

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор



Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Объединенный институт высоких  
температур Российской академии наук  
академик Фортов В.Е.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Скобелева Сергея Александровича  
**«САМОВОЗДЕЙСТВИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И  
ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ  
ИМПУЛЬСОВ»**, представленную на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «лазерная физика»

Диссертационная работа Скобелева Сергея Александровича представляет собой теоретическое и экспериментальное исследование, которое относится к нелинейной оптике предельно коротких лазерных импульсов и посвящено особенностям самовоздействия волновых пакетов в средах с различными типами нелинейностей: керровской, ионизационной, релятивистской.

С развитием фемтосекундной, а теперь и аттосекундной, лазерной техники исследования по нелинейной оптике сверхкороткого лазерного излучения являются весьма актуальными и представляют значительный интерес. Благодаря ультракороткой длительности генерируемого лазерного излучения, при относительно небольшом уровне энергии, содержащейся в лазерном импульсе, стало возможным получение беспрецедентно больших мощностей лазерных импульсов - тераваттного и петаваттного уровня мощности. Эти революционные достижения в технологии генерации лазерных импульсов усилили и в значительной степени обусловили интерес к вопросам их взаимодействия с веществом. Комбинация высоких интенсивностей с короткой длительностью делает взаимодействие таких импульсов с веществом уникальным. Однако в последние годы все больший интерес вызывают импульсы предельно короткой длительности, а также их взаимодействие с веществом. Таким образом, одной из актуальных задач физики сверхсильных полей остается проблема генерации, усиления и создание эффективных методов последующего укорочения лазерных импульсов вплоть до одного колебания поля.

В связи с этим передовые рубежи нелинейной оптики сверхкоротких лазерных импульсов сегодня – это исследование самовоздействия волновых пакетов, содержащих лишь несколько колебаний светового поля. Понятие огибающей для таких предельно коротких импульсов теряет свое физическое содержание. Перестает быть корректным и выводимое в приближении квазимонохроматического излучения привычное для нелинейной оптики уравнение движения огибающих. В связи с этим возникает новая в теоретическом плане проблема исследования особенностей распространения сверхкоротких импульсов конечной амплитуды, дифракции их в неоднородной среде и взаимодействия широкополосного излучения с веществом. Необходимо также и получение материальных уравнений, адекватно описывающих линейную и нелинейную дисперсию показателя преломления среды в широком диапазоне частот в области прозрачности.

В диссертации исследования особенностей самовоздействия широкополосного лазерного излучения проведены на основе безотражательного распространения волнового пакета. В случае квазимонохроматического излучения такой подход, очевидно, соответствует переходу к уравнению для огибающей. Основное отличие представленной диссертации от большинства исследований состоит в том, что в ней рассматриваются предельно короткие импульсы, для которых метод медленно меняющихся амплитуд не применим. В представленной диссертации, наряду с численным исследованием эволюции системы, проведено дальнейшее развитие методов теории нелинейных волн (метод моментов распределения волнового поля, обобщенное линзовое преобразование, солитонные и автомоделные решения).

Поэтому актуальность тематики диссертационной работы Скобелева С.А. не вызывает сомнений. Диссертация представляет большой интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для широкого круга практических приложений. Базируясь на проведенном анализе, были развиты новые регулярные методы для формирования волновых пакетов с длительностью, соизмеримой с периодом 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.

Диссертационная работа состоит из введения, заключения и шести глав, содержащих оригинальные результаты.

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 проведен анализ нового класса одномерных уединенных решений волнового уравнения для циркулярно поляризованного излучения с произвольным числом колебаний поля в средах с безынерционной нелинейностью керровского типа и плазменным законом дисперсии. Эти решения с увеличением амплитуды поля плавно перестраиваются от солитонных решений НУШ, соответствующих длинным импульсам со многими осцилляциями, до предельно коротких, фактически однопериодных видеоимпульсов. Особенностью данных волновых солитонов является существование предельного солитона с максимально допустимой энергией и минимальной возможной длительностью (соизмеримой с периодом колебаний поля). Предложен алгоритм для определения начальных распределений волнового поля, распадающихся в дальнейшем на последовательность солитонов с предопределенными параметрами. Рассмотрена реализуемость таких солитонных структур для поля с эллиптической поляризацией и численно показана их структурная устойчивость.

