

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт

прикладной физики Российской
академии наук» (ИПФ РАН),

д.ф.м.н., член-корр. РАН

Денисов Григорий Геннадьевич



2021 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Вайс Ольги Евгеньевны «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.

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Вайс О.Е. посвящена исследованию прямого лазерного ускорения частиц из ультратонких нанофолг или разреженного газа и нелинейного томсоновского рассеяния с целью диагностики параметров лазерного импульса. В настоящее время развитие лазерных технологий привело к созданию лазерных систем петаваттного класса мощности. При фокусировке таких импульсов в пятно диаметром в одну или несколько длин волн интенсивность может достигать рекордных значений, превышающих 10^{22} Вт/см². Однако диагностика таких интенсивностей с требуемой точностью для традиционных методов оказывается невозможной задачей, поэтому создание новых методов диагностики оказывается актуальным направлением исследований. В настоящий момент предлагаются различные подходы для решения данной задачи, такие как использование многократной туннельной ионизации атомов с высокими потенциалами ионизации, нелинейного комптоновского рассеяния, спектрально-угловых распределений рассеиваемого пучка ускоренных электронов. Однако в таких подходах необходим учет динамики частиц, полная информация о характеристиках пучка частиц, а также высокая степень синхронизации лазерного импульса и электронных пучков. Поскольку наибольшие интенсивности достигаются в условиях острой фокусировки, когда электроны и протоны могут ускоряться напрямую лазерным импульсом за счет его высокой пространственной неоднородности, то диагностика лазерного импульса может проводиться на основе спектрально-угловых распределений таких частиц, что и предлагается в

диссертационной работе. Таким образом, тематика диссертационного исследования Вайс О.Е. является актуальной и представляет интерес для передовых лазерных установок по всему миру.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 145 страницах и содержит 45 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 133 наименования.

Во введении обоснована актуальность исследования, формулируется цель, задачи работы, а также положения, выносимые на защиту, рассматривается научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов работы. Указан личный вклад автора, представлена апробация работы на конференциях и семинарах и публикации по теме диссертации. Приводится обзор научной литературы, в котором кратко изложены подходы для описания лазерных импульсов, используемые в численных и теоретических исследованиях, а также области их применимости. Освещены уже известные результаты по ускорению электронов лазерными импульсами с различной конфигурацией поля, а также результаты по рассеянию лазерного импульса на электронах. Из чего следует, что подобных исследований для режима острой фокусировки лазерного импульса внеосевым параболическим зеркалом не проводилось, что еще раз подчеркивает актуальность данной работы.

Первая глава диссертации посвящена постановке задачи и методам, используемым в проводимых в рамках диссертационной работы исследованиях. Описание лазерного импульса ведется на основе дифракционных интегралов Стреттона-Чу, которые позволяют моделировать поле лазерного импульса с различной пространственно-временной формой и сфокусированного внеосевым параболическим зеркалом, что отвечает оптическим системам, используемым в реальных экспериментах. Обсуждается влияние внеосевого угла параболического зеркала на распределение компонент лазерного импульса вблизи фокуса пучка, а также область применимости указанной модели, которая не учитывает влияние длительности лазерного импульса на пространственное распределение компонент. Расчет динамики частиц (электронов и протонов) ведется на основе метода пробных частиц, который не учитывает силы взаимодействия между частицами, что оправдано в случае взаимодействия лазерного импульса с разреженным газом, который предлагается использовать для диагностики лазерных импульсов. Для электронов решается релятивистское уравнение движения с силой Лоренца. Используемая модель не учитывает также силу радиационного трения, что оказывается возможным для исследуемых интенсивностей лазерного импульса и конечных энергий электронов, и что было проверено в ходе выполнения работы. Для исследования динамики протонов используется нерелятивистское уравнение движения с пондермоторной силой, которое описывает скорость смещения частицы в процессе взаимодействия с лазерным импульсом, а также углы вылета частиц, что отвечает характеристикам, которые могут быть измерены в эксперименте. Результаты, полученные при помощи данной модели, были сопоставлены с результатами, полученными на основе решения релятивистского уравнения движения с силой Лоренца. Результаты обоих подходов оказались в хорошем согласии друг с другом.

