

УТВЕРЖДАЮ
Директор ОИВТ РАН
академик РАН Петров О.Ф.



2020г.
М.П.

ОТЗЫВ
ведущей организации
на диссертационную работу Ефименко Евгения Сергеевича
«САМОСОГЛАСОВАННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИОНИЗАЦИИ
ВЕЩЕСТВА И ВАКУУМА СИЛЬНОСФОКУСИРОВАННЫМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Диссертация посвящена исследованиям ионизационной динамики фемтосекундных лазерных импульсов в режимах, когда для достижения максимальной интенсивности при фиксированной мощности лазерного излучения применяют резкую фокусировку лазерного излучения. При этом достигается высокая локализация взаимодействия и быстрый рост плотности формирующейся плазмы. Формируемые в процессе взаимодействия плазменные структуры и потоки высокоэнергичных частиц могут иметь экстремальные параметры. Развитие суперкомпьютерных технологий и численных методов позволяет проводить расчеты в условиях, труднодоступных для эксперимента, а также сопровождать эксперимент. В данной работе проведены расчеты как при интенсивностях, при которых происходит пробой в газовых и конденсированных мишенях, так и при экстремально высоких интенсивностях, при которых возможно образование электрон-позитронной плазмы.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения и библиографии. Текст изложен на 179 страницах, содержит 60 рисунков и 164 библиографические ссылки.

Во введении обосновывается актуальность проведенных исследований, сформулированы цели работы, научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и положения, выносимые на защиту. Представлены сведения об апробации

диссертационной работы, указаны печатные работы автора, в которых опубликованы материалы диссертации. Отмечен личный вклад автора.

В обзоре литературы представлено состояние исследований по полевой и лавинной ионизации вещества, рождению электрон-позитронной плазмы в сверхсильном поле. Рассмотрены нелинейные эффекты в ионизирующейся плазме. Представлен обзор литературы по взаимодействию лазерного излучения с одиночными водяными каплями и аэрозолями, а также квантово-электродинамическим каскадам и динамике электрон-позитронной плазмы при интенсивностях более 10^{23} Вт/см².

В первой главе рассмотрено распространение сфокусированного фемтосекундного лазерного импульса в ионизируемой среде. В качестве среды рассмотрен газ водород. Основное внимание уделено плазменным структурам, формирующимся с учетом туннельной ионизации, и характеристикам лазерного излучения в зависимости от угла фокусировки. Поскольку основные особенности этого взаимодействия проявляются при плотностях, существенно превышающих критическое значение, то дополнительно исследовано влияние кубичной нелинейности и поглощения лазерной энергии, вызванного соударениями электронов с молекулами водорода. Приведены основные уравнения рассматриваемой модели и обсуждается постановка численного эксперимента. Для понимания структуры поля при резкой фокусировке приведено аналитическое решение упрощенной двумерной задачи о распространении ТЕ-поляризованной волны в вакууме и продемонстрировано возникновение мелкомасштабных неоднородностей в сфокусированном поле. Рассмотрены ионизационная динамика сфокусированных ТЕ-поляризованных лазерных импульсов и особенности ионизационной динамики ТМ-поляризованных лазерных импульсов, связанные с эффектом плазменного резонанса.

Во второй главе рассмотрен эффект вынужденного ионизационного рассеяния сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов. На основе анализа дисперсионного соотношения для электромагнитной волны в ионизируемом газе показано существование области параметров, в которой возможно развитие ионизационной неустойчивости. Для исследования нелинейного режима численно проанализирована динамика взаимодействия сильносфокусированного лазерного импульса накачки с электромагнитной волной малой амплитуды. Рассматривалась модельная задача с учетом только туннельной ионизации, затем было учтено влияние электронных соударений. Проанализированы спектральные и энергетические характеристики рассеянного излучения, рассмотрены плазменные структуры, формирующиеся в процессе взаимодействия. Показано, что в отличие от ТЕ-поляризованных импульсов, для которых

ионизационное рассеяние эффективно во всем диапазоне углов, для ТМ-поляризованных лазерных импульсов ионизационное рассеяние практически полностью подавлено для возмущений, распространяющихся перпендикулярно к лазерному импульсу. Продемонстрировано, что кроме возмущений поля в качестве затравки может выступать модуляция плотности газа. На основе эффекта вынужденного ионизационного рассеяния предложена схема усиления ультракоротких лазерных импульсов.

