

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Гожев Денис Алексеевич

**Генерация высокоэнергетичных заряженных частиц в
микро-структурированных мишенях, облучаемых
фемтосекундными лазерными импульсами**

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), г.Москва.

Научный

руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Быченков Валерий Юрьевич

Официальные

оппоненты: **Костюков Игорь Юрьевич**,
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) (г. Нижний Новгород), заведующий отделом сверхбыстрых процессов (330)

Кузнецов Сергей Вячеславович,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН) (г. Москва), старший научный сотрудник Лаборатории №1.3. – теории лазерной плазмы

Ведущая

организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). (г. Новосибирск)

Защита состоится 13 октября 2025 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), расположенном по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФИАН: www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

24.1.262.01,

доктор физ.-мат. наук

Золотько Александр Степанович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В последние десятилетия благодаря появлению методов усиления чирпированных лазерных импульсов [1, 2] технологии создания мощных лазеров с высокой частотой повторения значительно продвинулись. В результате были созданы оптические системы способные генерировать лазерные импульсы фемтосекундной длительности и обладающие тера- и петаваттной пиковой мощностью. При их фокусировке интенсивность излучения может превышать 10^{22} Вт/см². Уже воздействие одного лишь фронта этих импульсов на вещество приводит к ионизации атомов и образованию лазерной плазмы.

Важной особенностью такой плазмы является неравновесное распределение электронов по скоростям и образование не тепловых, а так называемых быстрых электронов. Они ускоряются за счёт различных бесстолкновительных механизмов, таких как резонансное поглощение, вакуумный нагрев, аномальный скин-эффект, пондеромоторное ускорение, стохастический нагрев и другие. Энергия быстрых электронов может достигать нескольких ГэВ. Эти электроны могут использоваться для ускорения ионов, а также для генерации вторичного жёсткого рентгеновского и гамма-излучения. Подобные лазерно-плазменные источники представляют большой интерес для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач: в ядерной физике [3, 4], инерциальном управляемом термоядерном синтезе [5, 6], радиографии [7], ядерной медицине и ядерной фармакологии [8, 9], лабораторной астрофизике, а также для исследований поведения вещества в экстремальном состоянии [10, 11].

Эти проблемы стимулировали поиск новых механизмов ускорения заряженных частиц и альтернативных схем взаимодействия лазера с мишенью, отличных от традиционных твердотельных. Основная цель таких исследований — повышение эффективности поглощения лазерной энергии, увеличение температуры и общего количества быстрых заряженных частиц. Важную роль в этом контексте играют мишени с низкой плотностью, такие как аэрогели, газовые струи и пены [12, 13], а также микро- и наноразмерные мишени, включая кластеры [14, 15], нанотрубки [16] и микро- и наноструктуры, нанесённые на поверхность мишени, например, суб-микронные провода, стержни и конусы [17, 18]. Использование инновационных мишеней позволяет добиться практически полного поглощения лазерной энергии и эффективной конверсии энергии падающего излучения в энергию заряженных частиц [17, 19]. Коэффициент конверсии в горячие электроны может достигать нескольких десятков процентов [20], что чрезвычайно важно для многих практических применений. Большой заряд возникающих суперпондеромоторных электронов может использоваться

для генерации импульсов рентгеновского излучения и ускорения, например, дейтронов, инициирующих генерацию термоядерных нейтронов [17]. Кроме того, при применении, например, кластерных мишеней практически отсутствуют загрязнения в камере взаимодействия. Более того, поскольку после каждого лазерного воздействия параметры таких мишеней быстро восстанавливаются до начальных значений [21], они подходят для экспериментов с лазерными системами, работающими с высокой частотой следования импульсов [22]. Однако проведение целенаправленных экспериментов в данной области требует полного понимания того, какие размеры кластеров и микроструктур, а также средняя плотность среды обеспечивают наиболее эффективное взаимодействие с лазерным импульсом.

Другой причиной возросшего интереса к взаимодействию мощного лазерного излучения с нано- и микроструктурированными мишенями стало появление систем чистки контраста лазерного импульса, позволяющих избавиться от предимпульсов, негативно влияющих на взаимодействие со структурированными мишенями. Это открыло возможности для экспериментального исследования взаимодействия лазерного излучения релятивистской интенсивности со структурированными мишенями. Соответственно, возникает необходимость в развитии теоретических моделей и проведении численных расчётов, которые позволят глубже понять механизмы ускорения электронов и ионов при таких взаимодействиях.

Следующим шагом в совершенствовании лазерно-плазменных источников является оптимизация параметров структурированных мишеней, а также выявление механизмов ускорения частиц в таких мишенях для более эффективного преобразования лазерной энергии и создания источников с заданными характеристиками. Как правило, оптимизация взаимодействия с подобными структурами в экспериментальных условиях оказывается весьма трудоёмкой из-за сложности изготовления нано- и микроструктурированных мишеней. В связи с этим для определения оптимальных условий лазерно-плазменного взаимодействия необходимы теоретические и численные исследования.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является численное и теоретическое исследование лазерно-плазменного взаимодействия излучения релятивистской интенсивности с поверхностно и объёмно микроструктурированными мишенями. В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе ставились следующие задачи:

1. Исследовать взаимодействие сверхкороткого релятивистски-интенсивного лазерного излучения с крупными кластерами тяжелых атомов. Найти зависимость полного заряда горячих электронов от интенсивности лазерного излучения при заданной энергии лазера.

2. Разработать методику, позволяющую в численном моделировании “частица-в-ячейке” (PIC) изучать взаимодействие релятивистски-интенсивного лазерного импульса с большим объемом дейтерий-содержащих кластеров суб-микронного размера. Исследовать зависимость выхода термоядерных нейтронов от диаметра кластеров, средней плотности среды и интенсивности лазерного излучения. Найти оптимальные условия для его максимизации.

3. С помощью PIC моделирования исследовать воздействие лазерного излучения релятивистской интенсивности на мишень с низкоплотным микропроволочным покрытием. Выявить механизмы ускорения электронов в такой мишени, включая роль эффекта стохастического нагрева. Провести оптимизацию лазер-плазменного взаимодействия по параметрам микроструктурированного покрытия для максимально эффективного нагрева электронов.

Научная новизна.

