

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Горловой Дианы Алексеевны

на тему: «Ускорение электронов и вторичные процессы при взаимодействии
лазерного импульса релятивистской интенсивности со слоем подкритической
плазмы»,

по специальности 1.3.19 – «лазерная физика»

Актуальность темы диссертации.

Одно из наиболее важных современных направлений лазерной физики связано с развитием короткоимпульсных лазерных систем высокой пиковой мощности, позволяющей достигать релятивистской интенсивности при фокусировке лазерного излучения. Несмотря на то, что на самых мощных современных лазерах пиковые мощности могут достигать нескольких петаватт, большая часть прикладных задач по-прежнему связана с использованием лазерного излучения тераваттной мощности. В значительной мере это связано с тем, что современные тераваттные лазерные системы могут работать с весьма высокими частотами повторения, что позволяет использовать их в качестве источников ускоренных частиц или вторичных излучений для самых разнообразных приложений. Диссертационная работа Горловой Д. А. как раз и посвящена экспериментальному и численному исследованию процессов взаимодействия тераваттного фемтосекундного лазерного излучения релятивистской интенсивности с мишенями околосубкритической плотности и созданию на этой основе источника ускоренных электронов, а также использованию полученного источника для задач ядерной фотоники и для эффективной генерации терагерцового излучения. Результаты, представленные в диссертационной работе, являются важным вкладом в это направление исследований, они могут широко использоваться в лазерных лабораториях по всему миру для дальнейшего развития приложений, что подтверждает **актуальность и перспективность** темы диссертационной работы.

Структура и содержание диссертации.

Текст диссертационной работы состоит из введения, трех глав, заключения, приложения, благодарностей и списка литературы. Общий объем работы составляет 130 страниц, включая 69 рисунков и 4 таблицы; список литературы насчитывает 153 наименования. Диссертация написана хорошим литературным языком, изложение полное и сопровождающееся достаточным количеством деталей, что позволяет в полной мере оценить обоснованность полученных результатов и выводов. Следует отметить хорошую сбалансированность экспериментальных и численных методов исследования процессов лазерно-плазменного взаимодействия, представленных в диссертации.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и соответствует ее тексту.

Структура и содержание **введения** соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям: в нем обосновывается актуальность выбранной темы диссертации и степень ее разработанности, формулируются цели и задачи работы, определяются объект и предмет исследования, описывается научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов, структурируются

основные методы исследования, формулируются защищаемые положения и обосновывается достоверность полученных результатов. Во введении приведен список публикаций автора по теме диссертации, перечислены многочисленные конференции, на которых происходила апробация результатов работы, а также описан личный вклад автора.

В первой главе детально изложены использованные экспериментальные и численные методы исследования релятивистской лазерной плазмы, включая оригинальные подходы, развитые в работе. Эксперименты проводились на ТВт лазерной системе МГУ; в главе дано описание лазерной системы и особенностей постановки экспериментов. Приведено описание пленочной лавсановой мишени, использованной для взаимодействия ТВт фемтосекундного лазерного излучения с веществом, а также методов ее замены между выстрелами лазерной установки. Подготовка пленочной мишени к приходу ТВт лазерного импульса осуществлялась путем ее абляции с помощью вспомогательного лазерного импульса наносекундой длительности. На основе численного моделирования разлета мишени (проверенного с помощью интерференционных измерений) выбраны оптимальные режимы работы лазерной системы. Интересной особенностью представленных в диссертации экспериментов является тот факт, что они проводились как с использованием линейной поляризации фемтосекундного лазера, так и с использованием квазициркулярной поляризации, причем для получения последней использовался очень простой и оригинальный способ: путем внесения лавсановой пленки в фемтосекундный пучок. В первой главе даны описания методов диагностики электронного пучка и оптического излучения плазмы, использованные в работе. Из всего набора использованных методов особый интерес представляет развитый в диссертации фотоядерный метод измерения заряда электронного пучка.

