

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу ЛАНИНА Александра Александровича на тему: “Когерентные взаимодействия сверхкоротких импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазонов в задачах микроспектроскопии и дистанционного зондирования”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21– «Лазерная физика», физико-математические науки.

Развитие нелинейной оптики привело к возникновению новых подходов в оптической спектроскопии и метрологии, созданию новых уникальных источников когерентного излучения в различных спектральных областях. С появлением стабильных источников сверхкоротких лазерных импульсов с высокими частотой повторения и пиковой мощностью возникли и нашли дальнейшее развитие нелинейно-оптические методики визуализации микроскопических объектов и микроспектроскопии. Нелинейно-оптическая (многофотонная) микроскопия нашла широкое применение в биомедицине для исследования и визуализации биологических тканей и в материаловедении для исследований наноматериалов.

Нелинейная природа оптических процессов, лежащих в основе многофотонной микроскопии, позволяет формировать трехмерные изображения объектов с субмикронным пространственным разрешением, позволяя определять не только внутреннюю структуру исследуемых объектов, но и их химический состав. В свою очередь, когерентная природа нелинейных процессов открывает новые возможности для улучшения основных параметров микроспектроскопии – спектральное, временное и пространственное разрешение, что диктует необходимость разработки новых технологичных источников сверхкоротких импульсов, а также методик управления спектром, длительностью и фазой этих импульсов. Спектр приложений нелинейно-оптических методик неуклонно увеличивается, и тематика настоящей диссертационной работы включает широкий диапазон исследований в области применения нелинейно-оптических взаимодействий в схемах когерентного оптического зондирования с использованием сверхкоротких лазерных импульсов. Именно эти обстоятельства и обуславливают актуальность этой диссертационной работы.

Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, основывается на согласованности данных эксперимента и научных выводах. В свою очередь, достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств и методик проведения исследований. Автор хорошо осведомлен в области физики, где он работает, и достаточно свободно владеет математическим аппаратом в широких пределах курсов, читаемых на физфаке. Это позволяет ему корректно обрабатывать и интерпретировать экспериментальные результаты и проводить теоретическое описание формирования нелинейного сигнала в необходимых случаях. Для анализа основных особенностей нелинейно-оптических процессов когерентного комбинационного рассеяния автором проводились модельные расчеты по своим теоретическим моделям. Автором изучены и творчески используются известные результаты и теоретические положения других исследователей по вопросам спектрального и фазового контроля ультракоротких импульсов и КАРС-микроскопии. Список литературы содержит 264 наименования и представляет собой достаточно полную базу данных по тематике диссертации. Всё вышеизложенное свидетельствует о достаточной степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.



В качестве новых научных результатов диссертантом выдвинуты 9 положений. Не все они «равнопонятны» – некоторые (например: п.2, п.3, п.4 раздела «Научная новизна» «Введения» диссертации) в своих формулировках содержат конкретные цифры, исчерпывающе характеризующие наблюдаемое (например: диаметр волокна, спектральный диапазон, параметры световых импульсов), и не требуют комментариев. Другие же хотелось бы прокомментировать. Итак:

- «показано, что управление фазой и временной задержкой оптических импульсов накачки позволяет осуществлять фазовый контроль процесса когерентного антистоксова рассеяния света, который ... позволяет восстановить комбинационный отклик вещества». Эта часть положения не является принципиально новой, речь здесь идёт о реализованных ранее подходах: методике так называемой «спектральной фокусировки» и методике восстановления мнимой части нелинейной восприимчивости третьего порядка из КАРС-спектров; однако демонстрация того, что это может быть применено «для КАРС-спектроскопии сильно рассеивающих сред» с достаточным в задачах микроскопии спектральным разрешением – из разряда новостей.

