

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Скобелева Сергея Александровича
«САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО
КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ»,

представленной на соискание ученой степени доктора
физико-математических по специальности 01.04.21 – лазерная
физика в диссертационный совет Д 002.069.02 в Федеральном
государственном бюджетном научном учреждении
«Федеральный исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии наук»

Диссертационная работа Скобелева С.А. посвящена исследованию взаимодействия оптических импульсов с малым числом колебаний с газами и плазмой. Тема работы, несомненно, актуальна как с точки зрения развития физических представлений о взаимодействии электромагнитного излучения с газовой средой и плазмой, так и с точки зрения практических задач, таких как разработка новых регулярных методов самокомпрессии мощных фемтосекундных лазерных импульсов вплоть до одного оптического периода, в широком диапазоне по энергии от нДж до кДж уровня. Проблема генерации электромагнитных импульсов предельно короткой длительности на высоком уровне энергии является одной из ключевых проблем создания лазерных систем тераваттного и петаваттного уровня мощности. Действующие в настоящее время в ведущих научных лабораториях мира мощные фемтосекундные лазерные комплексы тераваттного и петаваттного уровня мощности позволяют достигать беспрецедентно высоких величин плотности потока энергии светового излучения и пиковых значений напряженности электрического поля в лазерных импульсах. Это привело, по сути, к созданию новой, бурно развивающейся области физики – физики сверхсильных оптических полей, которая тесно связана с физикой плазмы, физикой высоких энергий, ядерной физикой. Исследования по взаимодействию такого мощного лазерного излучения ультракороткой длительности с веществом во многих случаях находятся на самом передовом рубеже современных знаний о физической картине мира. Работы, выполняемые в этой области физики, составляют фактически обязательную секцию на крупнейших международных научных конференциях по лазерной физике, физике плазмы и физике нелинейных волновых процессов. Практическая важность подобных исследований обусловлена такими приложениями, как создание ультрарелятивистских пучков заряженных частиц, лазерный управляемый термоядерный синтез, создание источников когерентного рентгеновского излучения, дистанционная нелинейная спектроскопия атмосферы и т.д. В тоже время, они представляют исключительный интерес для фундаментальной науки, поскольку позволяют в лабораторных условиях исследовать поведение вещества в таких экстремальных состояниях, которые характерны, например, для астрофизических процессов и которые не могут быть воспроизведены в лаборатории иными способами. Поэтому тема диссертации С.А. Скобелева, безусловно, является **актуальной** и представляет большой интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для широкого круга практических приложений.

Целью диссертационной работы является исследование особенностей самовоздействия лазерных импульсов с малым числом колебаний поля в средах с различными типами нелинейностей: керровская, ионизационная, релятивистская. Базируясь на проведенном анализе, разработаны новые регулярные методы самокомпрессии лазерных импульсов с энергией от нДж до кДж уровня в различных частотных диапазонах (УФ, видимый, средний ИК) до предельно короткой длительности, содержащей малое число колебаний поля.

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Разработанная теория удовлетворяет принципу соответствия, который включает известные уравнения эволюции огибающих сверхкоротких световых импульсов и результаты анализа пространственно-временной динамики огибающих, как частный случай, обобщая их на импульсы со сверхширокими временными и пространственными спектрами. Успешность нового теоретического подхода подтверждена соответствием результатов численного моделирования эволюции системы. В исследованиях применялись надежные и хорошо апробированные методы численного расчета, позволяющие проводить проверку правильности их работы на хорошо известных моделях. Имеется хорошее качественное и количественное совпадение теоретических результатов с экспериментально полученными данными.

Практическое значение работы заключается в следующем. Развитые методы аналитического исследования самовоздействия широкополосного излучения позволили более детально исследовать картину нелинейной динамики электромагнитного излучения, содержащего конечное число периодов поля в средах с различными типами нелинейностей: керровской, ионизационной, релятивистской. Базируясь на полученных результатах, предложены новые регулярные методы для формирования лазерных импульсов с малым числом колебаний поля в широком диапазоне по энергии от нДж до кДж, в том числе в недостаточно освоенных частотных диапазонах, таких как средний ИК и ультрафиолетовый, без использования внешних устройств компрессии импульсов.

