

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»

Диссертационная работа Степанова Е.А. посвящена развитию методов формирования и полной характеристики предельно коротких импульсов среднего инфракрасного диапазона длительностью до одного периода поля на центральной длине волны 3–8 мкм. Подобные импульсы представляют собой важнейший инструмент исследования разнообразных сверхбыстрых процессов, дают возможность регистрировать и управлять сверхбыстрой динамикой электронов на поверхности и в объеме полупроводника, открывая путь к прецизионному управлению физическими процессами в твердых телах. Развитые в последние годы нелинейно-оптические методы на основе параметрических процессов позволяют с высокой эффективностью генерировать сверхкороткие импульсы во всем среднем инфракрасном диапазоне длительностью в несколько периодов с различными средней и пиковой мощностями, однако задача формирования импульсов длительностью порядка одного периода поля в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах до сих пор не имеет универсального решения и требует применения наиболее современных техник генерации, спектрального уширения и временной компрессии, с точно согласованными параметрами исходного излучения и свойств используемых нелинейно-оптических материалов. В связи с этим задача создания лазерных источников предельно коротких импульсов среднего ИК диапазона и их дальнейшее применение для изучения динамики носителей заряда в твердых телах является актуальной для фундаментального исследования и востребованной современными технологиями.

Работа Степанова Е.А. состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения с используемыми аббревиатурами и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 135 страниц, Она содержит 51 рисунок, приведенный список цитированной литературы включает 168 наименований. Во введении к работе кратко изложена актуальность исследования, сформулированы цели исследования, указана научная новизна, приведены защищаемые положения и отмечено соответствие диссертации иным формальным требованиям, необходимым для ее защиты.

В первой главе рассмотрены основные методы генерации сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона в различных нелинейно-оптических кристаллах с использованием источников импульсов накачки на длине волны от 0.8 до 3 мкм. Представлен обзор методов последующего нелинейно-оптического преобразования импульсов для достижения предельно коротких длительностей порядка одного периода поля. Показано место оригинальных результатов в литературе. Также в первой главе описаны подходы к описанию явления генерации гармоник высокого порядка в твёрдых телах под действием сверхкоротких лазерных импульсов среднего инфракрасного диапазона, отмечена роль данного явления как удобного полностью оптического сенсора непертурбативных нелинейно-оптических процессов, происходящих на петагерцовой несущей частоте.

Вторая глава работы посвящена описанию экспериментальных установок и методов, при помощи которых осуществлялось оригинальное исследование, описаны работы по модернизации используемых источников, выполненные автором, которые позволили достичь требуемой высокой стабильности параметров излучения. Также в этой главе рассмотрены экспериментальные методы полной характеристики сверхкоротких импульсов среднего и ближнего инфракрасного диапазонов, использовавшиеся для восстановления параметров предельно коротких импульсов ближнего и среднего инфракрасного диапазона и мультиоктавного суперконтинуума.

Главы с третьей по пятую составляют оригинальную результативную часть, и описывают непосредственно результаты экспериментальных исследований, выполненных Степановым Е.А. при подготовке диссертационной работы. В третьей главе впервые продемонстрирован метод генерации микрожоулевых импульсов длительностью порядка одного периода поля в среднем инфракрасном спектральном диапазоне на длине волны 4 – 8 мкм в полностью «твёрдотельном» формате. Достижение такого результата стало возможным благодаря использованию последовательности точно согласованных этапов нелинейно-оптического преобразования фемтосекундных импульсов: оптического параметрического усиления, генерации разностной частоты, спектрального уширения в полупроводниковых в арсениде галлия и компенсации остаточной фазовой модуляции. На центральной длине волны около 7 мкм вблизи точки нулевой дисперсии групповых скоростей арсенида галлия экспериментально зарегистрирована наименьшая длительность импульсов, составившая 0.9 периодов поля, что при энергии центрального 20-фс импульса в 1 мкДж соответствует пиковой мощности около 50 МВт.

