

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Шишкина Ивана Ивановича** «Синтез и исследование фотонных структур и метаматериалов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации

Наступающий 2015-й год объявлен международным годом света и световых технологий. Возможность управления световыми потоками представляет собой нетривиальную задачу, требующую новых решений в самых различных областях, включая оптическую передачу данных и обработку информации. Концепции фотонных кристаллов и метаматериалов явились основой для технологов, экспериментаторов и теоретиков при изучении взаимодействия электромагнитных волн с пространственно-периодическими структурами и разработке новых приборов.

Разработка и широкое использование прогрессивных технологий синтеза трехмерных структур с периодом решетки, сопоставимым с длиной волны инфракрасного и видимого света, будет определять технологический прогресс во многих областях человеческой деятельности в ближайшие десятилетия. Одной из таких технологий является трехмерная лазерная литография, которая позволяет создавать нано-, микро- и макроструктуры практически произвольной формы для фотоники, микрофлюидики, микромеханики и медицины. Метод основан на нелинейном эффекте двухфотонного поглощения и дальнейшей полимеризации фоторезистивного материала при его освещении фемтосекундным лазером. Для управления прибором создается программа, составной частью которой является математическая трехмерная модель синтезируемого объекта. В соответствии с этой моделью фокус лазерного луча перемещается по трем пространственным координатам в объеме фоторезиста, «вырисовывая» создаваемый объект. Пороговый характер двухфотонного поглощения позволяет реализовать режимы, при которых порог достигается лишь в малой области сфокусированного лазерного луча, что позволяет создавать объекты с разрешением порядка 100 нм в латеральной плоскости.

И.И.Шишкин впервые в России освоил эту уникальную технологию, что потребовало от него разносторонних знаний и навыков в оптике, компьютерном моделировании, прикладной химии. Результаты, полученные И.И.Шишкиным и опубликованные в Российских журналах, должны послужить импульсом к развитию этой технологии в нашей стране. Все это свидетельствует о том, что работу И.И.Шишкина следует признать актуальной.

Научная и практическая значимость работы.

Практическая значимость работы непосредственно следует из Глав 2 и 3, посвященных методике трехмерной лазерной литографии (Глава 2) и описанию образцов фотонных структур, изготовленных автором (Глава 3).

Научная значимость диссертации определяется рядом результатов, полученных И.И.Шишкиным. Во-первых, в работе впервые представлен полный набор экспериментальных данных, характеризующих явление многоволновой брэгговской дифракции в синтетических опалах, которые можно причислить к классическим объектам для исследования оптических эффектов в фотонных кристаллах (Глава 4). Явление антипересечения фотонных стоп-зон, характеризующее режим многоволновой брэгговской дифракции, наблюдалось как в спектрах пропускания, так и в спектрах дифракции на системе плоскостей (111) и, впервые, на системе неростовых плоскостей (-111). Этот результат был достигнут за счет использования оригинального держателя образца, состоящего из двух кварцевых полусфер. Такой держатель позволил решить одновременно ряд проблем – устранить полное внутреннее отражение в пленке опала, вывести дифрагированные под разными углами лучи без преломления на границах держателя, сохранять угол падения луча на образец независимо от ориентации образца с держателем.

Во-вторых, научная значимость работы И.И.Шишкина определяется результатами исследования фотолюминесценции в системе метаматериал-квантовые точки. В работе было продемонстрировано, что существование мультипольных магнитных компонент разомкнутых кольцевых резонаторов усиливает фотолюминесценцию квантовых точек, связанных с метаматериалом. Статья с участием И.И.Шишкина, опубликованная в престижном журнале Nature Communications, является одной из первых работ,

в которых демонстрируется вклад магнитных моментов высших порядков в спектры рассеяния сложных нано- и микро-объектов.

Обоснованность научных положений и выводов.

Защищаемые И.И.Шишкиным научные положения и выводы достаточно полно обоснованы комплексом экспериментальных данных и теоретических расчетов. Автор приводит четкие изображения фотонных структур, синтезированные методом лазерной литографии (Главы 2 и 3). Изображения получены методом сканирующей электронной микроскопии, на изображениях приведены масштабные линейки, таким образом, не возникает сомнений в размерах, форме и качестве изготовленных структур.

Экспериментальные результаты, представленные в Главах 4 и 5, можно назвать комплексными, т.к. они получены разными методами. Оптические спектры опалов (Глава 4) исследовались как в режиме пропускания, так и в режиме отражения, результаты полностью коррелируют. Спектры системы метаматериал - квантовые точки (Глава 5) исследовались в режиме пропускания, снимались карты люминесценции, исследовались спектры затухания люминесценции.