Третья глава посвящена исследованию взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса с одиночной водяной каплей и аэрозолем. Представлены основные уравнения и параметры моделирования, на основе которых описывалась динамика лазерного излучения и плазмы с учетом полевой ионизации воды. Для понимания структуры поля на основе теории Ми описано взаимодействие плоской волны со сферой из диэлектрика с действительным коэффициентом преломления. Численно исследуется ионизационная динамика при взаимодействии плоской волны с одиночной водяной каплей на примере капель диаметром 3 и 30 мкм. Исследуются спектральные и энергетические характеристики рассеянного излучения, а также поглощение в объеме капли. Проводится сравнение результатов численного моделирования с результатами экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с одиночными водяными каплями и аэрозолем.

В четвертой главе рассматривается нелинейная динамика электрон-позитронной плазмы, создаваемой в результате квантово-электродинамического каскада в поле дипольной волны электрического типа. Анализируются два нелинейных режима взаимодействия, реализуемые при мощностях сходящихся волн меньше и больше 20 ПВт. Показано, что в первом режиме в результате азимутального токового расслоения формируются плазменные структуры слоистого типа. Во втором режиме динамика системы носит ярко выраженный сингулярный характер, происходит самосжатие электрон-позитронной плазмы под действием генерируемого магнитного поля. Кратко обсуждаются многопучковые системы для формирования структуры поля, приближенной к идеальной дипольной волне, а также параметры мишени, необходимые для достижения рассматриваемых режимов.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

По содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие замечания.

1. В уравнениях модели, использованной в главах 1, 2 и 3, не учитывается поглощение энергии поля при полевой ионизации вещества, поэтому эту модель нельзя считать самосогласованной.
2. В главах 1 и 2 показано сильное влияние поглощения энергии поля в результате столкновений электронов с молекулами водорода на максимальные значения концентрации электронов, полную рассеянную энергию и усиление лазерного импульса при вынужденном ионизационном рассеянии, однако влияние поглощения энергии поля при полевой ионизации водорода на эти величины не исследовано.
3. Поглощение энергии поля, обусловленное столкновениями электронов с молекулами водорода (в газовой фазе водорода), описывается в данной работе эмпирической формулой для частоты столкновений, которая неприменима при плотностях водорода, характерных для конденсированной фазы (соответствующие результаты расчетов приведены на рисунках 1.12 (а) и 1.14).
4. При значительной ионизации водорода, вплоть до полной ионизации, показанной на рисунке 1.12 (б) в случае ТМ-поляризации лазерных импульсов, необходимо учитывать поглощение энергии поля, обусловленное столкновениями электронов с ионами.
5. В работе [A4] (E. S. Efimenko et al. 2014. J. Opt. Soc. Am. B) и главе 3 диссертации заметно отличие расчетного и измеренного спектров излучения, рассеянного каплей воды диаметром 30 мкм при интенсивности лазерного излучения 2.5 ТВт/см^2 . Это указывает на недостатки в рассмотренной модели, к которым можно отнести использование постоянных значений для частоты столкновений электронов и коэффициента рекомбинации независимо от степени ионизации, а также пренебрежение поглощением энергии поля при полевой ионизации воды.
6. В работе [A5] (E. S. Efimenko et al. 2015. Appl. Phys. B) при сравнении результатов расчетов и измерений спектров и энергии рассеянного излучения учитывается лавинная ионизация капель воды диаметром 3 мкм, а в главе 3 она не учитывается. В главе 3 не рассмотрен вопрос о влиянии лавинной ионизации на результаты расчетов.
7. Один из основных результатов работы (№ 4) и соответствующее положение, выносимое на защиту (№ 3), не опубликованы в рецензируемом издании.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Актуальность и научная новизна работы подтверждаются семью публикациями в высокорейтинговых рецензируемых журналах, индексируемых в

международной базе данных Web of Science. Материалы диссертации докладывались на многочисленных российских и международных конференциях.

