

## ОТЗЫВ

официального оппонента Брантова Андрея Владимировича  
на диссертационную работу Серебрякова Дмитрия Андреевича  
«Динамика электронных структур и генерация фотонов высоких энергий при  
взаимодействии интенсивного лазерного излучения с закритической плазмой»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

С ростом интенсивности лазерного излучения вводимых в строй и планируемых установок эффектам, связанным с ультра-релятивистским лазерно-плазменным взаимодействием, уделяется все больше внимания. В первую очередь речь идет о значительном усилении генерации гамма-излучения лазерно-ускоренными электронами, ожидаемом при интенсивностях падающего излучения порядка или больше  $10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup>. В этом режиме электроны могут практически сразу терять полученную от лазера энергию на синхротронное излучение, что необходимо учитывать при моделировании взаимодействия. Уже появились первые экспериментальные работы, претендующие на нахождение эффектов, связанных с радиационным торможением электронов даже при значительно меньших интенсивностях света. Кроме того, можно ожидать, что лазерно-плазменный источник гамма-излучения по своим параметрам превзойдет все существующие подобные источники, и в силу своей относительной компактности, может быть использован для широкого круга практических приложений. Именно изучению оптимальных режимов генерации гамма-излучения ультра-релятивистскими лазерными импульсами с учетом влияния сил радиационного торможения и посвящена диссертационная работа Серебрякова Д.А. Поэтому актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии, списков сокращений, рисунков и таблиц. Общий объем диссертации составляет 158 страниц, из них 125 страниц текста, включая 47 рисунков и одну таблицу. Библиография включает 156 наименований.

**Во введении** показана актуальность диссертационной работы, аргументирован выбор целей и методов их достижения, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены выносимые на защиту научные положения. Также дается краткий обзор литературы по вопросам лазерного ускорения электронов, генерации гармоник лазерного

излучения и вторичного гамма-излучения, а также численного моделирования лазерно-плазменного взаимодействия.

**В первой главе** описывается модель динамики электронного слоя, отжатого пондеромоторной силой лазерного импульса, с учетом конечной скорости колебаний слоя, силы радиационного трения электронов и полей излучения. Проводится сравнение результатов модели с результатами трехмерного численного моделирования и определяется область параметров применимости модели (интенсивность лазерного излучения и плотность мишени). Показывается ограниченность модели, связанная с постоянным уходом горячих электронов из слоя. Обсуждаются разные режимы взаимодействия лазерного излучения с мишенью с точки зрения эффективности поглощения энергии лазера и нагрева электронов в зависимости от плотности мишени и безразмерной амплитуды лазерного поля. Демонстрируется возможность обобщения модели на случай наклонного падения лазерного импульса, что позволяет рассчитать динамику осцилляций слоя, но не учитывает эффектов, связанных с вакуумным нагревом электронов.

**Во второй главе** приводятся результаты моделирования генерации гамма-излучения при нормальном и наклонном падении релятивистского лазерного импульса на слой плазмы. Найдены зависимости эффективности генерации гамма-излучения от амплитуды лазерного импульса (при нормальном падении), плотности мишени и угла падения излучения (при заданной интенсивности). Для случая непрозрачной мишени дается сопоставление полученных результатов с модельными расчетами, основанными на траектории движения слоя электронов, и отмечается неплохое согласие диаграммы направленности гамма-излучения. Показано, что наиболее эффективно гамма-излучение генерируется в случае прозрачной для лазерного излучения мишени с плотностью ниже релятивистской критической плотности, найдены оптимальные значения угла падения лазерного импульса (30 градусов) и плотности мишени (100 критических плотностей), приводящих к максимальной эффективности генерации гамма-излучения из слоя толщиной 2 микрона. Продемонстрировано некоторое падение эффективности гамма-излучения при учете движения ионов мишени. Изучено влияние преплазмы на эффективность генерации гамма-фотонов и показано, что достаточная большая преплазма приводит к увеличению эффективности генерации гамма-излучения при нормальном падении лазерного импульса, которое становится оптимальным.

**В третьей главе** анализируется ускорение электронов и генерация гамма-излучения при скользящем падении лазерного излучения на мишень. Автором предложена

оригинальная аналитическая модель ускорения электронов в стоячей волне, созданной падающим и отраженным лазерными импульсами. Показано, что существует позиция электрона в вакууме вблизи поверхности мишени, где на него действует только одна продольная компонента поля (направленная вдоль поверхности мишени), приводящая к его эффективному ускорению до больших энергий. Проведен анализ устойчивости условий ускорения вблизи этой оптимальной позиции и найдены области начальных параметров, приводящих к наиболее эффективному ускорению электронов и генерации гамма-фотонов. Проведенное численное моделирование демонстрирует эффективное ускорение электронов с высоким зарядом, достигающим десятков нКл, который увеличивается при использовании мишеней с пре-плазмой. Найдены оптимальные параметры пре-плазмы, приводящие к ускорению максимального числа электронов.

**Четвертая глава** посвящена исследованию ускорения электронов и генерации гамма-излучения из мишеней со структурированной облучаемой поверхностью. Предложена простая идея поперечного ускорения электронов непосредственно полем лазерного импульса, если форма структуры позволяет экранировать лазерное поле таким образом, чтобы электрон все время находился в ускоряющей фазе. При этом максимальная энергия, набираемая электроном, оказывается ограниченной только размерами лазерного пучка. На основе проведенного моделирования найдена зависимость эффективности генерации гамма-излучения от размеров структур и интенсивности облучения. Показано, что острые структуры наиболее эффективны для генерации гамма-излучения. Продемонстрирована возможность увеличения эффективности генерации приблизительно на два порядка в случае микро-структурированной мишени (по сравнению с плоской мишенью).

