



В специализированный совет
Д 002.205.01

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого **Фирсова Дмитрия Анатольевича**

о диссертационной работе **Рыбина Михаила Валерьевича** "Резонансные эффекты в электромагнитных спектрах фотонных кристаллов и метаматериалов", представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Актуальность. Интенсивное развитие фотоники, имеющей дело с фотонами, как носителями информации, требует детального исследования свойств структур, изучаемых и используемых в этой области знаний. Перспективными структурами фотоники, открывающими возможности наблюдения совершенно новых эффектов, являются фотонные кристаллы и метаматериалы. Определенные проблемы метаматериалов с металлическими структурными элементами, возникающие при продвижении в область высоких частот, стимулируют интерес к изучению фотонных диэлектрических структур. Именно такие структуры являются объектом исследования настоящей работы. Обилие резонансных явлений, которые можно наблюдать в фотонных кристаллах, метаматериалах и в их структурных элементах, определяет потребность в классификации таких явлений, а также в их теоретическом и экспериментальном изучении. Решению этих задач посвящено настоящее диссертационное исследование. Таким образом, настоящая работа восполняет пробелы в физике резонансных явлений в фотонных кристаллах и метаматериалах, в связи с этим тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной, а сама работа представляется необходимой и своевременной.

Новизна и достоверность результатов. В работе получено значительное количество новых научных результатов. Укажем лишь некоторые из них, по нашему мнению, наиболее важные и интересные.

В работе реализован т.н. "*метод обратной дисперсии*" для расчета комплексных зонных диаграмм фотонных структур, заключающийся в расчете зависимости волнового вектора волны от ее частоты. Методическое значение этого метода высоко, поскольку он, во-первых, позволяет учитывать произвольные частотные зависимости диэлектрической проницаемости, что важно для полупроводников и диэлектриков в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, и, во-вторых, позволяет находить эванесцентные решения с комплексным волновым вектором.

Также несомненно большое методическое и научное значение имеет сформулированная автором концепция фазовых переходов "фотонный кристалл - метаматериал". Такой фазовый переход исследован в работе теоретически и экспериментально. Возникновение перехода определяется путем анализа положения второй дисперсионной ветви на зонной диаграмме фотонной структуры. Для экспериментальной проверки выполненных расчетов автором был использован оригинальный подход, основанный на высоких значениях диэлектрической проницаемости воды в гигагерцовом диапазоне, которыми можно управлять, изменяя температуру. На основе такого подхода была изготовлена фотонная структура для микроволнового диапазона с плавно меняющимися параметрами и на эксперименте продемонстрирован изучаемый фазовый переход.

Значительно внимание в работе уделено проявлению в фотонных структурах резонансных свойств, связанных с резонансами Фано, наблюдаемыми в различных физических системах. В работе автор успешно проводит систематизацию различных резонансных эффектов, что позволяет корректно интерпретировать полученные экспериментальные результаты. Показано, что резонансное рассеяние Ми на объектах с большим значением показателя преломления может быть представлено в виде каскадов резонансов Фано. Весьма интересными являются результаты по резонансу Фано, вызванному структурным беспорядком в фотонных кристаллах. Было показано, что введение беспорядка может приводить не к усилению локализации света, а к его делокализации. Явление объясняется интерференцией Фано между широкополосным фоновым рассеянием, связанным с беспорядком, и блоховскими волнами. В определенных условиях брэгговская полоса отражения может даже превратиться в брэгговский пик пропускания. Экспериментально эти результаты были продемонстрированы при изучении спектров пропускания синтетических опалов. Автору удалось экспериментально наблюдать все характерные профили резонанса Фано, а также превращение брэгговской стоп-зоны в полосу брэгговского пропускания.

В настоящей работе автору удалось продвинуться в решении важной фундаментальной задачи эффективного удержания электромагнитной энергии в локализованных модах. С этой целью был использован подход, связанный с т.н. связанными состояниями в континууме. Было обнаружено, что субволновые высокоиндексные диэлектрические резонаторы (цилиндры) могут поддерживать суперрезонансные моды с высокой добротностью

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. В работе построена теория исследуемых явлений и на этой основе выполнены расчеты основных характеристик фотонных структур. В качестве модельных структур автором выбирались объекты (например, цилиндры), позволяющие получить аналитические решения. Результаты расчетов, полученные в работе, хорошо согласуются с результатами экспериментов в тех случаях, когда такие экспериментальные результаты имеются. Примерами могут служить исследованные фазовые переходы фотонный кристалл – метаматериал, резонансы Фано в синтетических опалах, экспериментальные исследования микроволнового прототипа диэлектрической антенны на основе резонанса Фано с параметрами, определенными из результатов численного моделирования.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она частично отражена в предыдущих разделах отзыва. Следует отметить фундаментальный характер разработанных автором теоретических подходов. К важному и интересному практическому результату следует отнести первое экспериментальное наблюдение эффекта невидимости микроскопического объекта и переключение между видимым и невидимым состояниями изменением диэлектрической проницаемости. Обнаруженный эффект Парселла для фотонных мод позволяет управлять добротностью микрорезонаторов с помощью внешних элементов. Практическая значимость результатов по резонансу Фано в фотонных кристаллах с беспорядком определяется присутствием в той или иной степени такого беспорядка в реальных структурах. Ряд эффектов, описанных в настоящей работе, еще не обнаружен на эксперименте, что направляет и стимулирует экспериментальные исследования в области фотоники.

Замечания и вопросы.

1. В главе, посвященной изучению фазового перехода "фотонный кристалл – метаматериал" рассматриваются зонные диаграммы бесконечных структур, при этом в эксперименте используется конечная структура, состоящая только из 50 цилиндров. Как проявляются конечные границы образов на наблюдаемые эффекты?

2. В спектрах пропускания фотонного кристалла в отсутствие беспорядка (рис. 46) наблюдаются осцилляции вблизи брэгговской линии. В структурах с беспорядком осцилляции отсутствуют. С чем связано исчезновение осцилляций в спектрах пропускания?

3. Одним из результатов работы является наблюдение эффекта невидимости диэлектрического цилиндра. При этом рассматривается только нормальное падение излучения относительно оси цилиндра. Возникают ли частотные окна невидимости при произвольном падении света на цилиндр.

4. В диссертации вводится понятие суперрезонансной моды. Было бы желательно ввести критерий, указывающий, при какой добротности мода может быть названа суперрезонансной.

Указанные вопросы и замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, большой объем проведенных исследований, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Несомненно, эта работа открывает новые перспективы дальнейшего исследования резонансных эффектов в фотонных кристаллах и метаматериалах. Совокупность работ автора, опубликованных в ведущих мировых научных журналах, представляет собой крупное достижение в области фотоники, имеющее большое научное и прикладное значение. Диссертация имеет четкую структуру, основные результаты четко сформулированы.

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

Таким образом, диссертация Рыбина Михаила Валерьевича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а он сам, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени.

Заведующий кафедрой физики полупроводников
и наноэлектроники, профессор, доктор физ.-мат. наук
195251, С.-Петербург, Политехническая ул., д. 29
E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru
Тел.: +7-921-798-8231

Дмитрий Анатольевич Фирсов

01.10.2018