К наиболее значимым результатам можно отнести следующие.

1. Продемонстрирован эффект формирования регулярных мелкомасштабных плазменных неоднородностей при распространении лазерных импульсов в плотном газе, который объясняется усилением модуляции сильнофокусированного поля вблизи фокуса вследствие резкой зависимости вероятности ионизации от величины поля. Продемонстрировано, что при высокой плотности газа ионизационная динамика существенно зависит от поляризации лазерного импульса.
2. Показано, что развитие быстрой неустойчивости при распространении сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов в плотном газе может приводить к рассеянию заметной доли энергии лазерных импульсов. Показано, что в качестве затравки для развития неустойчивости может выступать как электромагнитная волна малой амплитуды, так и модуляция плотности газа.
3. Предложен метод усиления ультракоротких лазерных импульсов, основанный на эффекте вынужденного ионизационного рассеяния.
4. Проведено сравнение теоретически рассчитанных спектров рассеянного назад излучения, величин рассеянной и поглощенной лазерной энергии с результатами экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с одиночной водяной каплей и аэрозолем, которое показало хорошее количественное и качественное совпадение.
5. Показано существование двух режимов динамики плотной электрон-позитронной плазмы, формирующейся в результате квантово-электродинамического каскада, в случае предельной фокусировки лазерного излучения мультипетаваттного уровня мощности в виде сходящейся волны дипольной конфигурации в зависимости от мощности падающего излучения. При мощности лазерного излучения меньше 20 ПВт формируется структура, представляющая собой плазменные слои, расположенные под углом π друг к другу. При мощности, превышающей 20 ПВт, возможно пинчевание электрон-позитронной плазмы, приводящее к достижению ею плотности 10^{28} см^{-3} , при этом магнитное поле может превышать поле волны в 7 раз.

Практическая значимость работы. Вынужденное ионизационное рассеяние фемтосекундных лазерных импульсов может быть использовано для микро структурирования плазмы, а также для усиления предельно коротких лазерных импульсов. Сильно локализованное поглощение лазерного излучения внутри одиночной

водяной капли может создавать условия для исследования вещества в экстремальных состояниях. На основе анализа свойств рассеянного на аэрозоле лазерного излучения может осуществляться детектирование примесей в атмосфере. Плотная электрон-позитронная плазма, формируемая за счет квантово-электродинамического каскада в дипольной волне, может служить универсальным объектом исследований, позволяя достичь экстремально высоких плотностей электронов и позитронов. Такая плазма может выступать в качестве эффективного источника электронов, позитронов и фотонов с энергиями, превышающими 1 ГэВ. Результаты работы могут быть использованы в Институте прикладной физики РАН, Институте оптики атмосферы СО РАН, Физическом институте РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Московском инженерно-физическом институте, на Физическом факультете МГУ.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Ефименко Евгений Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Диссертация и отзыв на неё обсуждены на семинаре лаборатории № 1.3 – теории лазерной плазмы ОИВТ РАН (протокол № 187 от 25 ноября 2020 г.).

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук Костенко Олегом Федотовичем.

Старший научный сотрудник лаборатории № 1.3 – теории лазерной плазмы ОИВТ РАН, к.ф.-м.н.

Костенко О. Ф.

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 485-9722, jiht.ru, olegkost@ihed.ras.ru

Заведующий лабораторией № 1.3 – теории лазерной плазмы ФГБУН ОИВТ РАН, д.ф.-м.н., профессор

Андреев Н. Е.

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 485-9722, jiht.ru, andreev@ras.ru

Ученый секретарь ОИВТ РАН

д.ф.-м.н.



Амиров Р. Х.

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 485-9009, jiht.ru, amirovravil@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, (495) 485-8244, jiht.ru, webadmin@ihed.ras.ru