

Отзыв официального оппонента
о диссертации Беляева Кирилла Геннадьевича
**«Плазмонные эффекты в композитных металл-полупроводниковых
структурах на основе соединений А2В6 и А3N»**,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Актуальность темы

Плазмоника находит множество важных применений в современной науке и технике. Среди них – источники и детекторы излучения, химические и биологические датчики с предельно высокой чувствительностью (вплоть до одиночных молекул), эффективные фотовольтаические приборы и солнечные элементы. Широкие перспективы в этой области открывает использование композитных металл-полупроводниковых структур. Такие структуры дают возможность увеличения скорости спонтанной рекомбинации экситонов (или электронно-дырочных пар) в полупроводнике за счет экситон-плазмонного взаимодействия, что позволяет, в принципе, повысить внутреннюю квантовую эффективность светоизлучающих гетероструктур. В научной литературе имеются данные об увеличении эффективности эпитаксиальных гетероструктур в спектральных диапазонах 260–300 нм и 560–650 нм, однако достигнутый масштаб увеличения пока незначителен (увеличение интегральной по площади интенсивности люминесценции не превышает двух раз). Диссертация К.Г. Беляева посвящена исследованию плазмонных эффектов в композиционных металл-полупроводниковых структурах и нацелена на повышение внутренней квантовой эффективности полупроводниковых структур на основе различных соединений, излучающих в видимом и ультрафиолетовом диапазонах, за счет включения в их конструкцию металлических элементов, выполненных из золота и алюминия. Поэтому актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертационная работа К.Г. Беляева охватывает круг технологических, экспериментальных и теоретических задач, связанных с созданием, исследованием и оптимизацией оптических свойств композитных образцов на основе эпитаксиальных гетероструктур. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 представляет собой обзор литературы по оптическим и структурным свойствам гетероструктур на основе соединений A_2B_6 и A_3N , а также оптическим свойствам золота и алюминия и металл-полупроводниковых структур на их основе. Рассмотрены физические основы экситон-плазмонного взаимодействия и обсуждаются перспективы использования данного эффекта для увеличения внутренней квантовой эффективности полупроводниковых гетероструктур.

Главы 2 – 5 посвящены **оригинальным новым результатам**, полученным в диссертационной работе. Наиболее важными результатами представляются следующие (перечисление ведется в порядке изложения материала в диссертации).

В главе 2 представлены результаты исследований влияния экситон-плазмонного взаимодействия на люминесценцию металл-полупроводниковых структур $Zn(Cd)Se/Au$ и $AlGaN/Al$. Для первого типа композитных структур экспериментально продемонстрировано увеличение скорости спонтанной рекомбинации в 10 раз и показано, что оно обусловлено ближнепольным взаимодействием экситонов, возбуждаемых в квантовых точках $CdSe/ZnSe$, и поверхностных плазмон-поляритонов, распространяющихся вдоль интерфейса $ZnSe/Au$.

В главе 3 представлены результаты исследований спектров микрофотолюминесценции в эпитаксиальных слоях $InGaN$ с нанокolonчатой структурой, используемых в качестве основы композитных структур. На основании статистического анализа спектров показано, что пространственное распределение индия в массивах нанокolonн соответствует определенным дискретным значениям содержания индия. Установлено, что изменение среднего состава при изменении ростовой температуры происходит в основном за счет изменения соотношения объемов выделенных фаз с фиксированными значениями содержания индия.

В главе 4 экспериментально продемонстрирована возможность локального усиления люминесценции нанокolonчатых гетероструктур $InGaN$ в десятки раз с помощью точного позиционирования наночастицы золота. Показано, что эффект обусловлен изменением скорости спонтанной рекомбинации локализованных экситонов в результате их взаимодействия с поверхностным плазмоном, локализованным в золотой наночастице. Исследованы особенности усиления фотолюминесценции в композитных структурах на основе коллоидных частиц золота и нанокolonчатого $InGaN$.

В главе 5 представлены результаты по экспериментальному наблюдению эффекта усиления интегральной по площади фотолюминесценции в композитных структурах на основе нанокolonчатых слоев $InGaN$, пленок Au и слоев Si_3N_4 . Наиболее важным результатом работы представляется получение 7-кратного интегрального по площади

увеличения интенсивности люминесценции в «проблемном» желто-красном диапазоне длин волн. Показано, что результаты эксперимента согласуются с электродинамической моделью композитной системы, в которой усиление фотолюминесценции определяется резонансным взаимодействием излучателей (экситонов или электронно-дырочных пар) в InGaN с мультипольными модами локализованных поверхностных плазмонов в золотых включениях.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Перечисленные выше основные результаты диссертационной работы получены впервые. Они подтверждены подробными экспериментальными исследованиями наблюдаемых эффектов и согласуются с общепринятыми теоретическими моделями. В ряде случаев проведено рассмотрение различных альтернативных микроскопических механизмов наблюдаемых эффектов и на основе сравнения спектральных, температурных и других особенностей эффектов обоснованно сделан вывод о доминирующем механизме.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Защищаемые научные положения обобщают результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов, адекватно согласуются с основными выводами работы. Основные результаты работы неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

