

Отзыв

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Н.Е. Андреева на диссертационную работу Голованова Антона Александровича «Сильно нелинейные кильватерные ускоряющие структуры в неоднородной плазме», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Голованова А.А. посвящена актуальной в настоящее время тематике плазменных методов ускорения заряженных частиц. Теоретические и экспериментальные исследования в этой области переживают бурный рост в последние десятилетия. Во многом это связано с развитием лазерных технологий, позволивших многим научным лабораториям получить в свое распоряжение лазерные установки петаваттного уровня мощности, и открытием сильно нелинейного («баббл») режима кильватерного ускорения, позволяющего за счет механизма самоинжекции генерировать ускоренные электронные сгустки, захваченные из плазмы при падении лазерного импульса на газовые мишени. В передовых экспериментах были достигнуты энергии в несколько ГэВ при длине ускорения всего несколько сантиметров, что значительно превышает возможности традиционных радиочастотных ускорителей.

Факторами, ограничивающими использование плазменных ускорителей для многих важных приложений, в том числе в медицине и диагностике материалов, являются низкая стабильность и недостаточно хорошее качество получаемых сгустков. Для решения этих проблем предложено много различных идей. К их числу относятся и рассматриваемые в диссертационной работе методы: использование профилированных плазменных мишеней и создание в плазме различных каналов с пониженной концентрацией. В работе Голованова А.А. развиваются теоретические подходы к самосогласованному описанию сильно нелинейной кильватерной волны в неоднородной плазме, которые позволяют существенно упростить анализ численных расчетов и экспериментальных данных и составляют значительный вклад в решение указанной выше актуальной проблемы.

Содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, вводной главы, четырех глав с основным содержанием диссертации и заключения, а также содержит список литературы (165 наименований), список публикаций автора по диссертации (17

наименований) и список иллюстраций (51 рисунок). Общий объем диссертации составляет 159 страниц.

В *Главе 2* (первой из глав, содержащих новые результаты) исследуется квазистатическое распределение электронов и полей, возникающее при распространении лазерного импульса либо электронного сгустка в плазме в режиме плазменной полости («баббла»). Разработана новая модель, описывающая форму поверхности плазменной полости в случае радиально неоднородной плазмы. Особенностью модели является необходимость задания профиля и характерной толщины граничного электронного слоя на основе внешних данных (например, численного PIC-моделирования), однако показано, что форма профиля граничного слоя слабо влияет на результат (форму поверхности плазменной полости). Модель также позволяет рассчитать электрическое и магнитное поля внутри и снаружи плазменной полости. Сравнение результатов моделирования и теоретических расчетов показывает очень хорошее совпадение как формы поверхности полости, так и распределений электрического и магнитного полей. Результаты представлены в виде аналитических выражений, что представляет большую ценность для дальнейших исследований данного режима.

Глава 3 посвящена рассмотрению динамики электронов в плазменной полости в полях, рассмотренных в предыдущей главе (также в условиях произвольной радиальной неоднородности плазмы). Вычисление сил, действующих на электронные сгустки, показывает, что поперечная сила в рамках рассмотренной модели зависит только от поперечной координаты, что также подтверждается численным моделированием. В случае полого канала в плазме поперечные силы в нем вообще оказываются равны нулю, что теоретически позволяет использовать данный режим для ускорения частиц с положительным зарядом. В подразделе 3.2 рассмотрены энергетические характеристики ускорения электронного сгустка — в частности, определена эффективность передачи энергии поля плазменной полости сгустку и оптимальная плотность сгустка для достижения максимальной эффективности. Также исследован важный для получения квазимоноэнергетических сгустков электронов вопрос об однородности ускоряющего поля в плазменной полости и найдены аналитические выражения для зависимости плотности сгустка от продольной координаты для обеспечения такой однородности. В подразделе 3.3 исследованы бетатронные колебания и бетатронное излучение электронов в плазме с каналом. Вычислены выражения, описывающие рост периода бетатронных колебаний в случае канала в плазме. Так как в плазме с каналом электрон испытывает большую возвращающую силу в момент максимального удаления от оси, чем в случае однородной плазмы, оказывается, что траектории на данных участках оказываются сильнее искривлены и частота и мощность бетатронного излучения увеличиваются, что является важным результатом.

В *Главе 4* исследуется достаточно важная с точки зрения теоретических исследований задача об описании плазменной полости в двумерной геометрии. Это является актуальным для численных расчетов, так как двумерная задача требует намного меньше вычислительных ресурсов для решения, но при этом основные эффекты, проявляющиеся в трехмерной геометрии, проявляются также и в данном случае. По сравнению с результатами для трехмерной плазменной полости, в двумерном случае она оказывается более вытянутой в продольном направлении, но структура сил остается такой же. Также проведено численное моделирование плазменной полости в «квазидвумерной» геометрии: в трехмерном моделировании задан электронный сгусток, сильно вытянутый по одной из поперечных координат, и результаты оказываются очень близкими к полученным в рамках двумерной модели.

