

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Б. И. Афиногенова
«Фемтосекундная и нелинейно-оптическая спектроскопия фотонных кристаллов в
присутствии таммовских плазмон-поляритонов», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.21 - лазерная физика

Диссертационная работа Б.И. Афиногенова посвящена исследованию оптических и нелинейно-оптических свойств таммовских плазмон-поляритонов в системах фотонный кристалл – металлическая плёнка. Таммовские плазмон поляритоны (ТПП) являются локализованными состояниями электромагнитного поля и активно изучаются на протяжении последних десяти лет.

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав и Заключения. Список цитированной литературы содержит 119 ссылок. Материал изложен на страницах с 1й по 125ю, а также на страницах 140 – 142 Приложения.

Во Введении дана общая характеристика работы, обоснован выбор темы Диссертации и указаны причины интереса к изучению оптических свойств ТПП. Кроме того, во Введении сформулирована актуальность работы, её научная новизна и практическая значимость, приведён перечень положений, выносимых на защиту, с указанием личного вклада автора Диссертации. Даны сведения об апробации работы на ведущих всероссийских и международных конференциях, а также в виде публикаций в журналах, входящих в международные базы Web of Science, Scopus.

Глава I содержит обзор литературы по теме диссертации. В начале обзора приводится аналогия между задачами из квантовой механики и оптики и объясняется происхождение термина «таммовский плазмон-поляритон». Далее следует информация об оптических свойствах ТПП и их гибридных состояний. Вторая часть первой главы посвящена обзору оптических методик детектирования сверхбыстрых процессов в твёрдых телах и наноструктурах, а также некоторым интересным результатам, полученным с их помощью. Третья часть содержит информацию о механизмах усиления нелинейно-оптических эффектов локализованными состояниями электромагнитного поля. Обзор написан логично и структурированно, содержит всю информацию, важную для понимания дальнейшего текста Диссертации, и показывает глубокое знание Б.И. Афиногеновым областей исследования по теме Диссертации. В конце Главы I приведен

перечень выводов, сделанных автором из литературы, а также сформулированы цели и задачи исследования в рамках диссертационной работы.

Глава II посвящена исследованию фемтосекундной динамики ТПП с помощью кросс-корреляционных методов и методики «накачка-зонд». В начале приводятся характеристики образцов, представляющих собой одномерные фотонные кристаллы (брэгговские отражатели), покрытые полупрозрачными плёнками металлов (золото и серебро). Показаны результаты спектроскопии коэффициентов отражения и пропускания, а также результаты численных расчётов методом матриц распространения, в хорошей степени совпадающие с экспериментом.

Вторая часть Главы II содержит информацию об изучении временной динамики релаксации ТПП методом измерения кросс-корреляционных функций (ККФ) лазерных импульсов, отражённых от образцов. Для данных исследований использовалась установка, детальное описание которой приведено в тексте Диссертации. Установка позволяла измерять ККФ импульсов с центральной длиной волны в диапазоне 760 – 810 нм, отражённых от образцов под углами от 7 до 45 градусов, с временным разрешением 1 фс. Высокая точность измерений обуславливалась полной автоматизацией установки и использованием схем синхронного детектирования. Автором показано, что при отражении импульса длительностью 50 фс от образца возникает удлинение заднего фронта ККФ, связанное с переизлучением света из моды ТПП. Из анализа затянутого заднего фронта ККФ делается вывод о времени жизни ТПП, составляющем несколько десятков фемтосекунд. Подобные измерения при различных углах падения и поляризации фемтосекундных импульсов показали, что время жизни ТПП существенно зависит от вышеуказанных параметров и может изменяться в пределах от 21 до 42 фс. Были также проведены численные расчёты методом конечных разностей во временной области, позволяющие по известной ККФ восстановить временной профиль электрического поля импульса, отраженного от образца. Согласие численных расчётов и экспериментальных результатов говорит в поддержку точности измерений и правильности интерпретации полученных результатов.

Четвертая часть второй главы посвящена исследованию влияния возбуждения ТПП на фемтосекундную динамику коэффициента отражения образца фотонный кристалл – металлическая плёнка. Известно, что взаимодействие лазерного излучения с электронной подсистемой металла приводит к модуляции диэлектрической проницаемости металла (ДП). Как было показано в литературе, длина волны возбуждения ТПП зависит от действительной части ДП, а ширина резонансного контура – от мнимой части ДП. Таким

образом, при модуляции ДП металла возникает спектральный сдвиг и изменение ширины резонанса ТПП. Для изучения данного эффекта Автором использовалась методика фемтосекундной спектроскопии коэффициента отражения образца фотонный кристалл – металлическая плёнка в схеме «накачка-зонд». Схема была реализована в экспериментальной установке, подробно описанной в тексте Диссертации. Автоматизация установки и использование схемы синхронного детектирования с высокой частотой модуляции, а также использование кросс-поляризационной схемы позволило добиться точности измерения относительного изменения коэффициента отражения на уровне 10^{-6} . В спектре относительного изменения коэффициента отражения образца наблюдается асимметричный резонанс, связанный со спектральным сдвигом контура ТПП.