Четвёртая глава диссертационной работы посвящена исследованию возможности применения полого «револьверного» антирезонансного фотонно-кристаллического

волновода, заполненного инертным газом, в задаче формирования предельно коротких импульсов среднего и ближнего ИК. За счет подбора структуры такого волновода, контроля давления газа и параметров фемтосекундных импульсов накачки на длине волны 2 и 3.2 мкм с энергией до 100 мкДж показана возможность достижения специфических режимов их нелинейно-оптического преобразования, приводящих к генерации мультиоктавного суперконтинуума, а также солитонной самокомпрессии импульсов и их сжатия до длительностей порядка одного периода поля на центральной длине волны. Применение метода полной характеристики импульса X-SEA-F-SPIDER в экспериментах с импульсом накачки вблизи 2 мкм удалось зарегистрировать импульс длительностью 6.6 фс по полувысоте, что соответствует примерно одному колебанию поля, с пиковой мощностью до 1.5 ГВт.

В пятой главе представлены результаты начальных экспериментов по нелинейно-оптической спектроскопии зонной структуры и сверхбыстрой электронной динамики полупроводниковых материалов на основе явления генерации высших оптических гармоник сверхкороткими импульсами среднего инфракрасного диапазона. Исследования спектральных и энергетических характеристик излучения высоких гармоник проведены с использованием поли- и монокристаллических образцов широкозонного полупроводника селенида цинка для импульсов накачки на центральной длине волны 5.0, 6.7 и 3.6 мкм. Для описания полученных зависимостей мощностей отдельных гармоник от интенсивности накачки предложена понятная полуклассическая модель вынужденного движения носителей заряда под действием поля импульса накачки, позволившая достаточно точно восстановить зонную структуру вдоль наиболее нелинейного направления для поликристаллического образца и охарактеризовать анизотропные свойства петагерцовых фотоиндуцированных токов, возникающих в монокристаллическом полупроводниковом материале.

Следует отметить высокий научный уровень диссертационной работы Степанова Е.А., в том числе высокое качество экспериментов, сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования, позволяющее дать объяснение полученным данным. Выносимые на защиту положения являются обоснованными и оригинальными, что подтверждается семью основными публикациями, в том числе в высокорейтинговых изданиях.

В то же время работа Степанова Е.А. не свободна от ряда недостатков.

В Главе 2 на стр .56 приведён график длины фазового синхронизма четырёхволнового смешения без указания источника данных.

На стр. 57 не раскрывается причина более эффективной генерации разностной частоты по сравнению с суммарной и не объясняются более высокие требования к минимальной пиковой мощности измеряемого импульса.

В Главе 4 на Рис. 40 представлены 2 спектра мультиоктавного суперконтинуума, но отсутствует пояснение какой из них измеренный, а какой восстановлен методом X-SEA-F-SPIDER.

На стр.100 и в Заключение приведено утверждение о формировании лазерного импульса длительностью менее половины цикла светового поля основано только на моделировании, в котором не полностью учтено влияние сверхширокой спектральной ширины на коэффициент Керровской нелинейности n_2 и нелинейностей высших порядков, возникающих в фотонно-кристаллическом волноводе при интенсивностях, достигающих значений в десятки ТВт/см².

В Главе 5 факт регистрации выраженных отдельных гармоник связывается с сохранением когерентности на временах порядка периода излучения накачки, но в экспериментах используются импульсы с длительностью от 4 периодов и данное отличие в работе не обсуждается.

Вместе с тем указанные замечания 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:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории спектроскопии ультрабыстрых процессов Института спектроскопии Российской академии наук

«23» июня 2022 г.

В.О. Компанец

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5

Тел. +7 495 851 05 79, E-mail: kompanetsvo@isan.troitsk.ru

Подпись Компанца В.О. заверяю:

Учёный секретарь ИСАН

«23» июня 2022 г.

Р.Р. Кильдиярова

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5

Тел. +7 495 851 02 21, E-mail: rimma@isan.troitsk.ru