

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Савицкого Ильи Владимировича «Формирование однопериодных фазостабильных импульсов ближнего инфракрасного диапазона для сверхбыстрой нелинейной спектроскопии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Исследования, представленные в диссертационной работе Савицкого И.В., направлены на развитие методов и технологий формирования однопериодных импульсов со стабильной фазой поля относительно огибающей. В работе также продемонстрирована возможность использования такого излучения для реализации сверхбыстрой нелинейной спектроскопии в схеме накачка-зондирование. Для получения импульсов длительностью около одного периода поля используется метод солитонного самосжатия импульсов в новом типе полых антирезонансных волокон. Структура таких волокон определяет широкую спектральную полосу отрицательной дисперсии групповых скоростей, покрывающую диапазон, превышающий оптическую октаву. Это позволяет генерировать импульсы с мультиоктавным спектром с скомпенсированной спектральной фазой, что определяет предельно малую длительность излучения на выходе из волновода. Вместе с реализованной в работе техникой стабилизации фазы поля относительно огибающей этих импульсов, данный метод позволяет получать однопериодные фазостабильные импульсы, которые активно используются в современных исследованиях сверхбыстрых процессов, например, когерентной электронной динамики в твердых телах.

Актуальность выбранного направления исследований, а именно разработка методов генерации одно- и субпериодных фазостабильных импульсов, не вызывает сомнений и определяется большим количеством применений подобного излучения в современных областях исследований, связанных с сверхбыстрыми процессами.

Научная новизна представленных в работе результатов заключается в следующем:

1. В работе демонстрируется удобство использования полых антирезонансных револьверных волокон для реализации солитонной самокомпрессии импульсов ближнего ИК диапазона, а также экспериментально и теоретически исследуются особенности распространения излучения в таких волокнах.
2. Показано формирование гигаваттных однопериодных фазостабильных импульсов, охарактеризованных с помощью интерференционного метода, позволяющего восстанавливать импульсы с октавной шириной спектра.
3. С помощью анализа зависимости спектра суперконтинуума на выходе из волновода от фазы поля относительно огибающей входного импульса, было показано формирование субпериодного импульса в ходе солитонной самокомпрессии.
4. Продemonстрировано использование однопериодных импульсов для реализации сверхбыстрой спектроскопии в схеме накачка-зондирование и, в частности, показана возможность управления электронной динамикой фотоионизации в твердом теле с помощью фазы поля относительно огибающей однопериодного импульса.

Достоверность представленных в работе результатов подтверждается обоснованной методикой экспериментов, большой статистической базой данных и их повторяемостью, использованием сертифицированного, метрологически поверенного регистрирующего оборудования, а также разумным совпадением с результатами, полученным другими исследователями для частных случаев совпадения условий экспериментов и согласием между экспериментальными и теоретическими данными, полученными с использованием корректных численных моделей.

Практическая значимость работы состоит в разработке методов формирования однопериодных фазостабильных импульсов ближнего инфракрасного диапазона микроджоулевого уровня энергии.

Текст диссертационной работы состоит из введения, четырех глав, заключения и списком литературы, содержащего 194 источника. Общий объем работы составляет 123 страницы и содержит 54 рисунка.

Во **введении** к диссертации обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований и задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной в работе цели. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава работы содержит обзор научной литературы о состоянии исследований по теме диссертации. В главе дано краткое описание основных этапов развития методов формирования однопериодных лазерных импульсов и более подробно рассматриваются основные современные техники, включая используемую в работе солитонную самокомпрессию в полых волокнах. Однопериодная длительность импульсов вместе со стабильной фазой определяют ряд уникальных возможностей, которые предоставляет такое излучения для исследований в области сверхбыстрой нелинейной спектроскопии. Некоторые из этих возможностей также описываются в первой обзорной главе работы.

Вторая глава посвящена описанию техники, которая была использована автором для получения экспериментальных результатов. Подробно описан оптический параметрический усилитель, накачиваемый излучением титан-сапфирового лазера с генеративным усилителем. Излучение холостой волны на выходе из параметрического усилителя используется во всех представленных в работе экспериментах и, как показано в главе имеет стабильную фазу поля относительно огибающей, абсолютное значение которой можно управлять. Также в главе показана реализация интерференционного метода восстановления формы импульса, с помощью которой можно охарактеризовать импульс вплоть до однопериодной длительности.

В **третьей главе** описан метод формирования однопериодных лазерных импульсов с помощью солитонной самокомпрессии в полых антирезонансных волноводах. В главе показаны экспериментальные исследования уширения спектра импульса холостой волны при распространении в заполненном аргоном полем волокне револьверного типа. За счет отрицательной дисперсии групповых скоростей в спектральном диапазоне холостого импульса, при распространении в волноводе импульс подвергается компрессии. В работе демонстрируется получение фазостабильного импульса с длительностью около одного периода поля с микроджоулевой энергией и более чем октавной шириной спектра, распространяющегося в основной волоконной моде.

В четвертой главе исследуются фазочувствительные эффекты с использованием однопериодных лазерных импульсов. В данной главе экспериментальные результаты сравниваются с численным моделированием обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера, описывающего распространения импульса в нелинейной среде. Показано, что видимая часть суперконтинуума на выходе из волновода зависит от фазы поля относительно огибающей входных импульсов. С помощью этой зависимости была восстановлена спектральная фаза излучения во всем видимом диапазоне, что, вместе с измерениями инфракрасной части интерференционным методом, демонстрирует субпериодную длительность импульса, получаемого в результате самокомпрессии в волноводе. Также в главе показано применение однопериодных фазостабильных импульсов для спектроскопии в схеме накачка-зондирование. С помощью предельно короткого импульса показана возможность управления электронной динамикой фотоионизации в твердом теле с помощью фазы поля относительно огибающей.

В заключении сформулированы наиболее значимые результаты диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты исследований, легших в основу диссертационной работы опубликованы в 7 работах в научных журналах индексируемых в WoS и Scopus, и представлялись в 15 докладах на всероссийских и международных конференциях. Это позволяет сделать вывод о хорошей степени апробации результатов.

Несмотря на общее положительное мнение о диссертационной работе, хотелось бы сделать несколько замечаний:

1. Было бы полезно в главе 1, представляющей собой обзор литературы, дать выводы из этого обзора и сформулировать на его основе задачи исследования.

2. Пассивная стабилизация фазы поля импульса относительно его огибающей в оптическом параметрическом усилителе (рис. 18, стр. 45) обеспечивает среднеквадратичное отклонение, составляющее 106 мрад для холостой волны, но на выходе из волновода флуктуации возрастают до 146 мрад (рис. 34, стр. 76). В работе дано лишь краткое пояснение увеличения неустойчивости фазы. Однако ввиду важности данной величины для однопериодных импульсов следовало бы подробнее обсудить наблюдавшийся рост флуктуаций.

3. В параграфе 3.5 показано, что в видимой области часть излучения перетекает в высшие моды. В работе стоило бы провести анализ влияния пространственной структуры видимой части суперконтинуума на результаты на f - $3f$ интерферометрии, представленной в четвертом параграфе.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация «Формирование однопериодных фазостабильных импульсов ближнего инфракрасного диапазона для сверхбыстрой нелинейной спектроскопии» отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19. 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 требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой

степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Соискатель Савицкий Илья Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», физический факультет, кафедра общей физики и молекулярной электроники, профессор

Головань Леонид Анатольевич

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

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

06.06.2025

Подпись Л.А. Голованя заверяю:

Ученый секретарь Ученого Совета

физического факультета МГУ

имени М.В.Ломоносова

профессор

С.Ю. Стремоухов