

ОТЗЫВ  
официального оппонента  
о диссертационной работе Серебрякова Дмитрия Андреевича  
«Динамика электронных структур и генерация фотонов высоких энергий при  
взаимодействии интенсивного лазерного излучения с закритической плазмой»,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности  
01.04.08 — физика плазмы

Диссертационная работа Д. А. Серебрякова посвящена теоретическому исследованию поглощения энергии лазерного импульса, ускорения электронов и генерации гамма-излучения по синхротронному механизму при взаимодействии релятивистского лазерного импульса с мишенями твердотельной плотности.

Взаимодействие ультрарелятивистских лазерных импульсов (интенсивностью  $10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup> и выше) с твердотельными мишенями активно исследуется в настоящее время с целью получения источников горячих электронов и ионов, генерации нейтронов, получения экстремальных магнитных полей и пучков жесткого рентгеновского и гамма-излучения. Как показывают теоретические расчеты и экспериментальные данные, облучение мишеней твердотельной плотности релятивистскими лазерными импульсами позволяет генерировать высокоэнергетичные электронные сгустки с достаточно большим зарядом, существенно превышающим таковой при лазерно-плазменном ускорении электронов в газовых струях. Генерация гамма-излучения при помощи лазерно-плазменного взаимодействия позволяет получить источник с управляемыми спектральными и угловыми характеристиками без необходимости работать с радиоактивными материалами. Поэтому теоретическое исследование процессов, происходящих при взаимодействии релятивистских лазерных импульсов с твердотельными мишенями, является актуальной научной задачей.

Теоретические оценки показывают рост эффективности генерации с увеличением интенсивности лазерного поля в области взаимодействия. Однако процессы, протекающие при релятивистском лазерно-плазменном взаимодействии, сильно зависят от параметров взаимодействия: угла падения излучения, пространственного масштаба неоднородности плазмы, наличия микроструктур на поверхности. Поэтому поиск оптимальных конфигураций представляет значительный интерес с точки зрения практических приложений.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав и заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы, списка рисунков и списка таблиц. Общий объем диссертации составляет 158 страниц, а список цитируемой литературы содержит 156 наименований, что полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Во введении к диссертации обосновывается актуальности темы исследования, описываются цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость, формулируются положения, выносимые на защиту, аргументируется достоверность и личный вклад автора. Также во введении приводится краткий обзор литературы по затронутым в работе тематикам.

В первой главе диссертации рассматривается динамика приповерхностного слоя электронов при нормальном падении релятивистского лазерного импульса на плоскую закритическую мишень. На основе предыдущих моделей, не учитывающих силу реакции излучения, рассматривается новая модель, описывающая динамику электронного слоя с учетом реакции излучения. Результаты (траектории электронов и их энергетические характеристики) сравниваются с результатами численного моделирования методом частиц в ячейках (PIC-моделирования) и показывается неплохое их совпадение. Путем анализа

результатов численного моделирования определяется область наилучшей применимости модели. Также модель адаптируется на случай наклонного падения лазерного импульса, и показывается возможность описания формы поверхности плазмы с ее помощью.

Во второй главе рассматривается синхротронное излучение электронов, нагреваемых лазерным полем при взаимодействии релятивистского лазерного импульса с мишенями твердотельной плотности. Модель динамики электронного слоя, представленная в первой главе, используется для описания генерации жестких фотонов электронами слоя, в частности, вычисляются диаграммы направленности гамма-излучения. Сравнение с результатами PIC-моделирования показывает совпадение положений максимумов диаграмм, однако форма «пиков» в случае моделирования несколько отличается. В подразделе 2.2 численно исследуется зависимость коэффициента генерации гамма-квантов от угла падения лазерного импульса и плотности мишени. Показывается, что максимум эффективности генерации и угла падения лазерного импульса достигается при угле падения около 30 градусов, а также то, что зависимость оптимальной (с точки зрения эффективности генерации) концентрации плазмы от угла падения имеет максимум также при угле падения в 30°. В подразделе 2.3 исследуется влияние градиента концентрации плазмы на эффективность генерации гамма-излучения и коэффициент поглощения лазерной энергии и показывается существование оптимального масштаба градиента концентрации плазмы в простейшем случае линейного градиента.

Третья глава посвящена режиму «скользящего падения» лазерного импульса на плоскую твердотельную мишень с резкой границей. В данном случае вблизи поверхности возможно формирование структуры поля, распространяющейся вдоль поверхности со скоростью, несколько большей скорости света. В определенных точках такой структуры электрическое поле также направлено вдоль поверхности, и из-за релятивистской амплитуды лазерного поля электроны, попадающие в данные точки, могут быть «захвачены» структурой поля и ускоряться на протяжении большого числа лазерных периодов. В подразделе 3.1 представлена аналитическая модель динамики тестовых частиц в рассматриваемой структуре поля, и показано, что в определенной области пространства начальных условий ускорение является устойчивым по поперечной координате. С помощью численного интегрирования уравнений динамики тестовых частиц также подтверждено, что эффективное ускорение в данной структуре возможно для достаточного широкого диапазона начальных условий. Методами численного трехмерного PIC-моделирования демонстрируется возможность реализации механизма приповерхностного ускорения в условиях, приближенных к условиям эксперимента, также учитывается влияние предплазмы на процесс ускорения. В подразделе 3.2 численно продемонстрировано повышение эффективности генерации гамма-квантов в режиме скользящего падения лазерного импульса.