Личный вклад автора заключается в постановке задач, в проведении теоретического анализа решений уравнений, в получении численных результатов, обсуждении полученных результатов. Экспериментальные исследования были проведены в ИПФ РАН группой А.Н. Степанова и в университете им. Г. Гейне, Дюссельдорф, Германия группой проф. О. Вилли.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы. Кратко излагается содержание работы.

В первой главе диссертации автором получен ряд новых результатов в области физики сверхсильных полей, в частности, найден новый класс уединенных решений волнового уравнения с нелинейностью керровского типа, описывающий распространение в нерезонансных средах электромагнитных импульсов циркулярно поляризованного поля с солитонной структурой огибающей, включающий конечное число периодов колебаний, вплоть до одной. Переход от солитонов огибающих, описываемых нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) и его модификациями, к волновым солитонам, содержащим малое число осцилляций поля, представляется нам достаточно интересным и важным шагом в теории нелинейных волновых явлений. На основе проведенного анализа предложена схема самосжатия лазерных импульсов субтераваттного уровня мощности до предельно коротких длительностей

– вплоть до одного периода оптических колебаний. При этом предельная степень компрессии определяется солитонными структурами с длительностями, близкими к минимально возможной. Хотя сама физическая идея самосжатия лазерных импульсов за счет нелинейного взаимодействия со средой при определенном знаке дисперсии групповой скорости хорошо известна и активно используется, в частности, в волоконной оптике, предложенная в диссертации схема ее реализации с использованием газоплазменной смеси в полых диэлектрических волноводах является оригинальной. Показано, что предлагаемая в диссертации схема компрессии позволяет получать лазерные импульсы длительностью в один оптический период на субмиллиджоульном уровне энергии в импульсе.

Во второй главе диссертации проведено детальное исследование особенностей самовоздействия пространственно-ограниченных лазерных импульсов с малым числом колебаний поля. Основная модель, используемая для описания таких волновых пакетов, представляет собой аналог уравнения Кадомцева-Петиашвили для электромагнитных волн с малым угловым распределением и безынерционной нелинейностью керровского типа. В этой модели окно прозрачности предполагается достаточно широким, так что дисперсия оказывается универсальной, определяемой из соотношений Крамерса-Кронига областью низких и высоких частот. В этом случае благодаря керровской нелинейности происходит поперечная самофокусировка импульса, которая следует из вириального равенства для квадрата поперечного размера пучка — аналога вириального соотношения Власова-Петрищева-Таланова при двумерной самофокусировке света, описываемой с помощью двумерного нелинейного уравнения Шредингера. На основе уравнения для эффективной ширины волнового поля удается выделить класс начальных распределений, которые в дальнейшем испытывают коллапс. Кроме того, найден широкий класс пространственно – временных автомодельных решений, описывающих самофокусировку излучения и образования ударных волн. Развитие теории нелинейных волн в приложении к исследованию самофокусировки сверхкоротких импульсов показало, что ключевым процессом в динамике системы является укручение продольного профиля. Более того, удалось доказать аналитически и подтвердить численно, что этот процесс несколько опережает самосжатие волнового поля. В результате возможно образование более сложной особенности поля, в которой градиентная катастрофа сопровождается коллапсом волнового поля. Однако о формировании ударной волны можно говорить лишь для сред без дисперсии и сред с аномальной дисперсией. Важно отметить, что обогащение спектра вверх по спектру по степенному закону на заднем фронте импульса в процессе укручения волнового пакета может быть использовано для генерации аттосекундных импульсов. С.А. Скобелевым было аналитически и численно показано, что нелинейная дисперсия приводит к уменьшению длины самофокусировки излучения с уменьшением длительности волнового пакета.