Научная значимость работы заключается в том, что в ней экспериментально доказана возможность значительного увеличения внутренней квантовой эффективности композитных металл-полупроводниковых структур на основе соединений A_2B_6 и A_3N в «проблемных» спектральных диапазонах за счет экситон-плазмонного взаимодействия. В работе доказано положение о том, что резонансное взаимодействие экситонов, локализованных в наноклоннах InGaN, с мультипольными резонансами высших порядков поверхностных плазмонов в одиночных наночастицах золота позволяет получить локальное увеличение квантового выхода излучения до двух порядков величины в желто-красном спектральном диапазоне. Кроме того, доказано положение о возможности реализовать резонансное взаимодействие поверхностных плазмонов в золотых включениях в трехмерных композитных структурах на основе InGaN/Au и излучателей (экситонов или электронно-дырочных пар) в полупроводниковой матрице

за счет изменения величины эффективной диэлектрической проницаемости, зависящей от толщины и материала диэлектрической прослойки (обрамления), входящей в состав композита. Доказано, что именно этот механизм лежит в основе наблюдавшегося в эксперименте 7-кратного интегрального по площади увеличения интенсивности люминесценции в желто-красном диапазоне длин волн.

Практическая значимость работы заключается в реализации ряда конструкций композитных структур, в которых наблюдались плазмонные эффекты увеличения квантовой эффективности, а также в определении требований к данным конструкциям, обеспечивающих эффективное управление скоростью спонтанной рекомбинации.

Замечания

1. На страницах 38-40 автор рассматривает электромагнитные волны на границе полупроводника и металла, описывая эти две среды комплексными диэлектрическими функциями $\epsilon_1(\omega)$ и $\epsilon_2(\omega)$. Утверждается, что существование поверхностных ТМ волн на границе сред возможно при выполнении неравенства $\epsilon_2 < -\epsilon_1$. Однако использование отношений неравенства «меньше» и «больше» для комплексных величин некорректно. Далее на стр. 41 говорится: «Металлическая область описывается диэлектрической функцией Друде $\epsilon_2(\omega)$, которая имеет только вещественную часть». Эта формулировка представляется неудачной, поскольку сама по себе модель Друде дает диэлектрическую функцию с заметной мнимой частью, которая при низких частотах даже превосходит (по абсолютной величине) вещественную часть.

2. Следует сделать несколько замечаний по оформлению диссертации. Нет расшифровки при первом появлении в тексте следующих обозначений: k_0 (стр. 40), ϵ'_2 и ϵ''_2 (стр. 41). Аббревиатура МПЭ ПА появляется на стр. 19, а получает расшифровку лишь на стр. 37, аббревиатура ПЭВ (стр. 71) не расшифрована. На рис. 23, 26, 57 и 58 не хватает вертикальной оси для волнового вектора плазмон-поляритона, а на рис. 32 – для спектральной плотности излучения. В тексте диссертации на стр. 70 при анализе рисунка 24 речь идет о двух структурах, хотя на самом рисунке представлена лишь одна структура. В автореферате помещен рис. 3(b), который никак не обсуждается (впрочем, соответствующий рисунок анализируется в диссертации на стр. 105).

3. В диссертации имеется несколько существенных опечаток. Следует заменить «III-V» на «III-N» (стр. 21), « f_v » на « $f_h = 1 - f_v$ » (стр. 30), « $\mu - \hat{z} \cdot \mu$ » на « $\mu - \mu \cdot \hat{z}$ » и «компоненты дипольного момента» на «абсолютные величины компонент дипольного момента» (стр. 46), в формуле (2.1) не хватает символа «*» (соответствующее корректное выражение приведено далее в формуле (2.6)). На стр. 43 ссылку на формулу (1.21) следует заменить ссылкой на (1.22). В таблице 1.1 неверно заполнены две ячейки, в подписи к рисунку 1 « $-\epsilon_n$ » следует заменить на « $-\epsilon'_n$ ».

Указанные замечания не имеют решающего значения и не ставят под сомнение основные результаты диссертационной работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научный уровень выполнения работы, комплексный подход к проведению исследований и большой объем новых научных результатов. Автореферат и публикации автора правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

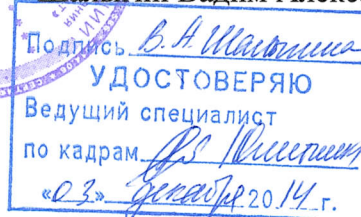
По степени завершенности исследований, актуальности темы диссертации, новизне и степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, рецензируемая работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор – Беляев Кирилл Геннадьевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры физики
полупроводников и наноэлектроники
Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»

Адрес: ул. Политехническая 29,
Санкт-Петербург, 195251
Телефон: +7 812 552 9671
E-mail: shalygin@rphf.spbstu.ru



Шалыгин Вадим Александрович



03.12.2014