

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Ширяева Олега Борисовича на диссертацию Вайс Ольги Евгеньевны на тему «Теоретическое исследование эффектов прямого лазерного ускорения частиц для целей диагностики интенсивных лазерных импульсов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Значительный прогресс в технологии фемтосекундных лазерных систем позволил создавать лазерные установки петаваттного уровня мощности. Интенсивность генерируемых ими сфокусированных пучков потенциально может достигать значений, превышающих 10^{22} Вт/см², что не позволяет измерять интенсивность лазерного импульса напрямую. Оценка интенсивности путем отдельного измерения пространственных и временных характеристик при пониженной энергии лазерного импульса и последующей экстраполяции в область более высоких значений энергии пучка может значительно отличаться от фактического значения, достигнутого в эксперименте. Это приводит к необходимости разработки таких методов диагностики лазерных импульсов, которые не требуют уменьшения энергии лазерного импульса или перенесения и увеличения изображения фокального распределения лазерного импульса при помощи оптических схем, также вносящих искажения в результат измерения. Таким образом, исследования посвященные новым методом диагностики, являются актуальными и востребованными. Одному из таких новых методов и посвящена диссертационная работа Вайс О.Е..

В диссертационной работе исследуется динамика частиц, ускоренных ультраинтенсивным остросфокусированным фемтосекундным лазерным импульсом, а также связь характеристик распределений частиц (электронов, протонов и фотонов вторичного излучения) с параметрами лазерного импульса, с целью диагностики данных параметров. В диссертационной работе применяются дифракционные интегралы Стрэттона-Чу для описания вблизи фокуса всех 6-ти компонент лазерного импульса, сфокусированного внеосевым параболическим зеркалом. Это соответствует оптическим схемам, используемым в реальных экспериментах, что увеличивает практическую значимость проведенных исследований. Динамика электронов и протонов рассчитывается методом тестовых частиц, согласно модельным

предположениям которого считается, что заряженные частицы движутся в заданном поле лазерного импульса, при чем не учитываются взаимодействия между частицами. Такая модель отвечает взаимодействию лазерного импульса с ультратонкой фольгой или разреженным газом (почти вакуумом). В этом случае динамика частиц оказывается зависящей только от параметров лазерного импульса, и данное обстоятельство позволяет использовать вычисляемые распределения частиц для диагностики параметров лазерного пучка.

Работа изложена на 145 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении представлены: актуальность темы диссертации, обзор научной литературы, цель работы и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, апробация результатов работы и их достоверность, публикации автора по теме диссертации и ее личный вклад в рассматриваемое исследование.

Первая глава посвящена обсуждению постановки задачи, а также методам и подходам, используемым при моделировании фемтосекундного лазерного импульса, сфокусированного внеосевым параболическим зеркалом в пятно диаметром вплоть до дифракционного предела, и при расчете динамики частиц (электронов и протонов) в поле такого импульса. Обсуждаются диапазоны применимости используемых приближений.

Во второй главе исследуется динамика электронов, ускоренных фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью от 10^{21} до 10^{23} Вт/см², в зависимости от различных параметров лазерного импульса: пиковой интенсивности, диаметра фокального пятна, его длительности, особенностей пространственно-временной формы и начальной фазы. Там же исследуется устойчивость метода диагностики параметров лазерного импульса на основе спектрально-угловых распределений электронов относительно случайных флуктуаций параметров эксперимента. В конце главы представлены результаты расчетов для экспериментальной апробации метода при определении пиковой интенсивности лазерного импульса в диапазоне от 10^{18} до 10^{20} Вт/см² в совместной работе с МЛЦ МГУ.

Третья глава посвящена исследованию нелинейного томсоновского рассеяния остросфокусированного лазерного импульса на первоначально покоящихся электронах. В главе осуществляется анализ основных особенностей временных и спектральных характеристик вторичного

излучения при рассеянии лазерного импульса на отдельных электронах в условиях острой фокусировки. Исследуется зависимость спектрально-угловых распределений вторичного излучения при взаимодействии лазерного импульса с ансамблем частиц от пиковой интенсивности оптического поля и диаметра фокального пятна. На этой основе устанавливается возможность использования характеристик вторичного излучения для диагностики параметров лазерного импульса.

В четвертой главе обсуждается связь энергетических и угловых характеристик пондермоторно ускоренных протонов с параметрами лазерного импульса: пиковой интенсивностью ($10^{21} - 10^{24}$ Вт/см²), длительностью (от 10 до 80 фс), диаметром фокального пятна (от 1 до 4.5 длин волн), а также с особенностями пространственного профиля в виде анизотропного распределения в фокальной плоскости и временной огибающей. Представлена методология одновременной оценки пиковой интенсивности лазерного импульса и его длительности на основе двух сортов частиц: электронов и протонов.

Заключение содержит основные выводы и результаты работы.

Полученные в диссертационной работе результаты характеризуются высокой степенью новизны. Впервые исследована динамика электронов и протонов в поле лазерного импульса, сфокусированного внеосевым параболическим зеркалом. Был проведен комплексный анализ зависимости характеристик распределений частиц от различных параметров лазерного импульса в условиях его предельно острой фокусировки. Предложено использовать протоны для диагностики параметров лазерного импульса, а также разработана методика диагностики лазерного импульса на основе двух сортов частиц. Достоверность результатов подтверждается согласованностью результатов, полученных в численных расчетах, с теоретическими оценками, а также с итогами предшествующих работ при тех значениях параметров лазерного импульса, которые отвечают диапазонам применимости задействованных в них моделей. Кроме того, проведенная совместно с МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова экспериментально-теоретическая работа демонстрирует перспективность предложенного в диссертации метода диагностики лазерных импульсов.