С.А. Скобелевым также было проведено исследование самофокусировки волнового поля вблизи точки нулевой дисперсии групповой скорости. Было показано, в процессе эволюции поля имеет место сильное уширение спектра примерно на две октавы, а также дробление спектра вблизи точки нулевой дисперсии групповой скорости. Такая сильная модификация спектра лазерного импульса приводит к формированию пространственно-временного распределения поля в виде гофры.

В третьей главе диссертации аналитически и численно показано, что самофокусировка пространственно-ограниченных волновых пакетов в среде с кубичной нелинейностью и аномальной дисперсией групповой скорости приводит к

адиабатическому уменьшению продольного размера лазерного импульса до длительности, соизмеримой с периодом колебания поля, для первоначально широких волновых пучков (дисперсионная длина значительно меньше дифракционной) с солитонным распределением поля по продольной координате. Для таких распределений волнового поля по сути реализуется квазиодномерная ситуация. Таким образом, данная компрессия связана с тем, что благодаря процессу самофокусировки излучения будет наблюдаться приток энергии с периферийной части пучка к приосевой, что приведет к увеличению максимальной амплитуды поля и, соответственно, к уменьшению нелинейной длины. Поскольку солитон является нелинейным образованием, существующим при балансе нелинейности и дисперсии среды, это приведет к уменьшению длительности волнового пакета. Удивительным оказалось, что сильно вытянутое эллипсоидальное распределение волнового пучка сохраняется в процессе эволюции и симметризация не происходит. Показано, что в случае когда в начальном распределении «содержится» несколько солитонов в процессе самофокусировки начальное распределение лазерного импульса разобьется на последовательность солитонов, которые в дальнейшем будут по отдельности монотонно сжиматься в продольном направлении. Таким образом, ключевую роль в динамике волнового пакета играют солитонные решения, найденные в первой главе диссертации. Следует отметить, что возможность уменьшения длительности волнового пакета в процессе трехмерного коллапса обсуждалась еще в середине 80-х годов прошлого века для сферически симметричных распределений. Однако эти надежды не оправдались из-за самофокусировочной неустойчивости. В данной главе диссертации аналитически и численно продемонстрировано, что данная опасная неустойчивость, приводящая к расслоению пучка на отдельные нити, может быть стабилизирована для лазерных импульсов с длительностью менее десяти периодов колебаний поля благодаря нелинейной дисперсии (зависимость групповой скорости от амплитуды). В результате предложенный метод самокомпрессии позволяет получать лазерные импульсы с одним периодом поля мДж уровня с мощностями, существенно превосходящие критическую мощность для самофокусировки.

В четвертой главе диссертации предложен новый метод экстремальной самокомпрессии лазерных импульсов солитонного типа в процессе полевой ионизации газа. Аналитически и численно показано, что в волноведущей системе, заполненной двумя сортами газа с существенно различными потенциалами ионизации для обеспечения независимого управления вкладами керровской и ионизационной нелинейностей, имеет место адиабатическое уменьшение длительности волнового пакета от нескольких десятков фс до нескольких сотен ас, сопровождаемое сверхшироким смещением спектра в ультрафиолетовую область с энергетической эффективностью в десятки процентов. Показано, что режим самокомпрессии солитона включает в себя две качественно отличающиеся друг от друга последовательные стадии. На первой стадии лазерный импульс солитонного типа сжимается обычным образом. Число периодов, содержащихся в волновом пакете, уменьшается в процессе ионизации газа в соответствии с солитонными соотношениями. Продемонстрировано, что экстремальная самокомпрессия солитона имеет место на второй стадии, когда солитон с малым числом колебаний поля становится однопериодным и укорочение длительности здесь, по сути, связано уже с адиабатическим уменьшением периода поля с сохранением однопериодичности солитона на протяжении всего времени. Для качественного анализа самокомпрессии солитонно-подобных лазерных импульсов была получена упрощенная система уравнений, которая позволила исследовать динамику волнового пакета в случае, когда несущая частота лазерного импульса может существенно меняться в процессе

ионизации газа с меньшим потенциалом ионизации. На основе данной системы уравнений получены основные зависимости параметров солитона (длительность и несущая частота солитона) от длины среды. Продемонстрировано хорошее согласие результатов численного моделирования с проведенным качественным анализом.

