

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук,

Кузнецова Сергея Вячеславовича

о диссертации Гожева Дениса Алексеевича

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

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.19 - Лазерная физика

Диссертационная работа Гожева Дениса Алексеевича посвящена исследованию взаимодействия релятивистски интенсивных лазерных импульсов с кластерными и микропроволочными мишенями, а также выявлению особенностей ускорения заряженных частиц в формирующихся сложных лазерно-плазменных полях.

Рассматриваемое направление исследований обладает высоким практическим потенциалом и сохраняет актуальность в контексте поиска новых, более эффективных механизмов ускорения заряженных частиц, а также повышения эффективности поглощения лазерной энергии. Использование нано- и микроструктурированных мишеней способствует существенному увеличению коэффициента конверсии лазерной энергии в энергию ускоренных электронов, достигающему нескольких десятков процентов. Ускоренные электроны могут служить источником рентгеновского излучения и использоваться для ускорения ионов, способных инициировать ядерные процессы. Многообразие параметров структурированных мишеней обуславливает необходимость выявления наиболее перспективных конфигураций, что и составляет одну из основных задач настоящего исследования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, включая 45 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 145 наименований.

Во **введении** сформулирована актуальность исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы, а также определены её цели и задачи. Приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена информация о личном вкладе автора, обоснована достоверность полученных результатов, а также даны сведения об апробации работы и публикациях, отражающих её основные результаты

Первая глава служит для ознакомления читателя с тематикой исследования. В ней рассматриваются основные механизмы ускорения

заряженных частиц в интересующем диапазоне релятивистских интенсивностей лазерного излучения, при этом особое внимание уделяется стохастическому ускорению электронов. Кроме того, в главе представлен обзор результатов предшествующих теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия фемтосекундного излучения с различными поверхностно- и объемно-структурированными мишенями.

Во **второй главе** рассматривается взаимодействие сверхкороткого мощного лазерного импульса с крупными кластерами тяжёлых атомов. Представлены результаты трёхмерного PIC-моделирования данного процесса при различных интенсивностях излучения, выполненного внутри небольшой области кластерной среды с последующим их обобщением на всю область, прогреваемую лазерным импульсом. Полученные данные по энергетическим характеристикам электронов и их выходу сопоставляются с ранее предложенными приближенными оценками. На основе моделирования тестовых частиц показано, что в рассматриваемых условиях электроны ускоряются стохастическим образом в комбинированных лазерных и кулоновских полях кластеров.

В **третьей главе** представлены результаты исследования взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса джоулевого уровня энергии с кластерной мишенью, состоящей из капель тяжёлой воды, при различных интенсивностях излучения, размерах капель и средней плотности среды. Разработан «зональный» метод PIC-моделирования, позволяющий получать приближённые спектры дейтронов во всём объёме взаимодействия при меньших вычислительных затратах. Выполненные теоретические оценки и трёхмерные PIC-расчёты показали существование оптимального диаметра кластеров, при котором реализуется режим ускорения дейтронов, наиболее эффективный для последующей генерации нейтронов в среде. На основе интеграла перекрытия, а также расчётов с использованием кода GEANT4, был определён выход нейтронов при различных лазерно-плазменных параметрах.

Четвёртая глава посвящена исследованию взаимодействия субрелятивистского лазерного излучения с микропроволочными мишенями. Установлено, что применение подобных мишеней обеспечивает существенно более эффективное ускорение электронов по сравнению с использованием традиционной плоской твердотельной фольги. Найдено условие согласования параметров лазерного излучения с параметрами структурированной мишени, при котором достигается максимальная средняя энергия электронов. Рост энергии в оптимальном случае обусловлен стохастическим ускорением в сложных полях: падающей и отражённой лазерной волны, а также

квазистатических кулоновских и магнитных полях, формирующихся вблизи микроструктур.

В **заключении** приведены выводы и основные результаты работы.

Защищаемые положения и выводы являются обоснованными. К научной **новизне** работы относятся: разработка методики, упрощающей моделирование больших объёмов лазерно-кластерного взаимодействия; выявление спектральных особенностей высокоэнергетичных электронов в кластерной плазме; установление зависимости выхода дейтронов и нейтронов при взаимодействии кластеров с лазерным импульсом от параметров кластерной среды и излучения; а также определение условий оптимизации средней энергии электронов при взаимодействии лазерного излучения с микропроволочными мишенями.

