

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего лабораторией теории полупроводниковых наноструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) Тиходева Сергея Григорьевича (адрес: 117942, ГСП-1, Москва, ул.Вавилова, 38, телефон: +7 (499) 503-81-02, e-mail: tikh@gpi.ru)

на диссертацию

Поддубного Александра Никитича
«РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА В
НАНОСТРУКТУРАХ И МЕТАМАТЕРИАЛАХ»,

представленную в диссертационный совет No 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.

Диссертация Александра Никитича Поддубного посвящена теоретическому исследованию множества важных с фундаментальной и прикладной точки зрения оптических эффектов в разнообразных наноструктурированных средах – метаматериалах, фотонных кристаллах и квазикристаллах, кластерах наночастиц. Объединяет развиваемые в диссертации теоретические методы их направленность на исследование резонансных структур, то есть последовательный учет взаимовлияния структурных фотонных эффектов (связанных с пространственной модуляцией электромагнитного отклика, например, брэгговских резонансов в периодической системе) и резонансного электромагнитного отклика составляющих композитную фотонную систему наноструктур, например, экситонных резонансов в квантово-ямных полупроводниковых слоях и нанокристаллах, локализованных электро- и магнито-дипольных резонансов Ми в металлических наночастицах различной геометрии (нанодисках, двойных нанодисках, нанопроводах). **Актуальность и востребованность** этих исследований не вызывает сомнений, поскольку речь идет о разработке физических принципов активно развивающейся в последнее десятилетие фотоники, области исследований на стыке физики конденсированного состояния и теоретической электродинамики. Вошедшие (и не вошедшие) в диссертацию работы А.Н. Поддубного занимают в современном развитии фотоники весьма значительное место.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и заключения. В списке литературы, помимо впечатляющего списка работ автора, вошедших в диссертацию (25 статей,

включая статьи в ЖЭТФ, ACS Photonics, Nature Photon, Nature Communications, 2 статей в Phys. Rev. Lett, 9 статей в Phys. Rev. B) – 374 публикации.

Во Введении анализируется структура основных направлений исследований в области фотоники, связь с ними вошедших в диссертацию исследований, убедительно аргументируется их актуальность, новизна и практическая значимость. Формулируются цели диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту, приводится апробация работы (весьма внушительная), кратко описывается структура диссертации и содержание ее глав.

В главах 1-5 диссертации А.Н. Поддубного получен впечатляющий объем новых фундаментальных результатов, среди которых я хотел бы выделить следующие.

1. Разработка теории мандельштам-бриллюэновского рассеяния экситон-поляритонов на акустических фононах в полупроводниковых сверхрешетках (глава 1). Развитие в последние годы технологии изготовления высококачественных структур с квантовыми ямами позволили экспериментально зарегистрировать весьма тонкие эффекты, предсказанные в работах диссертанта, например, качественное изменение структуры спектра рассеяния (от двух- к трехпиковому) при росте числа ям и связанное с переходом от резонансов падающей и рассеянной волн на одиночных квантовых ямах к рассеянию коллективных экситон-поляритонных мод. Из подгонки разработанной автором теории к эксперименту удалось получить, в частности, не доступную ранее информацию о коэффициенте фотоупругого отклика структур с квантовыми ямами. Убедительно доказано резонансное усиление этого коэффициента (на два порядка при комнатной температуре и до пяти порядков при 30 К) по сравнению с объемным GaAs в области прозрачности.

2. Проанализирован оптический отклик различных аperiодических структур, как одномерных, так и двумерных (глава 2). Например, изучены квазикристаллические сверхрешетки квантовых ям с экситонными резонансами. В разработанном автором двухволновом приближении получены аналитические выражения для спектров отражения. Выявлены сверхизлучательный и фотонно-кристаллический режимы в спектрах отражения, и область скэйлинга. Как и все остальные вошедшие в диссертацию теоретические рассуждения, эти результаты проверены и подтверждены экспериментально, что позволило, например, определить резонансные частоты и излучательные и безызлучательные затухания квантовоямных экситонов. Показано, что в квазикристаллических структурах Фибоначчи с квантовыми ямами, в зависимости от соотношения величин излучательных и безызлучательных потерь, поглощение и локализация экситонов конкурируют между собой. Кроме того, в главе 2 построена

аналитическая теория локализации света в одномерных неупорядоченных структурах (со случайной диэлектрической постоянной каждого второго слоя) и получены весьма общие и интересные результаты для Фано-резонансов в таких структурах. Наконец, проанализированы свойства циркулярного дихроизма в системах из расположенных на плоской подложке плазмонных наночастиц, и показано, что при упорядочении в виде мозаики Пенроуза эти эффекты слабее, чем в квадратной или гексагональной решетках. Отмечу, что вторая глава сама по себе содержит достаточное для докторской диссертации количество материалов.