Во второй главе исследуется влияние различных пространственно-временных характеристик острогофокусированного фемтосекундного лазерного импульса на динамику электронов из ультратонкой нанофольги. В начале главы приводятся условия, ограничивающие

толщину нанофольги или плотность разреженного газа, для проведения диагностического эксперимента. В главе представлены характерные спектрально-угловые распределения электронов. Показано, что в условиях острой фокусировки наблюдается анизотропия в распределении быстрых частиц. На основе анализа распределений компонент лазерного импульса сделан вывод о том, что данная анизотропия обусловлена продольной компонентой электрического поля лазерного импульса. Исследование влияния мощности лазерного импульса на характеристики частиц показало, что при заданном значении диаметра фокального пятна увеличение интенсивности лазерного импульса (за счет увеличения мощности) приводит к увеличению энергетических характеристик распределений частиц. Исследование влияния диаметра фокального пятна лазерного импульса на распределения частиц при заданной мощности продемонстрировало нелинейную зависимость энергетических характеристик частиц. Так при увеличении диаметра фокального пятна лазерного импульса от 1 до 4 длин волн наблюдалось увеличение энергетических характеристик, а затем дальнейшая расфокусировка пучка сопровождалась уменьшением энергий электронов. Автор связывает это с тем, что в условиях предельно острой фокусировки частица быстрее покидает область взаимодействия, не успевая набрать большую энергию даже в случае большей интенсивности. Таким образом, изначально расфокусировка приводит к росту конечных энергий заряженных частиц. В тоже время угол вылета высокоэнергетичных частиц определяется диаметров фокального пятна лазерного импульса, так при меньшем диаметре пятна высокоэнергетичные частицы детектируются под большими углами, что объясняется влиянием угла сходимости/расходимости лазерного излучения на углы вылета частиц. Во второй главе было также исследовано влияние пространственной формы лазерного импульса на распределения частиц. Так мода Лагерра-Гаусса с интенсивным кольцом в фокальной плоскости приводит к увеличению доли среднеэнергетичных электронов. Форма временной огибающей лазерного импульса также влияет на энергетические распределения электронов. Было показано, что в условиях острой фокусировки лазерный импульс с дефектом фемтосекундного масштаба ускоряет электроны до меньших энергий. В главе был проведен анализ влияния начальной фазы лазерного импульса на энергии электронов, было показано, что данная характеристика лазерного импульса влияет на энергии частиц только в случае предельно острой фокусировки (диаметр порядка длины волны) и длительности лазерного импульса лишь в несколько периодов лазерного поля. Было исследовано влияние длительности лазерного импульса на энергии частиц, так было показано, что в условиях острой фокусировки энергии частиц пропорциональны градиенту интенсивности лазерного импульса, то есть прямо пропорциональны интенсивности и обратно пропорциональны длительности лазерного импульса. Проведено исследование стабильности эксперимента относительно случайных флуктуаций параметров эксперимента, было показано, что предложенная методика является устойчивой к отклонениям, возникающим при установке мишени и зеркал. Исследуемый в диссертационной работе метод был апробирован в эксперименте с лазерными импульсами с интенсивностью в диапазоне от 10^{18} до 10^{20} Вт/см². Результаты численных расчетов, проведенных методом пробных частиц в рамках данного исследования, приведены в главе 2. В конце главы подводятся ее итоги и формулируются ее основные выводы.

Третья глава посвящена исследованию нелинейного томсоновского рассеяния остророфокусированного релятивистски интенсивного лазерного импульса. Введение к третьей главе представляет собой небольшой литературный обзор, в котором обсуждаются основные особенности рассеяния лазерных импульсов на электронах, как в нерелятивистском, так и в

