

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,
члена-корреспондента РАН, профессора,
директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ им. В.А.
Котельникова РАН)

Никитова Сергея Аполлоновича (адрес: 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7,
телефон: +7 (495) 629 3331, e-mail: nikitov@cplire.ru)

на диссертацию

Рыбина Михаила Валерьевича «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.

Диссертация Михаила Валерьевича Рыбина посвящена изучению резонансных явлений в искусственных структурированных периодических средах – фотонных кристаллах и метаматериалах, а также в отдельных структурных элементах. Создание и исследование искусственно создаваемых сред для управления световыми потоками за последнее тридцатилетие сформировалось в новую бурно развивающуюся область физики конденсированного состояния. В электромагнитных спектрах фотонных структур, а также отдельных структурных элементов, наблюдается целый ряд резонансных эффектов, которые определяют ключевые свойства объектов в различных спектральных интервалах - от радиодиапазона до ультрафиолета. При этом взаимодействие резонансов между собой приводит к появлению новых эффектов, существенно изменяющих частоту резонансов, их добротность, модифицирующих спектральную амплитуду отклика системы, что важно для практических применений. Работы, вошедшие в диссертацию, посвящены решению актуальных задач современной фотоники. Статьи диссертанта хорошо известны научному сообществу, что подтверждается активным цитированием этих публикаций (по данным Web of Science, на момент написания данного отзыва у М.В. Рыбина индекс Хирша $h=15$). Поэтому **актуальность и востребованность** вошедших в диссертацию исследований, а также их **научная и практическая значимость** не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав и заключения. В списке литературы, помимо впечатляющего списка работ автора, вошедших в диссертацию (27 статей, включая статьи в Nature, Nature Photonics, Physical Review Letters, Laser & Photonics Reviews, а также трех глав в монографии) – 392 публикации.

Оценим значимость и новизну результатов М.В. Рыбина исходя из **основных положений, выносимых на защиту.**

В первом положении, выносимом на защиту, предлагается новая концепция фотонных фазовых переходов. Следует отметить, что хотя фотонные кристаллы и метаматериалы представляют собой два разных класса фотонных структур, они имеют много общего, начиная от теоретических методов расчета зонных диаграмм и оптических спектров и заканчивая технологиями, применяемыми для изготовления образцов. Поэтому постановка вопроса о том, как фотонный кристалл приобретает свойства метаматериала, является интересным с фундаментальной точки зрения и важным для практического применения при разработке метаматериалов. Структура приобретает свойства метаматериала, когда запрещенная зона, связанная с локальными резонансами M_i , становится самой низкочастотной запрещенной зоной. В диссертации показано, что при изменении параметров фотонного кристалла (постоянная решетки, диэлектрическая проницаемость образующих элементов) возникает качественное перестроение зонной диаграммы, связанное с отщеплением запрещенной зоны M_i , т.е. появлением у структуры свойств метаматериала. В диссертации при описании перехода фотонной структуры от режима фотонного кристалла к режиму метаматериала применяется терминология фазовых переходов. Диссертант указывает, что эти переходы не относятся к классу термодинамических фазовых переходов. Отчасти, использование такой терминологии можно считать оправданным, поскольку в рамках концепции фотонных фазовых переходов естественным образом была построена фазовая диаграмма «фотонный кристалл – метаматериал» в осях «диэлектрическая проницаемость – отношение радиуса структурного элемента к постоянной решетки».

Второе положение, выносимое на защиту, касается метода вычислений комплексных фотонных зонных диаграмм. Диссертант записал уравнения Максвелла в виде задачи на собственные числа для комплексного волнового числа некоторого оператора, зависящего от частоты и распределения диэлектрической проницаемости. Такая формулировка задачи позволяет быстро находить стандартными методами все значения волнового числа даже в случае фотонных структур, состоящих из материалов с комплексным показателем преломления. Анализ комплексных зонных диаграмм дает возможность отличить метаматериал от фотонного кристалла в случае поглощающих материалов, что соответствует случаю большинства материалов с высоким показателем преломления в оптическом диапазоне.

