

Отзыв

официального оппонента Виноградова Алексея Петровича
на диссертацию Рыбина Михаила Валерьевича
на тему: «Резонансные эффекты в электромагнитных спектрах фотонных
кристаллов и метаматериалов»,
представленную в диссертационный совет Д 002.205.01
при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа М.В. Рыбина посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию резонансных явлений в фотонных кристаллах и метаматериалах, а также в отдельных резонансных диэлектрических структурах. В настоящее время фотоника искусственных сред, где характерный размер структурного элемента сравним с длиной волны, выделилась в отдельное, быстро развивающееся направление физики конденсированного состояния. Развитие технологии привело к возможности создания разнообразных типов фотонных структур с необычными оптическими свойствами, возникающими благодаря резонансным эффектам. Исследованию таких структур и посвящена настоящая диссертационная работа. В диссертации рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с наличием в системе нескольких резонансов. Исследованы явления, возникающие при взаимодействии резонансов, имеющих существенно отличные добротности, т.е. при резонансе типа Фано, в том числе наблюдение режима невидимости; режима взаимодействия двух резонансов в субволновом дисковом резонаторе, приводящего к формированию

высокодобротных мод. Решение этих задач обуславливает безусловную **актуальность** диссертации.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения, и содержит 288 страниц текста. Основные результаты работы изложены в 30 публикациях, включающих статьи в ведущих российских и международных физических журналах (Письма в ЖЭТФ, Физика твердого тела, Nature Photonics, Nature Communications, Physical Review Letters) и три главы в монографиях.

Во **Введении** дан краткий обзор современного состояния исследований в области фотонных кристаллов 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. Список литературы содержит 391 ссылку на статьи.

Первая глава носит вспомогательный характер, где описаны методы расчета фотонных зонных структур (автор использует термин диаграмм, который в литературе применяется в другом смысле. Обычно под зонной диаграммой подразумевается чередование разрешенных и запрещенных зон в пространстве «зонная диаграмма p-n перехода») периодических систем. Рассматривается случай зависимости собственных частот ω от волнового вектора k , в предположении, что волновой вектор принимает действительные значения, и случай, когда рассматривается обратная задача зависимости волнового числа от действительной частоты. В диссертации он назван «методом обратной дисперсии». Адаптацию данного метода для электромагнитных волн диссертант выдвигает в качестве результата диссертации. Оценить оригинальность, полученных результатов, исходя из

текста диссертации представляется не возможным. Собственно «метод обратной дисперсии» оказался не описанным, т.е. повторить и проверить вычисления и почувствовать преимущества данного подхода в отличии, например от изложенного в монографии А. Ярива и П. Юха «ортические волны в кристаллах» Мир 1987) не удастся.

Вторая глава посвящена расчету зонных структур периодических систем, включающих в себя метаматериалы. Под последними понимаются включения резонансно взаимодействующие с проходящей волной. Так как коэффициенты отражения (рассеяния) сильно зависят от частоты, то наблюдаются необычные явления, в том числе появление дополнительных запрещенных зон внутри зонн Бриллюэна.

Результаты численных расчетов сопоставлены с результатами оригинального эксперимента. Результаты эксперимента продемонстрировали существование предсказанных аномалий.

Третья глава посвящена различным электромагнитным резонансным явлениям, которые наблюдаются в режимах слабой и сильной связи. Особое внимание уделяется резонансам типа Ф'ано. Было показано, что известное уже более ста лет резонансное рассеяние Ми в случае рассеяния на однородных высокоиндексных диэлектрических объектах представляет собой каскады резонансов Ф'ано. Интерференция между высокочастотной модой Ми и нерезонансным рассеянием приводит к формированию асимметричных линий в спектрах, которые описываются формулой Фано. Подробно анализируются диаграммы направленности антенны, состоящей из излучателя и сферической частицы с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 16$ (соответствует кремнию на длине волны порядка 600 нм). Спектр рассеяния антенны характеризуется резонансом Фано, у которого параметр асимметрии q зависит от направления излучения. Подбирая параметры антенны определенным образом, можно сформировать в диаграмме направленности выраженный лепесток в направлении вперед или назад.

В **четвертой главе** приведены примеры резонансов Фано, которые возникают благодаря структурному беспорядку. В качестве объекта исследования была выбрана классическая структура – одномерный фотонный кристалл, образованный чередующимися слоями A и B . При увеличении величины беспорядка по ε наблюдается переверт спектра пропускания, т.е. брэгговская стоп-зона превращается в брэгговский пик пропускания. Появление индуцированного беспорядком резонанса Фано наблюдалось экспериментально в спектрах пропускания синтетических опалов. В спектрах пропускания у полосы, связанной с брэгговским рассеянием на слоях (111) ГЦК решетки опала, наблюдались все характерные формы профиля резонанса Фано, включая перевернутую линию.

