

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Федеральное государственное

бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский

государственный университет»

С. В. Микушев

20 Января

2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Коротченкова Алексея Владимировича «Плазмоны и плазмон-экситоны в наноструктурах металл-полупроводник», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников

Диссертация А.В. Коротченкова, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников, посвященная теоретическому исследованию плазмонов в слоях металлических наночастиц и смешанных возбуждений, возникающих при взаимодействии плазмонов с экситонами в полупроводниковых квантовых ямах, является важным и актуальным научным трудом. Целью диссертационной работы является теоретическое исследование плазмонных и плазмон-экситонных возбуждений в наноструктурах, включающих массивы металлических нанокластеров и полупроводниковые квантовые ямы. Представленные в диссертации результаты имеют высокую значимость как для фундаментальной науки, так и для практических применений.

Актуальность темы исследования обусловлена активным изучением новых материалов, сочетающих оптические свойства металлических и полупроводниковых наноструктур. Необходимость разработки моделей, описывающих композитные и структурированные материалы, связана с их

применением в различных областях оптики для увеличения эффективности светоизлучающих приборов, генерации кратных гармоник электромагнитного излучения, управления поляризацией и распространением оптических сигналов. В целом изучение свойств наноструктур металл-полупроводник является актуальной задачей физики низкоразмерных систем, затрагивающей фундаментальные вопросы взаимодействия света с веществом.

Новизна представленного исследования заключается в детальном теоретическом исследовании плазмонных и плазмон-экситонных возбуждений в наноструктурах, включающих массивы металлических нанокластеров и полупроводниковые квантовые ямы. Автором впервые получены оценки константы взаимодействия квази-двумерных полупроводниковых экситонов с плазмонами в металлических наночастицах и нанопроволоках, и дано объяснение резонансной особенности в спектре металл-полупроводниковых наноструктур. Также впервые предложено наблюдение оптической ориентации горячих экситонов, возбуждаемых в гетероструктуре с квантовой ямой при помощи решётки металлических наночастиц.

Диссертационная работа включает Введение, 3 главы, Заключение, Приложение, Список литературы.

Во **введении** автором убедительно обоснована актуальность выбранной темы, что подтверждается четким выделением научной новизны работы и значимости полученных результатов для дальнейшего развития области. Сформулированы цели и задачи исследования, которые последовательно раскрываются в каждой из глав, а также указаны ключевые положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена теория спектроскопии анизотропного отражения света от слоев металлических частиц на поверхности полупроводника. Разработанная модель коллективных слоевых плазмонов применяется для объяснения экспериментально измеренных спектров анизотропного отражения, что придает работе определенную практическую значимость. Самосогласованная теория, использующая понятие эффективной дипольной поляризуемости металлических наночастиц, применяется в дальнейших разделах диссертационной работы.

Во второй главе решена задача о взаимодействии плазмонов в решетках из наночастиц с экситонами в полупроводниковой квантовой яме. Рассчитаны спектры плазмон-экситонной поляризуемости, а также спектры отражения и поглощения света, в которых присутствует резонансная особенность в виде двух пиков, разделенных узким провалом. При этом

полученные оценки показывают, что характерные значения константы плазмон-экситонной связи оказываются меньше ширины плазмонного резонанса. Аналогичные результаты были получены для плазмонов в одномерной решетке из нанопроволок. Отсюда можно заключить, что для экситонов Ванье-Мотта характерным оказывается случай слабой связи с поверхностными плазмонами.

В третьей главе представлена теория оптической ориентации горячих экситонов, возбуждаемых в квантовой яме в ближнем поле решетки наночастиц. Насколько нам известно, ранее оптическая ориентация экситонов в ближнем поле не изучалась, хотя сложные наноструктуры с металлическими решетками и квантовыми ямами создавались и исследовались. Показано, что решетка позволяет генерировать и собирать излучение экситонов с волновыми векторами обратной решетки, в несколько раз превосходящими волновой вектор падающего света. При этом ориентация спина экситонов в момент рождения и поляризация их излучения определяется поляризацией поверхностных волн, распространяющихся вдоль решетки. Для описания динамики рождаемых экситонов применяется уравнение для матрицы плотности, в котором учитывалась релаксация импульса и спина экситонов, а также энергетическая релаксация, обусловленная испусканием акустических фононов. В результате предложен метод определения времени жизни и спиновой релаксации горячих экситонов с помощью измерения степеней круговой и линейной поляризации излучения в магнитном поле.

В Заключении приведена краткая сводка основных результатов выполненного исследования.

В Приложении диссертационной работы приводятся сведения о функциях Грина для многослойных структур.

Текст диссертации представлен на 86 страницах и включает список литературы из 91 источника. Оформление диссертационной работы не вызывает нареканий. Работа хорошо структурирована, достаточно полно проиллюстрирована, материал диссертации изложен грамотно, ясно и последовательно. Имеются незначительные опечатки, которые не портят положительного впечатления от работы.