релятивистском режиме. Первая часть исследования посвящена генерации вторичного излучения отдельными частицами при рассеянии лазерного импульса с гауссовой пространственно-временной формой. В третьей главе показана связь угловых распределений вторичного излучения с динамикой частицы, которая излучает в узком конусе углов вдоль направления своего движения. В условиях релятивистских интенсивностей вторичное излучение представляет собой набор аттосекундных импульсов, число которых зависит как от длительности лазерного импульса, так и от диаметра фокального пятна. В условиях острой фокусировки с уменьшением диаметра фокального пятна число генерируемых импульсов уменьшается, что так же, как и в главе 2, объясняется уменьшением области взаимодействия частицы с лазерным импульсом. При этом мощность таких аттосекундных импульсов также уменьшается. Как и в случае с ускорениями электронов, существует оптимальное значение диаметра фокального пятна лазерного импульса, при котором мощность и ширина спектров вторичного излучения достигают наибольшего значения при фиксированной мощности лазерного импульса. Вторая часть исследования посвящена рассеянию лазерного импульса на ансамбле частиц. Расчеты ведутся в рамках приближения некогерентных источников, что является оправданным в случае острой фокусировки. В работе показано, что так же, как и в случае рассеяния плоской электромагнитной волны, при рассеянии острогофокусированного лазерного импульса наблюдается анизотропия в распределении энергии вторичного излучения с наибольшей угловой шириной вдоль направления поляризации лазерного импульса. Однако в условиях острой фокусировки часть излучения распространяется непосредственно в направлении распространения лазерного импульса. Кроме того, существует направление, в котором генерируются наиболее широкие спектры. В ходе анализа влияния диаметра фокального пятна и пиковой интенсивности лазерного импульса на спектрально-угловые распределения вторичного излучения было установлено, что излучение в данном направлении обусловлено направлением вылета высокоэнергетичных электронов. В третьей главе показано, что определение данного направления может служить для диагностики диаметра фокального пятна лазерного импульса, в то время как критическая частота спектров вторичного излучения использоваться для оценки пиковой интенсивности лазерного импульса. В конце третьей главы подводятся ее итоги и формулируются ее основные выводы, а также условия для диагностики лазерных импульсов.

В четвертой главе исследуется связь характеристик распределений пондермоторно ускоренных протонов с параметрами лазерного импульса. Во введении к главе обсуждается постановка задачи, а также приведены оценки параметров среды, которая должна быть использована в эксперименте. Рассматриваются типичные спектрально-угловые распределения протонов, ускоренных лазерным импульсом. В четвертой главе выделяются два режима ускорения протонов: с незначительным смещением частицы за время взаимодействия, для которого в диссертационной работе дана оценка для энергии отсечки протонных спектров для гауссового лазерного импульса с различной пиковой интенсивностью, длительностью и диаметром фокального пятна, и со значительным смещением частицы. В последнем случае энергия отсечки пропорциональна интенсивности лазерного импульса. В работе показано, что в отличие от электронов в режиме незначительного смещения протонов энергия частиц не зависит от формы временной огибающей лазерного импульса и определяется флюенсом лазерного импульса. На основе численного моделирования и при помощи аналитических оценок показано, что протоны могут быть использованы для выявления анизотропии фокального распределения лазерного импульса по наибольшим энергиям частиц,

детектируемым под разными углами, а также для оценки диаметра фокального пятна по угловой ширине протонных спектров. Кроме того, в последней части четвертой главы предложена методика одновременной оценки интенсивности и длительности лазерных импульсов на основе двух сортов частиц: электронов и протонов, которые имеют различные зависимости от искомых параметров лазерного импульса. В конце подводятся итоги и формулируются основные выводы четвертой главы.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертации. В конце дается список используемой литературы.

Научная новизна исследования

В рамках диссертационной работы Вайс О.Е. было впервые проведено комплексное исследование влияния различных пространственно-временных параметров лазерного импульса, сфокусированного внеосевым параболическим зеркалом в пятно диаметром в одно или несколько длин волн, на спектрально-угловые распределения электронов и протонов с целью использования характеристик ускоренных частиц для диагностики лазерных импульсов. Было проведено исследование характеристик нелинейного томсоновского рассеяния остросфокусированного лазерного импульса на ансамбле электронов, что позволило выявить особенности спектрально-угловых распределений вторичного излучения характерных для рассеяния лазерного пучка в случае предельно острой фокусировки. В диссертационной работе впервые предложено использовать протоны для диагностики лазерных импульсов, а также разработана методика одновременной диагностики интенсивности и длительности лазерных импульсов на основе двух сортов частиц.