**В заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

В диссертационной работе хорошо сочетаются простые аналитические модели с результатами полномасштабного трехмерного моделирования. Достоверность полученных численных результатов подтверждается их согласием с упрощенными физическими моделями в рамках применимости последних. Новизна полученных результатов не вызывает сомнений, цитирование работа других авторов проведено достаточно полно. Практическая ценность полученных теоретических результатов определяется возможностью их использования для планирования лазерных экспериментов, направленных на создание компактных источников гамма-излучения.

Материалы диссертации опубликованы в 20-х печатных работах, из них 6 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК, индексируемых базой Web of Science, и 14 тезисов докладов.

Проведенная работа, судя по автореферату и тексту диссертации, является завершенным исследованием. Автореферат отражает содержание диссертации и дает полное представление о ней. Диссертация представляет специально подготовленную рукопись, содержит совокупность новых научных результатов, имеет внутреннее единство. Оформление диссертации отвечает требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. Все результаты получены автором лично или при его определяющем участии (п.10 «Положения»).

**По тексту автореферата и диссертации имеются следующие замечания:**

1. Приведенная автором модель релятивистской электронной пружины оправдана для случая непрозрачной для лазерного излучения мишени. Более того, баланс ponderomotorного воздействия лазерного импульса и кулоновской силы ионов определяет максимальную плотность электронного слоя и его положение. Фактически, на основе этой модели можно определить условия релятивистской прозрачности мишени [36], отличающиеся от стандартного использованного в диссертации условия релятивистской прозрачности без учета отжатия электронов. Из текста диссертации неясно, какое условие реализуется в численном моделировании и при какой интенсивности/плотности мишень становится прозрачной для лазерного излучения. Вероятно, подобный анализ помог бы точнее объяснить границы области параметров наиболее эффективной генерации гамма-излучения.
2. Численные результаты, приведенные в первой и второй главах диссертации, получены для мишени с фиксированной толщиной 2 микрона. При этом, зависимость полученных результатов от толщины мишени не обсуждается. Это может быть оправдано в случае использования непрозрачных для лазерного излучения мишеней, когда все взаимодействие происходит вблизи облучаемой поверхности в скиновом слое. Однако, значительная часть результатов и, в частности, оптимальные параметры для генерации гамма излучения получены для прозрачных для лазерного излучения мишеней, где зависимость от толщины мишени становится определяющей. Возможно, что именно достаточно тонкая фиксированная толщина мишени приводит к падению эффективности нагрева электронов и генерации гамма излучения при уменьшении плотности мишени.

3. Предложенный автором механизм ускорения электронов при скользящем падении лазерного импульса предполагает насыщение (или даже уменьшение) эффективности ускорения электронов при очень малых скользящих углах из-за уменьшения величины ускоряющего поля (о чем упоминается в тексте диссертации). Было бы полезно продемонстрировать данную тенденцию результатами численного моделирования. Также неясно как это согласуется с третьем положением, выносимым на защиту, из которого можно сделать вывод о максимальной эффективности угла падения в 90 градусов.
4. Поскольку автором предлагается использовать структурированную мишень для проведения будущих экспериментов, было бы полезно оценить контраст лазерного излучения, необходимый для выживания найденных оптимальных структур (с размерами много меньше длины волны лазера) до прихода на мишень основного импульса.
5. Автором неудачно сформулировано первое основное положение, выносимое на защиту. Скорее не концентрация плазмы, а эффективность генерации гамма-излучения достигает максимума при угле падения лазерного излучения в 30 градусов. Более того, данный факт доказан в диссертационной работе только для рассмотренного случая релятивистской прозрачности мишени толщиной 2 микрона.
6. Цитирование работы [147] на странице 102 (глава 4) проведено неверно. Работа [147] посвящена в основном генерации электронов при скользящем падении лазерного импульса и представляет интерес сравнение с ее результатами (и других работ этих же авторов) в предыдущей главе диссертации (глава 3), затрагивающей те же вопросы генерации пучка горячих электронов с высоким зарядом.

Отмеченные выше недостатки, носящие, в основном, рекомендательный характер, не влияют на положительную оценку работы в целом. Диссертация Серебрякова Д. А. содержит ряд новых и интересных результатов, важных как для планирования экспериментов, так и для дальнейших теоретических работ. Особо стоит отметить предсказание возможности генерации сгустков электронов с высоким зарядом при скользящем падении лазерного импульса даже для относительно небольших интенсивностей лазера (достижимых на современных установках), которая частично уже была подтверждена рядом экспериментов. Результаты диссертационной работы известны научной общественности в нашей стране и за рубежом, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в шести реферируемых журналах из списка ВАК.

Диссертация Серебрякова Дмитрия Андреевича «Динамика электронных структур и генерация фотонов высоких энергий при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с закритической плазмой» представляет собой законченную научно-квалификационную работу высокого уровня, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика», ведущий научный сотрудник Сектора лазерно-плазменной физики высоких энергий Отдела квантовой радиофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН», 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53, тел. 499 132 6906 E-mail: brantovav@lebedev.ru



Брантов Андрей Владимирович

Даю свое согласие на обработку своих персональных данных, связанных с защитой диссертации



Подпись Брантова А.В. заверяю:



Ученый секретарь ФИАН к.ф.-м.н. Колобов А. В. 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53. (499) 132-62-06. scilpi@mail.ru