Среди наиболее важных новых **фундаментальных научных результатов** диссертационной работы отметим следующее:

построена модель резонансного плазмон-экситонного отражения света от массивов наночастиц вблизи квантовой ямы, в рамках которой впервые получены оценки константы взаимодействия возбуждений двух типов;

впервые рассмотрены плазмон-экситоны в гибридной наноструктуре из решётки металлических нанопроволок и полупроводниковой квантовой ямы; предложено исследование оптической ориентации и выстраивания горячих экситонов в квантовых ямах при помощи ближнего поля плазмонов в решётке металлических наночастиц.

Следует отметить глубину проработки темы и высокий уровень теоретического рассмотрения. Автором проведены многоплановые теоретические исследования, что обеспечивает достоверность результатов и надежность выводов диссертационной работы.

Значимость для науки и практики полученных в диссертационной работе результатов состоит в разработке теоретических подходов для описания плазмонов в решётках наночастиц и плазмон-экситонов в гибридных наноструктурах с квантовыми ямами. Это позволяет использовать модели, описывающие композитные и структурированные материалы, для всестороннего изучения фундаментальных физических свойств таких материалов. Например, представленные в диссертации результаты могут позволить определять свойства экситонов с отличным от нуля импульсом в плоскости квантовой ямы, возбуждаемых и излучающих свет с помощью решётки металлических наночастиц. Использование предложенных в диссертационной работе моделей открывает перспективы для дальнейшего практического применения таких материалов в различных областях оптики для увеличения эффективности светоизлучающих приборов, генерации кратных гармоник электромагнитного излучения, управления поляризацией и распространением оптических сигналов.

Конкретная рекомендация по использованию результатов и выводов диссертационной работы заключается в предложении исследования оптической ориентации и выстраивания горячих экситонов в квантовых ямах при помощи ближнего поля плазмонов в решётке металлических наночастиц. Предложенный метод изучения горячих экситонов открывает возможность увеличения эффективности излучающих устройств, работающих на экситонных переходах.

Некоторые частные аспекты обсуждаемой диссертационной работы, как и любой большой научной работы, требуют дополнительного пояснения, вследствие чего возникли следующие **вопросы и замечания**.

1. В уравнении (1.13) не совсем понятен смысл «шляпок» над G . Буквы, обозначающие преобразование Фурье и оригинал одинаковы – преобразование от оригинала отличается только буквами, обозначающими

аргументы соответствующих функций. Символ G со шляпкой далее в работе не встречается.

2. Рассмотрение эффекта появления поляризационной анизотропии отражения ведется на решетке (уравнение (1.12) и ниже). Нельзя ли вместо решетки наночастиц рассмотреть сплошной (не структурированный) слой с анизотропией (причиной этой анизотропии может являться анизотропия составляющих слой наночастиц), но не учитывать дискретный характер слоя?

3. Вопрос по рис. 2.7 в тексте диссертации. Как известно, мнимая и вещественная части поляризуемости связаны соотношением Крамерса-Кронига, и вблизи резонанса должны иметь существенно различающиеся дисперсионные зависимости. При этом спектры оптического поглощения определяются мнимой частью поляризуемости, а спектры отражения – вещественной частью. Почему на рис. 2.7 указанные зависимости сходны?

4. Вопрос по первому защищаемому положению: дает ли возможность предложенная автором теория анизотропного отражения различить анизотропию формы наночастиц и анизотропию расположения наночастиц в слое? Можно ли как-нибудь отличить эти два «источника» анизотропии в эксперименте?

5. Вопрос по второму защищаемому положению: не совсем понятно, что было сделано диссертантом, а что было известно ранее.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение. Диссертационное исследование Коротченкова Алексея Владимировича «Плазмоны и плазмон-экситоны в наноструктурах металл-полупроводник» является выполненной на высоком научном уровне законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи теоретического исследования плазмонных и плазмон-экситонных возбуждений в наноструктурах, включающих массивы металлических нанокластеров и полупроводниковые квантовые ямы, имеющей важное значение для применением в различных областях оптики для увеличения эффективности светоизлучающих приборов, генерации кратных гармоник электромагнитного излучения, управления поляризацией и распространением оптических сигналов. Представленные в работе результаты достоверны, выводы логично обоснованы, выносимые на защиту положения сформулированы четко и соответствуют полученным результатам. Автореферат диссертации корректно и полно отражает основное содержание диссертационной работы. По значимости и научному уровню результатов диссертация отвечает всем требованиям, предъявляемым

к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и требованиям п. 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), а ее автор – Коротченков Алексей Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором кафедры физики твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Козловым Глебом Геннадьевичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры физики твердого тела с участием сотрудников лаборатории «Оптика спина» СПбГУ 14 января 2025 г., протокол № 44/12/15-02-1.

Профессор физики твердого тела СПбГУ
с возложением обязанностей заведующего кафедрой,
доцент, доктор физико-математических наук

Вербин С.Ю.

Профессор кафедры
физики твердого тела СПбГУ,
доктор физико-математических наук

Козлов Г.Г.

Подписи заверяю:

И.о. начальника
отдела кадров № 3 И.И.
Константинова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»
Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9.
Телефон +7 (812) 328-97-01
E-mail: spbu@spbu.ru