

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию П.П. Вабищевич
**«Фемтосекундная динамика оптических, магнитооптических
и нелинейно-оптических эффектов в плазмонных кристаллах
и кремниевых наноструктурах с резонансами Ми»,**
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.21 - лазерная физика

Диссертационная работа П.П. Вабищевич посвящена одному из актуальных направлений в области лазерной физики и нанофотоники, а именно, исследованию оптических, магнитооптических и нелинейно-оптических эффектов в металлических и диэлектрических наноструктурах с помощью ультракоротких лазерных импульсов.

Диссертация состоит из «Введения», 4-х глав и «Заключения». Список литературы содержит 172 ссылки. Материал изложен на страницах с 1-ой по 150.

Во «Введении» обоснована актуальность решаемых в диссертации задач, сформулированы основные цели работы, описана ее научная новизна, указаны причины интереса к оптическим, магнитооптическим и нелинейно-оптическим эффектам в металлических и диэлектрических наноструктурах и отмечена практическая значимость работы.

Во «Введении» также дана общая характеристика диссертационной работы, приводится перечень результатов работы выносимых на защиту и их новизна, констатация роли автора, которая является определяющей в получении результатов по экспериментальному исследованию по теме диссертационной работы. Приводится также перечень публикаций и докладов автора по теме диссертации. Постановка задач и полученные результаты описаны во «Введении» логично и понятно.

Глава I посвящена обзору литературы по теме диссертации. Данная глава диссертации показывает глубокое знание П.П. Вабищевич областей исследований по теме диссертации, таких как: (1) поверхностные плазмон-поляритоны на границе раздела металл-диэлектрик, (2) магнитооптические эффекты, индуцированные возбуждением локальных плазмонов и (3) эффекты, обеспечивающие полностью оптическое переключение. Данная глава диссертации также обосновывает тщательный выбор объектов исследований и адекватный выбор экспериментальной техники для последующих экспериментов.

Глава II посвящена исследованию преобразования огибающей фемтосекундных лазерных импульсов при их отражении от плазмонных кристаллов. Можно выделить две группы основных результатов данной Главы диссертации. Ими являются: (1) детальное изучение динамики поверхностных пламон-поляритонов в плазмонных кристаллах по спектральной зависимости изменения огибающей лазерных фемтосекундных импульсов при их отражении от поверхности плазмонных кристаллов и (2) развитие эффективного метода формирования формы фемтосекундных импульсов при их отражении от плазмонных кристаллов.

Исследуемым плазмонным кристаллом являлась одномерная решетка, полученная из DVD-диска. Проведена значительная экспериментальная работа по приготовлению и характеристике плазмонного кристалла: анализ состава поверхности образца методом просвечивающей электронной микроскопии, характеристика профиля поверхности образца методами электронной микроскопии и атомной микроскопии, измерение периода одномерной решетки плазмонного кристалла. Для проведения исследований по преобразованию огибающей фемтосекундного лазерного импульса при его отражении от плазмонных кристаллов была создана оптическая установка, позволившая проведение спектроскопии коэффициента отражения и измерение угловой зависимости спектра отражения в видимом диапазоне оптического излучения. Представлено детальное описание экспериментальной установки для измерения изменения фемтосекундных импульсов при их отражении от поверхности плазмонных кристаллов. Установка позволила измерить спектры коэффициента отражения для различных углов падения излучения на образец в спектральном диапазоне 400-800 нм.

Зарегистрированные в эксперименте резонансные контуры спектральных линий коэффициента отражения соответствовали возбуждению поверхностных плазмонов на границе раздела воздух-металл образца. Проведенное в Диссертации сравнение экспериментально полученного положения резонанса с рассчитанным, подтвердили плазмонную природу резонансных особенностей в спектрах отражения. Проведены измерения форм контуров резонансов и рассчитано время затухания поверхностного плазмона из значений ширин резонансов.

Данные измерения послужили основой для изучения динамики поверхностных пламон-поляритонов в плазмонных кристаллах по спектральной зависимости изменения огибающей лазерных фемтосекундных импульсов при их отражении от поверхности плазмонных кристаллов. В ходе выполнения экспериментальных исследований обнаружена временная модификация фемтосекундных лазерных импульсов при их отражении от образцов одномерных серебряных решеток при условии резонансного

возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов. В тексте Диссертации приводится подробное описание методики измерения, анализ результатов и теоретическое моделирование процесса отражения лазерного импульса.