Диссертация содержит описание законченного исследования, научная новизна которого заключается в следующем:

1. Найдены условия согласования параметров сверхкороткого лазерного импульса и кластерной среды из атомов тяжелых элементов, при которых для заданной энергии лазера выход горячих электронов оказывается максимальным. Впервые в соответствующем энергетическом распределении электронов обнаружено широкое плато с признаками квазимоноэнергетичности, обусловленное эффектом стохастического нагрева частиц.
2. Для численного изучения лазерно-кластерного взаимодействия в большом объеме плазмы предложена облегчающая расчеты методика, основанная на его разбиении по небольшим зонам. Представлен алгоритм, значительно снижающий стандартно требующиеся численные ресурсы и позволяющий получить полный спектр лазерно-ускоренных ионов, необходимый для решаемой задачи об оптимальном лазерно-кластерном источнике нейтронов.
3. Проведено комплексное исследование зависимости параметров заряженных частиц (электронов и ионов), а также нейтронов при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с кластерно/микрокапельной средой из тяжелой воды от интенсивности импульса, размеров кластеров и средней плотности среды.
4. Найдены оптимальные параметры мишени с микропроводным покрытием для получения наибольшей температуры горячих электронов при их взаимодействии с фемтосекундным лазерным импульсом. Выявлена определяющая роль стохастического нагрева при этом взаимодействии.

Практическая значимость.

Проведенные в рамках диссертационной работы расчетно-теоретические исследования, и полученные зависимости числа и энергии горячих электронов от интенсивности лазерного импульса при его взаимодействии с кластерной плазмой тяжелых атомов может служить основой для планирования и оценки результатов экспериментов по созданию источников рентгеновского излучения.

Численная многопараметрическая оптимизация взаимодействия лазерного излучения с кластерными/капельными мишенями из тяжелой воды позволяет не только найти самые благоприятные условия для генерации максимального числа нейтронов, но и подобрать наиболее оптимальные параметры лазерно-плазменного взаимодействия из доступных для проведения эксперимента. При этом разработанная методика моделирования, основанная на разбиении области лазерного взаимодействия на зоны, может быть использована для планирования и проведения экспериментов на будущих крупных высокоэнергетических лазерных системах, облучающих большие объемы вещества, например, на такой как XCELS – планируемой к созданию многопучковой установке мультитераваттного уровня мощности.

Полученные результаты по взаимодействию лазерного излучения с микропроводной мишенью могут выступать в качестве теоретической базы при выборе наиболее эффективной мишени для экспериментов по получению горячих электронов с максимальной энергией и рентгеновского источника на их основе.

Положения, выносимые на защиту.

1. Взаимодействие лазерного импульса умеренно-релятивистской интенсивности и ультракороткой длительности с суб-микронными кластерами тяжелых элементов позволяет получать максимальную энергию лазерно-нагретых электронов при наиболее острой, допускаемой лазерной установкой, фокусировке или максимальное число умеренно нагретых электронов при наибольшем размере фокального пятна.

2. Разработанная новая зональная схема для PIC-расчетов взаимодействия релятивистски-интенсивных лазерных импульсов с кластерной плазмой, основанная на разбиении объема взаимодействия на небольшие зоны и интерполяционном нахождении полного распределения ионов по результатам расчетов всего в нескольких зонах, решает задачу моделирования лазерно-инициированного нагрева ионов в больших, экспериментально востребованных объемах взаимодействия.

3. При воздействии фемтосекундных лазерных импульсов с умеренно-релятивистской интенсивностью на кластерную/микрокапельную плазму

из тяжелой воды максимальный выход нейтронов достигается, когда радиус кластеров близок к дебаевской длине нагретых электронов. Он слабо зависит от средней электронной плотности среды в диапазоне значений существенно меньших критических. Найденная параметризация позволяет выявить условия достижения наибольшего выхода нейтронов для заданных, экспериментально доступных лазерно-плазменных параметров.

4. При лазерно-плазменном взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса слабо-релятивистской интенсивности ($\sim 10^{18}$ Вт/см²) с микроструктурным покрытием мишени в виде микропроволок наиболее эффективный нагрев электронов, характеризующийся как увеличением их температуры, так и их числа, происходит, когда длина микроструктур составляет примерно половину длины лазерного импульса, а зазор между ними достаточен для проникновения лазерного излучения до поверхности подложки. Генерация супер-пондеромоторных частиц обусловлена стохастической неустойчивостью электронов, движущихся в сложном лазерно-плазменном поле в области между структурами.

Достоверность результатов работы.

Основная часть работы была выполнена при помощи полностью релятивистского трехмерного кода “частица в ячейке” (PIC-кода) “Mandor” [23], достоверность результатов которого была многократно проверена работами различных авторов, результаты которых находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами. Достоверность полученных в данной работе результатов численного моделирования подтверждается их близостью к представленным аналитическим оценкам. Кроме того, полученные результаты находятся в хорошем согласии с известными результатами экспериментальных исследований, сравнение с которыми представлено в тексте работы.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены автором лично на конференциях: International Conference on Ultrafast Optical Science (Москва, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), Международных конференциях «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Москва, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes With Matter (Москва, 2021), Международных Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2022, 2024). Семинарах отделения квантовой радиопизики им.Н.Г.Басова (ФИАН, Москва, 13 января 2023, 4 октября 2024), межрегиональных семинарах «Новые методы ускорения частиц и экстремальные состояния материи» (14 октября 2021, 19 мая 2022, 11 апреля 2024, 7 ноября 2024). А также рабочем совещании International

Публикации.

Материалы диссертации изложены в 8 научных статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus и в 8 материалах научных конференций. Список публикаций приводится в конце автореферата (стр.19-21).

Личный вклад автора.

Автором были проведены численные расчеты, лежащие в основе диссертационной работы, а также их обработка и последующий анализ. Постановка задач исследования, интерпретация результатов и написание статей проводилась совместно с научным руководителем и другими соавторами. Экспериментальная часть работы [A1] не входит в диссертацию. Также в работу не входит моделирование методом FIT (finite integration technique) и изготовление суб-микроструктурированных мишеней в работе [A2]. Автор выступал на научных конференциях, где представлял полученные результаты исследований.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации 143 страницы текста с 45 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 145 наименований.

Основное содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель и ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость работы, представляются выносимые на защиту научные положения. Также даются сведения о достоверности, практической значимости результатов и их апробации.

Первая глава посвящена литературному обзору. В разделе 1.1 кратко описаны методы ускорения электронов при релятивистских интенсивностях лазерного излучения ($I_L \lambda^2 \sim 1.4 \times 10^{18}$ Вт/см²×мкм², где I_L – пиковая интенсивность лазерного импульса, а λ – его длина волны). В этом случае электроны в лазерной плазме приобретают осцилляционную скорость, сравнимую со скоростью света в вакууме. В частности, рассматриваются такие механизмы, как пондеромоторное ускорение и $j \times B$ нагрев.

