



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»  
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

М.Ю. Шестопалов

2014 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Беляева Кирилла Геннадьевича на тему:

«Плазмонные эффекты в композитных металл-полупроводниковых  
структурах на основе соединений A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> и A<sub>3</sub>N»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников»

**Актуальность темы диссертации**

Расширение спектрального диапазона практического применения полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур, в особенности структур на основе прямозонных соединений A<sub>3</sub>N, является одной из ключевых задач современной полупроводниковой технологии. Возможность увеличения внутренней и внешней квантовой эффективности гетероструктур на основе соединений ZnCdSe, AlGaN и InGaN в спектральных диапазонах 260-300 нм и 560-650 нм, где современные эпитаксиальные полупроводниковые приборы характеризуются низкой эффективностью, представляет практически значимый интерес. Выбранный автором диссертационной работы метод увеличения квантовой эффективности эпитаксиальных гетероструктур путем создания на их основе металл-полупроводниковых нанокompозитов, представляется интересным и, согласно последним зарубежным публикациям в области наноплазмоники, уже успешно зарекомендовал себя, но требует как доработки методов создания самих композитных структур, так и общих комплексных исследований эффектов экситон-плазмонного

взаимодействия с целью получения композитных структур с наибольшей квантовой эффективностью.

### **Новизна полученных результатов и выводов диссертации**

Метод получения металл-полупроводниковых композитов, предложенный автором, является технологически более простым для увеличения эффективности исходных эпитаксиальных структур, чем, например, создание брэговских микрорезонаторов, в которых также наблюдается увеличение скорости спонтанной рекомбинации излучения.

Управление скоростью спонтанной рекомбинации электрон-дырочных пар с помощью экситон-плазмонного взаимодействия, помимо увеличения внутренней квантовой эффективности полупроводниковых эпитаксиальных гетероструктур, имеет значение также для создания однофотонных источников или эффективных источников с узким спектром излучения, имеющих размеры в несколько десятков нанометров и избирательно «выделенный» плазмонным резонансом диапазон излучения. Продемонстрированные в работе данные по локальному усилению (в пределах области порядка диаметра наночастицы Au) показывают возможность избирательного усиления люминесценции отдельных локализованных экситонных состояний.

В работе получен ряд новых научных результатов, среди которых перечислим следующие:

- Созданы и исследованы Me-полупроводниковые композитные структуры на основе ZnCdSe, InGaN, AlGaN и специально подобранных плазмонных металлов Au и Al.
- Показано и изучено образование нескольких фаз выделенного состава в диапазоне содержания InN от 20 до 40% при стимулированном фазовом распаде твердого раствора InGaN, что помимо фундаментального интереса, связанного с исследованием особенностей самого эффекта фазового распада, дополняет интерпретацию особенностей избирательного локального усиления люминесценции наноколонн InGaN наночастицей золота.
- Продемонстрировано сильное локальное увеличение (до двух порядков величины) интенсивности фотолюминесценции в композитных структурах на основе наноколончатого InGaN наночастицами золота.

На основе обобщения результатов экспериментов с наночастицами и пленками металлов, а также на основе результатов проведенного расчета усиления люминесценции точечного диполя в ближнем поле сферической наночастицы металла предложена новая конструкция композитной структуры в виде наноразмерных включений золота,

самоупорядоченных на наноколонках InGaN. В таких композитных структурах достигнуто интегральное по площади увеличение интенсивности люминесценции в 7 раз. При этом квантовая эффективность наноколонн InGaN состава 25 - 35% по InN, излучающих в желто-оранжевой спектральной области, становится сравнима с эффективностью «зеленого»  $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ .

### **Достоверность полученных результатов**

Общая согласованность экспериментальных результатов работы и расчетов в рамках теоретических моделей служит подтверждением достоверности выводов и заключений диссертационной работы. К достоинствам данной работы следует отнести также подробный характер исследования и интерпретации наблюдаемых плазмонных эффектов, включающий рассмотрение различных возможных механизмов эффекта и гипотез о его интерпретации.

