

Отзыв

**официального оппонента Виноградова Алексея Петровича
на диссертацию Александра Никитича Поддубного
на тему: «Распространение, локализация и излучение света
в наноструктурах и метаматериалах»,
представленную в диссертационный совет № Д 002.205.02
при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика**

Диссертационная работа А.Н. Поддубного посвящена теоретическому исследованию оптических процессов в метаматериалах и наноструктурах. В настоящее время фотоника, плазмоника и оптика метаматериалов выделились в отдельные, быстро развивающиеся направления, расположенные на стыке оптики и физики конденсированных сред. Развитие технологии привело к созданию разнообразных типов наноструктур, что подтолкнуло эксперимент к открытию новых, нетривиальных оптических эффектов. Остро встал вопрос о теоретическом описании экспериментальных результатов и предсказании новых эффектов. На решение этого вопроса и нацелена диссертационная работа.

В диссертации с единой точки зрения рассмотрен широкий круг оригинальных задач, таких как распространение и рассеяние экситонных поляритонов в периодических и квазикристаллических структурах с квантовыми ямами, спонтанное излучение в гиперболических средах, фёрстеровский перенос энергии в плазмонных наноструктурах, локализация света в неупорядоченных фотонных кристаллах и на краях топологически нетривиальных фотонных структур. Решение этих задач обуславливает безусловную актуальность диссертации.

Структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, и содержит 256 страниц текста. Основные результаты работы изложены в 25 публикациях, включающих статьи в ведущих российских и международных физических журналах (ЖЭТФ, Физика твердого тела, Nature Photonics, Nature Communications, Physical Review Letters) и одну главу в монографии.

Во Введении дан краткий обзор современного состояния исследований в области оптики наноструктур и метаматериалов и обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Приведены общие сведения о работе и сформулированы основные положения, выносимые на защиту. В дальнейшем каждая из глав начинается подробным обзором текущего состояния исследований, в соответствующей области.

Первая глава диссертации, «Рассеяние экситонных поляритонов в полупроводниковых сверхрешётках», посвящена спектроскопии мандельштам-бриллюэновского рассеяния экситонных поляритонов на акустических фонах в периодических структурах с квантовыми ямами (сверхрешетках). Оптический отклик квантовых ям имеет резонанс на частоте возбуждения квазидвумерного экситона. Взаимодействие световых волн с экситонами приводит к образованию гибридных квазичастиц --- экситонных поляритонов. А.Н. Поддубный впервые рассмотрел рассеяния поляритонов на акустических фонах в полупроводниковых сверхрешетках. Ранее теория была построена лишь для сверхрешеток без учета экситонных резонансов и для поляритонов в объемных кристаллах. В главе 1 на основе метода электродинамической функции Грина, получено общее выражение для спектра рассеяния, учитывающее дифракцию поляритонных и акустических волн в структуре. Достигнуто хорошее согласие рассчитанных спектров с экспериментальными данными. Развитая теория позволяет количественно определять частоты, силы осциллятора и скорости нерадиационного затухания, описывающие экситонный резонанс в квантовой яме. Наиболее

ярким результатом главы считаю продемонстрированное экспериментально и объясненное теоретически многократное усиление (до 10^5 раз) фотоупругого отклика структуры на частоте экситонного резонанса.

Вторая глава диссертации, «Резонансные эффекты в аperiodических фотонных структурах», посвящена особенностям оптических свойств фотонных квазикристаллов и неупорядоченных структур. В начале главы дан краткий, но достаточно емкий обзор работ в этой области, охватывающий период от первоначальных наблюдений дифракции рентгеновских лучей в кристаллах до современных исследований неупорядоченных фотонных кристаллов и квазикристаллов. Последующие три раздела главы посвящены, последовательно, экситон-поляритонным свойствам структур Фибоначчи с квантовыми ямами, мозаике Пенроуза из резонансных наночастиц и резонансам Фано в спектрах длины локализации разупорядоченного фотонного кристалла. В первом разделе предсказано брэгговское усиление отражения от структур Фибоначчи на частоте экситонного резонанса. Получено аналитическое выражение для частоты коллективной сверхизлучательной моды экситонных поляритонов, определяющей основной резонанс в спектре отражения. Теоретическое предсказание подтверждено экспериментально. Во втором разделе изучены трансформации поляризации света, проходящего через мозаику Пенроуза. Наиболее интересным представляется последний раздел, в котором рассмотрено пропускание света последовательностью диэлектрических слоев с беспорядком специфического типа – случайной диэлектрической проницаемостью каждого второго слоя. Несмотря на то, что исследования одномерных разупорядоченных слоистых структур ведутся более 50 лет, исследование данной модели беспорядка является оригинальным. В диссертации проведен последовательный анализ стохастических уравнений для распространения света в структуре и получено аналитическое выражение для длины экстинкции. В спектре экстинкции выявлен неожиданный эффект --- при усилении беспорядка брэгговская стоп-

зона не размывается, как можно было бы ожидать, а асимметрично трансформируется в зону пропускания согласно формуле Фано. Дано физическое объяснение эффекта, которое может быть применимо и к резонансам Фано, наблюдавшимся в спектрах пропускания разупорядоченных трехмерных фотонных кристаллов на основе синтетических опалов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию спонтанного излучения в гиперболических метаматериалах --- одноосных средах, в которых главные компоненты тензора диэлектрической проницаемости имеют разные знаки. Активное исследование излучения в таких средах началось в последние 5-6 лет, и работы А.Н. Поддубного стояли у истоков развития этой области. В частности, в диссертации впервые получено замкнутое аналитическое выражение для скорости спонтанного затухания квантовой точки конечных размеров, помещенной в гиперболическую среду. В настоящее время эти работы диссертанта привлекают значительное внимание исследователей в связи с обнаружением естественных гиперболических сред, таких как гексагональный нитрид бора.