Следует отметить, что в литературе неоднократно отмечалась сложность задачи измерения сверхбыстрого, на фемтосекундной временной шкале, оптического поля, поскольку полное знание параметров лазерного импульса $E(t)$ может быть достигнуто только путем измерения корреляционных функций всех порядков $G_n(\tau)$ [L. Sarger and J. Oberlé, *Femtosecond laser pulses: Principles and Experiments*. Claude Rulliere (Ed.), Springer, 2005]. Экспериментально корреляционные функции высших порядков могут быть получены с использованием многофотонных процессов. На практике, как правило, ограничиваются измерениями автокорреляционной функции второго порядка и последующим анализом результатов в предположении априорного знания вида огибающей функции лазерного импульса. Метод по измерению корреляционной функции второго порядка дает ограниченную информацию о длительности импульса и его форме, и только корреляции более высоких порядков чувствительны к асимметрии импульса [E. I. Blount and J. R. Klauder, *J. Appl. Phys.* **40**, 2874 (1969); D. H. Auston, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 249 (1971)]. В Диссертации использовалась методика получения информации о модификации формы отраженного от плазмонного кристалла лазерного импульса на основе кросс-корреляционной функции только второго порядка. Возникает вопрос о мере потери информации в модификации формы отраженного лазерного импульса из-за присущего данному методу ограничений.

Использование отражения фемтосекундного импульса от плазмонного кристалла представляется интересной и заслуживающей исследования физической задачей. В то же время представляется, что данная схема могла бы быть положена в основу потенциального практического устройства для детерминированного изменения формы лазерного импульса. Представляется, что обсуждение данного вопроса в тексте Диссертации могло бы быть целесообразным.

Глава III диссертации посвящена исследованию плазмонных эффектов в материалах, обладающих ферромагнитными свойствами. Исследовалась временная динамика магнитооптического эффекта Керра в магнитоплазмонных наноструктурах. Решалась задача исследования временной зависимости экваториального магнитооптического эффекта Керра в магнитоплазмонных кристаллах, связанная с возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов. Исследование в данной главе строится на основе более ранних работ, в которых отмечалось, что наличие резонансных

особенностей в спектре отражения магнитоплазмонных кристаллов приводит к усилению магнитооптического эффекта Керра по сравнению с пленками из этого же металла.

Экспериментальные исследования проводились на одномерных субволновых решетках на железной нанопленке. Предварительно были выполнены исследования по линейной спектроскопии коэффициента отражения от образцов магнитоплазмонных кристаллов. В спектрах коэффициента отражения было обнаружено два резонанса, положение которых соответствует возбуждению поверхностных плазмон-поляритонов на границе железо-воздух. Следующим шагом исследований в данной главе явилось измерение экваториального магнитооптического эффекта Керра для образцов магнитоплазмонных кристаллов. Для этого использовался динамический метод измерений, при котором образец находился в переменном магнитном поле и изменение интенсивности при намагничивании образца, регистрировалось методом синхронного детектирования.

В спектре экваториального магнитооптического эффекта Керра были обнаружены резонансные особенности, положение которых коррелировало с положением резонансов поверхностных плазмон-поляритонов. В эксперименте убедительно наблюдалось изменение значения экваториального магнито-оптического эффекта Керра, индуцированного чувствительным к приложенному магнитному полю возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов. Использование импульсного фемтосекундного источника излучения позволило в диссертационной работе также произвести измерения временной зависимости экваториального магнито-оптического эффекта Керра.

Глава III диссертации содержит обширный экспериментальный материал. В диссертации произведена убедительная интерпретация экспериментальных результатов. Проведено моделирование временной зависимости экваториального магнито-оптического эффекта Керра в магнитоплазмонных наноструктурах, индуцированной возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов.

Глава IV посвящена исследованию полностью оптического переключения лазерного излучения с помощью массива нанодисков из гидрогенизированного аморфного кремния. Эта глава диссертации посвящена актуальному направлению современной нанофотоники – исследованию возможности создания полностью оптического переключателя. В диссертации подробно анализируется современное состояние развития исследований в этой области на основе применений фотонных кристаллов, плазмонных наноструктур, метаматериалов и микрорезонаторов. Приводится убедительная аргументация в целесообразности и перспективности использования диэлектрических наночастиц с высоким показателем преломления для задач создания

полностью оптического переключателя. Подробно анализируется возможность достижения максимального значения одного из основных параметров полностью оптического переключателя – время отклика переключателя. Убедительной является аргументация в пользу использования диэлектрических наночастиц с высоким показателем преломления в сравнении с металлическими наноструктурами (при возможности достижение времен переключения на фемтосекундной временной шкале).