В пятой главе диссертации теоретически и экспериментально исследован эффект ионизационно-индуцированной самокомпрессии высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов вплоть до одного колебания поля, реализующегося при распространении излучения в условиях полого сверхразмерного диэлектрического капилляра. Ключевой идеей является использование газа при сравнительно более высоких давлениях, когда с учетом образующейся плазмы нарушаются условия одномодового распространения и возможно возбуждение ионизационно-нелинейного плазменного волновода, в котором могут распространяться собственные утекающие моды. Существование такого волновода связано с резкой зависимостью вероятности ионизации газа от интенсивности поля в лазерном импульсе, что приводит к образованию резкого (на масштабе длины волны) скачка показателя преломления. По сути, такой плазменный волновод полностью аналогичен капилляру но, в отличие от последнего, обладает существенно меньшей величиной относительного показателя преломления и, как следствие, худшей добротностью. создание более узкого плазменного канала, способного обеспечить аномальный характер групповой дисперсии, в сочетании с частотной модуляцией, приобретаемой импульсом в результате ионизационного перестройки частоты, позволяет осуществить возможность ионизационной самокомпрессии лазерного импульса в условиях полого капилляра. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования свидетельствуют о достаточно высокой эффективности предлагаемого метода, как его энергетической эффективности, так и в определенной степени простоты его реализации, где наиболее чувствительным местом является определение и правильный выбор длины диэлектрического капилляра. Экспериментально продемонстрирована двух-трех кратная временная компрессия исходного импульса длительностью ~ 70 фс. Проведенное численное моделирование нелинейной динамики оптических импульсов в указанных условиях хорошо согласуется с проведенными экспериментами, что и позволило выработать соответствующие рекомендации по выбору параметров излучения, когда наблюдается эффективная самокомпрессия оптического импульса.

В оптимальном режиме предлагаемая схема компрессии позволяет получать сверхкороткие импульсы с длительностью вплоть до одного колебания поля. Теоретически показано, что данный метод самокомпрессии волновых пакетов может быть промасштабирован к высоким энергиям в лазерном импульсе, покрывая диапазон от суб-миллиджоульного до мультиджоульного уровня. Данный результат открывает возможность получения источников высокоэнергетичных лазерных импульсов с малым числом колебаний поля, в частности, используя традиционную титан-сапфировую лазерную систему высокой мощности.

В шестой главе диссертации теоретически и экспериментально исследован новый метод самокомпрессии релятивистски сильных лазерных импульсов вплоть до периода колебания поля в условиях возбуждения кильватерной плазменной волны. Самосжатие волнового поля, длительностью меньше периода плазменных колебаний, связано с самосогласованным вытеснением электронов в задней части импульса. Для мультитераваттных лазерных импульсов насыщение релятивистской нелинейности приводит к квазиодномерному режиму самосжатия лазерного импульса. При этом характерная длина формирования сжатого импульса зависит от

интенсивности поля по степенному закону. При релятивистски слабых интенсивностях самокомпрессия волнового пакета протекает в условиях нестационарной самофокусировки излучения; в этом случае характерная длина компрессии зависит от интенсивности экспоненциально. Наряду с теоретическим анализом был проведен также эксперимент. В эксперименте, было продемонстрировано сжатие релятивистски сильного лазерного импульса с мощностью 100 ТВт с 30 фс до 10 фс в газовой струе длиной 2 мм с концентрацией газа $1.1 \cdot 10^{19}$ Вт/см². Анализ экспериментальных спектров показал, что можно было рассчитывать и на более сильное укорочение лазерного импульса, но с данным SPIDER нельзя достоверно измерить более короткие волновые пакеты.