Для оценки средней энергии электронов при нагреве за счет данных механизмов обычно используется пондеромоторная оценка, T_{pond} , [24]:

$$T_{\text{pond}} \approx m_e c^2 \left(\sqrt{1 + a_0^2/2} - 1 \right) \quad (1)$$

где m_e – масса электрона, c – скорость света, $a_0 \approx 0.85 \times 10^{-9} \sqrt{I_L \lambda_\mu^2}$ – безразмерная амплитуда лазерного поля, λ_μ – длина волны лазерного излучения в микронах.

Также в этом разделе рассмотрен механизм ускорения электронов, известный как стохастическое ускорение. Этот механизм может возникать в результате движения электронов в суперпозиции различных полей. Например, электроны могут ускоряться в двух, трех или более поперечных электромагнитных волнах или в суперпозиции лазерного поля и квазистатических кулоновских полей.

В **разделе 1.2** кратко рассмотрены механизмы нагрева ионов до высоких энергий при лазерно-плазменном взаимодействии: кулоновский взрыв и ускорение в поле разделения зарядов. Кулоновский взрыв играет особенно важную роль при взаимодействии излучения с небольшими кластерными мишенями. В этом случае лазерное излучение практически мгновенно может оторвать почти все электроны от кластера. Возникающая отталкивающая сила нескомпенсированного положительного заряда приводит к разлету кластера в вакууме и ускорению ионов. Если же размер мишени становится слишком большим и лазерное излучение не способно вырвать значительную часть электронов, то нагрев ионов происходит за счет электрического поля разделения зарядов, возникающего при вырывании быстрых электронов лазерным импульсом.

В **разделе 1.3** продемонстрированы примеры различных теоретических и экспериментальных исследований, посвященных взаимодействию лазерного излучения со специально подготовленными структурированными мишенями, такими как кластерные мишени и микропроволочные мишени. В этих исследованиях показано, что использование структурированных мишеней может значительно повысить как энергию, так и выход заряженных частиц, а также увеличить генерацию вторичного рентгеновского и гамма-излучения.

Вторая глава посвящена изучению особенностей взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов с кластерами при наиболее доступных интенсивностях излучения $\gtrsim 10^{18}$ Вт/см². Рассматриваются кластеры из тяжелых атомов суб-микронного размера, которые не успевают разрушиться в течение действия лазерного импульса.

В **разделе 2.1** обсуждаются особенности моделирования кластерной среды с использованием метода PIC-моделирование. Обычно проведение трехмерного кинетического моделирования взаимодействия лазерного

излучения с кластерной плазмой в пространственных масштабах, представляющих практический интерес, оказывается либо невозможным, либо чрезвычайно ресурсоемким для современных академических вычислительных систем. Средняя электронная плотность кластерной среды значительно ниже критической плотности $n_c = m_e \omega^2 / (4\pi e^2)$, где e — заряд электрона, ω — частота лазера. В таких условиях лазерный импульс способен распространяться на расстояния в десятки и сотни микрон. Однако из-за твердотельной плотности кластеров требуется высокое пространственное разрешение. Это делает моделирование всего объема взаимодействия практически неосуществимым. Для решения данной задачи необходима физически обоснованная модель, которая одновременно была бы реалистичной с точки зрения вычислительных затрат. В данной главе моделирование проводилось в небольшой, относительно нагреваемого лазером фокального объёма, области кластерной среды, а затем полученные результаты масштабировались на весь объем. Тогда для этой области падающее лазерное поле можно описывать в рамках плоско-волнового приближения.

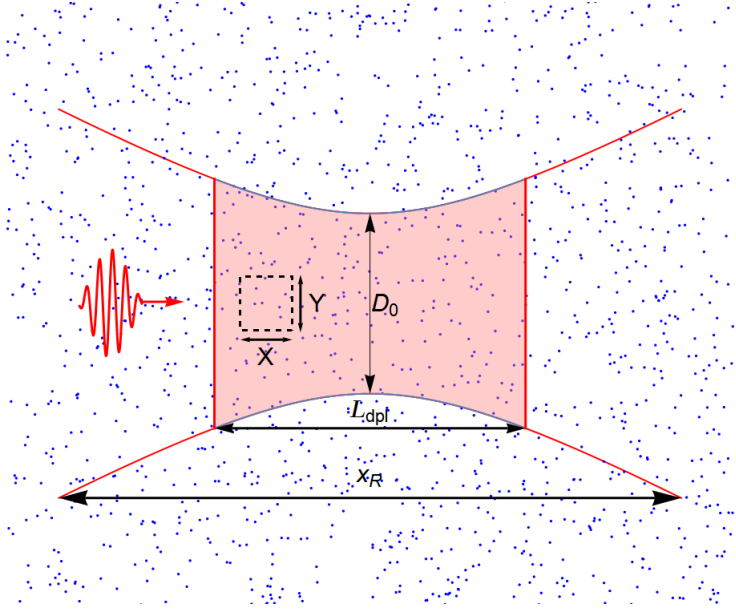


Рис. 1: Качественная иллюстрация постановки численного моделирования. Показано сечение, (XY) , фокальной области лазер-плазменного взаимодействия (выделена розовым цветом). Внутри фокального объема схематично изображена расчётная область (пунктирный прямоугольник $X \times Y$). Распространяющийся лазерный импульс показан красной стрелочкой. Здесь D_0 — диаметр лазерного пятна, L_{dpl} — длина истощения импульса, $x_R = \pi D_0^2 / \lambda$ — рэлеевская длина.

Теоретические оценки и результаты PIC моделирования рассматриваются в **разделах 2.2-2.3**. Схема взаимодействия лазерного излучения с кластерной мишенью в ходе численного моделирования представлена на Рис. 1. Линейно-поляризованный лазерный импульс распространялся в положительном направлении оси x и был поляризован по оси y . Интенсивность лазерного излучения варьировалась в диапазоне $I_L = (2 \div 34) \cdot 10^{18}$ Вт/см² ($a_0 = 1.2 \div 5$), а его длительность была равна $\tau_L = 10$ фс (FWHM). В рамках задачи рассматривались крупные кластеры суб-микронного размера с диаметром $d = 0.2\lambda$ ($\lambda = 1$ мкм) и с электронной плотностью $n_e = 200n_c$. В расчётах используются тяжелые многозарядные ионы, для определенности, золота, ($M_i \approx 197$ а.е.м.) с модельной плотностью $n_i = n_e/Z$, где $Z = 20$ - заряд иона (уровень ионизации).

Моделирование продемонстрировало, что после вырывания электронов из скин-слоя кластеров в их окрестности возникает сильное кулоновское поле, которое слабо экранировано.