В третьем положении указано, что резонансное рассеяние Ми в объектах с большим значением диэлектрической проницаемости может быть описано при помощи резонанса Фано. Классическая теория, имеющая столетнюю историю, как оказалось, содержит в себе новую интересную физику. Помимо фундаментального интереса, резонанс Фано имеет несколько важных для практического использования особенностей. Это наличие минимума интенсивности, связанного с деструктивной интерференцией электромагнитных волн, а также быстрая трансформация спектральной линии от минимума к максимуму. В диссертации была продемонстрирована возможность реализации невидимости диэлектрических цилиндров при помощи интерференционного гашения рассеяния Ми в минимуме резонанса Фано.

Четвертое положение относится к резонансам Фано, которые возникают благодаря наличию беспорядка. Обычно предполагается, что беспорядок приводит к деградации наблюдаемых спектроскопических эффектов. В работе М.В. Рыбина теоретически исследованы спектры пропускания одномерного фотонного кристалла, образованного из чередующихся слоев А и В, в котором в одном из слоев флуктуирует значение диэлектрической проницаемости. В результате, рассеяние на отдельных структурных элементах проявляется в виде широкополосного контура Фабри-Перо, который возникает из-за некомпенсированного рассеяния на неупорядоченных слоях. Широкополосный контур интерферирует с узкими брэгговскими резонансами, что наблюдается как появление контура Фано в спектрах пропускания. При увеличении беспорядка интерференция Фано приводит к перевороту брэгговской линии, т.е. брэгговская запрещенная зона становится брэгговским пиком пропускания. М.В. Рыбин экспериментально продемонстрировал, что этот результат имеет достаточно общий характер и справедлив также для трехмерных фотонных структур. В качестве неупорядоченного фотонного кристалла он использовал образец синтетического опала, представляющего собой плотноупакованную ГЦК структуру сферических частиц, пустоты между которыми заполнялись разными прозрачными жидкостями. Естественная неоднородность сферических частиц $\alpha\text{-SiO}_2$ приводила к флуктуации плотности и, в конечном счете, к флуктуации диэлектрической проницаемости. Таким образом, сферические частицы $\alpha\text{-SiO}_2$ играли роль неупорядоченных слоев в теоретически изученной одномерной структуре, а однородная жидкость играла роль упорядоченных слоев. В спектрах пропускания опалов диссертант экспериментально исследовал резонанс Фано, в том числе наблюдал при изменении диэлектрической проницаемости заполнителя трансформацию брэгговской полосы отражения в брэгговский пик пропускания.

Пятое положение относится к наиболее интересному, на мой взгляд, результату диссертационной работы. В последние годы пристальный интерес научного сообщества вызывает исследование связанных состояний в континууме в применении к электромагнитной задаче. Как известно, локализация света находит применение в самых разных областях: нелинейные эффекты, чувствительные датчики, генерация излучения и пр. Для удержания света применяют резонаторы, размеры которых превышают рабочую длину волны. В работе М.В. Рыбина предложен новый метод удержания света в субволновых диэлектрических цилиндрах. В цилиндрах могут возбуждаться как моды Ми, связанные с круглым профилем стенок, так и моды типа Фабри-Перо, возникающие между плоскими торцами резонатора. При изменении аспектного соотношения радиуса цилиндра к его высоте, спектральное положение мод двух типов будет смещаться с разной скоростью. При этом диссертант обратил внимание на режим антипересечения мод, который является признаком сильной связи между состояниями. В области антипересечения образуются гибридизированные моды. «Утекающие хвосты» невзаимодействующих мод в гибридных состояниях интерферируют конструктивно и деструктивно. Деструктивная интерференция утекающих хвостов приводит к локализации электромагнитной энергии и повышению добротности цилиндрического резонатора. Подобный механизм с деструктивной интерференцией хвостов известен в квантовой задаче для электронов, как один из механизмов формирования связанных состояний в континууме. Хотя в диэлектрическом цилиндре не выполняется условие для идеальной деструктивной интерференции, для кремниевого субволнового цилиндра предсказана добротность $Q=200$ для соответствующей моды, что на порядок выше добротности обычных резонансов в цилиндрах с близкими параметрами.