3. Весьма впечатляющие результаты получены диссертантом при исследовании характеристик спонтанного излучения малых по сравнению с длиной волны излучателей в гиперболических метаматериалах. Вычислен фактор Парселла квантовых точек конечного размера a в таких метаматериалах, показано, что он расходится как a^{-3} и максимален для перехода эффективного отклика из эллиптического в гиперболический режим. Построена модель гиперболического метаматериала в виде кубической решетки дипольных рассеивателей, получены приближенные аналитические формулы для фактора Парселла и его зависимость от локального поля в точке расположения излучателя. Кроме того, в главе 3 исследовано еще электро- и магнито-дипольное излучение метаматериала в виде массива параллельных металлических нанопроводов и показано, что фактор Парселла максимален для электро-дипольного излучения с поляризацией поперек нитей.

4. Теоретически исследован резонансный перенос Фёрстера возбуждений между периодическими массивами локализованных осциллирующих диполей, одни из которых называются донорами (являются источниками энергии возбуждения), а другие акцепторами (получателями энергии), причем прямой туннельной связи для электронных возбуждений между ними нет. Исследовано влияние гибридизации дипольных мод источников, приводящей к формированию коллективных состояний, на фёрстеровский перенос возбуждений. Предложен механизм для объяснения экспериментально наблюдавшегося замедления скорости переноса в случае, когда массивы диполей находятся над металлическим зеркалом.

5. Исследованы оптические свойства массива металлических наночастиц с резонансами локализованных плазмонов, расположенных в форме зигзага. Диполь-дипольное взаимодействие между плазмонными модами индивидуальных наночастиц приводит к образованию коллективных состояний. Показано, что в спектре собственных мод присутствуют две энергетически вырожденные моды, локализованные на противоположных краях массива. Установлен топологический

характер краевых мод и численно установлена их устойчивость к беспорядку, вызванному флуктуациями углов между соседними частицами в зигзаге. В совместной с экспериментаторами работе диссертанта была выполнена спектроскопия ближнего поля зигзага из металлических нанодисков, которая подтвердила основные предсказания теории.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается внутренней непротиворечивостью результатов, использованием совершенного аппарата теоретической и математической физики, симметричного анализа, сопоставления полученных результатов с данными эксперимента.

Высокая **научная и практическая значимость** этих результатов обусловлена тем, что в диссертации построена теория ряда фундаментальных физических явлений в резонансных структурах, связанных с когерентным распространением, рассеянием, локализацией, и излучением света. Решенные в диссертации задачи открывают возможность измерения параметров наноструктур и их композиционных материалов оптическими методами. Так, анализ спектров мандельштам-бриллюэновского рассеяния экситонных поляритонов в полупроводниковых сверхрешетках позволил установить значения фотоупругого коэффициента GaAs в не исследованной ранее спектральной области.

Диссертация не лишена некоторых, впрочем, весьма незначительных, **недостатков**.

1. В первой главе диссертации проанализирован только случай нормального распространения и рассеяния (перпендикулярно слоям структуры). Мне представляется, что при наклонном падении света, особенно в р-поляризации (магнитное поле вдоль плоскостей структуры) могли бы проявиться качественно новые эффекты, связанные с нелокальностью отклика квантовых ям. Кроме того, даже при нормальном падении света, из-за выполнения условий синхронизма для наклонно-распространяющихся фононов, должны возникать и наклонно распространяющиеся рассеянные поляритоны. (Только при нормальном распространении и s-поляризации при наклонном распространении поляритонный отклик не зависит от деталей распределения экситонной поляризации в квантово-ямном слое – на этом приближении основываются полученные в этой главе результаты.)

2. Во второй главе, при описании двухволнового приближения, следовало бы подробнее проанализировать (и описать) область применимости приближения и физические критерии – малые параметры, по которым справедливо приближение. Например, на с. 63 указывается, что двухволновое приближение хорошо работает при $N \geq 20$ (N – число квантовых ям в структуре) даже если $N \neq F_{j+1}$ (F_j – одно из чисел Фибоначчи), и не объясняется, почему это удивительно.