- что касается теоретических оценок возможности «дистанционного зондирования атмосферы посредством когерентного антистоксова рассеяния света в геометрии встречных пучков и на базе процесса вынужденного комбинационного усиления/ослабления», то результаты, без сомнения, являются новыми. Однако, модельные лабораторные эксперименты (при фокусировке лазерных пучков на расстояниях в единицы метров и менее) и соответствующие результаты численных оценок всё ещё весьма далеки от реальных условий зондирования атмосферы. К тому же, «гвоздём программы» в этих подходах является атмосферный лазероподобный источник, обеспечивающий излучение, идущее навстречу пучку накачки, а такого источника пока нет, и на пути его создания пока больше вопросов, чем ответов...

- «продемонстрирована техника измерения огибающей интенсивности, спектральной и временной фазы сверхкоротких импульсов среднего ИК диапазона (3-11 мкм) на базе широкополосного оптического стробирования с разрешением по частоте в процессе четырехволнового взаимодействия в воздухе». Здесь новым и интересным является следующее. «Классическая» методика оптического стробирования импульсов с разрешением по частоте (FROG) основывается на генерации суммарной частоты в нелинейном кристалле, который должен удовлетворять ряду серьезных требований, в частности, обладать высокой квадратичной нелинейностью, низкими потерями и широким частотным синхронизмом для процесса удвоения частоты в средней ИК области спектра. Выполнить эти требования во всём среднем ИК диапазоне ( $\omega_d$ :  $\lambda_d = 3-11$  мкм) весьма непросто. Вместе с тем, если сверхкороткие импульсы среднего ИК диапазона смешивать со сверхкороткими импульсами ближнего ИК ( $\omega_p$ :  $\lambda_p = 810$  нм) в атмосферном воздухе (среде, обладающей кубической нелинейностью), то происходит генерация излучения на новых частотах в процессах четырехволнового взаимодействия:  $\omega_{SF\ FWM} = 2\omega_p + \omega_d$  (суммарная частота) и  $\omega_{DF\ FWM} = 2\omega_p - \omega_d$  (разностная частота), соответственно. Процесс повышения частоты среднего ИК излучения (up-конверсия) в ходе четырехволнового взаимодействия в газе в видимую область спектра позволяет отобразить спектр всего среднего ИК диапазона 3-15 мкм в спектральном окне шириной всего несколько десятков нанометров в видимом диапазоне, в котором доступны дешёвые и эффективные приемники излучения.

- обнаружено, «что модуляция спектра сверхкоротких импульсов среднего ИК диапазона (3-11 мкм), возникающая за счет резонансного взаимодействия света с компонентами атмосферного воздуха (дипольно активными, например: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O), приводит к возникновению субимпульсов, временные профили и задержки которых специфичны к колебательно-вращательному движению молекул». Здесь надо отметить следующее. Поскольку «прямой» анализ спектра поглощения является достаточно непростой задачей из-за отсутствия эффективных спектрометров и детекторов в данной области спектра, это



явление может быть положено в основу нового спектроскопического метода с использованием методики характеристики импульсов среднего ИК диапазона при реализации их четырехволнового взаимодействия с импульсами накачки ближнего ИК/видимого диапазона в газовой среде. Однако. При относительно слабом поглощении, интерпретация экспериментальных результатов относительно проста. При усилении поглощения возникают эффекты, разрушающие простую спектрально-временную трансляцию молекулярных мод, что делает анализ более сложным и затрудняет извлечение параметров молекулярного движения из временных профилей импульсов.

В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научными знаниями в области применения нелинейно-оптических взаимодействий в схемах когерентного оптического зондирования с использованием сверхкоротких лазерных импульсов. Результаты, представленные на защиту, согласуются с данными, полученными другими исследователями в этой области знаний, органично вписываясь в общую канву исследований, широко проводимых во всём мире. Наконец, в пользу достоверности представленных результатов говорит и факт соавторства с авторитетными исследователями, чей вклад в развитие схем когерентного оптического зондирования с использованием сверхкоротких лазерных импульсов общепризнан. Материалы диссертации неоднократно докладывались на научных семинарах кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, на научных российских и международных конференциях и симпозиумах и получили одобрение ведущих специалистов. Основные результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, из них 10 в рецензируемых журналах - Optics Letters, Optics Express, Scientific Reports, Applied Physics Letters, Laser Physics Letters, Письма в ЖЭТФ - и 13 статей в сборниках трудов конференций.