В четвертой главе диссертации рассмотрен очень интересный вопрос о фёрстеровском переносе возбуждений в массиве локализованных экситонов, помещенных над металлическим зеркалом. Оригинальность постановки задачи состоит в учете коллективных эффектов, связанных с гибридизацией различных локализованных экситонных мод друг с другом благодаря их взаимодействию с оптическими модами. Показано, что из-за коллективных эффектов фёрстеровский перенос может, как замедляться, так и ускоряться вблизи зеркала. Без учета таких эффектов перенос может лишь ускоряться, причем существенно слабее. Предложенный механизм может объяснять замедление фёрстеровского переноса, наблюдавшееся экспериментально в таких структурах.

Пятая, заключительная, глава диссертации посвящена исследованию краевых оптических мод, возникающих в одномерных массивах плазмонных и диэлектрических нанодисков в форме зигзага с плазмонными резонансами и резонансами Ми, соответственно. В рамках модели дискретных диполей показано, что структура зигзага обладает топологически нетривиальным энергетическим спектром, что приводит к образованию пар поляризационно-вырожденных состояний на ее краях. Теоретические предсказания согласуются с экспериментами по ближнепольной оптической микроскопии плазмонных и диэлектрических структур. Существенно, что наблюдаемые краевые моды являются субволновыми. Это выгодно выделяет проведенное в диссертации исследование нанодисков среди других работ по оптическим аналогам электронных топологических изоляторов, активно ведущихся в последние несколько лет.

Необходимо отметить, что несмотря на широкий круг задач, решенных в диссертации А.Н. Поддубного, исследование носит цельный и законченный характер. Разделы диссертации объединяются общими идеями резонансного усиления оптических эффектов (с экситонными, плазмонными и Ми резонансами), образования коллективных оптических мод, модификации оптических процессов (спонтанного излучения и фёрстеровского переноса) в структурированных средах.

Надежность и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Полученные результаты являются результатом детального анализа с использованием современных методов теоретической физики и компьютерного моделирования. Сильной стороной диссертации является получение приближенных аналитических выражений, позволяющий наглядно интерпретировать физику исследуемых явлений. Основные теоретические предсказания подтверждены сопоставлением с экспериментом. Работы А.Н. Поддубного хорошо известны специалистам и

докладывались на ведущих российских и международных физических конференциях, в том числе в качестве приглашенных докладов.

Новизна и научную значимость диссертации состоит в построении теории фундаментальных физических явлений, таких как рассеяние поляритонов на акустических фононах, формирование коллективных сверхизлучательных мод экситонных поляритонов в квазикристаллах, спонтанное излучение в гиперболических средах, локализация оптических мод и фёрстеровский перенос энергии в структурированных средах.

К работе имеются и некоторые **замечания**:

- При исследовании оптических спектров структур Фибоначчи с квантовыми ямами (Глава 2) было бы уместно сопоставить спектры отражения, пропускания и поглощения в спектральной окрестности экситонного резонанса. В диссертации внимание сосредоточено лишь на спектрах отражения.
- В главе 4, посвященной фёрстеровскому переносу в массивах локализованных экситонов, рассчитывалась лишь эффективная скорость переноса от доноров к акцепторам. Расчет же непосредственно наблюдаемой в эксперименте величины --- кинетики излучения акцепторов и доноров не проводился.

Отмеченные мелкие недостатки не являются существенными и ни в коей мере не влияют на безусловно положительное впечатление о работе и высокую оценку. В целом, диссертационная работа А.Н.Поддубного выполнена на очень высоком научном уровне. Результаты изложены последовательно, ясным языком и несомненно вносят значительный вклад в науку. Все результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых научных журналах. Основное содержание диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, адекватно отражены в автореферате.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа А. Н. Поддубного «Распространение, локализация и излучение света в наноструктурах и метаматериалах» полностью отвечает критериям пунктов 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней" для ученой степени доктора наук, утвержденного постановлением Правительства от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 "Теоретическая физика".

Официальный оппонент

Виноградов Алексей Петрович

доктор физико-математических наук, профессор,

главный научный сотрудник лаборатории

теоретической электродинамики конденсированного состояния,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теоретической и прикладной электродинамики

Российской академии наук,

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13,

a-vinogr@yandex.ru , тел. (495) 485-83-55

/Виноградов А.П./

Подпись А.П. Виноградова заверяю

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИТПЭ РАН

к.ф.м.н. А.Т Кунавин