Во **второй главе** диссертации приведены результаты аналитических и численных исследований структурных особенностей динамики самофокусировки лазерных произвольной длительности. Описание процессов проведено в предположении безотражательного распространения волнового поля произвольной длительности в диспергирующей среде с безынерционной нелинейностью керровского типа. Развиты методы качественного исследования динамики самовоздействия сверхкоротких импульсов. В частности, методом моментов найдено достаточное условие коллапса в системе. На основе преобразования автомоделного типа показано, что вблизи особенности (в области неограниченного нарастания поля) дисперсионные эффекты ослабляются, и существенную роль играет нелинейная дисперсия среды (зависимость групповой скорости от амплитуды поля). Самофокусировка волнового поля сопровождается опрокидыванием продольного профиля импульса, и в результате формируется особенность нового типа, в которой на фоне неограниченного роста поля происходит градиентная катастрофа. Численное исследование подтверждает, что самофокусировка сверхкоротких импульсов, как правило, сопровождается укрупнением продольного распределения и формированием ударных фронтов. Это приводит к

аномальному уширению спектра излучения, который спадает при больших частотах по степенному закону.

**В третьей главе** диссертации приведены результаты аналитических и численных исследований нового метода самокомпрессии лазерных импульсов солитонной формы по продольной координате в процессе самофокусировки пространственно-ограниченных распределений, сильно вытянутых в поперечном направлении, у которых дисперсионная длина много меньше дифракционной. Показано, что самофокусировка волнового поля приводит к адиабатическому уменьшению продольного размера волнового пакета до длительности, соизмеримой с периодом колебаний поля. Сильно вытянутое эллипсоидальное распределение волнового пакета сохраняется на всех стадиях эволюции системы, и симметризация не происходит. В дальнейшем нелинейная дисперсия приводит к формированию ударной волны. Аномальное уширение спектра излучения, спадающего по степенному закону, может быть использовано в дальнейшем для генерации аттосекундного импульса вблизи заднего фронта волнового пакета.

Аналитически и численно показано, что нелинейная дисперсия среды приводит к стабилизации самофокусировочной неустойчивости для лазерных импульсов с длительностью менее десяти периодов колебаний.

**В четвертой главе** диссертации показано, что в среде с независимым контролем керровской и ионизационной нелинейностей (например, таких как смесь двух газов с заметно отличающимися потенциалами ионизации) может иметь место экстремальная самокомпрессия лазерного импульса. Газ с более высоким потенциалом и большей плотностью обеспечивает керровскую нелинейность и приводит в условиях волноводной дисперсии к образованию солитона, в то время как второй сорт газа с меньшим потенциалом ионизации приводит к ионизационному повышению частоты в коротковолновую часть, и соответственно, к уменьшению длительности солитона. В таком случае, режим самокомпрессии солитона включает в себя две качественно отличающиеся друг от друга последовательные стадии. На первой солитонный импульс сжимается обычным образом, когда процесс адиабатически развивается, согласуясь с солитонными соотношениями. При этом экстремальная компрессия имеет место на втором этапе, когда солитон с малым числом колебаний поля становится по-настоящему однопериодным со сверхшироким спектром. Продемонстрировано, что на данной стадии процесс дальнейшей самокомпрессии значительно ускоряется и сопровождается повышением сверхширокого спектра, сохраняя однопериодичность солитона на протяжении всего времени. Предложенный метод позволяет получить лазерные импульсы с длительностью в несколько сотен аттосекунд в ультрафиолетовой области с эффективностью в десятки процентов. Проведены исследования по оптимизации самокомпрессии лазерных импульсов, основанные на концепции солитонов высокого порядка.

**В пятой главе** диссертации приведены теоретические и экспериментальные результаты по самовоздействию мощного лазерного импульса в диэлектрическом капилляре, заполненном газом, в случае, когда основным механизмом нелинейности является полевая ионизация газа. Продемонстрировано, что при сравнительно высоких давлениях газа в процессе его ионизации имеет место возбуждение довольно узкого нелинейного плазменного канала в диэлектрическом капилляре, в котором могут распространяться собственные утекающие моды. Благодаря дисперсии данного канала и частотной модуляции в волновом пакете, связанной с ионизационной нелинейностью, имеет место самокомпрессия лазерного импульса вплоть до одного колебания поля. Продемонстрирована возможность масштабирования данной схемы компрессии к джоулеву уровню энергии.