Полученные спектры электронов при различных значениях a_0 , но заданной энергии лазерного импульса $W_L = 300$ мДж представлены на Рис. 2. При всех значениях a_0 в высокоэнергетичной части спектра формируется плато с признаками квазимоноэнергетичности, которое содержит значительное количество горячих частиц. Среднее значение энергии электронов в области плато, T_{hot} , резко возрастает при увеличении a_0 : $T_{\text{hot}} \sim m_e c^2 a_0^2 / 4$. Рост средней энергии горячих частиц с увеличением a_0 происхо-

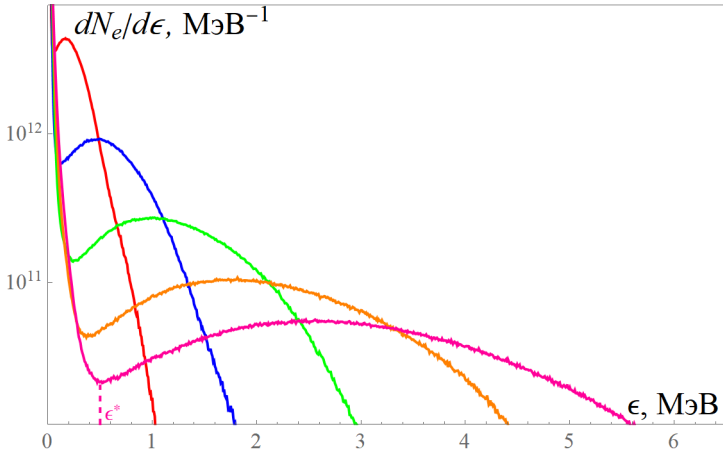


Рис. 2: Энергетические спектры ускоренных электронов в зависимости от амплитуды поля лазерного импульса (a_0) при заданной энергии лазера $W_L = 300$ мДж на момент времени $t = 60$ фс для $a_0 = 1.2$ (красный), 2 (синий), 3 (зелёный), 4 (оранжевый), 5 (фиолетовый). Для $a_0 = 5$ показана левая граница плато - ϵ^* .

дит значительно быстрее, чем предсказывает пондеромоторная оценка (1).

Это может быть объяснено сложным стохастическим блужданием электронов в кластерной среде с набором и перераспределением энергии под действием лазерного излучения и кулоновских полей кластеров.

Число горячих электронов в области плато в зависимости от a_0 продемонстрировано на Рис. 3. Характер представленной на графике зависимости хорошо аппроксимируется функцией $\propto 1/a_0$. Эту зависимость можно объяснить, если оценить число электронов, ΔN_e , находящихся внутри нелинейного скин-слоя кластеров, $l_{NS} = \lambda n_c a_0 / (\pi \sqrt{2} n_e)$, и которые могут быть нагреты лазерным импульсом:

$$\Delta N_e \approx \pi d^2 l_{NS} n_e N_{cl} \approx \frac{\sqrt{2}}{3a_0} \frac{W_L}{m_e c^2} \propto 1/a_0,$$

где N_{cl} - число кластеров в фокальном объеме.

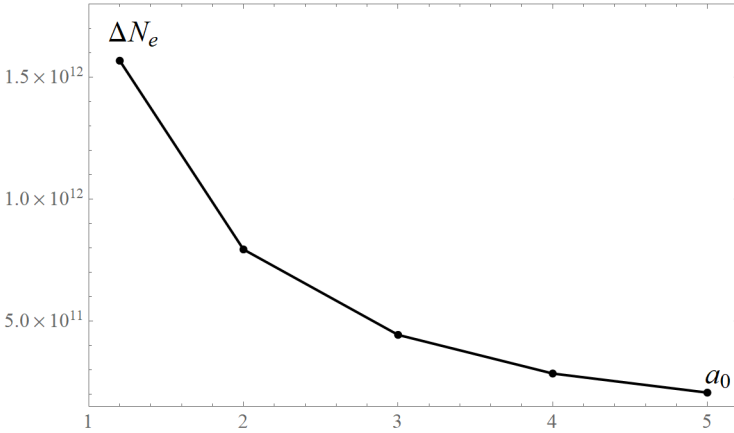


Рис. 3: Число горячих электронов в фокальном объёме с энергией свыше ϵ^* .

Для выявления механизма формирования плато и демонстрации стохастического ускорения/нагрева электронов в **разделе 2.4** численно была решена задача движения тестовых частиц в заданных электромагнитных полях, представляющих собой суперпозицию лазерной волны и кулоновского поля кластеров. Для демонстрации стохастического поведения высокоэнергетичных электронов использовался метод показателей Ляпунова [25].

В **разделе 2.5** подводятся итоги **второй главы** и формулируются основные выводы. Результаты представленные во **второй главе** были опубликованы в работах [A4, C4].

В **третьей главе** проведен численный эксперимент с кластерами/каплями тяжелой воды (D_2O), облучаемыми фемтосекундным лазерным импульсом. Целью исследования была оптимизация параметров

капельной мишени, таких как размер капель, d , и средняя электронная плотность среды, $n_{e,av}$, для достижения максимального количества ускоренных дейтронов с энергией, подходящей для термоядерного производства D-D нейтронов, при различных интенсивностях излучения.

В разделе 3.1 даются теоретические оценки оптимальных параметров кластерных мишеней для получения максимального выхода дейтронов и нейтронов.

Раздел 3.2 состоит из нескольких подразделов, в которых описывается PIC-моделирование. В подразделе 3.2.1 рассматривается усовершенствованный метод моделирования взаимодействия лазерного излучения с большим объемом кластерной среды. Весь объем взаимодействия разбивается на небольшие расчетные области – зоны, в каждой из которых задается своя начальная интенсивность. А после моделирования результаты, полученные в разных зонах, объединяются. Соответствующая схема области взаимодействия лазерного излучения с кластерной плазмой изображена на Рис. 4. Кроме того, исследование показало, что можно ограничиться моделированием всего в нескольких (“опорных”) зонах с разной интенсивностью, а в остальных зонах получать приблизительный спектр дейтронов с помощью предложенной процедуры линейной интерполяции результатов в “опорных” зонах. Такой подход позволяет существенно сократить количество необходимых расчетов.

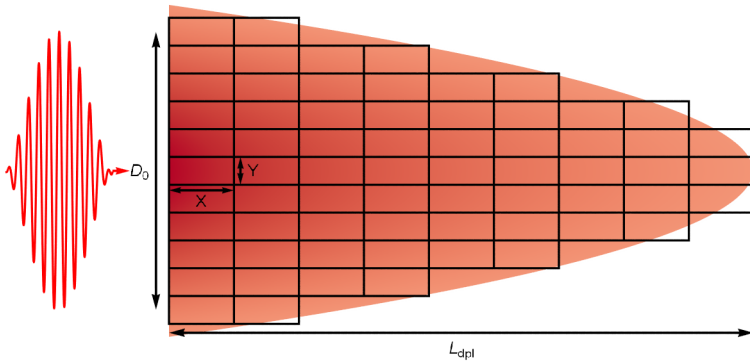


Рис. 4: Схема области взаимодействия лазерного излучения с кластерной плазмой. Показано разделение всего фокального объема, в которой интенсивность излучения уменьшается не более чем в e раз относительно начального значения, на прямоугольные ячейки (зоны).