Отдельно следует отметить теоретическую поддержку экспериментальной работы соавторами И.И.Шишкина. Соответствующий материал выделен в приложения с указанием теоретиков, проводивших расчеты – М.В.Рыбина (Приложение А, «Расчет многоволновой брэгговской дифракции») и М.Декера (Приложение Б, «Модельное описание люминесценции в системе метаматериал-квантовые точки»). Все экспериментальные результаты И.И.Шишкина находятся в хорошем соответствии с результатами расчетов.

Перечислим **замечания**, которые следует сделать по диссертационной работе И.И.Шишкина:

1. В главе 3 приводятся изображения кристаллов типа «поленница», синтезированных методом лазерной литографии. Изображения получены методом сканирующей электронной микроскопии. Автор приводит изображения образцов, полученные в одной геометрии («вид сверху»), что не позволяет оценить толщину образца, хотя изображения кристаллов типа «яблоновит» представлены в различных проекциях.

2. В диссертации методом лазерной литографии был синтезирован целый ряд фотонных кристаллов, в том числе уникальных. Была теоретически рассчитана зонная структура этих кристаллов. К сожалению, автор не проводил исследование оптических спектров синтезированных образцов. Такие измерения придали бы работе большую завершенность, хочется пожелать автору выполнить спектроскопические измерения в ближайшем будущем.
3. На рис.4.10 приведены результаты аппроксимации экспериментальных данных по многоволновой брэгговской дифракции в области антипересечения. Автор отсылает читателя к ссылке [156], не разъясняя метода аппроксимации, не приводя соответствующего аналитического выражения и не указывая полученные параметры аппроксимации.
4. В главе 5 на рис.5.5. приведены спектры пропускания трех образцов А, В и С. Однако в дальнейшем спектры и временные зависимости затухания люминесценции представлены на рис.5.6 только для образца А. Выполнялись ли аналогичные исследования для образцов В и С, и если выполнялись, то каковы их результаты?
5. Автор не указывает число резонаторов и ориентировочное число квантовых точек, расположенных на картируемых областях на рис.5.6(a,b). Это затрудняет восприятие и оценку результатов эксперимента.

Конечно, ни одна работа такого объема не обходится без опечаток и ошибок. Так например на стр. 21, в подписи к Рис. 1.8 написано «Микориглы» вместо « Микроиглы». На стр. 30, 7 строка сверху написано «fсс-структуры» вместо «ГЦК структуры». К счастью опечаток совсем немного, и они совсем не портят общего хорошего впечатления от работы и языка, которым она написана.

Я также хочу остановиться на названии диссертации И.И.Шишкина «Синтез и исследование фотонных структур и метаматериалов». С одной стороны, такое название вполне подходит для докторской диссертации, с другой стороны в диссертационной работе исследован очень широкий круг объектов (фотонные кристаллы, фотонное стекло, метаматериалы, квантовые точки) синтезированных разными методами, частично – И.И.Шишкиным, частично – его соавторами. Поэтому отразить в названии диссертации все эти

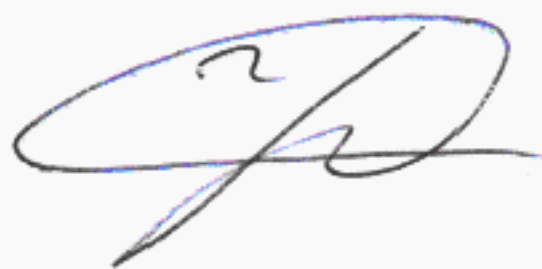
нюансы представляется крайне затруднительным и название, предложенной автором, в данном случае можно считать приемлемым.

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

Результаты диссертации опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Отдельно хотелось бы отметить публикацию в высокорейтинговом журнале Nature Communications. И.И.Шишкин неоднократно докладывал результаты своей работы на представительных Международных и Национальных конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа И.И.Шишкина «Синтез и исследование фотонных структур и метаматериалов» представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в Положении о порядке присуждения ученых степеней, утвержденном Правительством Российской Федерации в Постановлении N 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор – Шишкин Иван Иванович несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
зав. отделом исследования конденсированного состояния,
ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова»
НИЦ «Курчатовский институт»



С.В.Григорьев
12 января 2015 г.