В первой главе изложены также методы численного моделирования лазерно-плазменного взаимодействия с использованием PIC кода SMILEI. Приведено сравнение нескольких схем расчета и обоснован выбор наиболее оптимальных из них. Описаны методы обработки данных численного моделирования. В частности, предложен оригинальный метод анализа механизмов ускорения электронов с помощью разделения электрических полей на вихревую и потенциальную компоненты и дальнейшего вычисления работ соответствующих компонент над частицами (последнее потребовало разработки специальных методов коррекции численной ошибки, возникающей в ходе такого вычисления).

Вторая глава посвящена экспериментальному и численному исследованию процессов ускорения электронов при взаимодействии релятивистски-сильного лазерного излучения с субкритической плазмой и их использования в задачах ядерной фотоники. И для линейной, и для циркулярной поляризации 1 ТВт лазерного импульса, взаимодействующего с предьонизированной пленочной мишенью определены оптимальные условия для генерации коллимированного электронного пучка. Так, в частности, показано, что для плазмы с концентрацией электронов порядка 10% от критической генерируется электронный пучок с угловой шириной порядка 0,1 рад, экспоненциальным энергетическим спектром с температурой порядка 2 МэВ и зарядом в несколько десятков пКл. Установлены механизмы инжекции электронов в ускоряющую фазу поля и механизмы их последующего ускорения при различных плотностях мишени. Следует особо отметить, что предложенный в первой главе диссертации метод анализа механизмов ускорения, основанный на

разделении вихревой и потенциальной компонент векторных полей, позволил установить, что генерация коллимированного электронного пучка происходит в результате гибридного механизма ускорения, при котором прямое лазерное ускорение переходит в самомодулированное кильватерное ускорение. Приведены детальные исследования зависимости параметров ускоренных электронов от начальной плотности пленочной мишени, положения точки фокусировки излучения на мишень и энергии основного лазерного излучения.

Важным результатом второй главы является демонстрация возможности использования полученного источника ускоренных электронов в задачах ядерной фотоники, в частности, для создания источника нейтронов на основе реакций фоторасщепления во вторичной мишени-конверторе. При использовании бериллиевого конвертора достигнутый поток нейтронов соответствует уровню 10^6 нейтронов/Дж*с*срад. Использование конверторов из нескольких различных материалов позволило оценить заряд и температуру ускоренной электронной компоненты; полученные значения этих параметров совпали с измеренными другими методами.

Важный практический результат этой главы связан с предложенным методом отклонения электронного пучка на поперечном градиенте плотности мишени. Достигнуты величины отклонения порядка 10 градусов без заметного ухудшения параметров электронного пучка.

В третьей главе представлены результаты экспериментального и численного исследования процессов генерации ТГц излучения, возбуждающегося при падении 1 ТВт фемтосекундного лазерного импульса на слой субкритической плазмы. Детально обсуждается схема экспериментальной диагностики ТГц излучения и приводятся полученные в экспериментах результаты измерений его характеристик. Продемонстрировано, что генерация ТГц излучения коррелирует с генерацией пучков ускоренных электронов. Показано, что угловое распределение ТГц излучения имеет коническую форму и его энергия приблизительно пропорциональна квадрату заряда пучка. На основании этого было предположено и доказано в аналитических и численных расчетах, что основным механизмом генерации ТГц излучения является когерентное переходное излучение ускоренных электронов, пересекающих границу плазма-вакуум.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Диссертация Д. А. Горловой является законченным научным трудом, содержащим большое количество нового научного материала по актуальной теме взаимодействия сверхсильного лазерного излучения с плазмой. Научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 7 статьях в высокорейтинговых журналах, таких как Laser Physics Letters, Plasma Physics and Controlled Fusion, Physical Review E, Квантовая электроника и др., а также доложены автором на различных международных и российских конференциях. Результаты работы могут быть использованы в ИПФ РАН, ФИАН, ИОФ РАН, МИФИ, ОИВТ РАН, ННГУ им. Н. И. Лобачевского, ВНИИЭФ, ВНИИТФ и других организациях.