К началу выполнения исследований по теме диссертации отсутствовали литературные данные по возможности достижения в системах, где основным материалом является кремний, фемтосекундного временного отклика. Возможность достижения фемтосекундного временного отклика полностью оптического переключателя послужило мотивировкой экспериментальных исследований, приведенных в Главе IV диссертации. В качестве объекта экспериментальных исследований Главы IV диссертации был выбран массив нанодисков из гидрогенизированного аморфного кремния. Приводится обоснованная аргументация в пользу образца из гидрогенизированного аморфного кремния: гидрогенизированный аморфный кремний обладает большим значением нелинейно-оптических восприимчивостей и в нем также времена релаксации носителей существенно меньше, чем в кристаллическом кремнии.

В экспериментальной демонстрации оптического переключателя использовалась методика “накачка-зонд”, в которой измерялось при помощи лазерного импульса “накачки” в массиве нанодисков оптическое пропускание, как за счет процесса двухфотонного поглощения, так и из-за процесса генерации свободных носителей. Изменение оптического пропускания в зависимости от времени регистрируется при помощи “зондирующего” лазерного импульса. Следует отметить, что использование резонансов Ми в диэлектрических наночастицах явилось перспективным способом в диссертационной работе решения проблемы малости нелинейно-оптических эффектов в диэлектрических средах для достижения заметного переключения при умеренных по интенсивностям лазерных полей.

В ходе экспериментальных исследований по реализации оптического переключателя, в диссертационной работе проведено большое количество необходимых вспомогательных измерений, таких как: измерение зависимости спектров коэффициента пропускания от угла падения оптического излучения, исследование эффекта самовоздействия в образцах массивов нанодисков при возбуждении резонансов Ми, исследование релаксации свободных носителей в образцах полностью диэлектрических наноструктур с резонансами Ми и многие другие.

По диссертационной работе имеются следующие замечания. Кроме вышеприведенного замечания по измерению формы лазерного импульса, также имеются другие замечания:

– Выражение (6) не описывает закон дисперсии поверхностных плазмонов. Закон дисперсии поверхностных плазмонов характеризует структурированную поверхность и не зависит от способа возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов.

– На стр. 17 написано: «Для эффективного возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов использовалась не дополнительная модуляция поверхности, а призмный метод возбуждения ПП (рис. 7), что позволило перенести световую линию под запрещенную зону. Такой метод заведения излучения позволил получить ЗЗ шириной в 0.08 эВ».

Метод заведения излучения не может позволить получить ЗЗ той или иной ширины. ЗЗ определяется созданной структурой, а метод заведения излучения может только позволить измерить ширину ЗЗ данной структуры.

– На стр. 18 написано: «Поэтому запрещенная зона в законе дисперсии ПП может возникнуть не только в отраженном, но и в пропущенном свете».

ЗЗ уже существует и она проявляется как в отражении, так и в пропускании света через структуру.

– На стр. 20. написано: «Фано в том же году представил теорию их описания в виде процесса взаимодействия дискретных состояний атома с непрерывным спектром».

Следовало бы написать: процесса взаимодействия дискретных состояний атома с *состояниями* с непрерывным спектром.

– На стр. 40 написано: «локальных плазмонов – возбуждений в металлических наночастицах».

Принято в плазмонной «комьюнити» использовать термин «локализованных» плазмонов.

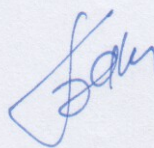
Рецензенту представляется также целесообразным приведение в конце каждой главы диссертации основных выводов по проделанным измерениям. Это в диссертации отсутствует.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы П.П. Вабищевич. 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 отечественных и

зарубежных журналах и неоднократно докладывались на международных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

На основании вышесказанного считаю, что диссертация П.П. Вабищевич 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, Вабищевич Полина Петровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Заведующий лабораторией лазерной спектроскопии
Института спектроскопии РАН,
д.ф.-м.н., профессор,



В.И. Балыкин

Подпись д.ф.-м.н. В.И. Балыкина заверяю:

Ученый секретарь
Института спектроскопии РАН,
к.ф.-м.н.



Е.Б. Перминов