Пятая глава посвящена резонансным эффектам, наблюдаемым в цилиндрах с высоким значением диэлектрической проницаемости. Как было показано в Главе 3, рассеяние Ми представляет собой каскады резонансов Фано. Важной особенностью резонанса Фано является обращение амплитуды рассеяния на некоторой частоте. В результате рассеяние пропадает и цилиндр становится невидимым стороннему наблюдателю. Такой эффект наблюдался экспериментально в микроволновом диапазоне. В качестве цилиндра была использована горячая дистиллированная вода, залитая в длинную трубку. Яркое интерференционное явление наблюдалось в спектрах рассеяния цилиндров, высота которых сравнима с диаметром. В таких цилиндрах наблюдаются дополнительные резонансы, связанные с трехмерностью объекта. В частности наблюдается формирование стоячей волны между плоскими торцами цилиндра, т.е. резонансы типа Фабри-Перо. Амплитуда рассеяния, имеющую особенности на каждой из частот, можно представить как сумму вкладов от отдельных резонансов. В силу конечных добротностей наблюдается интерференция рассеянных волн, и формируется две гибридные моды: одна с низкой, а другая высокой добротностью. Показано, что в режиме сильной связи мод добротность суперрезонансной

моды достигает значения $Q = 200$ в субволновом резонаторе с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 13$.

В **шестой главе** рассматриваются классические аналоги известных эффектов квантовой электродинамики – эффекта Парселла и лэмбовского сдвига, которые связаны с переходами между квантовыми уровнями из-за взаимодействия с нулевыми флуктуациями электромагнитного поля вакуума. Была исследована система, которая состоит из волновода и расположенного рядом с ним высокодобротного микрорезонатора. Волновод содержит два дефекта (расположенные по разные стороны от микрорезонатора), которые формируют окружение, модифицирующее локальную плотность состояний вблизи микрорезонатора. Классические формулы, полученные на основе метода матриц переноса, с точностью до переобозначений совпадают с формулами квантовой электродинамики, которые учитывают локальную плотность состояний нулевых колебаний вакуума. Это позволило описать эффект Парселла и лэмбовский сдвиг для фотонных мод в терминах интерференции без использования понятия локальная плотность состояний. Также в шестой главе функция Грина, вычисленная методом матриц переноса, используется для описания экспериментальных спектров люминесценции одномерного фотонного кристалла, сформированного чередующимися слоями $a\text{-Si}_{0.5}\text{C}_{0.5}:\text{H}$ и $a\text{-SiO}_2$. В экспериментальных спектрах наблюдалось усиление интенсивности фотолюминесценции на границах брэгговской стоп-зоны, что по всей видимости связано с увеличением плотности состояний на краю разрешенной зоны.

В **Заключении** перечислены основные результаты работы.

Надежность и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Полученные результаты являются результатом детального анализа с использованием современных методов теоретической физики и компьютерного моделирования, экспериментальной проверки.

Научная новизна состоит в обнаружении большого числа новых эффектов, связанных с резонансным рассеянием электромагнитных волн на различных объектах. Необходимо отметить, что несмотря на широкий круг задач, решенных в диссертации М.В. Рыбина, исследование носит цельный и законченный характер. Разделы диссертации объединяются общим подходом, связанным с исследованием эффектов, возникающих из-за резонансного взаимодействия электромагнитных волн со структурой.

К работе имеются и некоторые замечания, которые относятся к оформлению и манере изложения.

1. Для ряда ссылок введена очень непривычная форма цитирования литературы, без указания авторов: сначала идет название статьи, а затем выборочно указывается один из авторов. Имеются опiski, например «Советское радио» написано через «ц».
2. Манера изложения материала отличается от канонического подхода, когда основное внимание уделяется механизму возникновения явления. С точки зрения оппонента слишком большое внимание уделено поиску оригинального названия или неочевидной аналогии. Так как, к сожалению, за этим часто ничего не стоит, то создается впечатление, что это всего лишь элемент рекламы. В качестве примеров можно привести упоминание аналогии с РТ симметричным переходом или с фазовыми переходами. Местами увлечение рекламой мешает понять, что именно в том или ином вопросе сделано диссертантом. Так ссылка на существование эффектов Керкера и Боррманна идет на собственную статью диссертанта. Понятно, что в этой статье об этом говорится, но очевидно, что диссертант не является автором открытия открытий, и не понятно каков вклад диссертанта в изучение этих хорошо известных, явлений. Когда же мы сталкиваемся с менее известными результатами, например, в цикл расчетов в первой главе, то возникают сомнения к оригинальности этих результатов.

Однако следует отметить, что данные замечания не умоляют ценности работы. Результаты изложены последовательно, языком, учитывающим общие тенденцией в требованиях на публикации в центральных физических журналах. Все результаты диссертации несомненно вносят значительный вклад в науку, опубликованы в высокорейтинговых научных журналах. Основное содержание диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, адекватно отражены в автореферате.

Таким образом, считаю, что диссертационная работа М. В. Рыбина «Резонансные эффекты в электромагнитных спектрах фотонных кристаллов и метаматериалов» полностью отвечает критериям пунктов 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней для ученой степени доктора наук, утвержденного постановлением Правительства от 24.09.2013 г. N 842, а ее автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 "Физика конденсированного состояния".

Официальный оппонент, Виноградов Алексей Петрович,

доктор физико-математических наук, профессор, ИТПЭ РАН,

Ижорская ул. 13, г. Москва, 127412, РФ, a-vinogr@yandex.ru

+7(903)1885444, 28.09.2018

Подпись А. П. Виноградова заверяю

Ученый секретарь ИТПЭ РАН,

А. Т. Кунавин

к.ф.-м.н.