

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Говраса Евгения Александровича «Теоретическое исследование лазерно-инициированного ускорения ионов изnano- и микроструктурированных мишеней», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 — «лазерная физика».

Диссертационная работа Говраса Евгения Александровича посвящена теоретическому описанию ускорения ионов при разете в вакуум плазмы тонких лазерных мишеней субмикронного масштаба. Получение пучков ускоренных частиц с помощью ультракоротких лазерных импульсов релятивистской интенсивности является одним из интенсивно развивающихся направлений современной физики высоких плотностей энергий. Так, уже сейчас достигнуты энергии лазерно-ускоренных электронов в 4 ГэВ. Причем значительное увеличение максимально достижимой энергии лазерно-ускоренных электронов происходит практически ежегодно. Совсем другая ситуация наблюдается с ускорением ионов. За последние почти 20 лет трудно говорить о каком бы то ни было существенном прогрессе. Отсутствие значительных успехов в экспериментах стимулирует более интенсивные работы в этой области. Актуальность данного исследования также обусловлена тем фактом, что лазерное ускорение ионов имеет более сложную природу, чем в случае с электронами: ускорение ионов лазером при интенсивностях, меньших 10^{23} Вт/см², происходит опосредовано через нагрев электронной компоненты плазмы и создание полей разделения заряда. Такой сложный механизм конверсии лазерной энергии в энергию ускоренных частиц, безусловно, требует более глубокого изучения механизмов и оптимизации процесса лазерно-инициированного ускорения ионов. Особую роль здесь играет построение упрощенных теоретических моделей, способных описать основные эффекты, влияющие на характеристики лазерно-ускоренных ионов. Именно эту цель преследует диссертационная работа Говраса Е.А.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения. Текст изложен на 161 странице, содержит 39 рисунков и 223 библиографические ссылки.

Во **введении** достаточно подробно обоснована актуальность проведенных исследований, дан обзор литературы по тематике диссертации, из которого видно, какие проблемы до сих пор остались неизученными и требуют особого внимания. Также представлены данные о научной новизне проведенных исследований. Сформулированы положения, выносимые на защиту. И представлены сведения об апробации и внедрении результатов диссертационной работы.

В главе 1 диссертации описана общая постановка задачи об одномерном разлете плазмы мишени с двумя сортами ионов и заданной температурой электронами. Введены основные параметры, определяющие различные режимы разлёта плазмы и её компонентного состава. Решению общей задачи при определенных наборах управляющих параметрах посвящены следующие главы диссертации. Также в **главе 1** приведены результаты численного решения основной системы уравнений для разлета плазмы конечной толщины с одним сортом ионов и электронами произвольной температуры. Численное моделирование проводилось с помощью разработанного автором одномерного электростатического PIC-кода. Показано, что при конечной толщине плазменного слоя в случае слабого нагрева электронной компоненты становится существенным взаимодействие в центре мишени волн разрежения, пришедших с краев мишени. Подобное взаимодействие влияет на распределение электростатического поля, а, следовательно, его необходимо учитывать при описании разлета плазмы ультратонких мишеней.

В главе 2 на основе простых, физически обоснованных, предположений и результатов одномерного численного моделирования построена аналитическая модель разлета в вакуум плазмы однокомпонентного ионного состава, позволяющая вычислить максимальную энергию ионов и их спектральное распределение для произвольного отношения дебаевского радиуса нагретых электронов к толщине мишени. Путем учета перехода разлета плазмы в трехмерный режим и адиабатического остывания электронов после выключения лазерного импульса получена аналитическая связь максимальной энергии ионов с основными параметрами лазерного импульса и мишени. Изучено поведение максимальной энергии ионов на параметрической плоскости «диаметр пятна фокусировки – длительность импульса» для фиксированной энергии лазерного импульса.

В 3-й и 4-й главе рассматривается ускорение ионов при разлете плазмы мишеней с двумя сортами ионов: легкоускоряемая примесь и ионы остова мишени. Ввиду сложности решения задачи для произвольных температур электронов плазмы, рассматривается случай их полной эвакуации лазерным импульсом, то есть кулоновский взрыв мишени. Получено аналитическое решение данной задачи и исследована возможность улучшения качества пучка ускоренных легких ионов путем подбора параметров и структуры мишени. Рассмотрены случаи слоистого распределения примесных ионов (**3-я глава**) и их локализации в виде тонкого слоя внутри или на поверхности мишени (**4-я глава**). В качестве практически значимых параметров пучка частиц рассматривались его полная спектральная ширина и

количество ионов, обладающих узким спектральным диапазоном. Также было произведено сравнение между собой слоистого и однородного распределения примеси по объёму мишени. Были получены важные выводы о подборе мишеней для лазерно-инициированного ускорения ионов: использование слоистых мишеней позволяет генерировать пучки ускоренных ионов с малой полной спектральной шириной, порядка долей процента, а гомогенные мишени обеспечивают генерацию наибольшего числа частиц, попадающих в узкий спектральный диапазон вблизи максимальной энергии.

