология изготовления трёхмерных микро- и наноструктур на основе AlGaIn и InGaIn, нацеленная на применения в источниках освещения и цветных дисплеях.

Разработка приборов на основе АЗ-нитридных соединений сопряжена с необходимостью решения ряда проблем, в том числе связанных с высокой плотностью дефектов при росте планарных структур на коммерчески доступных подложках, а также с наличием встроенных электрических полей, характерных для “выростных” материалов. Эти факторы приводят к уменьшению внутреннего квантового выхода излучения, влияя на скорости излучательной и/или безызлучательной рекомбинации. Значительное влияние на скорость излучательной рекомбинации могут также оказывать экситонные эффекты, поэтому их изучение играет важную роль для оптимизации внутреннего квантового выхода.

Диссертация Е.А. Европейцева посвящена экспериментальным исследованиям фотолюминесценции (ФЛ) в планарных и колончатых АЗ-нитридных структурах с квантовыми ямами (КЯ), излучающими в ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн. Цель работы – исследование экситонных эффектов в данных структурах и анализ их проявлений в спектре и кинетике ФЛ. Таким образом, тема диссертации является **актуальной** в контексте разработки АЗ-нитридных структур для различных приборов оптоэлектроники.

Диссертационная работа содержит введение, пять глав и заключение.

Во Введении сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные защищаемые научные положения.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертации.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. Здесь представлено описание исследуемых образцов, а также основных экспериментальных методов – спектроскопии

стационарной и разрешённой во времени фотолюминесценции и микрофотолюминесценции.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию фотолюминесценции одиночных КЯ AlN/GaN/AlN с шириной от одного до четырёх монослоёв, а также в одиночных наноклонках, полученных из исходных планарных структур с помощью фотолитографии и травления. Измерены температурные зависимости спектров и кривых затухания ФЛ. Экспериментальные данные проанализированы в рамках модели, учитывающей тонкую структуру экситонного спектра, определена энергия расщепления между тёмными и светлыми экситонами.

В Четвёртой главе решена задача оптимизации параметров одиночной КЯ  $Al_yGa_{1-y}N/Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$  с целью максимального увеличения внутреннего квантового выхода ФЛ в среднем ультрафиолетовом диапазоне. Проведены исследования ФЛ на экспериментально реализованной гетероструктуре, содержащей КЯ с оптимизированными параметрами.

В Пятой главе исследована фотолюминесценция микроколонок типа ядро–оболочка, содержащих неполярные, полуполярные и полярные КЯ InGaN/GaN, расположенные вдоль граней с различной кристаллографической ориентацией.

В Заключении обобщены основные результаты работы.

Автором получен ряд новых научных результатов. К наиболее важным результатам работы, определяющим **научную новизну** исследований, можно отнести следующие:

- 1) Для КЯ GaN/AlN шириной 1–3 монослоя экспериментально продемонстрирован экситонный механизм фотолюминесценции и показано определяющее влияние рекомбинации тёмных экситонов на кинетику ФЛ в таких ямах.
- 2) Для КЯ GaN/AlN экспериментально определена энергия расщепления светлых и темных экситонов в зависимости от номинальной ширины ямы. Из полученной зависимости определена константа короткодействующего обменного расщепления.
- 3) При исследовании наноклонок диаметром ~200 нм, изготовленных из гетероструктуры с КЯ GaN/AlN шириной 1–2 монослоя, были спектрально разделены линии излучения тёмных и светлых экситонов, латерально локализованных на неоднородностях потенциала ямы, и показано, что ширина этих линий составляет менее 1 мэВ. Экспериментально обнаружен эффект гашения ФЛ темных экситонов и возгорания ФЛ светлых экситонов при повышении температуры от 10 до 120 К.
- 4) Установлено, что большая спектральная ширина полосы экситонной ФЛ (~100–200 мэВ) в планарной структуре с КЯ GaN/AlN обусловлена разбросом энергий излучения одиночных локализованных экситонов в пределах зондируемой

области (диаметр ~200 мкм) и наложением неоднородно уширенных линий излучения темных и светлых экситонов.

- 5) В экспериментах на гетероструктуре с квантовой ямой  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  при комнатной температуре достигнут высокий внутренний квантовый выход ФЛ (более 75%) в среднем ультрафиолетовом диапазоне (длины волн 260–330 нм).
- 6) Разработан метод идентификации полос излучения неполярных, полуполярных и полярных КЯ  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  в микроколонках типа ядро–оболочка, основанный на исследовании кинетики ФЛ и зависимости спектра ФЛ от мощности накачки.

**Достоверность** результатов, полученных в диссертации, подтверждается применением в работе современных методик исследования, непротиворечивостью полученных экспериментальных результатов и их теоретической обоснованностью, публикацией основных результатов работы в рецензируемых научных изданиях и обсуждением результатов работы на российских и международных конференциях.

**Практическая значимость** полученных результатов определяется возможностью их применения при разработке источников излучения ультрафиолетового и видимого спектральных диапазонов.

По изложенному в диссертации материалу имеются следующие **замечания**:

- 1) Комментируя кривую затухания ФЛ монослойной КЯ на рис. 3.2(с), автор утверждает, что основной вклад в ФЛ дает медленная компонента с постоянной времени более 10 нс, а быстрая компонента имеет постоянную времени менее 150 пс и дает лишь трёхпроцентный вклад. К сожалению, автор не демонстрирует явно разложение кривой затухания на две экспоненты и результирующую подгоночную кривую. Более того, экспериментальная кривая затухания построена не в полулогарифмическом масштабе, а в линейном. Это не позволяет судить о том, насколько в данном случае адекватно описанное автором биэкспоненциальное разложение.
- 2) Сложную кинетику ФЛ монослойной КЯ при температурах выше 150 К (рис. 3.5) автор связывает с увеличивающимся вкладом безызлучательной рекомбинации. Из текста на стр. 63 не ясно, о каком механизме безызлучательной рекомбинации идет речь. Не понятно также, чем обусловлен резкий рост постоянной времени быстрой компоненты кривой затухания в интервале температур от 70 до 140 К (рис. 3.5(b)).
- 3) На панелях рисунка 1.3 с анизотропной валентной зоной не указаны кристаллографические направления.
- 4) Вместо термина «энергия фотонов» в тексте диссертации несколько раз ошибочно используется термин «энергия излучения» (стр. 59–70).

## Заключение

Диссертационная работа Европейцева Е.А. выполнена на актуальную тему, достоверность и новизна содержащихся в ней научных результатов не вызывают сомнений. Следует отметить цельность и высокий научный уровень работы, большой объем сложных экспериментов, применение современных теоретических моделей для интерпретации результатов. Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации. Сделанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую высокую оценку работы. Представленная диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор – Европейцев Евгений Андреевич – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы  
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Шальгин Вадим Александрович

Адрес: ул. Политехническая 29,  
Санкт-Петербург, 195251

Телефон: +7 812 552 9671

E-mail: shalygin@rphf.spbstu.ru