Глава III содержит обширный материал по нелинейно-оптической спектроскопии образцов при возбуждении в них ТПП. В работе рассмотрены три случая усиления генерации оптических гармоник. Первый соответствует условиям локализации электромагнитного поля излучения накачки на границе раздела фотонный кристалл – металл из-за возбуждения ТПП. Поскольку интенсивность второй оптической гармоники (ВГ) пропорциональна квадрату интенсивности излучения накачки, локализация поля приводит к резонансному усилению интенсивности ВГ при выполнении условий возбуждения ТПП. Автором была проведена частотная и угловая спектроскопия интенсивности ВГ, генерированной в образце и в референсной металлической плёнке и показано, что возбуждение ТПП в образце приводит к увеличению интенсивности ВГ в 200 раз. Приведённые результаты численного расчёта методом матриц распространения с учётом нелинейности слоёв совпадают с экспериментальными данными с очень хорошей точностью.

Второй случай усиления генерации ВГ в образце соответствует увеличению фактора Парселла на частоте ВГ при условии её совпадения с резонансной частотой ТПП. Данный случай интересен тем, что накачка является нерезонансной, то есть в образце не возникает локализации электромагнитного поля излучения накачки. В то же время, эффективность генерации ВГ увеличивается на собственных частотах образца, в частности на частоте возбуждения ТПП. Эффект аналогичен эффекту Парселла, описывающему увеличение вероятности спонтанного излучения у системы, помещённой в резонатор. В данном случае излучающей системой является тонкий приповерхностный слой металла на границе раздела металл – фотонный кристалла, а в качестве резонатора выступает образец, который обеспечивает с одной стороны металлическое отражение, а с другой

стороны – брэгговское. Результаты эксперимента в этом случае также сравниваются с результатами расчёта методом матриц распространения.

Третий случай, описанный в Главе III, соответствует комбинации двух, описанных выше. За счёт специальной геометрии фотонного кристалла, излучение накачки оказывается в резонансе с фундаментальной модой ТПП, а излучение третьей оптической гармоники (ТГ) – в резонансе с высшей модой ТПП. Таким образом интенсивность ТГ оказывается усиленной за счёт обоих вышеуказанных механизмов. Приведены результаты угловой зависимости интенсивности ТГ для различных комбинаций поляризаций излучений накачки и ТГ, показано, что максимальный нелинейно-оптический отклик наблюдается для *pp*-комбинации поляризаций. Кроме того, вид угловой зависимости интенсивности ТГ и амплитуда пика, связанного с ТПП, зависит от ориентации образца относительно падающего излучения. Данный эффект по-видимому связан с разным типом пространственного распределения электромагнитного поля в образце при различных ориентациях и является интересным с точки зрения управления эффективностью генерации оптической гармоники.

Глава IV Диссертации посвящена изучению гибридного состояния ТПП и поверхностного плазмона (ПП). Несмотря на простоту экспериментальной установки, полученные результаты являются крайне наглядными и важными с точки зрения возможности управления дисперсионной кривой ПП. Метод частотно-угловой спектроскопии коэффициента отражения, использованный автором, позволяет напрямую визуализировать дисперсионные законы таммовского и поверхностного плазмонов. Показано, что возбуждение гибридного состояния приводит к расталкиванию дисперсионных кривых ТПП и ПП, причём последняя смещается в длинноволновую область спектра на 80 нм по сравнению с дисперсионной кривой ПП, возбуждающегося независимо от ТПП. Численные расчёты показывают, что величиной смещения можно управлять, изменяя толщину металлической плёнки, причём при больших толщинах последней (около 70 нм) гибридизация не возникает, то есть ТПП и ПП возбуждаются в образце независимо.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. На мой взгляд, во вступительной части работы можно было уделить больше внимания тому, чтобы указать в чем отличия (преимущества/недостатки) систем, поддерживающих Таммовские плазмон-поляритоны по сравнению с плазмонными наноструктурами или микрорезонаторами с точки зрения их нелинейных оптических свойств.

2. На мой взгляд, разделение причин усиления генерации второй гармоники на обусловленные эффектом Парселла и усилением локального поля является несколько искусственно в случае пространственно-распределенных источников сигнала второй гармоники (объемного нелинейного кристалла). В этом случае, оба эффекта являются взаимосвязными и трудно разделимыми. Учет обоих эффектов в этом случае правильней проводить в рамках формализма функций Грина.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы Б.И. Афиногенова. Научные результаты и выводы диссертации детально обоснованы. Достоверность и новизна научных положений не вызывает сомнения. В тексте диссертации автор явно выделяет его личный вклад в получении научных результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих зарубежных журналах и неоднократно докладывались на международных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

На основании вышесказанного считаю, что диссертация Б.И. Афиногенова является оригинальным научным трудом, результаты которого имеют как научное, так и практическое значение. Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК России для диссертаций, представляемых на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика, а ее автор, Борис Игоревич Афиногенов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

К.ф.-м.н., Доцент кафедры Нанопотоники и Метаматериалов,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Биржевая линия 14, 199034
Тел. +79052195432
e-mail: i.iorsh@metalab.ifmo.ru

Иорш Иван Владимирович



С.А. Смирнов