В **заключении** резюмируются основные результаты, полученные в диссертации, которые сгруппированы по типам распределений компонент плазмы лазерной мишени.

В **приложении** приведена схема построения численного решения системы уравнений, описывающей бесстолкновительный разлет плазмы в рамках модели Больцмана-Власова-Пуассона.

В качестве важных новых научных результатов работы можно выделить следующие:

- 1) Впервые получено аналитическое описание разлета в вакуум плазменного слоя конечной толщины, содержащего один сорт ионов и электроны произвольной температуры. Решение данной задачи имеет важное как прикладное, так и фундаментальное значение.
- 2) В широком диапазоне значений параметров лазера и мишени получена их аналитическая связь с максимальной энергией ионов, что, поможет планированию экспериментов по взаимодействию релятивистских лазерных импульсов с плазмой.
- 3) Получены рекомендации по структурированию мишеней двухкомпонентного ионного состава, взрывающихся кулоновским образом. Применение этих рекомендаций позволит улучшить качество генерируемых пучков лазерно-ускоренных ионов.
- 4) Показано, что гетерогенные мишени с двумя сортами ионов не уступают по качеству генерируемого пучка легких ионов более сложным в изготовлении слоистым мишеням.

Результаты научных исследований диссертанта являются новыми. Их достоверность не вызывает сомнений, так как для их получения были использованы строгие, последовательные методы математической и вычислительной физики. Достоверность и новизна результатов подтверждается также публикациями в авторитетных научных рецензируемых изданиях. Сама

диссертация представляет собой завершенную работу, состоящую из решения логически связанных между собой задач.

Результаты диссертации могут быть использованы при планировании и сопровождении полномасштабных численных экспериментов, а также при практической реализации лазерной генерации ускоренных ионов.

По диссертационной работе можно высказать следующие замечания:

1. Недостаточно полно обсуждены вопросы применимости некоторых приближений, в частности,
 - а) использование формулы для адиабатического остывания электронов, полученной в квазинейтральном приближении, для случая сильных полей разделения заряда;
 - б) предположение об изотермичности электронной компоненты плазмы в случае коротких лазерных импульсов.
2. Недостаточно полно обоснован выбор внешних параметров теоретической модели при сравнении с результатами численного моделирования в разделе 2.3, а именно, значений коэффициента поглощения лазерного излучения, длины ускорения ионов, асимметрия пространственного распределения электронов.
3. Пондеромоторный скейлинг для температуры горячих электронов в форме Wilks'a был обоснован (сравнением с результатами численного моделирования и экспериментальными измерениями) только при использовании в нём амплитуды падающего на мишень лазерного поля в вакууме. Применение скейлинга такой формы при использовании поглощённого лазерного поля требует обоснования и выяснения условий, в которых происходит отклонение от установленного распределения Wilks'a.
4. В случае коротких лазерных импульсов следует обсудить возможность установления у электронов конкретного значения температуры (средней кинетической энергии), особенно, если длительность импульса не превышает значительно времени рециркуляции электронов вблизи мишени.
5. Утверждается, что построение параметрических зависимостей, изображенных на рисунке 2.8, невозможно с помощью прямого полномасштабного численного моделирования. Однако при построении теоретических зависимостей напрямую используются результаты такого численного моделирования.

Отмеченные недостатки носят, однако, частный характер и не снижают общей высокой оценки диссертации. Результаты, полученные в диссертации, достаточно полно обосновывают научные положения, вынесенные на защиту. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации. Основные

результаты опубликованы в 7 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Диссертационная работа «Теоретическое исследование лазерно-инициированного ускорения ионов изnano- и микроструктурированных мишеней» является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к работам на соискание научной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Говрас Евгений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 — «лазерная физика».

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией теории лазерно-плазменных воздействий ОИВТ РАН
доктор физико-математических наук, профессор



/ Андреев Николай Евгеньевич /

дата: 29 февраля 2016 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)
125412, Россия, г.Москва, ул. Игорская, д. 13, стр. 2
тел.: (495) 485-97-22; (495) 485-9009; (495) 483-4211
e-mail: andreev@ras.ru

Подпись Николая Евгеньевича Андреева удостоверяю:
ученый секретарь ОИВТ РАН, доктор физико-математических наук

Амиров Равиль Хабибулович
29 февраля 2016 г.