**В шестой главе** диссертации теоретически обоснован и экспериментально продемонстрирован новый метод самокомпрессии релятивистски сильных лазерных импульсов до нескольких колебаний поля при возбуждении кильватерной плазменной

волны. Развита теория нестационарного самовоздействия широких (в масштабе длины плазменной волны) пространственно-ограниченных сверхкоротких лазерных импульсов. Предложен новый перспективный метод самокомпрессии лазерных импульсов петаваттного уровня мощность вплоть до одного колебания поля. Самосжатие волнового пакета связано с тем, что в условиях возбуждения кильватерной волны в задней части волнового пакета происходит вытеснение электронов, а в передней части импульса, наоборот, концентрация электронов увеличивается. Следовательно, задняя часть импульса догоняет переднюю часть, так как групповая скорость волнового пакета в плазме увеличивается с уменьшением концентрации электронов. Как показали результаты аналитических и численных исследований, темп укорочения лазерного импульса протекает по-разному в зависимости от величины амплитуды векторного потенциала. В случае, когда амплитуда векторного потенциала мала по сравнению с релятивистским значением, лазерный импульс будет испытывать самофокусировку, что приведет к дополнительному усилению поля. Как показал качественный анализ, в этом случае характерная длина экспоненциально уменьшается с увеличением мощности в лазерном импульсе. В другом предельном случае, когда из-за насыщения нелинейности подавляется самофокусировка (реализуется квазиодномерная ситуация), темп укорочения ниже и зависимость длины компрессии волнового пакета степенная от амплитуды лазерного импульса.

Проведено детальное теоретическое исследование шланговой неустойчивости распространяющихся в плазме релятивистски сильных лазерных импульсов с длительностью менее периода кильватерной плазменной волны. Получено аналитическое выражение для смещения центра масс волнового пучка и проанализировано влияние этой неустойчивости на процесс модификации спектра лазерного излучения для широкой области начальных параметров. Показано, что развитие неустойчивости характеризуется степенной (не экспоненциальной) зависимостью от времени на трассе распространения и не приводит к ухудшению режима самокомпрессии лазерных импульсов.

**В заключении** формулируются основные результаты работы.

Диссертация не свободна от недостатков, к которым следует отнести следующие.

В работе практически не обсуждаются условия, при которых возможно пренебречь влиянием «высокочастотной» дисперсией среды на динамику лазерного импульса. Желательно привести примеры, когда это возможно.

При построении модели диэлектрической проницаемости пренебрегается диссипацией в рассматриваемом диапазоне частот, однако затухание поля учитывается при анализе "ударно-волновой" структуры излучения.

Не обсуждаются пределы применимости однонаправленного приближения.

В разделе 1.9 продемонстрированы солитонные решения с нелинейностью пятого порядка по полю, но не указано когда данная ситуация может быть реализована.

Имеется опечатка в формуле (3.62).

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИОФАН им. А.М. Прохорова, ИПФ РАН, МГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Институте спектроскопии РАН, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Санкт-Петербургском государственном университете и других научных центрах.

Замечания и недостатки, указанные выше, ни в коей мере не снижают высокую оценку представленной работы и ценность полученных в ней результатов. Работу Скобелева Сергей Александровича отличает комплексный подход и весомость полученных результатов. Диссертация является завершенным исследованием.

Характеризуя работу в целом, следует еще раз отметить ее актуальность и новизну, четкую концепцию, научную и практическую значимость, современный уровень

разработанных теоретических моделей. Следует отметить, что в диссертации очень хорошо сочетаются аналитические и численные расчеты, дополняя друг друга. Особо отметим экспериментальные работы, в которых принял участие диссертант.

Результаты, полученные С.А. Скобелевым в диссертации, широко известны как у нас в России, так и за рубежом. Основные результаты опубликованы в ведущих физических российских и международных журналах, входящих в перечень журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией. Научные положения, выносимые на защиту, достаточно полно отражены в опубликованных работах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и дает достаточно полное представление об использованных методах и подходах, актуальности, новизне и значимости работы, а также личном вкладе автора.

Оценивая работу в целом, необходимо сказать, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную на высоком уровне. Как по уровню проведенных исследований, так и по полученным результатам работа полностью отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (п. 9-14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Скобелев Сергей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «лазерная физика» ..

Работа заслушана и обсуждена на семинаре Лазерной плазмы 23 марта 2016 г.

Руководитель семинара,  
зав. лаб. №1.2.3.2 теории лазерно-плазменных воздействий ОИВТ РАН,  
профессор, д.ф.-м.н.

Андреев Николай Евгеньевич

Секретарь семинара, с.н.с., лаб. №1.2.3.2, д.ф.-м.н.

Фролов Александр Анатольевич

**Отзыв составил:**

Заведующий отделом №1.2.3 лазерной плазмы ОИВТ РАН,  
д.ф.-м.н.

Агранат Михаил Борисович

«25» марта 2016 г.

Телефон: (495) 362-51-36

Email: [agranat2004@mail.ru](mailto:agranat2004@mail.ru)

Адрес :

125412, г. Москва,

ул. Ижорская, д.13, стр.2

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)