В четвертой главе рассматривается использование периодических микроструктур на поверхности мишеней с целью повышения эффективности ускорения электронов и генерации гамма-излучения при облучении мишени лазерным импульсом. В подразделе 4.1 рассмотрен «резонансный» механизм ускорения электронов для микроструктуры, период которой равен длине волны лазерного импульса. С помощью аналитической модели в пренебрежении поперечной динамикой показана возможность бесконечного ускорения электронов в данной структуре. Численное трехмерное PIC-моделирование также показывает возможность ускорения электронного пучка, инжектированного в периодическую микроструктуру, облучаемую лазерным импульсом. В подразделе 4.2 показывается возможность повышения эффективности генерации гамма-излучения более чем на 2 порядка по сравнению со случаем плоской мишени, а также определяются оптимальный размер элементов микроструктуры и ее период с целью повышения эффективностей гамма-генерации и поглощения лазерной энергии.

В диссертационной работе можно выделить несколько основных результатов, несомненно, обладающих научной новизной:

1. Обобщена модель динамики приповерхностного слоя электронов при нормальном падении релятивистского лазерного импульса на плоскую закритическую мишень для учета силы реакции излучения. С помощью сравнения с результатами численного моделирования методом частиц в ячейках (PIC-моделирования) определена область применимости модели. Теоретически вычислена диаграмма направленности гамма-квантов в данном режиме, и показано соответствие результатов с полученными в численном моделировании.

2. Разработана модель приповерхностного ускорения электронов в режиме скользящего падения лазерного импульса на твердотельную мишень. Теоретически показано, что ускорение является устойчивым для определенного диапазона начальных условий. Установлено, что область фазового пространства начальных условий, соответствующая захвату электронов и ускорению параллельно поверхности, увеличивается при приближении угла падения к  $90^\circ$ . С помощью трехмерного численного моделирования продемонстрирована возможность реализации механизма ускорения в условиях, приближенных к реалистичным. Найдена оптимальная концентрация предплазмы с точки зрения максимального заряда и энергии ускоренного электронного сгустка.

3. Разработана модель захвата и резонансного ускорения электронов вблизи мишени с периодическими структурами прямоугольного профиля на поверхности. Показано, что при увеличении начальной энергии электронов и интенсивности лазерного импульса область начальных условий, при которых возможен захват, увеличивается. Продемонстрирована возможность ускорения электронного сгустка по описываемому механизму при взаимодействии лазерного импульса с широким фронтом с твердотельной микроструктурированной мишенью.

Полученное в научной работе обобщение развитых ранее моделей на случай заметного влияния силы реакции излучения, а также новая модель резонансного ускорения электронов вблизи профилированной поверхности обладают несомненной теоретической значимостью. Кроме того, проведена численная (с помощью PIC-кода) оптимизация параметров лазерного импульса и мишени с целью повышения эффективности генерации быстрых электронов и гамма-квантов. Это может служить основой для получения более эффективных компактных источников гамма-квантов.

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием известных физических моделей при изучении взаимодействия мощного электромагнитного излучения с металлами, а также сопоставлением полученных результатов с численными расчётами, проведёнными с помощью PIC-моделирования.

Изложение материала работы выполнено на высоком научном уровне, текст работы написан грамотным языком, исследуемые эффекты и явления описаны доступно и понятно.

По работе имеются следующие замечания.

1. «Защищаемые положения» и раздел «Заключение» написаны в самом общем виде, без указания областей параметров, где эти положения и выводы справедливы. В частности, не указаны даже параметры лазерного импульса – длительность, интенсивность и т.д. Раздел «Заключение» не содержит практически ни одного числа, все выводы носят обобщенный качественный характер. В работе также отсутствуют выводы по главам, что несколько затрудняет понимание излагаемого материала.
2. При проведении численного моделирования (стр.38, рис.1.6) указано, что результаты приведен на «конец численного моделирования». Как выбирался этот момент? Что зависит от его выбора?
3. В разделе 3.1.5 (стр.91 и далее) при описании используемой модели преплазмы указано лишь, что она имеет концентрацию в 0.1 или 0.3 от критической. Каков пространственный профиль преплазмы? Оказывает ли он влияние на результаты расчетов? Не обоснован также сам выбор указанных значений концентраций.
4. В разделе, посвященном взаимодействию с микроструктурами (стр.127) говорится о найденных оптимальных параметрах структур, однако в явном виде эти

параметры нигде не приводятся. Возникает также вопрос о зависимости оптимальных параметров микроструктур от параметров лазерного излучения.

5. В разделе, посвященном ускорению электронов при скользящем падении, выбраны углы 7 и 16 град (стр.69), а вот при моделировании генерации гамма-излучения - 6 и 15 град (стр.97). Почему произошел сдвиг на 1 град?
6. В тексте имеются опечатки, научный жаргон и т.п. (стр.81 «процесс ускорения является устойчивым в зависимости от начальных условий», стр.123 «приповерхностные электроны ускоряются до  $\gamma = 100$ , что все еще порядка  $a_0 = 64$ », формула 1.18 совпадает с формулой 2.4, «синхротронные гамма кванты», «амплитуда лазера» и др.).

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Д. А. Серебрякова, ее научной и практической значимости.

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе в 2 международных журналах и 2 центральных российских журналах, входящих в международные индексы цитирования Web of Science и Scopus, а также трудах и сборниках тезисов докладов международных и российских научных конференций. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа Д. А. Серебрякова выполнена на актуальную тему, соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
кафедры общей физики и волновых процессов  
физического факультета  
Московского государственного  
университета имени М. В. Ломоносова

А. Б. Савельев-Трофимов

Контактная информация:

Савельев-Трофимов Андрей Борисович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
физический факультет  
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1  
тел.84959395318, e-mail: abst@physicsc.msu.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора А. Б. Савельева-Трофимова заверяю

Декан  
физического факультета  
Московского государственного  
университета имени М. В. Ломоносова