Список

публикаций официального оппонента Андреева Николая Евгеньевича, опубликованных за последние пять лет по теме диссертации Говраса Евгения Александровича «Теоретическое исследование лазерно-инициированного ускорения ионов изnano- и микроструктурированных мишеней», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 — «лазерная физика».

1. L.P. Pugachev, N.E. Andreev, P.R. Levashov et al., “Laser Acceleration of Electrons in Two-Dimensionally Inhomogeneous Plasma at the Boundary of a Metal Foil,” *Plasma Phys. Rep.* 41, 542 (2015).
2. N.E. Andreev, S.V. Kuznetsov, M.E. Veysman, “Laser Wakefield Electron Acceleration in Capillary Waveguides under Non-Symmetric Coupling Conditions,” *Nucl. Instrum. Meth. A* 740, 273 (2014).
3. B.S. Paradkar, N.E. Andreev, B. Cros et al., “A Comparative Study of Plasma Channels for a 100 GeV Electron Accelerator Using a Multi-Petawatt Laser,” *Plasma Phys. Control. Fusion* 56, 084008 (2014).
4. J. Ju, G. Genoud, H.E. Ferrari et al., “Analysis of X-Ray Emission and Electron Dynamics in a Capillary-Guided Laser Wakefield Accelerator,” *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 17, 051302 (2014).
5. N.E. Andreev, V.E. Baranov, B. Cros et al., “Laser Wakefield Compression and Acceleration of Externally Injected Electron Bunches in Guiding Structures,” *J. Plasma Phys.* 79, 143 (2013).
6. Yu.A. Malkov, A.N. Stepanov, D.A. Yashunin et al., “Generation of Quasi-Monochromatic Beams of Accelerated Electrons during Interaction of Weak-Contrast Intense Femtosecond Laser Radiation with a Metal-Foil Edge,” *Quantum Electron.* 43, 226 (2013).
7. O.F. Kostenko, N.E. Andreev, “Simulation of the Generation of the Characteristic X-Ray Emission by Hot Electrons in a Foil,” *Quantum Electron.* 43, 237 (2013).
8. M. Veysman, N.E. Andreev, G. Maynard, B. Cros, “Nonsymmetric Laser-Pulse Propagation in Capillary Tubes with Variable Radius,” *Phys. Rev. E* 86, 066411 (2012).
9. M.E. Povarnitsyn, N.E. Andreev, P.R. Levashov et al., “Dynamics of Thin Metal Foils Irradiated by Moderate-Contrast High-Intensity Laser Beams,” *Phys. Plasmas* 19, 023110 (2012).
10. V. Eremin, Yu. Malkov, V. Korolikhin et al., “Study of the Plasma Wave Excited by Intense Femtosecond Laser Pulses in a Dielectric Capillary,” *Phys. Plasmas* 19, 093121 (2012).

11. N.E. Andreev, V.E. Baranov, B. Cros et al., "Electron Bunch Compression and Acceleration in the Laser Wakefield," Nucl. Instrum. Meth. A 653, 66 (2011).
12. N.E. Andreev, S.V. Kuznetsov, B. Cros et al., "Laser Wakefield Acceleration of Supershort Electron Bunches in Guiding Structures," Plasma Phys. Control. Fusion 53, 014001 (2011).
13. A.A. Balakin, M. Veysman, N.E. Andreev et al., "Laser and Particle Dynamics in LWFA," IEEE T. Plasma Sci. 39, 2806 (2011).
14. A.V. Ovchinnikov, O.F. Kostenko, O.V. Chefonov et al., "Characteristic X-Rays Generation under the Action of Femtosecond Laser Pulses on Nano-Structured Targets," Laser Part. Beams 29, 249 (2011).

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией теории лазерно-плазменных воздействий ОИВТ РАН
доктор физико-математических наук, профессор



/ Андреев Николай Евгеньевич /

дата: 29 февраля 2016 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)
125412, Россия, г.Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2
тел.: (495) 485-97-22; (495) 485-9009; (495) 483-4211
e-mail: andreev@ras.ru

Подпись Николая Евгеньевича Андреева удостоверяю:
ученый секретарь ОИВТ РАН, доктор физико-математических наук

Амиров Равиль Хабибулович
29 февраля 2016 г.