В подразделах 3.2.2-3.2.4 обсуждаются характеристики нагретых заряженных частиц – электронов и дейтронов. Моделирование выявило зависимость механизмов ускорения ионов от соотношения между размером кластеров, d , и радиусом Дебая горячих электронов, $\lambda_D =$

$\sqrt{T_{\text{hot}}/(4\pi e^2 n_{\text{hot}})} \approx \lambda a_0/(4\pi\sqrt{2})$, где n_{hot} – плотность горячих электронов кластера. В случае маленьких кластеров, $d < 2\lambda_D$, большинство электронов покидают кластер и образуют разреженную межкластерную электронную плазму. В этом случае дейтроны ускоряются преимущественно за счет кулоновского взрыва кластеров. Несмотря на большое число горячих электронов и, соответственно, их суммарную энергию, такая мишень оказывается неэффективной для ускорения кластерных ионов до высоких энергий, так как энергия ионов определяется зарядом кластера, а он относительно мал. В случае больших кластеров горячие электроны формируют на них двойной слой и создают сильное электрическое поле разделения зарядов [26]. Это поле способно ускорить дейтроны до энергий, необходимых для эффективного производства нейтронов. Спектры дейтронов при $a_0 = 1.2$ представлены на Рис. 5. Число ускоренных дейтронов с энергией более 100 кэВ уменьшается с увеличением размера кластера. Однако для маленьких кластеров, $d < 2\lambda_D$, большая часть ионов имеет относительно низкую энергию 100-500 кэВ. Дейтронов с энергией более 500 кэВ больше при $d \approx 0.15\lambda \approx 2\lambda_D$. В этом случае, с одной стороны, число высокоэнергетичных дейтронов достаточно велико, а с другой стороны, их энергия достаточна для эффективной генерации нейтронов. Исследование показало, что $d \approx 2\lambda_D = d_{\text{opt}}$ соответствует наиболее оптимальным условиям генерации нейтронов при изученных амплитудах лазерного поля $a_0 = 1 - 5$.

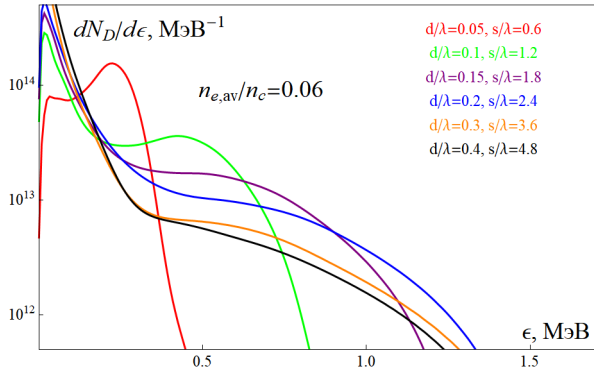


Рис. 5: Спектры дейтронов во всем объеме взаимодействия для $a_0 = 1.2$, $W_L = 10$ Дж, $n_{e,\text{av}}/n_c = 0.06$ и нескольких различных диаметров кластеров.

Следующий **раздел 3.3** посвящен оценке и оптимизации выхода нейтронов. Выход D-D нейтронов на один дейтрон Y_d был найден с помощью так называемого интеграла перекрытия [3] по формуле:

$$Y_d \equiv \frac{N_{\text{tot}}}{N_{D,\text{tot}}} \approx \frac{n_D}{N_{D,\text{tot}}} \int_0^{\epsilon_{\text{max}}} d\epsilon \frac{dN_D}{d\epsilon} \int_0^\epsilon d\epsilon' \sigma(\epsilon') \left| \frac{d\epsilon'}{dr} \right|^{-1}, \quad (2)$$

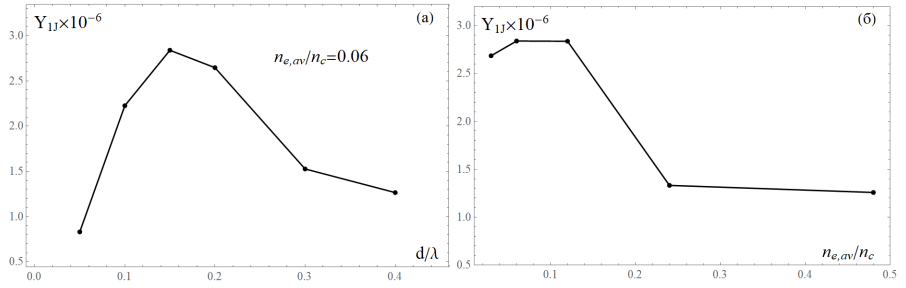


Рис. 6: (а) Выход D-D нейтронов на 1 Дж, энергии лазера Y_{1J} при $a_0 = 1.2$ в зависимости от d/λ при $n_{e,av}/n_c = 0.06$. (б) Зависимость максимального Y_{1J} при различных d от $n_{e,av}$ и той же интенсивности лазерного импульса.

где $N_{D,tot} = \int_0^{\epsilon_{max,1}} d\epsilon dN_D/d\epsilon$ и N_{tot} – общее число дейтронов и сгенерированных нейтронов во всем объеме взаимодействия, $dN_D/d\epsilon$ – распределение дейтронов, $n_D = n_{e,av}/4$ – средняя плотность дейтерия в кластерной среде, $\sigma(\epsilon)$ – сечение D-D реакции, а $d\epsilon/dr$ – ионизационные потери дейтронов.

Помимо оценок, основанных на интеграле перекрытия (2), для количественного определения выхода D-D нейтронов применялся Монте-Карло код GEANT4.

Выход нейтронов при заданной амплитуде поля $a_0 = 1.2$, но различных диаметрах кластеров и средней электронной плотности среды представлены на Рис. 6. На Рис. 6а показан выход нейтронов при фиксированной средней плотности среды $n_{e,av}/n_c = 0.06$ в зависимости от d . Максимальный выход нейтронов во всем объеме взаимодействия на 1 Дж энергии лазера достигается при $d_{opt}/\lambda \approx 0.15$ и составляет $Y_{1J} \approx 3 \times 10^6$. На Рис. 6б показаны максимальные значения выхода нейтронов, которые могут быть достигнуты при различных $n_{e,av}$. Выход нейтронов при оптимальном $d \sim d_{opt} \gtrsim 2\lambda_D$ слабо зависит от средней плотности $n_{e,av}$ до тех пор, пока $n_{e,av} \ll n_c$. Вероятно, это связано с тем, что в среде с высокой плотностью значительная часть лазерного излучения не проникает вглубь кластерной среды.

Результаты моделирования генерации D-D нейтронов для более высоких интенсивностей $a_0 > 1.2$ при заданной энергии лазера и оптимальном диаметре кластера $d \approx d_{opt}$ демонстрируют монотонный рост выхода нейтронов, как показано на Рис. 7. Выход нейтронов достигает $\sim 10^7$ нейтронов на 1 Дж энергии лазера для $a_0 = 5$.

В разделе 3.4 проводится сравнение 2D моделирования лазерно-кластерного взаимодействия методом зон с полноразмерным 2D моделированием. Полученные в этих моделированиях спектры дейтронов практически совпадают, а выходы нейтронов отличаются менее чем на 10%.

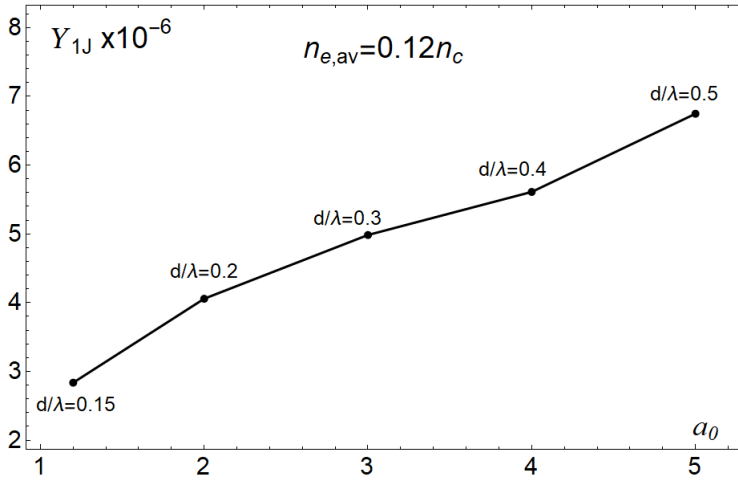


Рис. 7: Полный выход нейтронов на 1 Дж лазерной энергии в зависимости от a_0 , оцененный с помощью интеграла перекрытия (2).

Раздел 3.5 выступает в качестве заключения к **третьей главе**, где перечислены основные полученные выводы. Результаты, представленные в ней, были опубликованы в работах [A5-A8, B2, C5-C6].

Четвертая глава посвящена взаимодействию фемтосекундного лазерного излучения с другим типом структурированных мишеней – микропроволочными мишенями, которые часто называют микро- или нанотравой. Эти мишени рассматриваются перспективными для эффективного ускорения электронов и ионов, а также для генерации жесткого рентгеновского и гамма-излучения. Однако, как показывают теоретические и экспериментальные исследования, такие результаты возможны только при правильном подборе лазерно-плазменных параметров взаимодействия.

В **разделе 4.1** рассматривается падение лазерного излучения по нормали к поверхности, на которой расположены микроструктуры. В **подразделе 4.1.1** обсуждается 3D PIC моделирование взаимодействия фемтосекундного излучения с микропроволочной мишенью, в которой варьируются зазор между структурами, s , и их высота, h , при этом диаметр структур остается постоянным и значительно превышает глубину скин-слоя. На Рис. 8 продемонстрирована зависимость средней энергии горячих электронов от s и h . Исследование показало, что наиболее эффективный нагрев электронов происходит в том случае, если зазор между структурами достаточен для проникновения лазерного импульса до плоской поверхности мишени. Также излучение должно отразиться от подложки и практически полностью поглотиться внутри мишени на обратном пути в вакуум, а длина структур и длительность лазерного импульса должны удовлетворять условию $h \sim c\tau_L/2$. Это происходит благодаря стохастическому ускорению/нагреву в сложном поле, которое состоит из падающей волны,

отраженной волны и квазистатических полей вблизи границ плазма-вакуум. Чем длиннее микропроволоки, тем больше должен быть зазор между ними, чтобы лазерный импульс мог проникнуть на глубину $\sim h$.

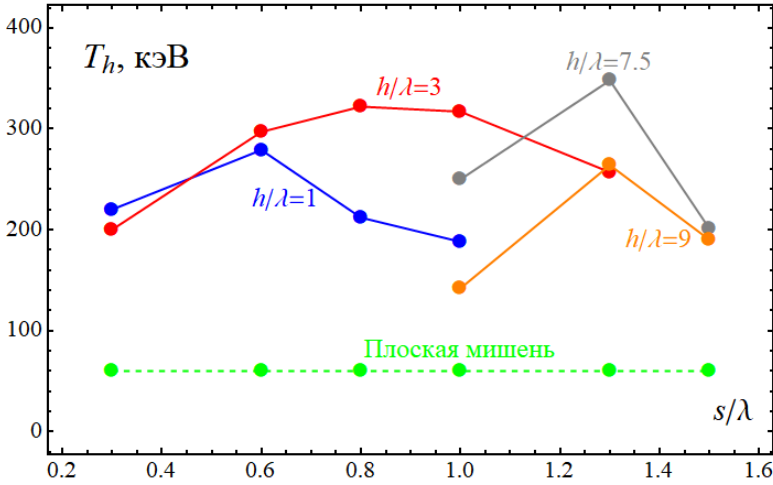


Рис. 8: Зависимость средней энергии горячих электронов от s при различных h и значение средней энергии горячих электронов, полученной на плоской мишени (зеленым).

В подразделе 4.1.2 с использованием метода тестовых частиц и метода показателей Ляпунова была подтверждена стохастическая динамика электронов в сложном лазерно-плазменном поле между структурами. Подраздел 4.1.3 посвящен PIC моделированию взаимодействия лазерного излучения с микрослоистой мишенью. Исследование показало, что основные выводы по оптимизации ускорения электронов, сделанные при моделировании взаимодействия с микропроволочной мишенью, справедливы и для данного типа мишеней при условии, что поляризация излучения перпендикулярна внутренней стенке слоя (р-поляризация). Однако средняя энергия электронов при использовании микрослоистых мишеней оказывается ниже, чем при использовании микропроволочной мишени.

В экспериментах по изучению взаимодействия лазерного излучения с плазмой часто используется наклонное падение излучения на мишень, поэтому в разделе 4.2 рассматривается наклонное падение лазерного импульса на микропроволочную структуру. Ввиду технической сложности проведения трёхмерного PIC-моделирования в расчётной области практически интересных размеров, в данном разделе исследование ограничивается 2D моделированием. Было показано, что при малом зазоре

между микропроводами после воздействия лазерного импульса электронная плотность вблизи концов структур становится закритичной, что препятствует проникновению излучения между структурами к подложке. В результате выход и энергия горячих электронов оказываются значительно ниже, чем в оптимальном случае. При этом оптимальный зазор между структурами при наклонном падении лазерного излучения больше, чем в случае нормального падения.

Раздел 4.3 служит заключением к **четвертой главе**, где перечислены основные результаты, полученные в рамках данной главы, а также проведено их сравнение с известными экспериментальными исследованиями. Результаты, представленные в четвертой главе, опубликованы в работах [A1-A3, B1, C1-C3].

В **заключении** изложены основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе. В конце диссертации дается список используемой литературы.

Основные результаты работы.

1. На основе численного 3D PIC моделирования взаимодействия фемтосекундных умеренно релятивистских лазерных импульсов с крупными суб-микронными кластерами из тяжелых атомов обнаружено ярко выраженное стохастическое блуждание электронов в кулоновских полях кластеров с большим набором энергии. Это приводит к образованию широкого высокоэнергетического плато в спектре электронов, т.е. – большой группы сильно-нагретых электронов со средней энергией порядка достигаемой внутри лазерного импульса

2. Показано, что при заданной энергии лазерного импульса число горячих электронов, формирующих спектральное плато, оказывается обратно пропорциональным амплитуде лазерной волны. Таким образом, наибольшее число умеренно-энергетичных частиц достигается при мягкой фокусировке, характеризуемой наибольшим фокальным пятном, тогда как максимально-энергетичные электроны, но в существенно меньшем количестве, получают при наиболее острой фокусировке

3. Предложенный новый зональный подход к PIC-моделированию позволяет количественно получать востребованное, и пока не достигнутое, описание лазерно-плазменного взаимодействия в большом объеме кластерной среды без привлечения сверхмассивных труднодоступных вычислительных ресурсов.

4. Установлено, что при взаимодействии ИК лазерных импульсов заданной энергии с крупными субмикронными кластерами тяжелой воды в диапазоне интенсивностей 10^{18} - 10^{19} Вт/см² максимальный выход нейтронов на уровне 10^7 нейтронов/Дж достигается в случае наиболее острой

фокусировки при выполнении найденного условия согласования диаметра кластера с амплитудой лазерного поля и его длиной волны. При этом выход нейтронов практически не зависит от средней плотности среды в наиболее экспериментально интересном диапазоне значений, существенно меньших критической плотности.

5. Продemonстрировано, что использование микропроводной мишени, облучаемой фемтосекундным слабoreлятивистским лазерным импульсом, дает значительное увеличение температуры лазерно-нагретых электронов по сравнению со случаем облучения плоской мишени. Наибольшая температура горячих электронов достигается, когда толщина микроструктурированного покрытия оказывается порядка половины длины лазерного импульса, а зазор между ними минимально достаточен для проникновения излучения порядка длины волны лазерного света.

6. Эффективное ускорение/нагрев электронов в микропроводных структурах обусловлены их стохастическим движением в сложном поле, состоящем из падающей и отражённой от подложки лазерных волн, квазистатического электрического поля разделения заряда и квазистатического азимутального магнитного поля, связанного с током частиц вдоль микроигл.

Список публикаций по теме диссертации.

А. Публикации в научных рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus:

- [A1] Nanostructured plasmas for enhanced gamma emission at relativistic laser interaction with solids / K. A. Ivanov, D. A. Gozhev, S. P. Rodichkina, S. V. Makarov, S. S. Makarov, M. A. Dubatkov, S. A. Pikuz, D. E. Presnov, A. A. Paskhalov, N. V. Eremin, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov, R. V. Volkov, V. Yu. Timoshenko, S. I. Kudryashov, A. B. Savel'ev // Applied Physics B. – 2017. – Т. 123. – С. 1-9.
- [A2] Laser-triggered stochastic volumetric heating of sub-microwire array target / D. A. Gozhev, S. G. Bochkarev, N. I. Busleev, A. V. Brantov, S. I. Kudryashov, A. B. Savel'ev, V. Yu. Bychenkov // High Energy Density Physics. – 2020. – Т. 37. – С. 100856.
- [A3] Neutron Production from Structured Targets Irradiated By an Ultrashort Laser Pulse / S. G. Bochkarev, A. B. Brantov, D. A. Gozhev, V. Y. Bychenkov // Journal of Russian Laser Research. – 2021. – Т. 42. – С. 292-303.
- [A4] Гожев Д. А., Бочкарев С. Г., Быченков В. Ю. Электронный нагрев кластерной плазмы ультракоротким лазерным импульсом // Письма

в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 114. – №. 4. – С. 233-241.

- [A5] Оптимизация лазерно-иницируемой генерации термоядерных нейтронов из микрокапельной плазмы / Д. А. Гожев, С. Г. Бочкарев, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков // Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2022. – Т. 49. – №. 2. – С. 20-29.
- [A6] Импульсный источник заряженных частиц и нейтронов на основе 10-петаваттной лазерной системы, облучающей микрокластерную среду. / Д. А. Гожев, С. Г. Бочкарев., М. Г. Лобок, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53. – №. 3. – С. 217-223.
- [A7] Optimized laser production of thermonuclear neutrons from plasma of submicron-sized clusters / D. A. Gozhev, S. G. Bochkarev, M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Y. Bychenkov // Physics of Plasmas. – 2024. – Т. 31. – №. 7. – С. 073103.
- [A8] Гожев Д. А. Зональный подход к многомерному моделированию лазер-кластерного взаимодействия в больших пространственных объемах // Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2024. – Т. 51. – №. 12. – С. 51-62.

В. Тезисы докладов в сборниках трудов конференций, индексируемых в базах Web of Science и Scopus:

- [B1] Stochastic electron heating in micro-structured targets irradiated with intense laser radiation and applications / S. G. Bochkarev, D. A. Gozhev, N. I. Busleev, A. V. Brantov, S. I. Kudryashov, A. B. Savel'ev, V. Yu. Bychenkov // International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2020, pp. 1-1.
- [B2] Optimized production of charged particles and thermonuclear neutrons from large nanoclusters irradiated with a relativistically intense ultrashort laser pulse / S. G. Bochkarev, D. A. Gozhev, M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Y. Bychenkov. // International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2022, pp. 1-1.

С. Тезисы докладов в сборниках трудов конференций, индексируемых в базе РИНЦ:

- [C1] Оптимизация генерации горячих электронов при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с нанотравой и нанослоями /

Д. А. Гожев, С. Г. Бочкарев, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2019. – 2019. – С. 273-274.

- [C2] Стохастическое ускорение электронов при взаимодействии мощного фемтосекундного лазерного импульса с микроструктурированными мишенями / Д. А. Гожев, С. Г. Бочкарев, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2020. – 2020. – С. 330-331.
- [C3] Моделирование объемного нагрева микроструктурированных мишеней под действием мощного лазерного излучения ультракороткой длительности / Д. А. Гожев, С. Г. Бочкарев, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков // ЛАЗЕРЫ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ, МЕДИЦИНЕ. – 2020. – С. 201-203.
- [C4] Лазерное ускорение электронов мощными импульсами рекордно короткой длительности из микро-кластерной плазмы / Д. А. Гожев, С. Г. Бочкарев, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2021. – 2021. – С. 361-363.
- [C5] Оптимизация лазерно-плазменных параметров микро-капельной мишени для достижения максимальной конверсии во взрывно-ускоренные ионы / Д. А. Гожев, С. Г. Бочкарев., М. Г. Лобок, А. В. Брантов, В. Ю. Быченков // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022. – 2022. – С. 405.
- [C6] A new approach to optimizing of laser triggered acceleration of deuteron ions and d-d neutron generation at large-volume of interaction with microdroplet target / D. A. Gozhev, S. G. Bochkarev, M. G. Lobok, A. V. Brantov, V. Y. Bychenkov // Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation. – 2023. – С. 55-55.

Список литературы

- [1] D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses // Optics Communications. 1985. Т. 56, № 3.
- [2] A. Dubietis, G. Jonušauskas, A. Piskarskas. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal // Optics Communications. 1992. Т. 88, № 4-6.
- [3] В.Ю. Быченков, В.Т. Тихончук, С.В. Толоконников. Лазерное инициирование ядерных реакций высокоэнергетичными ионами // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1999. Т. 115, № 6. С. 2080–2090.

- [4] K.W.D Ledingham, P. McKenna, R.P. Singhal. Applications for nuclear phenomena generated by ultra-intense lasers // *Science*. 2003. T. 300, № 5622. C. 1107–1111.
- [5] Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams / Roth M., Cowan T.E., Key M.H. [и др.] // *Physical review letters*. 2001. T. 86, № 3. C. 436.
- [6] Fast ignitor concept with light ions / Bychenkov V.Yu., Rozmus W., Maksimchuk A. [и др.] // *Plasma Physics Reports*. 2001. T. 27. C. 1017–1020.
- [7] Proton radiography as an electromagnetic field and density perturbation diagnostic / Mackinnon A.J., Patel P.K., Town R.P. [и др.] // *Review of Scientific Instruments*. 2004. T. 75, № 10. C. 3531–3536.
- [8] S.V. Bulanov, V.S. Khoroshkov. Feasibility of using laser ion accelerators in proton therapy // *Plasma Physics Reports*. 2002. T. 28. C. 453–456.
- [9] V.Yu. Bychenkov, Brantov A.V. Laser-based ion sources for medical applications // *The European Physical Journal Special Topics*. 2015. T. 224, № 13. C. 2621–2624.
- [10] Experimental evidence for short-pulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures / Soloviev A., Burdonov K., Chen S.N. [и др.] // *Scientific Reports*. 2017. T. 7, № 1. C. 12144.
- [11] Nanoscale Ultradense Z-Pinch Formation from Laser-Irradiated Nanowire Arrays / Kaymak V., Pukhov A., Shlyaptsev V.N. [и др.] // *Physical Review Letters*. 2016. T. 117, № 3.
- [12] Interaction of relativistically intense laser pulses with long-scale near critical plasmas for optimization of laser based sources of MeV electrons and gamma-rays / Rosmej O.N., Andreev N.E., Zaehter S. [и др.] // *New Journal of Physics*. 2019. T. 21, № 4. C. 043044.
- [13] Управление свойствами и диагностика фемтосекундной плотной плазмы с использованием модифицированных мишеней / Волков Р.В., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С. [и др.] // *Квантовая электроника*. 1997. T. 24, № 12. C. 1114–1126.
- [14] Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters / Ditmire T., Zweiback J., Yanovsky V.P. [и др.] // *Nature*. 1999. T. 398, № 6727. C. 489–492.
- [15] Fusion neutron yield from a laser-irradiated heavy-water spray / Ter-Avetisyan S., Schnürer M., Hilscher D. [и др.] // *Physics of Plasmas*. 2005. T. 12, № 1. C. 012702–012702.

- [16] Laser-triggered proton acceleration from hydrogenated low-density targets / Brantov A.V., Obraztsova E.A., Chuvilin A.L. [и др.] // Physical Review Accelerators and Beams. 2017. Т. 20, № 6. С. 061301.
- [17] Micro-scale fusion in dense relativistic nanowire array plasmas / Curtis A., Calvi C., Tinsley J. [и др.] // Nature communications. 2018. Т. 9, № 1. С. 1077.
- [18] Повышение эффективности термоядерной DD-реакции в фемтосекундной лазерной плазме с применением структурированных мишеней пониженной средней плотности / Иванов К.А., Шуляпов С.А., Цымбалов И.Н. [и др.] // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 2. С. 169–174.
- [19] Highly Efficient Heavy Ion Acceleration from Laser Interaction with Dusty Plasma / Zou D., Yu M., Jiang X. [и др.] // Advanced Photonics Research. 2021. Т. 2, № 7. С. 2000181.
- [20] Short pulse laser interaction with micro-structured targets: simulations of laser absorption and ion acceleration / Klimo O., Psikal J., Limpouch J. [и др.] // New journal of physics. 2011. Т. 13, № 5. С. 053028.
- [21] Generation of Quantum Beams in Large Clusters Irradiated by Super-Intense, High-Contrast Femtosecond Laser Pulses / Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Fukuda Y. [и др.] // Contributions to Plasma Physics. 2013. Т. 53, № 2. С. 148–160.
- [22] A proposed 100-kHz fs laser plasma hard X-Ray source at the ELI-ALPS facility / Papp D., Polanek R., Lecz Z. [и др.] // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Т. 44, № 10. С. 2382–2392.
- [23] Self-organization of a plasma due to 3D evolution of the Weibel instability / Romanov D.V., Bychenkov V.Yu., Rozmus W. [и др.] // Physical review letters. 2004. Т. 93, № 21. С. 215004.
- [24] Absorption of ultra-intense laser pulses / Wilks S.C., Kruer W.L., Tabak M. [и др.] // Physical Review Letters. 1992. Т. 69, № 9. С. 1383.
- [25] A.J. Lichtenberg, M.A. Lieberman. Regular and Chaotic Dynamics. 2nd ed. Springer New York, NY, 1992.
- [26] Ion acceleration in expanding multispecies plasmas / Bychenkov V.Yu., Novikov V.N., Batani D. [и др.] // Physics of Plasmas. 2004. Т. 11, № 6. С. 3242–3250.