Заключительная *Глава 5* нацелена в значительной степени на экспериментальные приложения — в частности, на исследования процесса ускорения электронов на субпеттаваттной лазерной установке PEARL в ИПФ РАН. Для создания области пространства, заполненной веществом нужной плотности, обычно используются газовые ячейки с входными и выходными отверстиями, в которые подается газ (например, гелий или аргон). В подобных задачах оказывается важна не только поперечная, но и продольная неоднородность профиля плазмы, которая обусловлена профилем плотности газа внутри ячейки. В подразделе 5.1 приведены оценки характеристик электронного сгустка, ожидаемые в эксперименте с известными параметрами лазерного импульса. В подразделе 5.2 методами вычислительной гидродинамики моделируется распределение газа в газовой ячейке. Результатом является рассчитанный продольный профиль плотности газа (соответствующий профилю концентрации плазмы) вдоль оси ячейки, по которой распространяется лазерный импульс в эксперименте. Затем рассчитанный профиль применяется в трехмерном численном моделировании ускорения электронов в плазме, что позволяет рассчитать энергетические спектры ускоренных электронов. В главе проведено также сравнение энергий электронов, рассчитанных численно, с экспериментальными данными, полученными на установке PEARL, которые близки результатам моделирования.

Научная новизна

Соискателем предложена новая модель плазменной полости в плазме с поперечной неоднородностью, одним из достоинств которой является то, что она не требует предположений о форме профиля электронного слоя на границе плазменной полости, а основывается лишь на предположении о малой толщине этого слоя. С помощью созданной модели был получен ряд других новых результатов для неоднородной плазмы, в частности определены аналитические выражения для электромагнитных полей внутри и снаружи полости, найдены оптимальные профили плотности ускоряемых сгустков и определены

характеристики их бетатронного излучения. Полученные результаты представляются существенным продвижением в теории сильно нелинейного режима кильватерной волны.

Достоверность и обоснованность результатов

В своей работе соискатель использовал методы и подходы, широко используемые в мировом научном сообществе для исследования задач генерации кильватерных волн и плазменного ускорения заряженных частиц. Достоверность полученных результатов обоснована правильностью выбора физической модели, корректностью математических выкладок и обоснованностью сделанных приближений. Более того, результаты, полученные при помощи разработанных теоретических моделей, показали хорошее согласие с результатами численного моделирования, основанного на решении базовых физических уравнений.

Достоверность представленных результатов подтверждается публикациями в высокорейтинговых научных журналах, а также их представлением на большом количестве международных конференций.

Работа не лишена и некоторых **недостатков**, в частности:

1. При обсуждении квазистационарного приближения приведены оценки малости не учитываемых в модели производных по времени при переходе к сопутствующей координате, движущейся со скоростью света. Однако в диссертации не указаны ограничения на длину ускорения, на которой пригодно используемое приближение заданного драйвера (как электронного пучка, так и лазерного импульса) и, соответственно, ограничения на полученные в этой модели параметры ускоренных электронов, обусловленные изменением параметров драйвера.
2. При анализе ускорения электронов фазовая скорость кильватерной волны по-прежнему считается равной скорости света (практически совпадающей со скоростью ультррелятивистского электрона), что обуславливает постоянство фазы кильватерных полей, в которых ускоряются релятивистские электроны. Такое приближение оправдано в случае электронного драйвера, однако накладывает существенные ограничения на длину ускорения при генерации кильватерных полей лазерным импульсом, групповая скорость которого в плазме может существенно отличаться от скорости света.
3. К сожалению на некоторых рисунках (например, 2 и 49) не указаны масштабы по осям и/или по цветовой шкале.

Сделанные замечания не снижают общую высокую оценку уровня диссертационной работы.

Заключение

Работа выполнена на высоком научном уровне, полученные в работе результаты являются новыми и имеют высокую научную значимость. Личный

вклад автора не вызывает сомнений. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Диссертационная работа Голованова Антона Александровича полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

14 ноября 2019 г.

Заведующий лабораторией
теории лазерной плазмы ОИВТ РАН
доктор физ.-мат. наук
(специальность 01.04.08 — физика плазмы),
профессор

Н. Е. Андреев

Контактная информация:

Андреев Николай Евгеньевич

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

тел.: +7-495-485-9722

эл. почта: andreev@ras.ru

Подпись доктора физ.-мат. наук, профессора
Н. Е. Андреева заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН
Д.ф.-м.н.

Р.Х. Амиров

М.П.