Наиболее яркие и важные из полученных результатов отвечают положениям, выносимым на защиту:

1. На примере лазерного импульса мощностью 200 ТВт и длительностью 26 фс показано, что увеличение диаметра фокального пятна с 1λ до 4λ

приводит к увеличению энергии отсечки спектров частиц, в то время как дальнейшее увеличение диаметра пятна, наоборот, приводит к ее уменьшению.

2. Показано, что угловые распределения энергетических спектров электронов анизотропны в плоскости, перпендикулярной направлению распространения острогофокусированного лазерного импульса. Частицы с наибольшими энергиями вылетают вдоль направления поляризации лазерного импульса, что обусловлено влиянием продольной компоненты лазерного импульса.
3. В случае высоких интенсивностей, превышающих 10^{21} Вт/см², угол вылета высокоэнергетичных частиц (электронов и фотонов вторичного излучения) относительно направления распространения лазерного импульса определяется диаметром фокального пятна острогофокусированного лазерного пучка, причем уменьшение пятна приводит к увеличению угла вылета частиц.
4. Получена аналитическая зависимость угловой ширины энергетических спектров протонов от диаметра фокального пятна острогофокусированного лазерного импульса.
5. Показана связь характеристик спектрально-угловых распределений частиц с пространственно-временными параметрами лазерного импульса, что позволяет использовать распределения частиц для диагностики параметров лазерного импульса.

Кроме того, были сформулированы основные предложения по проведению экспериментов по диагностике релятивистски интенсивных лазерных импульсов с интенсивностями в диапазоне $10^{21} - 10^{24}$ Вт/см², диаметром фокального пятна от 1 до 6 длин волн, длительностью от 10 до 50 фс.

Положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обладают высокой степенью обоснованности. Результаты работы прошли апробацию на многочисленных всероссийских и международных конференциях и семинарах. По результатам диссертационной работы опубликовано 8 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. В тексте работы обнаруживаются отдельные стилистические погрешности. В частности, применительно к электронам следовало

- бы избежать употребления принадлежащих скорее к области разговорной речи прилагательных «мэвные» (стр. 43, 45, 63) и «кэвные» (стр. 93, 101, 124).
2. В третьем из выносимых на защиту положений точнее было бы вести речь не о рассеянии лазерного импульса (упоминание о рассеянии более уместно в случае, когда необходима и используется самосогласованная модель его распространения в плазме), а о взаимодействии лазерного импульса с электронным ансамблем.
 3. В разделе 1.2, посвященном описанию используемой модели компонент лазерного импульса, со ссылкой на одну из цитируемых работ (В. Quesnel, Р. Mora [62]) делается утверждение о несущественности влияния длительности импульса на пространственное распределение оптического поля, на основании чего в рассматриваемой модели пространственно-временные эффекты не учитываются (стр. 30). В других работах, однако, было показано, что в [62] пропущены поправки первого порядка, описывающие именно пространственно-временные эффекты, которые могут играть некоторую, хотя и не определяющую роль.
 4. Аналогичное предлагаемому в разделе 2.3 распределение сравнительно холодных электронов рассматривалось в ряде известных работ, с результатами которых можно было бы провести сравнение результатов диссертации.
 5. В главе о поперечной динамике ионов для определения угла их разлета не используется присущий поперечной динамике адиабатический инвариант, хотя полученные в диссертационной работе результаты могли бы быть сопоставлены с результатами, получаемыми таким способом.

Сделанные замечания не являются принципиальными, не снижают научной значимости результатов, представленных в диссертации, и не сказываются на общей положительной оценке работы.

Автореферат достоверно отражает структуру и содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа «Теоретическое исследование эффектов прямого лазерного ускорения частиц для целей диагностики интенсивных лазерных импульсов» подтверждает научную квалификацию Вайс О.Е и полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства

Российской Федерации (№ 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Вайс Ольга Евгеньевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры физики медико-биологического факультета ФГАОУ
РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России
доктор физико-математических наук,
Профессор РАН



Ширяев Олег Борисович

«27» октября 2021 г.

Почтовый адрес: 117997, Россия, г. Москва, ул. Островитянова, д.1

Телефон: 8 (916) 205-55-82

E-mail: DrOlegBShiryaev@gmail.com

Подпись О.Б. Ширяева удостоверяю:
ученый секретарь ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова,
кандидат медицинских наук, доцент



О.М. Демина

Список основных работ оппонента О.Б. Ширяева по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. M. Kalashnikov, A. Andreev, K. Ivanov, A. Galkin, V. Korobkin, M. Romanovsky, O. Shiryayev, M. Schnuerer, J. Braenzel, V. Trofimov, Diagnostics of Peak Laser Intensity Based on the Measurement of Energy of Electrons Emitted from Laser Focal Region, Laser and Particle Beams, Vol. 33, p. 361-366 (2015)
2. O.B. Shiryayev, The Combination of Cold and Hot Components in the Energy Spectra of Electrons Scattered by Relativistically Intense Laser Pulses with Various Transverse Distributions of Amplitude, Laser and Particle Beams, Vol. 35, p. 64-71 (2017)
3. Ширяев О.Б., Асимптотическая теория пондеромоторной динамики электрона в поле сфокусированного релятивистски интенсивного электромагнитного волнового пакета, Квантовая электроника, Том 49, номер 10, стр. 936-946 (2019)
4. O.B. Shiryayev, M.Yu. Romanovsky, V.B. Bukin, Vacuum post-acceleration of relativistic electrons by combinations of THz electromagnetic pulses and constant magnetic fields, Optical Engineering, Vol. 60(8), p. 082011-1 – 11 (2021)