

## ОТЗЫВ

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

Одной из тенденций развития лазерной физики, начавшейся практически с момента ее зарождения, является уменьшение длительности генерируемых импульсов. Импульсы с длительностью в несколько или даже порядка одного цикла поля используются как в задачах, где требуются релятивистские интенсивности, так и в нелинейно-оптических спектроскопических приложениях не требующих высокоэнергетичных импульсов. При переходе к столь коротким импульсам невозможно не учитывать влияние фазы поля относительно огибающей, что представляет интересной физической задачей, а возможность управления фазой поля импульса находит свое применение в аттосекундной оптике и фемтохимии. Эта тематика находится на передовом фронте современных исследований в области лазерной физики, поэтому диссертационная работа является чрезвычайно актуальной и перспективной. Диссертация посвящена различным вопросам генерации и характеристики лазерных импульсов с длительностью порядка одного цикла поля, их тщательной характеристики и применению в задачах интерференционной спектроскопии. Диссертация является законченным научным исследованием.

Диссертационная работа построена следующим образом. Она состоит из введения, содержащего защищаемые положения, четырех оригинальных глав, заключения с выводами и списка цитируемой литературы. Каждая глава содержит вступление, кратко описывающее ее содержание и направления представленных исследований. Общий объем диссертации - 123 страницы, включая 54 рисунков.

Во введении представлены цель и задачи работы, обозначены предмет и объект исследований, описаны ее актуальность и методология исследований, сведения о

разработанности темы, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость работы, сведения о публикациях автора.

В первой главе представлен обзор современной литературы, связанный с проблемами генерации предельно коротких импульсов с длительностями порядка одного цикла поля и стабильной фазой относительно огибающей. Одним из методов формирования подобных импульсов является нелинейно-оптическое преобразование в процессе солитонной самокомпрессии в волноводном режиме. Поскольку этот подход используется в настоящей работе, то ему уделяется повышенное внимание. Также в этой главе представлена техника формирования и измерения импульсов со стабильной фазой поля относительно огибающей, демонстрируются результаты пассивной стабилизации фазы мощных импульсов, получаемых с помощью лазерных систем с усилителем, аналогичных используемым в диссертационной работе. В заключительном параграфе описан ряд современных приложения фазостабильных предельно коротких импульсов для задачах нелинейной спектроскопии различных объектов.

Диссертационная работа в целом является экспериментальной, и во второй главе представляются основные элементы экспериментальной техники, основой которой является многофункциональная Ti:Sapphire лазерная система с оптическим параметрическим усилителем, обеспечивающим генерацию перестраиваемых фемтосекундных импульсов инфракрасного диапазона. Особенности параметрического усиления позволяют реализовать методику пассивной стабилизации фазы, которая управлялась системой обратной связи и контролировалась с помощью нелинейного  $f-2f$  интерферометра на различных этапах экспериментальных исследований. Важным вопросом экспериментальной техники является характеристика временных и спектрально-фазовых характеристик формируемых предельно коротких лазерных импульсов на основе пространственно-разрешенной модификации интерференционного метода восстановления спектральной фазы (X-F-SEA-SPIDER).

В третьей и четвертой главах диссертации представлены оригинальные результаты, которые составляют основное содержание работы. В третьей главе рассматриваются результаты по нелинейно-оптическому преобразованию фемтосекундных импульсов

накачки микроджоулевого уровня энергии ближнего инфракрасного диапазона в полых антирезонансных волокнах, заполненных аргоном при высоком давлении. Дисперсионные и волноводные свойства полых антирезонансных волокон (во многом определяемые толщиной стенок внутренних полых капилляров револьверной структуры около 0.5 мкм) обеспечили новые режимы нелинейного распространения импульсов, приводящие к генерации мультиоктавного суперконтинуума. В работе исследованы особенности пространственной структуры излучения при нелинейно-оптическом распространении импульсов, показано что наличие резонансов волноводной структуры приводит к перетеканию части излучения в высшие волоконные моды в видимой области спектра. Автором показано, что сложная спектрально-временная динамика распространяющихся импульсов накачки обеспечивает формирование в режиме солитонной самокомпрессии импульсов с длительностью порядка одного цикла поля, гигаваттным уровнем пиковой мощности, стабильной и управляемой фазой относительно огибающей (около 150 мрад). Особенно важно, что эти характеристики были убедительно экспериментально подтверждены в измерениях с использованием, представленных в предыдущей главе нелинейного  $f$ - $2f$  интерферометра и схемы интерференционного метода восстановления спектральной фазы (X-F-SEA-SPIDER).

