

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Степанова Евгения Александровича «Формирование предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона и их применение для нелинейной спектроскопии полупроводников на основе генерации высших оптических гармоник», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика»

В диссертационной работе Степанова Е.А. представлены результаты экспериментальных исследований, связанных с созданием источников лазерных импульсов предельно малых длительностей среднего инфракрасного диапазона, основанных на нелинейно-оптических преобразованиях в твёрдых телах и волноводных структурах фемтосекундных импульсов с начальной энергией от единиц до сотен микроджоулей. Актуальность выполненных исследований обеспечивается, как непосредственно новыми физическими явлениями, приводящими к генерации столь малых отрезков электромагнитного поля, так и обширным кругом новых задач когерентной оптики сверхбыстрых процессов. Одно из возможных применений предельно коротких импульсов заключается в полностью оптическом процессе регистрации и управление вынужденной фемтосекундной динамикой электронов на поверхности и в объеме полупроводников, что в свою очередь открывает путь к развитию сверхбыстрой петагерцовой оптоэлектроники. В работе показано, что излучение оптических гармоник высокого порядка, возникающее при воздействии сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона на твёрдое тело, может быть использовано для осуществления нелинейной спектроскопии энергетической структуры полупроводникового материала.

Диссертационная работа Степанова Е.А. состоит из введения, пяти глав и заключения со списком литературы. После каждой главы сформулированы краткие итоги. Объём работы составляет 135 страниц, включая 51 рисунок и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 168 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы, обозначена научная и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов работы.

В первой главе дан обзор основных нелинейно-оптических методов генерации сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона с энергией от долей до сотен микроджоулей, развитие которых наиболее активно велось в последнее десятилетие. Представлены ключевые работы в мировой литературе по формированию импульсов предельно малой длительности, с описанием особенностей и трудностей связанных с распространением известных методов из видимого и ближнего инфракрасного диапазона длин волн в область более длинных волн. Указано место оригинальных исследований в общей картине развития методов формирования предельно коротких импульсов среднего ИК диапазона. Последняя часть первой главы посвящена обзору методов теоретического и экспериментального анализа динамики носителей заряда в диэлектриках и полупроводниках под действием сверхкоротких лазерных импульсов, отмечена роль явления генерации гармоник высокого порядка как удобного полностью оптического сенсора непертурбативных нелинейно-оптических процессов, происходящих на петагерцовой несущей частоте.

Вторая глава диссертационной работы содержит описание экспериментальных методов и установок, использовавшихся в работе: представлены лазерные комплексы, методы характеризации спектральных и временных свойств мультиоктавного излучения предельно коротких импульсов среднего и ближнего ИК диапазонов.

В третьей главе впервые демонстрируется метод генерации микроджоулевых импульсов длительностью порядка одного периода поля в среднем инфракрасном спектральном диапазоне на длине волны 4 – 8 мкм в полностью твердотельном формате. Серия обширных экспериментов, проведённых в областях нормальной и аномальной дисперсии групповых скоростей арсенида галлия, позволили выявить уникальные режимы спектрально-временной эволюции исходных фемтосекундных импульсов накачки, приводящие к формированию предельно коротких импульсов длительностью порядка одного периода поля, включающие в себя совместное действие нескольких нелинейно-оптических эффектов. Экспериментально зарегистрированы импульсы длительностью не более 20 фс, составляющей около 0.9 периодов оптического поля на центральной длине волны 6.8 мкм, с энергией около 1 мкДж, что соответствует пиковой мощности до 50 МВт.

