

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук,
ведущего научного сотрудника Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Попруженко Сергея Васильевича

на диссертационную работу Мартыненко Артема Сергеевича

«Сверхплотная плазма в условиях изохорического нагрева
пикосекундными лазерными импульсами релятивистской интенсивности»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа А.С. Мартыненко посвящена экспериментальному исследованию процесса образования плотной плазмы при взаимодействии пикосекундного лазерного излучения высокой ($>10^{20}$ Вт/см²) интенсивности с твердотельными мишенями и численному моделированию, направленному на выяснение физического содержания полученных экспериментальных результатов. Целями исследования были: экспериментальная реализация изохорического нагрева плазмы, развитие диагностик температуры и плотности плазмы, основанных на наблюдении спектров излучения многозарядных ионов, оценка параметров пьедестала мощного пикосекундного лазерного импульса по характеристикам возникающей плазмы и верификация теоретических моделей, описывающих свойства многозарядных ионов в плазме, плотность которой близка к твердотельной.

В последние десятилетия активно развивается область физики, посвященная изучению взаимодействия лазерного излучения высокой интенсивности и энергии с веществом. Благодаря созданию лазерных установок кило- и мегаджоульного уровня энергии в импульсе и петаваттной мощности эта область исследований постоянно подпитывается новым экспериментальным материалом. В зависимости от параметров используемых лазерных импульсов и мишеней в таких экспериментах могут реализовываться различные режимы взаимодействия. Особый интерес представляет взаимодействие мощного лазерного излучения с плотными мишенями в условиях, при которых в результате поглощения энергии электромагнитного поля веществом образуется плотное теплое и горячее вещество (в настоящее время warm dense matter – WDM и hot dense matter – HDM – общепотребимые научные термины), физические характеристики которого

воспроизводят условия, реализующиеся как в астрофизических объектах, так и в лабораторных устройствах, в том числе предназначенных для получения управляемой термоядерной реакции. Благодаря возникшим в последние десятилетия возможностям создания лазерной плазмы и управления ее свойствами сформировалась новая быстро развивающаяся область исследований – лабораторная астрофизика. Получение плотной плазмы в форме WDM или HDM с заданными свойствами и диагностика такой плазмы являются исключительно сложными задачами, решение которых во многих случаях требует полноценного расчетно-экспериментального исследования. Это обусловлено и сложностью описания физических свойств плотных систем с кулоновским взаимодействием в присутствии интенсивного излучения широкого диапазона длин волн, и нестационарным режимом взаимодействия, и тем, что не все параметры лазерного импульса можно надежно контролировать. Решению задачи о реализации изохорического нагрева плотной плазмы и надежной диагностике такой плазмы, относящейся к обрисованной выше проблематике, и посвящена данная диссертационная работа. Таким образом, актуальность проведенных исследований не вызывает сомнений.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка терминов и сокращений и списка литературы, включающего 197 наименований.

Во введении дан краткий обзор области исследований, сформулированы цели работы, обоснованы ее актуальность и практическая значимость, перечислены выносимые на защиту положения, кратко изложено содержание диссертации, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

Первая глава посвящена описанию метода определения момента плазмообразования в мишенях, облучаемых лазерными импульсами высокой энергии и интенсивности. Дан краткий обзор методов получения WDM и HDM в лабораторных условиях. Приводятся характеристики установок Vulcan PW (Великобритания) и Phelix (Германия), на которых были получены представленные в диссертации экспериментальные результаты. Основным достижением данной главы является метод, позволяющий оценивать длительность пьедестала мощного пикосекундного лазерного импульса, основанный на анализе профиля и относительных интенсивностей диэлектронных сателлитов и линий серии Лайман-альфа водородоподобных ионов. Разработанный и экспериментально апробированный метод создает

дополнительные возможности контроля параметров пикосекундного лазерного излучения высокой мощности.

Вторая глава посвящена определению параметров свободно разлетающейся плазмы рентгеноспектральным методом. Здесь подробно описан разработанный автором метод определения параметров плазмы по ее интегральным характеристикам. Необходимость использования такого метода обусловлена трудностью проведения измерений с суб-пикосекундным временным разрешением. Основным результатом второй главы является разработанный и экспериментально апробированный подход, позволяющий оценить температуру и плотность плазмы на начальном этапе взаимодействия по интегральным спектрам излучения многозарядных ионов плазмы. Из полученных в главе экспериментальных данных следует также, что в отсутствие структур, препятствующих разлету плазмы, ее нагрев происходит в режиме, далеком от изохорического даже при очень высоком контрасте лазерного импульса. Таким образом, для достижения основной цели работы необходимо добавление таких структур в мишень.