Необходимо отметить, что в диссертационной работе экспериментальные результаты очень высокого уровня сочетаются с детальными и убедительными аналитическими и численными расчетами. Сочетание такого широкого набора методов исследования достаточно редко встречается и является свидетельством высокой научной

квалификации соискателя. **Достоверность** представленных результатов подтверждается тем, что экспериментальные данные получены на современном оборудовании и с использованием надежных диагностических методов; результаты экспериментов подтверждаются результатами численного моделирования, проведенного с использованием современных и общепризнанных моделей, и не противоречат опубликованным научным данным. Все вышеизложенное, а также детальный анализ диссертации свидетельствуют об **обоснованности защищаемых научных положений**.

Научная новизна полученных результатов связана с демонстрацией возможности генерации пучков ускоренных электронов при воздействии тераваттного фемтосекундного лазерного импульса на плазменный слой с электронной концентрацией порядка 10% от критической и длиной несколько сотен мкм путем последовательного ускорения электронов в плазменном канале и в кильватерных волнах, а также предложен метод оценки вкладов различных механизмов ускорения электронов. Предложен метод получения квазициркулярной поляризации лазерного излучения с помощью лавсановой пленки микрометровой толщины. Предложен метод управления углом вылета пучка ускоренных электронов по отношению к исходному направлению распространения лазерного импульса. Установлено, что когерентное переходное излучение ускоренных электронов, пересекающих границу плазма-вакуум, генерирует близкий к униполярному импульс ТГц излучения с эффективностью по энергии до 0,1% и угловым распределением в виде конуса с углом раствора 40 градусов.

Научная и практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью создания на их основе источника для проведения исследований в области ядерной фотоники, в частности, для создания источника нейтронов. Одним из практически важных результатов диссертационной работы является предложенный метод отклонения пучка электронов практически без потери его качества. Важным практическим результатом работы является продемонстрированная возможность создания эффективного источника терагерцового излучения на основе взаимодействия релятивистски-сильного лазерного излучения с мишенью суб-критической концентрации.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

- Одним из важных практических результатов работы является предложенный метод управления углом вылета электронного пучка на основе рефракции фемтосекундного лазерного импульса в поперечно неоднородной мишени, при этом максимальный угол отклонения ограничен величиной порядка 10 градусов, а дальнейшее увеличение отклонения приводит к недопустимому ухудшению характеристик пучка, вызванному, по видимому, тем, что при приближении к краю мишени пучок начинает взаимодействовать с плазмой слишком высокой плотности. Не может ли использование более разреженных мишеней компенсировать возникающее ухудшение характеристик пучка и увеличить, тем самым, максимально возможный угол отклонения?
- Один из методов измерения заряда пучка был основан на использовании цилиндра Фарадея, однако, в диссертации приводится лишь словесное описание этой диагностики и никак не обосновываются ее точность и возможные ограничения.
- Терагерцовое излучение, генерируемое при нормальном падении 1 ТВт лазерного импульса на слой подкритической плазмы, хорошо коррелирует с электронами, имеющими энергию $> 0,1$ МэВ (рис. 3.4(в)). Однако, для обоснования того факта, что основным

механизмом генерации ТГц излучения является переходное излучение, на рисунке 3.8 характеристики ТГц излучения сравниваются с характеристиками электронов с энергией > 3 МэВ, для которых корреляция между ТГц излучением и электронами значительно хуже (см. рис. 3.3).

Сделанные замечания не являются принципиальными, не затрагивают положения, выносимые на защиту, и ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы Д. А. Горловой.

Заключение.


Считаю, что диссертационная работа Горловой Д. А. «Ускорение электронов и вторичные процессы при взаимодействии лазерного импульса релятивистской интенсивности со слоем подкритической плазмы» представляет собой актуальный и ценный труд, выполненный на высоком научном уровне. Работа отвечает всем 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), удовлетворяет критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, а ее оформление соответствует 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 Горлова Диана Алексеевна безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,
заместитель директора по научной работе

Стародубцев Михаил Викторович

 5» октябрь 2023г.

Контактные данные:

Тел.: +7 903 043 82 75. E-mail: mstar@ipfran.ru

Степень и шифр специальности, по которой официальным оппонентом была защищена диссертация: 01.04.08. – физика плазмы

Адрес места работы:

г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, ИПФ РАН