Обоснование и достоверность результатов

Результаты, полученные в ходе исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, являются хорошо обоснованными. Так результаты численных моделирований согласуются с результатами других авторов, полученных для их приближений, а также с аналитическими оценками, а численные коды, используемые для расчетов, были проверены на задачах, с известными аналитическими результатами. Новый метод диагностики, теоретический базис для которого разрабатывался в рамках диссертационной работы, был апробирован в экспериментально-теоретической работе совместной с МЛЦ МГУ, что также подтверждает достоверность полученных результатов.

Научная и практическая значимость

Результаты, представленные в диссертационной работе Вайс О.Е., представляют собой теоретическую основу для нового метода диагностики высокоинтенсивных остросфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов на основе ускорения заряженных частиц (электронов и протонов) из разреженного газа. Предлагаемая методика измерения параметров лазерных импульсов представляет огромный интерес для современных установок петаваттного класса мощности (ELI, Чехия–Румыния–Венгрия; Vulcan, Великобритания;

Apollon, Франция; и др.), для которых традиционные методы измерения интенсивности лазерных импульсов оказываются вне зоны применимости.

Полученные в работе результаты представляют несомненный научный и практический интерес и могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в области лазерной физики высоких энергий. Так результаты уже прошли апробацию в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, и представляют интерес для лазерного комплекса PEARL в Институте прикладной физики Российской академии наук, а также проекта XCELS (Международный центр исследований экстремальных световых полей, <https://xcels.ipfran.ru/>).

Оценка работы

На основании рассмотрения материала диссертации, автореферата и представления работы на научном семинаре в отделении нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, ведущая организация считает, что диссертационная работа Вайс Ольги Евгеньевны представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.19 – лазерная физика. Автореферат полно и правильно отражает содержание работы, ее результаты и выводы. Тема диссертации является актуальной, а полученные в работе результаты являются новыми и оригинальными. Полученные результаты прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях и семинарах, и в полной мере опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Замечания по работе

1. Во второй главе диссертации пренебрегается влиянием пикосекундных предимпульсов на процесс диагностики основного фемтосекундного лазерного импульса с помощью ускоренных электронов. В то же время, не приводится оценок выноса плазмы из области перетяжки лазерного излучения под действием такого предимпульса. Не окажет ли такой вынос заметного влияния на результаты диагностики лазерного импульса?
2. Во второй главе диссертации изложены результаты численного моделирования ускорения электронов для экспериментальной апробации предложенного метода диагностики лазерных импульсов на фемтосекундном лазере МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, но сами экспериментальные результаты не приводятся. Представляется, что их изложение украсило бы диссертационную работу.
3. В третьей главе диссертации предлагается использовать нелинейное томсоновское рассеяние для диагностики остросфокусированного лазерного импульса. Было бы интересно провести расчеты, моделирующие современные методы рентгеновской диагностики, и продемонстрировать тем самым потенциал экспериментальной реализации предложенного метода.
4. В четвертой главе изложен метод диагностики лазерного импульса по ускоренным протонам, причем для описания процесса ускорения используется пондеромоторное приближение. Использование такого “усредненного” подхода накладывает ограничения на длительность лазерного импульса, что, однако, не отражено в диссертации.
5. Современные методы нелинейной компрессии лазерных импульсов могут приводить к достаточно сложной временной и пространственной динамике лазерного излучения.

Возможно ли использование предложенных в диссертации методов для диагностики пиковой интенсивности таких сложных типов лазерных импульсов?

Сделанные замечания не затрагивают защищаемых положений и не оказывают влияния на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа «Теоретическое исследование эффектов прямого лазерного ускорения частиц для целей диагностики интенсивных лазерных импульсов» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным 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.

Доклад Вайс О.Е. по материалам диссертации был заслушан и обсужден на онлайн (ZOOM) семинаре отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН 12 октября 2021 г. Отзыв подготовлен заведующим лабораторией, доктором физико-математических наук Стародубцевым Михаилом Викторовичем и одобрен на заседании семинара.

