

ОТЗЫВ

официального оппонента Брантова Андрея Владимировича

на диссертационную работу Туева Петра Викторовича

«Развитие методов теоретического исследования плазменного кильватерного ускорения с лазерным драйвером тераваттного уровня мощности», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

К настоящему времени лазерное кильватерное ускорение электронов представляет собой один из основных методов ускорения электронов с использованием лазерного излучения, хорошо обоснованный теоретически и неоднократно продемонстрированный в экспериментах. Именно на основе лазерного кильватерного ускорения экспериментально достигнута максимальная энергия электронов более 8 ГэВ. Однако, как правило, до таких высоких энергий удается ускорить только относительно малое число электронов даже с использованием лазерных установок рекордной мощности. В то же время для практических приложений часто требуются пучки электронов умеренных энергий (десятки-сотни МэВ), но с большим зарядом. Поэтому большое число проводимых в настоящее время поисковых исследований ставят своей целью получение высокозарядных пучков ускоренных электронов на небольших компактных лазерных установках, способных работать с высокой частотой повторения лазерных выстрелов. Диссертационная работа, посвященная достижению условий оптимального кильватерного ускорения электронов для конкретной небольшой лазерной установки, находится в русле мировых тенденций. Таким образом, **актуальность** избранной диссертантом темы не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 116 страниц, включая 34 рисунка. Библиография включает 111 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.

В первой главе разработан новый алгоритм восстановления профиля плотности газовой струи на основе измерения набега фазы в интерференционной картине. Показано, что, используя разложение плотности по базисным супергауссовым функциям и метод наименьших квадратов для определения констант разложения, удастся добиться

уменьшения ошибки восстановления профиля плотности для относительно больших соотношений сигнал-шум по сравнению со стандартными методами обратного преобразования Абея. Предложенный алгоритм был апробирован в ряде экспериментов на лазерной установке в Институте лазерной физики СО РАН в Новосибирске.

Во второй главе описан квазистатический подход, используемый для численного моделирования возбуждения плазменных волн и наиболее эффективный для описания длительной эволюции плазменных волн при медленном изменении состояния драйвера (лазерного импульса). Особое внимание уделяется исследованию способов включения захваченных частиц (электронов, движущихся вместе с потенциалом плазменной волны и ускоряемых им) в квазистатический код, не позволяющий описать захват и ускорение электронов самосогласованным образом. Показано, что в относительно плотной газовой плазме практически все модели захвата частиц (за счет перевода частиц плазмы в тестовые, «захваченные», частицы) приводят к возникновению численных неустойчивостей в квазистатическом коде.

В третьей главе представлены результаты оптимизации энергии и заряда электронов, ускоряемых в плотной газовой плазме слабoreлятивистским лазерным импульсом. Продемонстрировано, что захват и ускорение электронов происходит только в довольно плотной плазме при превышении пороговой величины плотности. При этом обнаружено, что сдвиг фокусировки лазерного импульса внутрь мишени приводит к существенному увеличению заряда ускоряемых электронов, причем большинство электронов ускорятся во втором периоде нелинейной плазменной волны. Полученный результат объясняется улучшением условий фокусировки лазерного импульса за счет нелинейных эффектов (релятивистской самофокусировки). Проводится сравнение результатов моделирования квазистатическим кодом с более полным расчетом, выполненным кодом «частица-в-ячейке», для оптимальных значений плотности мишени и положения фокуса лазерного импульса с целью уточнения характеристик ускоренных электронов, демонстрирующее, что квазистатический код, правильно описывая максимальную энергию электронов (~ 75 МэВ), значительно завывает заряд (120 пКл вместо 18 пКл) и предсказывает генерацию более направленного пучка, улучшая его расходимость в два раза.

Четвертая глава посвящена изучению возможности расширения квазистатического подхода к моделированию плазменных волн за счет удержания дополнительных смешанных производных при переходе к новым переменным в уравнениях Максвелла и уравнении движения частиц плазмы, для которых приводятся численные схемы их

решения. Схема апробирована на решении тестовой задачи распространения лазерного импульса в линейном режиме (продемонстрировано хорошее совпадение его групповой скорости с аналитическим значением). Показывается, что модифицированный квазистатический код значительно лучше описывает возбуждение плазменных волн в плазме с градиентом плотности (что проверяется сравнением результатов с полным моделированием методом «частица-в-ячейке»).

В пятой главе решена задача о собственных модах, возникающих в цилиндрической металлической полости, моделирующей капилляр, часто используемый для кильватерного ускорения электронов в условиях распространения лазерного импульса на много рэлеевских длин. Проанализирована структура и затухание возникающих мод и проведена оценка доли энергии падающего лазерного импульса, которая идет на возбуждение волноводных мод. Показано, что точное решение дисперсионного уравнения необходимо для вычисления затухания мод, возбуждаемых в медном цилиндрическом резонаторе с радиусом 15 мкм на длине волны 850 нм.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приводятся подробные численные схемы решения уравнений Максвелла и уравнений движения частиц плазмы в модифицированном квазистатическом приближении в декартовой (приложение А) и цилиндрической (приложение Б) системах координат.