В четвертой главе описываются результаты экспериментальных и численных исследований эффектов, чувствительных к фазе поля, относительно огибающей импульса. Прежде всего это относится к демонстрации и исследованию влияния фазы импульсов на характер спектрального преобразования и генерацию многооктавного суперконтинуума, в частности, возникновению широкополосной  $f$ - $3f$  интерференции, связанной с генерацией третьей оптической гармоники от формируемых предельно коротких импульсов. Более того, интересным и новым предложением явилось демонстрация возможности использования этой широкополосной интерференции для восстановления спектральной фазы формируемого импульса в видимом диапазоне и подтверждения субпериодной длительности излучения на выходе из волновода. В этой главе также представлены результаты спектроскопии процесса фотоионизации селенида цинка в схеме накачка-зондирование с использованием полученных предельно коротких импульсов. В диссертации было продемонстрировано, что ионизация тонкой пленки ZnSe приводит к спектральному

уширению, чувствительному к фазе однопериодного импульса накачки. Анализ результатов на основе численного моделирования на основе решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера (ОНУШ) показал, что новые фазочувствительные спектральные компоненты генерируются за счёт плазменной нелинейной добавки к показателю преломления и нелинейного плазменного поглощения, что демонстрирует возможность управления электронной динамикой в твердом с помощью фазы поля относительно огибающей.

Думаю, что эти представленные результаты свидетельствуют о высоком научном уровне. В целом работа представляется систематическим научным исследованием нелинейно-оптического преобразования фемтосекундного лазерного излучения со стабильной фазой поля относительно огибающей в новых типах полых антирезонансных оптических волноводов и формирования фазостабильных импульсов длительностью менее одного цикла поля и гигаватным уровнем пиковых мощностей. Достоверность представленных результатов не вызывает сомнений. По результатам опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах, также исследования широко представлялись на различных международных конференциях, имеют известность и цитируемость. Содержание диссертации корректно отражено в автореферате.

В этой связи, хотелось бы выделить результаты, имеющие с моей точки зрения высокое научное значение. Во-первых, это связано с демонстрацией возможности формирования однопериодных лазерных импульсов в области 2 мкм с управляемой и стабильной фазой поля относительно огибающей (среднеквадратичное отклонение  $RMS = 146$  мрад) в режиме солитонной самокомпрессии в полых антирезонансных световодах с энергиями порядка 10 мкДж. Во-вторых, совместное использование техники X-SEA-F-SPIDER и широкополосной  $f$ - $3f$  интерференции позволило экспериментально продемонстрировать, что длительность генерируемых фазостабильных импульсов составляет величину порядка половины цикла поля, а их пиковая мощность достигает нескольких гигаватт. В-третьих, было продемонстрировано практическое применение подобных фазостабильных предельно коротких импульсов в задачах нестационарной спектроскопии в схеме накачка-зондирование образцов селенида цинка, что открывает перспективы их использования для широкого класса актуальных задач лазерной физики, в

том числе для сверхбыстрого управления динамикой фотоиндуцированных токов в диэлектриках и полупроводниках, а также для развития сверхбыстрой оптоэлектроники.

Тем не менее, хотелось бы также отметить ряд замечаний:

1) В работе представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие формирование однопериодного и даже субпериодного импульса на выходе из волновода. Однако недостаточно подробно указано, насколько подобный импульс может сохранять свои уникальные свойства при распространении в пространстве. Имело бы смысл представить в тексте оценки дисперсионного расплывания таких импульсов в воздухе или в оптических элементах, которые продемонстрировали бы возможность практического использования описанного излучения.

2) Различия экспериментальных и расчетных зависимостей спектров от фазы (Рис. 41 и Рис. 46) в работе объясняются очень кратко. Остается неясным, связано ли это с ошибками в процедуре измерений, или некоторой неполнотой используемого теоретического анализа.

3) Подписи к нескольким рисункам (Рис. 13, 26, 48) не в полной мере поясняют изображенное на соответствующем рисунке. В подписях упущены детали (например, описание оптических элементов в схеме или отдельных кривых на графиках), назначение которых не очевидно без текста диссертации. Указанный на Рис. 1 в автореферате диаметр капилляра не соответствует значению, приведенному в тексте.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация Савицкого И.В. 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.

Таким образом, 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, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, отделение квантовой радиофизики им. Н.Г.Басова, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник

Стрелков Василий Вячеславович

119991 ГСП-1, г. Москва, Ленинский пр-т., д. 53, стр. 1 (ФИАН)

тел.: +7(499) 132-64-46, [v.strelkov@lebedev.ru](mailto:v.strelkov@lebedev.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.21 – «Лазерная физика»

Подпись

Дата 06.06.2025

Подпись Стрелкова В.В. заверяю:

Ученый секретарь Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук