

## **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 изучению ускорения ионов, возникающем при взаимодействии релятивистских и ультрарелятивистских лазерных импульсов с тонкими (субмикронными) пленками, в том числе сложного состава. Актуальность данного исследования обусловлена как успехами лазерной физики последних десятилетий, связанными с генерацией ультракоротких лазерных импульсов мультитераваттной и петаваттной мощности, так и с успехами в технологии создания и обработки новых материалов, позволяющих конструировать сложные лазерные мишени. В частности, создание лазерных мишеней, состоящих из слоев различных элементов с толщинами всего несколько нанометров, позволяет проводить эксперименты по лазерному ускорению с контролем параметров сгустка ускоренных протонов.

В настоящее время численное моделирование является фактическим основным методом как для планирования эксперимента и интерпретации экспериментальных данных, так и для общей оптимизации процесса лазерного ускорения ионов. Однако зависимость характеристик ускоренных частиц от многих параметров лазерного излучения и самой мишени приводит иногда к непреодолимо высоким затратам численных ресурсов при полномасштабном моделировании. В связи с этим, важной задачей является разработка простых моделей ускорения ионов, позволяющих предсказывать параметры ускоренных частиц. Разработка таких моделей является одной из целей диссертационной работы.

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

Во введении обоснована актуальность и своевременность проведённых исследований, дан обзор литературы по тематике диссертации, из которого видно место диссертационной работы в современной области описания лазерно-инициированного ускорения ионов. Указана научная новизна проведённых исследований, сформулированы их основные цели. Сформулированы положения, выносимые на защиту, а также данные по апробации и внедрению результатов диссертационной работы.

В главе 1 диссертации рассматривается общая постановка задачи о разлете плазмы мишени с двумя сортами ионов и лазерно-нагретыми электронами. Описаны используемые приближения и основные управляющие параметры. Также приведены результаты численного решения основной системы уравнений для разлёта плазмы конечной толщины с одним сортом ионов и электронами произвольной температуры. Численное моделирование проводилось с помощью разработанного автором одномерного электростатического PIC-кода. Показано, что в разлетающемся плазменном слое распространяются волны зарядовой плотности, взаимодействие которых отличает данный случай от рассматриваемого другими авторами случая полуограниченной плазмы. Показано влияние этих волн на распределение электростатического поля внутри плазмы.

В главе 2 построена модель, описывающая спектрально-энергетические характеристики ионов, ускоряемых при разлёте плазменного слоя однокомпонентного ионного состава с электронами произвольной температуры. Получена аналитическая связь максимальной энергии ионов с основными параметрами лазерного импульса и мишени.

В 3-й и 4-й главе рассмотрено аналитическое описание кулоновского взрыва мишени с двумя сортами ионов: примесь и ионы остова мишени. Проведена оптимизация параметров мишени с целью генерации пучков ионов высокого качества: уменьшение спектральной ширины пучка и максимизация числа частиц, содержащихся в узком спектральном диапазоне. Рассмотрено однородное распределение примесных ионов по объему мишени (3-я глава) и их концентрация в виде тонкого слоя (4-я глава), расположенного на поверхности мишени или на определённой глубине внутри. Также проведено сравнение слоистого и однородного распределения примеси в мишени.

В заключении приводятся 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 наиболее ярких новых научных результатов работы можно выделить следующие:

- 1) Построена модель разлета плазменного слоя конечной толщины с одним сортом ионов и электронами произвольной температуры. Модель корректно описывает переходы к известным предельным случаям: кулоновского взрыва мишени и её квазинейтрального разлета.

- 2) Установлена аналитическая связь между максимальной энергией ионов из однокомпонентной мишени и параметрами лазера (энергия импульса, длительность, размер пятна фокусировки) и мишени (плотность, толщина, заряд ионов).
- 3) Получены оптимальные значения параметров мишеней двухкомпонентного ионного состава в режиме кулоновского взрыва, при которых происходит улучшение качества пучка ускоренных ионов.
- 4) Рекомендации по оптимальному структурированию однородных и слоистых мишеней с двумя сортами ионов в режиме кулоновского взрыва нашли своё подтверждение при полномасштабном кинетическом моделировании.

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. Также достоверность и новизна результатов подтверждается 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 экспериментов на современных лазерных установках мультитераваттной и петаваттной мощности.

По диссертационной работе можно высказать следующие замечания:

- 1) В диссертационной работе модель, описывающая разлет однокомпонентной плазмы в вакуум при произвольной температуре, называется аналитической. Однако, основные результаты, полученные в рамках этой модели, не выведены из первых принципов, а частично основываются на интерполяционных формулах, найденных с помощью численного моделирования. Такую модель скорее следует отнести к численно-аналитическим или полу-феноменологическим моделям.
- 2) В главе 2 диссертационной работы разработанная модель, предполагающая однородную в пространстве температуру, используется для описания ускорения ионов при взаимодействии лазерного импульса с тонкими пленками в режиме далеком от «кулоновского взрыва». В таком режиме распределение лазерной интенсивности внутри пленки будет, вообще говоря, неоднородным (в том числе в направлении распространения лазерного импульса), что приведет к неоднородному распределению температуры и степени ионизации материала пленки. Подробное обсуждение влияния эффектов неоднородности на

предсказания модели, а также условий применимости, накладываемых этими эффектами на модель, в диссертации отсутствует.

3) В разделе 2.3.2 модель, описывающая ускорение протонов в режиме далеком от «кулоновского взрыва», сравнивалась с результатами трехмерного численного моделирования. Если в рамках модели рассматривалась водородная мишень, то численное моделирование проводилось для двухкомпонентной мишени CH<sub>2</sub>. Однако, процесс ускорения протонов в лазерной мишени, содержащей протоны и более тяжелые ионы, отличен от водородной мишени, что, в частности, следует из обсуждения ускорения протонов в мишенях с разной долей примеси в режиме «кулоновского взрыва», представленного в главах 3 и 4. Обоснование возможности использования результатов для двухкомпонентной мишени для подтверждения модели, описывающей однокомпонентную мишень, не приводится.

4) В разделе 2.3.3 со ссылкой на Рисунок 2.8 утверждается о существовании оптимального соотношения между длительностью лазерного импульса и размером пятна фокусировки для достижения максимальной энергии ускоренных протонов, и соответственно, для наиболее эффективной конверсии лазерной энергии в энергию ускоренных частиц. Однако, из Рис. 2.8 следует, что для заданной длительности импульса максимальная энергия протонов достигается при минимальном размере фокусировки, и наоборот, для заданного размера фокусировки максимальная энергия протонов достигается при минимальной длительности импульса. Из Рисунка 2.8 не видно, значений размера фокусировки и длительности импульса, ниже которых энергия ускоренных протонов перестает увеличиваться, поэтому в этом случае неправомерно говорить об оптимальном соотношении.

5) Диссертационная работа также содержит неточности. В частности, в формуле (1.2) в последнем слагаемом пропущен заряд электрона.

Отмеченные недостатки, однако, носят 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:

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник  
ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

*Костюков*

/ Костюков Игорь Юрьевич /

дата:

*16.02.2016*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950, Россия, г. Нижний Новгород. ГСП-120, ул. Ульянова, 46

тел.: (831) 416-48-31, e-mail: kost@appl.sci-nnov.ru

Подпись Игоря Юрьевича Костюкова удостоверяю:

Ученый секретарь  
Института прикладной физики РАН  
кандидат физико-математических наук  
Игорь Валерьевич Корюкин



- 12) A. Pukhov, I. Kostyukov, I. Tückmantel, P. Luu-Thanh, G. Mourou. Coherent acceleration by laser pulse echelons in periodic plasma structures. European Physical Journal Special Topics 223, 1197 (2014).
- 13) J. Thomas, A. Pukhov, I. Kostyukov. Temporal and spatial expansion of a multi-dimensional model for electron acceleration in the bubble regime. Laser and Particle Beams 32, 277 (2014).
- 14) A. Shaykin, I. Kostyukov, A. Sergeev, E. Khazanov. Prospects of PEARL 10 and XCELS Laser Facilities. The Review of Laser Engineering 42, 141 (2014).
- 15) A.M. Pukhov, I.Yu. Kostyukov. Relativistically induced transparency and compressed fusion targets. Problems of Atomic Science and Technology 4 (86), 245 (2013).
- 16) V.F. Bashmakov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov. Short-time particle motion in strong standing electromagnetic wave. Problems of Atomic Science and Technology 4 (86), 241 (2013).
- 17) E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov. Particle beams from laser-irradiated solids at ultrahigh intensities. Problems of Atomic Science and Technology 4 (86), 248 (2013).
- 18) I. Yu. Kostyukov, E.N. Nerush, A.G. Litvak. Radiative damping in plasma-based accelerators. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 15, 111001 (2012).
- 19) E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, A.M. Fedotov, N.B. Narozhny, N.V. Elkina, H. Ruhl. Laser field absorption in self-generated electron-positron pair plasma. Physical Review Letters 106, 035001 (2011).
- 20) N.V. Elkina, A.M. Fedotov, I.Yu. Kostyukov, M.V. Legkov, N.B. Narozhny, E.N. Nerush, H. Ruhl. QED cascades induced by circularly polarized laser fields. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams 14, 054401 (2011).
- 21) E.N. Nerush, B.F. Bashmakov, I.Yu. Kostyukov. Analytical model for electromagnetic cascades in rotating electric field. Physics of Plasmas 18, 083107 (2011).
- 22) A. Pukhov, D. an der Brügge, I. Kostyukov. Relativistic Laser Plasmas for Electron Acceleration and Short Wavelength Radiation Generation. in book «Progress in Ultrafast Intense Laser Science VII» (2011) P. 191-223. ISBN: 978-3-642-18326-3 (Print) 978-3-642-18327-0 (Online). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- 23) A.A. Soloviev, K.F. Burdonov, V.N. Ginzburg, A.A. Gonoskov, E.V. Katin, A.V. Kim, A.V. Kiryanov, A.V. Korzhimanov, I. Yu. Kostyukov, V.V. Lozhkarev, G.A. Luchinin, A.N. Mal'shakov, M.A. Martyanov, E.N. Nerush, O.V. Palashov, A.K. Poteomkin, A.M. Sergeev, A.A. Shaykin, M.V. Starodubtsev, I.V. Yakovlev, V.V. Zelenogorsky, E.A. Khazanov. Fast electron generation using PW-class PEARL facility. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 653, 35 (2011).

## Список

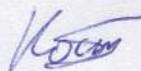
публикаций официального оппонента Костюкова Игоря Юрьевича, опубликованных за последние пять лет по теме диссертации Говраса Евгения Александровича «Теоретическое исследование лазерно-инициированного ускорения ионов изnano- и микроструктурированных мишеней», представленной на соискание ученой степени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

- 1) И.Ю Костюков, А.М. Пухов, Плазменные методы ускорения электронов: современное состояние и перспективы, Успехи физических наук 185, 89 (2015).
- 2) D.A. Serebryakov, E.N. Nerush, and I. Yu.Kostyukov, Incoherent synchrotron emission of laser-driven plasma edge, Phys. Plasmas 22, 123119 (2015).
- 3) Ph. Luu-Thanh, T Tückmantel, A Pukhov, I Kostyukov, Laser fields in dynamically ionized plasma structures for coherent acceleration, Eur. Phys. J. Special Topics 224, 2625 (2105).
- 4) E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov. Laser-driven hole boring and gamma-ray emission in high-density plasmas. Plasma Physics and Controlled Fusion 57, 035007 (2015).
- 5) E.G. Gelfer, A.A. Mironov, A.M. Fedotov, V.F. Bashmakov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, and N.B. Narozhny. Optimized multibeam configuration for observation of QED cascades. Phys. Rev. A 92, 022113 (2015).
- 6) A. Pukhov, O. Jansen, T. Tueckmantel, J. Thomas, I.Yu. Kostyukov. Field-reversed bubble in deep plasma channels for high-quality electron acceleration. Physical Review Letters 113, 245003 (2014).
- 7) L.L. Ji, A. Pukhov, I.Yu. Kostyukov, B.F. Shen, and K. Akli.Radiation-Reaction Trapping of Electrons in Extreme Laser Fields.Physical Review Letters 112, 145003 (2014).
- 8) L.L.Ji, A. Pukhov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, B.F. Shen, K.U. Akli. Energy partition,  $\gamma$ -ray emission, and radiation reaction in the near-quantum electrodynamical regime of laser-plasma interaction.Physics of Plasmas 21, 023109 (2014).
- 9) V.F. Bashmakov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, A.M. Fedotov, N.B. Narozhny. Effect of laser polarization on quantum electrodynamical cascading.Physics of Plasmas 21, 013105 (2014).
- 10) E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, L.L. Ji, A. Pukhov. Gamma-ray generation in ultrahigh-intensity laser-foil interactions.Physics of Plasmas 21, 013109 (2014).
- 11) L.L. Ji, A. Pukhov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, K.U. Akli, B.F. Shen. Near QED regime of laser interaction with overdense plasmas.European Physical Journal Special Topics 223, 1069 (2014).

- 24) A.A. Soloviev, M.V. Starodubtsev, K.F. Burdonov, I.Yu. Kostyukov, E.N. Nerush, A.A. Shaykin, and E. A. Khazanov. Two-screen single-shot electron spectrometer for laser wakefield accelerated electron beams. Review Scientific Instruments 82, 043304 (2011).
- 25) I.Yu. Kostyukov, S.V. Ryzhkov. Magneto-inertial fusion with laser compression of a magnetized spherical target. Plasma Physics Reports 37, 1092 (2011).
- 26) E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov. Kinetic modelling of quantum effects in laser-beam interaction. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 653, 7 (2011).

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник  
ИПФ РАН, г. Нижний Новгород



/ Костюков Игорь Юрьевич /

дата:

16.02.2016

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950, Россия, г. Нижний Новгород. ГСП-120, ул. Ульянова, 46  
тел.: (831) 416-48-31, e-mail: kost@appl.sci-nnov.ru

Подпись Игоря Юрьевича Костюкова удостоверяю:

Ученый секретарь  
Института прикладной физики РАН  
кандидат физико-математических наук  
Игорь Валерьевич Корюкин