Шестое положение, выносимое на защиту, касается классических аналогов эффекта Парселла и лэмбовского сдвига. В середине XX века открытие этих эффектов оказало огромное влияние на становление квантово-электродинамической теории. Эффект Парселла, т.е. изменение скорости спонтанного излучения за счет модификации окружения, и лэмбовский сдвиг частоты перехода были описаны посредством взаимодействия электронов с проквантованным электромагнитным полем. В своей работе М.В. Рыбин продемонстрировал, что аналогичные изменения происходят и с фотонными модами микрорезонаторов. В диссертации показано, что величины фактора Парселла для обоих случаев совпадают, а лэмбовский сдвиг отличается в два раза. Однако электродинамическая задача может быть описана и без привлечения таких понятий квантовой электродинамики как локальная плотность состояний и др. Диссертант показал,

что эффект Парселла и лэмбовский сдвиг могут быть описаны на интуитивно понятном языке интерференции волн. Понимание эффекта Парселла как интерференционного явления позволило описать простыми методами экспериментально наблюдаемую модификацию спектров люминесценции на границах стоп-зон одномерных фотонных кристаллов.

Из сказанного ясно, что актуальность темы диссертационной работы М.В. Рыбина и ее новизна не вызывают сомнения. Достоверность выводов диссертации определяется согласованностью результатов теоретических расчетов, проведенных разными методами, а также соответствием с экспериментальными результатами.

По диссертационной работе М.В. Рыбина имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. Во второй главе диссертант, описывая переход от фотонного кристалла к метаматериалам, использует терминологию фазовых переходов. В сообществе, занимающемся фотонными кристаллами и метаматериалами, принято считать, что такой переход происходит постепенно. Т.е. при изменении параметров фотонной структуры в режиме метаматериала характерные свойства плавно деградируют, пока структура не станет обычным фотонным кристаллом. В диссертации граница фазового перехода определяется исключительно на анализе вида зонных диаграмм. Напомним, что в фотонных кристаллах и метаматериалах основные свойства определяются фотонной подсистемой. Наблюдается ли при пересечении границы фаз качественная перестройка электромагнитного поля в фотонной структуре, что позволяло бы использовать терминологию фазовых переходов? Без демонстрации подобных результатов, основываясь лишь на анализе перестроения зонных диаграмм у термина «фазовый переход» лучше было бы убрать первую часть, т.е. оставив просто «переход».

2. В четвертой главе рассматривается распространение волн по неупорядоченной одномерной структуре. На рисунке 48 на стр. 150 диссертации показано, что пропускание света через такую структуру выходит на насыщение при числе ячеек более 10,000. С другой стороны в монографии Ping Sheng “Introduction to Wave Scattering, Localization and Mesoscopic Phenomena” 2ed (2006), на стр. 210 обсуждается локализация в одномерных системах. В частности в монографии указано, что Фурстенберг доказал, что произведение случайных матриц переноса всегда приводит к локализации. Пинг Шенг замечает, что случайные матрицы переноса не всегда соответствуют случайным средам, приводя пример, когда на некоторой частоте пропускание через постоянный слой равно единице, и

тогда не важна длина второго слоя. Кроме этого, приводился пример пропускания через бинарную структуру под углом Брюстера. В случае, описанном в диссертации, структура имеет существенный беспорядок, тем не менее, локализация волн отсутствует на брэгговской частоте. Не является ли это следствием численной неустойчивости метода матриц переноса при расчете структур более чем 10,000 ячеек?

3. В шестой главе описывается эффект невидимости диэлектрических цилиндров на частоте минимума резонанса Фано. В предыдущем замечании упоминалось, что если структурные элементы прозрачны, например, из-за эффекта Брюстера, то вся структура будет прозрачной. Если составить периодическую (или неупорядоченную) структуру из одинаковых цилиндров, то казалось бы, должен наблюдаться пик в спектрах пропускания. Однако, на спектрах пропускания, приведенных на рис. 19, стр. 73 диссертации, пика на низкочастотном крыле резонанса Ми TE₁₁ не наблюдается. Отсутствие пика четко видно на рис. 19о.

Указанные замечания ни в коем случае не снижают степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих отечественных и самых высокорейтинговых зарубежных журналах, неоднократно докладывались на представительных международных и национальных конференциях и получили высокую оценку специалистов. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает ее содержание.

В целом, диссертационная работа «Резонансные эффекты в электромагнитных спектрах фотонных кристаллов и метаматериалов» представляет собой законченное научное исследование, выполненное на самом высоком уровне, и соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее автор, Михаил Валерьевич Рыбин, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, член-корр. РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова

С. А. Никитов

Подпись С.А. Никитова заверяю

Ученый секретарь ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

И.И. Чусов