В третьей главе излагаются экспериментальные и расчетные результаты по прямому изохорическому нагреву плотной плазмы пикосекундным интенсивным лазерным импульсом. Подробно описана постановка эксперимента на лазерной установке Vulcan PW и использованного в этом эксперименте диагностического комплекса. В качестве мишени брались тонкие фольги из Si и SiN₃ без покрытия и с прозрачным покрытием из пластика CH. В этой главе получен ряд важных результатов. С использованием спектрального анализа было показано, что в отсутствие прозрачного покрытия плотность плазмы остается в несколько раз ниже твердотельной даже при использовании лазерного импульса со сверхвысоким контрастом, достигаемым за счет применения плазменного зеркала и технологии ОРСПА. При тех же условиях на мишенях с покрытиями образуется плазма с плотностью, близкой к твердотельной. Смоделирован и экспериментально исследован эффект понижения потенциала ионизации в плотной плазме, а также измерено положение границы фоторекомбинации при различных значениях плотности плазмы. Продемонстрировано хорошее согласие полученных результатов с предсказаниями модели НМ (D.G. Hummer and D. Mihalas, 1988). Наконец, были исследованы излучательные свойства плотной горячей плазмы, состоящей из Al и Si и определена толщина мишени (около 10 мкм), необходимая для достижения максимальной светимости в фоторекомбинационном континууме.

Четвертая глава посвящена исследованию непрямого изохорического нагрева плазмы потоком электронов, ускоренных пикосекундными лазерными импульсами релятивистской интенсивности. Дано подробное описание оригинальной экспериментальной постановки, реализованной на лазере Phelix, и состоящей в облучении (одновременном или с временной задержкой) двух проволочек, одна из которых служила основной мишенью, а другая – источником рентгеновских фотонов, использовавшихся для радиографии этой мишени. Были проведены измерения температуры прогрева вещества проволоочки-мишени и определена область, в которой этот прогрев осуществляется не напрямую лазерным излучением, а за счет поглощения энергии быстрых электронов. Методами радиографии исследована динамика разлета мишени и показано, что процесс прогрева происходит до разлета мишени, то есть является изохорическим. Показано также, что температура прогрева сильно зависит от величины вкладываемой энергии лазерного излучения и гораздо слабее – от его интенсивности.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Представленные в диссертационной работе результаты являются новыми. В частности, предложен новый метод оценки момента образования преплазмы по эмиссионным спектрам ионов; указан и апробирован способ существенного повышения плотности лазерной плазмы за счет использования пластиковых СН-обкладок мишени; разработан метод восстановления параметров плазмы в момент взаимодействия с мощным лазерным импульсом по наблюдению интегральных по времени эмиссионных рентгеновских спектров; экспериментально наблюдался эффект снижения потенциала ионизации уровней ионов, находящихся в плотной плазме, величина этого эффекта была исследована в зависимости от плотности плазмы. Теоретическая значимость работы определяется предложенными в ней моделями и полученными результатами расчетов параметров спектральных линий, выполненных при помощи пакетов программ PrismSPECT и SCFLY. Результаты работы безусловно обладают и значительной практической значимостью. Разработанные методы получения плотного вещества с высоким вложением в него энергии лазерного излучения и его диагностики могут найти широкое применение в исследованиях по лабораторной астрофизике, определению уравнений состояния различных веществ, находящихся в условиях WDM или HDM и других экспериментах по физике экстремальных состояний вещества. В частности, полученные результаты и разработанные экспериментальные методики могут быть востребованы в таких исследовательских центрах как

Объединенный институт высоких температур РАН, Институт общей физики РАН, НИЦ «Курчатовский институт», Физический институт РАН, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Институт прикладной физики РАН и многих других российских и зарубежных НИИ, вузах и лабораториях, проводящих исследования в области лазерной физики высоких интенсивностей и энергий.