Результаты численной многопараметрической оптимизации взаимодействия лазерного излучения с кластерными мишенями из тяжёлой воды, представленные в диссертационной работе, могут быть использованы при планировании и проведении экспериментов на мощных лазерных установках джоулевого класса. Полученные данные по оптимизации параметров горячих электронов при взаимодействии лазерных импульсов с микропроволочными и кластерными мишенями представляют интерес для разработки ярких источников рентгеновского излучения. Всё это подтверждает **практическую значимость** выполненной работы.

Достоверность работы подтверждается сравнением результатов моделирования с полученными аналитическими оценками, а также их согласием с известными экспериментальными результатами.

Тем не менее, по диссертационной работе имеются замечания:

1. Во второй и третьей главах при использовании упрощенного метода моделирования не учитывается искажение огибающей лазерного импульса по мере распространения в среде, что может повлиять на нагрев электронов.
2. Во второй главе используется величина ϵ^* , обозначающая начало широкого плато в энергетическом спектре электронов. Однако её точное определение отсутствует, хотя этот параметр необходим для количественного описания группы стохастически нагреваемых частиц.
3. В работе неоднократно упоминается, что для того, чтобы в экспериментах структурированные мишени не разрушились до прихода основного импульса, требуется использовать лазерные системы с высоким контрастом, однако конкретных значений требуемого контраста не было приведено. Следует привести минимальные требования по контрасту, который необходим для

применения микроструктурированных мишеней, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами.

Сделанные замечания не снижают научной значимости результатов, представленных в диссертации, и общей положительной оценки работы.

Полученные результаты докладывались на многочисленных российских и международных конференциях, а также были опубликованы в 8 статьях научных журналов, входящих в перечень ВАК и международные базы данных Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа подтверждает научную квалификацию Гожева Д.А. Автореферат достоверно отражает структуру и содержание диссертационной работы. Диссертация Гожева Д.А. «Генерация высокоэнергетичных заряженных частиц в микро-структурированных мишенях, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами» полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации (№ 842 от 24 сентября 2013 года), а ее автор Гожев Денис Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории «Теория лазерной плазмы»
Объединенного института высоких температур РАН

Кузнецов Сергей Вячеславович
17 сентября 2025 г.

125412, Россия, г. Москва,
ул. Ижорская, д. 13, стр.2, ОИВТ РАН
Тел. +7(985)778-55-30, эл. почта: svk@ihed.ras.ru

Подпись кандидата физ.-мат. наук, снс Кузнецова С.В. заверяю

Ученый секретарь
Объединенного института высоких температур РАН,
доктор физ.-мат. наук

А.Д. Киверин

Список основных публикаций официального оппонента кандидата физико-математических наук Кузнецова С.В. по тематике диссертации Д.А. Гожева "Генерация высокоэнергетичных заряженных частиц в микро-структурированных мишенях, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами" за последние 5 лет

1. С. В. Кузнецов «Механизм группировки электронов в сгустке, генерируемом лазерным импульсом ультрарелятивистской интенсивности при пересечении границы неоднородной плазмы», Квантовая электроника, 2020, Т. 50, № 10, С. 929–933.
2. С. В. Кузнецов «Опрокидывание нелинейной кильватерной волны лазерного импульса, взаимодействующего с полуограниченной плазмой», Квантовая электроника, 2021, Т. 51, № 9, страницы 819–825.
3. Кузнецов С.В. «Оптимизация толщины переходного слоя для генерации сверхкоротких сгустков электронов лазерным импульсом, воздействующим на полуограниченную плазму», 2022, Письма в ЖТФ, Т. 48, вып. 16, стр. 21-24.
4. С.В. Кузнецов, И.Р. Умаров, Н.Е. Андреев «Лазерно-плазменный инжектор сгустка электронов, генерируемого ультрарелятивистским лазерным импульсом», Вестник Объединенного института высоких температур. 2022. Т. 7. № 1. С. 70-74.
5. С.В. Кузнецов, И.Р. Умаров, Н.Е. Андреев «Лазерно-плазменный инжектор ультракороткого сгустка электронов», Квантовая электроника, 2023, Т. 53, № 3, С. 194–199.
6. С.В. Кузнецов, Н.Е. Андреев «Распространение моноэнергетического цилиндрического пучка релятивистских электронов в вакууме», Вестник Объединенного института высоких температур, 2023, Т. 11. № 3. С. 40-42.
7. Кузнецов С.В. «Электронные токи ионно-звукового солитона», Вестник ОИВТ РАН, 2024, Т. 13, С. 4-8.
8. М.Е. Вейсман, В.С. Попов, С.В. Кузнецов, И.Р. Умаров, Н.Е. Андреев, «Сильноточные пучки релятивистских электронов при прямом лазерном ускорении в плазме околкритической плотности» Квантовая электроника, 2025, Т. 55, № 1, С. 60-68.