Заведующий лабораторией моделирования плазменных явлений
в экстремальных астрофизических объектах ИПФ РАН,
доктор физ.-мат. наук
Стародубцев Михаил Викторович
тел.: +7 (903) 043-82-75
e-mail: mstar@ipfran.ru



Председатель семинара
Заместитель директора ИПФ РАН,
доктор физ.-мат. наук, академик РАН
Хазанов Ефим Аркадьевич
тел.: +7 (831) 436-57-36
e-mail: khazanov@ipfran.ru



Подписи сотрудников ИПФ РАН М.В. Стародубцева и Е.А. Хазанова заверяю:

Ученый секретарь ИПФ РАН,
кандидат физ.-мат. наук

 Корюкин Игорь Валерьевич



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)
603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120, ул. Ульянова, д. 46.
телефон: +7 (831) 436-86-10
e-mail: igor@ipfran.ru

Список основных публикаций сотрудников Института прикладной физики Российской академии наук по теме диссертации Вайс О.Е. в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Experimental evidence for short-pulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures, A. Soloviev, K. Burdonov, S. N. Chen et al. *Scientific Reports* **7**, 12144 (2017)
2. Alignment of solid targets under extreme tight focus conditions generated by an ellipsoidal plasma mirror, D. Kumar, M. Šmíd, S. Singh, A. Soloviev et al., *Matter and Radiation at Extremes* **4**, 024402 (2019)
3. Experimental study of strongly mismatched regime of laser-driven wakefield acceleration, S.E. Perevalov, K.F. Burdonov, A.V. Kotov et al., *Plasma Physics and Controlled Fusion* **62** (9), 094004 (2020)
4. Self-generated surface magnetic fields inhibit laser-driven sheath acceleration of high-energy protons M. Nakatsutsumi, Y. Sentoku, A. Korzhimanov et al., *Nature Communications* **9**, 280 (2018)
5. Нелинейное сжатие сверхмощных лазерных импульсов: компрессия после компрессора, Е.А. Хазанов, С.Ю. Миронов, Ж. Муру, *УФН* **189**, 1173–1200 (2019)
6. Fivefold compression of 250-TW laser pulses, V. Ginzburg, I. Yakovlev, A. Zuev et al., *Physical Review A* **101** (127), 013829(2022)
7. Nonlinear polarization interferometer for enhancement of laser pulse contrast and power, E. Khazanov, *Optics Express* **29** (11), 17277 – 17285 (2021)
8. Quasiclassical approach to synergic Synchrotron–Cherenkov radiation in polarized vacuum, I.I. Artemenko, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, *New Journal of Physics* **22** (9), 093072 (2020)
9. Probing non-perturbative QED with electron-laser collisions, C. Baumann, E.N. Nerush, A. Pukhov, I.Y. Kostyukov, *Scientific Reports* **9** (11), 9407 (2019)
10. Beam loading in the bubble regime in plasmas with hollow channels, A.A. Golovanov, I.Y. Kostyukov, J. Thomas, A. Pukhov, *Physics of Plasmas* **23** (9), 093114 (2016)
11. Formation of a plasma with the determining role of radiative processes in thin foils irradiated by a pulse of the PEARL subpetawatt laser, S.A. Pikuz, I.Yu. Skobelev, M.A. Alkhimova et al., *JETP Letters* **105**, 13–17 (2017)
12. Highly-collimated, high-charge and broadband MeV electron beams produced by magnetizing solids irradiated by high-intensity lasers, S. Bolaños, J. Béard, G. Revet, S.N. Chen et al., *Matter and Radiation at Extremes* **4**, 044401 (2019)
13. Thin plate compression of a sub-petawatt Ti:Sa laser pulses, S.Yu. Mironov, S. Fourmaux, P. Lassonde et al., *Appl. Phys. Lett.* **116**, 241101 (2020)
14. High energy femtosecond pulse compression, Ph. Lassonde, S. Mironov, S. Fourmaux et al., *Laser Phys. Lett.* **13**, 075401 (2016)
15. Laser-driven vacuum breakdown waves, A.S. Samsonov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, *Scientific Reports* **9**, 11133 (2019)