В диссертационной работе автором продемонстрировано хорошее владение математическими и численными методами решения физических задач. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, хорошо аргументированы и обоснованы результатами проведенных численных и аналитических исследований и сравнением с опубликованными данными. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием хорошо отестированных и проверенных численных кодов и согласием результатов расчетов, выполненных разными кодами. Новизна полученных результатов не вызывает сомнений, что подтверждается их публикацией в рецензируемых журналах. Практическая ценность полученных результатов определяется развитым алгоритмом восстановления плотности газовой струи и проведенным исследованием по условиям использования квазистатического кода для моделирования кильватерного ускорения электронов. Стоит также отметить разработанный алгоритм усовершенствования квазистатического кода, позволяющий более точно описывать формирование плазменной волновой структуры в неоднородной плазме.

Материалы диссертации опубликованы в 3 статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК, 2 статьях в сборниках трудах конференций и представлены на 5 международных конференциях.

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

По тексту автореферата и диссертации имеются следующие замечания:

1. На мой взгляд, стоило бы предоставить более полный обзор литературы по исследованной тематике, выделив его в отдельную главу. Это бы сняло бы многие вопросы, возникающие при чтении диссертации.
2. Квазистатические коды изначально создавались для моделирования плазменных волн в газовой плазме низкой плотности, когда изменение самого лазерного импульса происходит на огромных расстояния (по сравнению с его размером и длиной плазменной волны). Именно в этих условиях они демонстрируют свои преимущества и позволяют предсказать энергию, набираемую инжектируемыми электронами. В то же время, моделирование более плотной плазмы, что является целью данной диссертации, в значительной мере ожидаемо снижает эффективность использования данного приближения за счёт более быстрой эволюции самого драйвера и возникновения большого числа нелинейных эффектов, связанных с захватом электронов. В связи с этим было бы полезно обсудить до каких параметров плазмы использование квазистатического приближения представляется разумным, исходя из растущих вычислительных возможностей и совершенствования кодов «частица-в-ячейке» (см., например, [Nature Phys. 6 311, (2010)]).
3. В первой главе желательно было провести более подробное описание процедуры выбора базисных функций, в частности, определение области изменения характерного размера, определяемого индексом j , максимальное значение изменения которого (M_2) не указано, в том числе для приведенных примеров.
4. Во второй главе можно было бы рекомендовать более подробно сопоставить различные предлагаемые численные способы реализации захвата электронов с

теоретическими оценками для потенциально захватываемых электронов, которые существуют как для линейного одномерного случая, упомянутого в тексте, так и в модельном виде для нелинейной трехмерной структуры волны. Возможно, это позволило бы более четко определить критерии захвата электронов. В тексте диссертации не очень понятно описано пространственное положение захватываемых электронов (которые, по крайней мере, должны попадать в ускоряющий потенциал плазменной волны). Сначала упоминается, что захваченные электроны возникают вблизи точки опрокидывания, однако затем критерии захвата формулируются только исходя из скорости (энергии) и поперечного положения электрона. Здесь также стоит обратить внимание на не обсуждаемые в диссертации работы [Phys. Rev. Lett. 103, 135004 (2009); Phys. Plasmas 18, 056704 (2011)], в которых предложен оригинальный способ определения захваченных электронов для подобного квазистатического кода.

5. В третьей главе было бы полезно обсудить с чем связана величина пороговой плотности, выше которой начинается захват и ускорение электронов. Отвечает ли эта пороговая плотность условию опрокидывания плазменной волны?
6. В пятой главе автор пишет, что « TM_{mn} непрерывно трансформируются в моды R_{mn} ... Моды TE_{mn} превращаются в $L_{m,n-1}$, а мода TE_{m1} исчезает». Однако, ниже (на Рис. 5.4) приводится сопоставление моды TE_{11} (которая должна исчезать) с модой R_{11} (в которую должна переходить мода TM_{11} согласно вышесказанному).
7. В тексте диссертации присутствуют опечатки, жаргонизмы, неточные формулировки и ошибочные обозначения. Например, на стр. 15 используется жаргонное выражение «в кильватерных экспериментах», на стр. 39-40 приводится противоречащее само себе выражение «однородную неограниченную по радиусу плазму с областью однородности 900 мкм», на стр. 46 не уточняется фраза «тогда импульс сожмется до необходимой для захвата интенсивности», на стр. 49 из приведенной фразы «квазистатическое приближение становится неточным, если пучки медленно меняют форму...», можно сделать вывод, что это приближение точное для быстрого изменения формы пучка, в то время как для этого случая оно неприменимо вообще, на стр. 68 характерное время столкновений электронов названо частотой столкновений, на стр. 98, 105, 109 используется англоязычный термин «солвер».

Отмеченные выше недостатки, носящие, в основном, рекомендательный характер, не влияют на положительную оценку работы в целом. Диссертация Туева П. В. содержит ряд новых и интересных результатов, связанных с развитием аналитических и численных

методов, полезных для исследования кильватерного ускорения электронов на небольших лазерных установках. Результаты диссертационной работы известны научной общественности в нашей стране и за рубежом, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в трех статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК.

Диссертация Туева Петра Викторовича «Развитие методов теоретического исследования плазменного кильватерного ускорения с лазерным драйвером тераваттного уровня мощности» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 1.3.18. Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Я, Брантов Андрей Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Туева Петра Викторовича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

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 Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Тел. +7 (499) 132-69-06, e-mail: brantovav@lebedev.ru

16 ноября 2022 г.



Брантов Андрей Владимирович

Подпись Брантова А.В. заверяю:

Ученый секретарь ФИАН, к.ф.-м.н.



Колобов Андрей Владимирович