3. Во второй главе безусловно справедливо указано, что впервые резонансные фотонные кристаллы были предложены и изучены в пионерской работе [29] на примере слоистой системы с полупроводниковыми квантовыми ямами, разделенными расстоянием, соответствующим брэгговскому условию для основной и отраженной волн на частоте экситона в отдельных ямах. Однако довольно вскоре была предложена и альтернативная геометрия [Т. Fujita et al., PRB 57, 12428 (1998)], где резонансные экситонные и брэгговские эффекты наблюдались для брэгговского рассеяния не вдоль, а поперек направления распространения света. Учитывая, что впоследствии исследование именно таких систем (с периодической модуляцией в плоскости слоев) привело к появлению метаматериалов, было бы интересно обобщить полученные в главе результаты на аперидические в плоскости системы. Простейшей реализацией таких систем могли бы быть плоскости с металлическими нанонитями, образующими аперидическую структуру. Отмечу, что одна из рассмотренных в главе 2 систем – мозаика Пенроуза из плазмонных наночастиц – принадлежит к такому классу систем, но ее оптические свойства изучены только с точки зрения величины циркулярного дихроизма.

4. В главах 2 и 3 для описания эффективного электромагнитного отклика метаматериалов используются 2×2 матрицы переноса для тангенциальных к слоям компонент электрического поля (матрицы Джонса), а также только тензор эффективной диэлектрической восприимчивости ϵ (что, по-видимому, одно и то же). Это, в принципе, соответствует утверждению, что в общем случае, при учете пространственной дисперсии тензора диэлектрической проницаемости, можно не рассматривать тензор магнитной восприимчивости μ ,

а магнитные резонансы описывать нелокальными свойствами ϵ . В то же время, известно, что во многих случаях при описании резонансного (по частоте света) эффективного электромагнитного отклика метаматериалов можно ограничиться приближением локального отклика. Но тогда необходимо рассматривать не только частотно-зависимые ϵ и μ , но еще и члены, описывающие связь D с H и V с E . (При этом вместо 2×2 матриц Джонса надо использовать 4×4 матрицы, имеющие, в принципе, большее количество независимых компонент отклика, связывающие четырех-компонентные столбцы тангенциальных составляющих E и H). Такие члены в локальном приближении ответственны за хиральность и бианизотропию отклика (связь между, соответственно, параллельными и перпендикулярными компонентами этих векторов). Хиральная часть задачи в приближении с нелокальным ϵ подробно проанализирована в разделе 2.3 диссертации при исследовании циркулярного дихроизма мозаик Пенроуза из плазмонных наночастиц. Что касается эффектов бианизотропии, такие члены возникают, например, когда плазмонные наночастицы расположены не в однородном пространстве, а на подложке – то есть, как и в рассмотренных в 2.3 мозаиках. Было бы интересно исследовать проявления эффектов бианизотропии в этих системах.

5. Строго говоря, локальное приближение для эффективной ϵ , используемое в главе 3, не должно адекватно описывать локальное электромагнитное поле вблизи малого излучателя.
6. Имеются небольшие технические погрешности в тексте диссертации, например, на книгу [1] имеется еще и вторая ссылка, [73]. На с. 22 упоминаются «продольные акустические фотоны».

Указанные недостатки ни в коей мере не уменьшают ценности диссертации, выполненной на очень высоком и современном научном уровне.

В целом диссертационная работа А. Н. Поддубного «Распространение, локализация и излучение света в наноструктурах и метаматериалах» заслуживает самой

высокой оценки благодаря высокому научному уровню ее выполнения, новизне результатов, ясности изложения. Одним из важнейших достоинств работы является тесное сотрудничество автора с экспериментаторами – большинство теоретических результатов уже нашли экспериментальное подтверждение.

Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертация А. Н. Поддубного является законченным исследованием, имеющим важное научное и прикладное значение для физики. Таким образом, диссертационная работа А. Н. Поддубного полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, а её автор Александр Никитич Поддубный несомненно заслуживает присвоения ему искомой степени.

Заведующий лабораторией теории полупроводниковых наноструктур ИОФ РАН, д. ф.-м. н., проф.

С.Г. Тиходеев

Подпись С. Г. Тиходеева удостоверяю:
Ученый секретарь ИОФ РАН, д.ф.-м.н.

С.Н. Андреев

03 октября 2016