**Научная значимость работы** заключается в исследовании особенностей проявления эффекта экситон-плазмонного взаимодействия в металл-полупроводниковых структурах, полученных на основе эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур. В работе продемонстрированы эффекты локального усиления интенсивности люминесценции наноколончатых структур InGaN и интегрального по площади усиления интенсивности люминесценции в нанокompозитах InGaN/Au.

**Практическая значимость работы.** Достигнута эффективность желто-красной люминесценции эпитаксиального InGaN, сравнимая с эффективностью зеленой люминесценции в InGaN с меньшим составом (порядка 20 % InN). Таким образом, получены композитные структуры, обеспечивающие приемлемый уровень яркости излучения, которые могут быть использованы в светодиодных приборах желто-красного диапазона.

### **Вопросы и замечания по диссертации**

1. Одним из активно обсуждаемых в международной литературе способов достижения высокой эффективности излучения нитридных светодиодов в зеленой области спектра является создание наноколончатых бездислокационных структур с квантовыми ямами. Какие преимущества имеют изучаемые автором структуры с плазмонными эффектами по сравнению с наноколончатыми структурами на квантовых ямах?

2. Автор исследует светодиодные структуры, в которых возбуждение и измерение фотолюминесценции осуществляется со стороны прозрачного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (геометрия «флип-чип»). В этом случае слой металла на противоположной стороне структуры, помимо обеспечения плазмонных эффектов, очевидно, выступает как зеркало, что также



может увеличивать квантовый выход люминесценции. Какой из этих эффектов, по мнению автора, является преобладающим?

3. В диссертационной работе показано, что для структур AlGaIn/Al не получено значительного (более 1-20 %) увеличения квантовой эффективности. Хотелось бы, чтобы автор работы дал оценку возможного увеличения эффективности AlGaIn гетероструктур в спектральной области 260-300 нм путем создания композитных структур. Применим ли данный метод с использованием Al для гетероструктур AlGaIn?

Указанные замечания не снижают положительную оценку диссертационной работы.

### **Рекомендации по использованию**

Полученные в работе результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации светодиодных источников излучения в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербургский НИУ информационных технологий, механики и оптики, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, ОАО «Светлана» (Санкт-Петербург), ОАО «НИИ Полус» им. М.Ф. Стельмаха (Москва), Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Институт физики твердого тела РАН.

### **Заключение**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Во введении сформулированы цели и задачи исследования. Поставленные задачи успешно решены в ходе исследований, а полученные результаты согласованы и в целом работа представляет собой завершенное исследование в рамках конкретной области.

Основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах и прошли хорошую апробацию на российских и международных конференциях. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация является логически связанным и подробным изложением материала и данных экспериментальных исследований. В ней используется общепринятая терминология, доступная широкому кругу специалистов.

При оценке работы следует отметить удельную значимость полученных результатов в данной области, ввиду относительно малого количества успешных опубликованных результатов в настоящее время. А также учесть существенную новизну тематики исследований, задачи которой вследствие разной степени доступности сложного научно-исследовательского оборудования реализуемы не во всех

исследовательских институтах. Как преимущество работы необходимо отметить то, что автором были преимущественно использованы простые и широкодоступные методы получения композитных структур.

По актуальности темы диссертации, новизне и степени обоснованности результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, рецензируемая работа соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Беляев Кирилл Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников».

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры микро- и  
нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
тел.: (812) 234-31-64.

В.И. Зубков

e-mail: [vizubkov@mail.eltech.ru](mailto:vizubkov@mail.eltech.ru)

Диссертационная работа К.Г. Беляева заслушана на научном семинаре кафедры микро- и нанoeлектроники. Настоящий отзыв заслушан и одобрен на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (Протокол № 8 от 3 декабря 2014 г.).

Секретарь кафедры микро-  
и нанoeлектроники

О.А. Александрова

Заведующий кафедрой микро-  
и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» доктор  
технических наук, профессор  
тел.: (812) 234-31-64

В.В. Лучинин