Аналитически и численно показано, что пространственно-временная неустойчивость сверхкороткого релятивистски сильного лазерного импульса при возбуждении кильватерной волны с периодом, превышающим длительность волнового пакета, подавлена из-за инерции нелинейного отклика. Развитие шланговой неустойчивости, приводящей к нарушению осевой симметрии волнового пучка, характеризуется степенной (не экспоненциальной) зависимостью от длины распространения, и данная неустойчивость не приводит к ухудшению режима самокомпрессии.

В заключении формулируются основные результаты работы.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

- 1) В диссертации не обсуждаются области применимости безотражательного подхода
- 2) В разделе 1.9 рассматривается нелинейность пятого порядка по полю, но не поясните в каких условиях это может быть реализовано.
- 3) Во второй главе диссертации в общем то из одного и того же уравнения получены законы поведения максимальной амплитуды волнового пакета от эволюционной переменной z для линейно и циркулярно поляризованного излучения в случае сред без дисперсии. С чем связано различие в законах поведения амплитуды для двух разных поляризаций?
- 4) В третьей главе диссертации показано, что в случае когда в продольном направлении задано квазисолитонное распределение поля, то в процессе самофокусировки пучка длительность волнового пакета будет монотонно уменьшаться вплоть до значения, которое соответствует длительности предельного. Было показано, что при дальнейшем уменьшении поперечного размера пучка это будет приведет к формированию ударной волны, что, соответственно, это приводит к формированию очень широкого спектра, спадающего по степенному закону. Можно ли в данном случае на выходе нелинейной среды сформировать еще более короткий лазерный импульса, который мог бы быть значительно короче периода поля?
- 5) В четвертой главе диссертации не обсуждается роль «высокочастотной» дисперсии среды и линий поглощений в ультрафиолетовой области на процесс укорочения лазерного импульса солитонной формы в смеси двух газов. К чему может привести их роль в динамике волнового пакета?
- 6) В пятой главе диссертации показано, что при определенных условиях возможно возбуждение нелинейного плазменного канала внутри диэлектрического капилляра за счет которого происходит укорочение ионизирующего лазерного импульса. Можно ли реализовать компрессию волнового пакета в отсутствии диэлектрического капилляра.

Указанные замечания не являются критичными с позиций основных результатов работы и не снижают общей высокой ее оценки. Работа и автореферат написаны хорошим научным языком, все аналитические выкладки и результаты численных экспериментов выполнены и продемонстрированы с высочайшей тщательностью и аккуратностью. Автореферат диссертации правильно отражает содержание диссертации и дает достаточно полное представление об использованных методах, актуальности, новизне и значимости работы, личном вкладе автора. Работы С.А. Скобелева широко известны научной общественности по публикациям в реферируемой литературе. Полученные результаты в данной диссертации представляют собой существенный вклад в развитие научного направления в проблеме формирования волновых пакетов с длительностью, соизмеримой с периодом поля, в процессе самокомпрессии мощных лазерных импульсов в широком диапазоне по энергии от нДж до кДж уровня. Диссертация С.А. Скобелева соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к докторским диссертациям. У меня нет сомнений, что С.А. Скобелев заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «лазерная физика».

Желтиков Алексей Михайлович

Доктор физико-математических наук,
профессор, профессор физического
факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
тел.: (495) 939 51 74; zheltikov@physics.msu.ru
Диссертация защищена по специальности
01.04.21– лазерная физика

Караваев Владимир Александрович

Подпись А.М. Желтикова заверяю
Ученый секретарь Ученого совета
Физического факультета МГУ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова», г. Москва, Ленинские горы 1, 119991

25 марта 2016 г.

Декан физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
профессор



Сысоев Николай Николаевич