Результаты диссертационной работы прошли широкую апробацию в научном сообществе. Соискателем было представлено более десяти докладов на российских и международных научных конференциях и семинарах; в соавторстве с другими участниками экспериментальных исследований им опубликовано 13 работ по теме диссертации; 9 из которых – в журналах, индексируемых системой Web of Science. Значительная часть результатов опубликована в таких высокорейтинговых журналах как Optics Express, Physical Review E и Matter and Radiation at Extremes. Насколько можно судить по тексту диссертации, представленные результаты, как в части эксперимента, так и относящиеся к численному моделированию, получены автором лично. Автореферат полно и достоверно передает содержание диссертации.

При изучении работы у меня возникли вопросы и замечания, сформулированные ниже.

1. Судя по терминологии, используемой в работе, рассматриваемая в ней плотная плазма считается равновесной. Во всяком случае, повсеместно используется понятие температуры. Ясно однако, что на начальном этапе взаимодействия плазма оказывается сильно неравновесной: энергии электронов и ионов значительно различаются, а электронные спектры не похожи на тепловые. В работе отсутствуют оценки, обосновывающие использование концепции термодинамического равновесия. Насколько быстро равновесное состояние достигается в плазме твердотельной плотности? Насколько близкой к равновесной можно считать относительно разреженную преплазму, возникающую при облучении мишени без обкладок? Ответы на эти вопросы представляются мне важными, потому, в частности, что моделирование, используемое для восстановления параметров плазмы по форме спектральных линий, по-видимому, существенно опирается на предположение о равновесии.
2. В пункте 2.2.1 второй главы описывается модель адиабатического расширения, основанная на аппроксимации временных зависимостей ступенчатыми функциями. Из описания неясно, чем определяется

выбор параметров модели. Почему считается, что разлет плазмы происходит с постоянной скоростью? Насколько результаты расчетов чувствительны к этому предположению, а также к ряду других допущений, перечисленных на стр.37?

3. В разделе 4.2.7 четвертой главы обсуждается определение температуры плазменной короны путем сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования, выполненного при помощи пакета программ PrismSPEC. Для достижения наилучшего согласия с экспериментально измеренной структурой линий в расчете сделано предположение о присутствии в распределении 0,1% горячих электронов с энергией 10кэВ. Чем обосновано такое предположение? Далее, в разделе 4.2.8 кратко описано, каким образом энергетический спектр электронов моделируется распределением Максвелла с некоторой эффективной температурой, которая (стр.98) «...может быть приближенно оценена на основании значения лазерной интенсивности в соответствии с полуэмпирической модифицированной формулой Бэгга (согласно работе [176]), показанной на Рис.4-24-а для интересующего диапазона лазерных интенсивностей». Такая скудная форма изложения (на рисунке, конечно, показана не формула, а рассчитанная по этой формуле зависимость температуры от интенсивности) существенно затрудняет понимание физического содержания модели. Очень полезно было бы привести некоторое количество важных формул и соотношений, лежащих в основе модели, и лучше разъяснить основания для выбора значений параметров и модельных предположений. Сказанное относится не только к содержанию разделов 4.2.7, 4.2.8, но и ко всем частям диссертации, посвященным описанию использовавшихся моделей.
4. Текст диссертации написан крайне небрежно. Имеются многочисленные опечатки, рассогласование падежей, повторы. Иногда грамматическая конструкция предложений настолько неудачна, что не позволяет понять смысл написанного.

Перечисленные замечания и недостатки не снижают общей положительной оценки работы, ее научной значимости и новизны.

Диссертационная работа Мартыненко А.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней» № 842 от 24.09.2013г. (ред. 01.10.2018г.), а ее автор Мартыненко Артем Сергеевич за решение задачи об изохорическом нагреве сверхплотной плазмы пикосекундными лазерными импульсами и о спектроскопической

диагностике этой плазмы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»; 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38; +74995038777(347), www.gpi.ru, sergey.popruzhenko@gmail.com; доктор физико-математических наук (научная специальность – 01.04.02 – теоретическая физика).

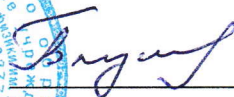
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»



Попрузженко С.В.

"11" мая 2021 г.

Подпись Попрузженко С.В. заверяю:
ВРИО ученого секретаря
д.ф.-м.н.



Глушков В.В.

"11" мая 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)
Почтовый адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38
Телефон: +7 (499) 503-87-34
e-mail: office@gpi.ru