Наряду с очевидными достоинствами, представленная работа не свободна и от некоторых недостатков.

1. Так, названия (и их сокращения и/или аббревиатуры) известных и общепринятых в мире методик ожидаешь встретить в том же виде, что и в мировой научной литературе, и поэтому дословный перевод на русский язык английского названия или аббревиатуры несколько сбивает с толку. Например: «FROG – frequency resolved optical gating» - понятно, «оптическое стробирование с разрешением по частоте» - надо сообразить: «это – FROG?» (хотя в конце диссертации в списке сокращений этот перевод дан, но «не в ту сторону»); аналогично с «отпечатками пальцев»: специалисты в спектроскопии биологических объектов знают, что «finger-prints» («отпечатки пальцев») – это характерные линии в спектрах определённой органики... а все остальные?..

2. Во многих ссылках список авторов дан не полностью: указан первый автор, а затем следует «и др.»; такая практика общепринята при упоминании работы в тексте статьи, однако в списке литературы это неудобно. Действительно, зачастую первым в списке авторов стоит не «основной» («коренной», если угодно), всем известный авторитетный исследователь; работу знают и помнят не по её названию, а именно по этому автору, и поэтому, просматривая список литературы и не находя знакомых имён, приходишь в недоумение: а полон ли список?

3. Ссылка 132 частично написана кириллицей, частично – латиницей, при том, что сама работа была опубликована в отечественном (переводном) журнале и на неё можно сослаться или по-русски, или – по-английски.

4. Рисунок 1.2.1 труден для восприятия: все кривые на графике одной толщины, одного стиля и одного цвета. При том, что рисунок был адаптирован из работы [37], а в диссертации почти все иллюстрации – цветные, и этот рисунок лучше было бы привести в цвете.

5. Рисунок 4.4.1 выполнен неудачно: график, на который в тексте ссылаются как на «правую панель на рис. 4.4.1.а» реально расположен под рис. 4.4.1б.

6. Есть опечатки. Не берусь перечислить все, отмечу «навскидку»:

- страница 69, строка 17 («принадлежать» вместо «принадлежат»), строка 18 («информа-

ция» вместо «информацию»);

- страница 152, строка 4 («средней» вместо «средний»), строка 6 (запятая после «этим» не нужна).

- страница 161, строка 12 («всем» вместо «всеми»), строка 27 («линии» вместо «линией»).

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Диссертация ЛАНИНА А. А. «Когерентные взаимодействия сверхкоротких импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазонов в задачах микроспектроскопии и дистанционного зондирования», выполненная под руководством к.ф.-м.н. доцента Андрея Борисовича Федотова на высоком научном уровне, является законченным научно-исследовательским трудом. Хотя часть экспериментов и теоретического анализа и численного моделирования, использованного для сравнения с оригинальными экспериментальными результатами, была выполнена совместно с сотрудниками других лабораторий (Института фотоники Венского технологического университета (Австрия) и лаборатории фотоники и нелинейной спектроскопии кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ), вклад диссертанта в выполнение работы был определяющим.

В работе приведены научные результаты, решающие ряд задач когерентного оптического зондирования с использованием сверхкоротких лазерных импульсов, которые, без сомнения, найдут своё применение в биомедицине для исследования и визуализации биологических тканей и в материаловедении для исследований наноматериалов.

Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана доходчиво, грамотно и (за вычетом опечаток) аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сформулированы заключения, подытоживающие изложенный материал.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа «Когерентные взаимодействия сверхкоротких импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазонов в задачах микроспектроскопии и дистанционного зондирования» отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - ЛАНИН Александр Александрович - заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент,  
старший научный сотрудник  
отдела фотоэлектроники ИОФРАН  
кандидат физ.-мат. наук  
02.06.2014

К.А. Верещагин

«Подпись руки Верещагина К.А. заверяю»

Ученый секретарь Института Общей Физики РАН  
к.ф.-м.н.



С.Н. Андреев