Четвёртая глава посвящена описанию экспериментальной реализации источника мультиоктавного суперконтинуума и предельно коротких импульсов гигаваттного уровня мощности в среднем и ближнем инфракрасном диапазоне на основе заполненных инертными газами полых антирезонансных фотонно-кристаллических волокон. Представлены результаты экспериментов, выполненных на двух различных лазерных системах с центральной длиной волны импульса в среднем (3.2 мкм) и ближнем (2 мкм) инфракрасном диапазоне. В обоих случаях выявлены режимы нелинейно-оптического преобразования исходных импульсов накачки в процессе распространения вдоль волновода, обеспечивающие генерацию суперконтинуума протяжённостью более октавы с солитонным сжатием до длительностей порядка одного периода поля. Реализованные экспериментальные методы характеризации предельно коротких импульсов среднего и ближнего диапазона позволили зарегистрировать солитонную самокомпрессию и сжатие импульсов до длительностей одного и менее периода оптического поля, возможные благодаря особому сочетанию параметров структуры полого антирезонансного фотонно-кристаллического волновода, обеспечивающему широкополосную аномальную дисперсию и высокую оптическую нелинейность.

В пятой главе развиваются методы нелинейно-оптической спектроскопии зонной структуры и сверхбыстрой электронной динамики полупроводниковых материалов на основе явления генерации высших оптических гармоник сверхкороткими импульсами среднего инфракрасного диапазона. В качестве исследуемого образца в экспериментах выступает поликристаллический и монокристаллический образец селенида цинка, в котором экспериментально зарегистрирована генерация оптических гармоник высокого порядка в режиме, не описываемом в рамках теории приближения. Показано, что высокая напряженность поля  $0.1 \text{ В/Å}$ , реализуемая в таком непертурбативном режиме, возбуждает нелинейную колебательную динамику электрона в пределах всей зоны Бриллюэна, что позволяет разделить внутри- и межзонные механизмы генерации гармоник высоких порядков и получить информацию о топологии зонной структуры полупроводника.

Достоверность и новизна представленных к защите положений подтверждаются публикацией результатов диссертационной работы в 13 печатных работах в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, RSCI и Перечень изданий МГУ, в том числе Scientific Reports, Physical Review Letters, Optica, Optics Letters, Physical Review A, Успехи физических наук, Письма в "ЖЭТФ" и Квантовая электроника.

К числу несомненных достоинств диссертационной работы относятся созданные ее автором экспериментальные установки: перестраиваемая по длине волны фемтосекундная лазерная система среднего инфракрасного диапазона, генерирующая импульсы длительностью порядка периода поля, а также устройств для полной характеризации

сверхкоротких импульсов, основанных на использовании нелинейно-оптических процессов (XFROG, SPIDER). Весьма впечатляет демонстрация возможностей экспериментальных систем для исследования сверхбыстрой динамики молекулярной когерентности. Безусловным достижением является реализация полностью оптического метода зондирования зонной структуры полупроводника на основе генерации высших оптических гармоник сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона.

Тем не менее можно отметить некоторые недочёты представленной работы:

1. Признавая весьма высокое качество выполненного диссертантом обзора методов формирования предельно коротких лазерных импульсов в среднем инфракрасном диапазоне, стоит отметить, что для лучшего понимания диссертации было бы полезно в конце первой главы явно сформулировать те задачи, на решение которых нацелена данная работа.
2. Во второй главе (п. 2.1) упоминаются теоретически рассчитанные зависимости энергии, длительности и мощности инфракрасного импульса от задержек импульса, однако не объясняется, как именно они были получены.
3. В п. 3.2 обсуждаются результаты анализа нелинейно-оптических процессов в арсениде галлия на основе численного решения нелинейного уравнения Шрёдингера и кинетического уравнения для плотности электронов. Однако в тексте диссертации сами эти расчеты и используемая модель детально не обсуждаются.
4. В тексте диссертации (п. 5.1) оказались опущены подробности расчета спектров оптических гармоник, генерируемых колебательным движением электронов и дырок, не обсуждаются вклады тяжелых и легких дырок.

Однако указанные замечания несколько не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация «Формирование предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона и их применение для нелинейной спектроскопии полупроводников на основе генерации высших оптических гармоник» отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.21 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Соискатель Степанов Евгений Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей физики и молекулярной электроники физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Головань Леонид Анатольевич

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 35

тел.: +7(495) 939-46-57, golovan@physics.msu.ru

Подпись Л.А. Голованя заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета

физического факультета МГУ

имени М.В. Ломоносова, профессор

В.А. Караваев