

На правах рукописи

Умаров Искандер Рашидович

**Моделирование и оптимизация лазерно-плазменных
источников релятивистских частиц и гамма-излучения**

Специальность 1.3.9 —
«Физика плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Андреев Николай Евгеньевич

Официальные оппоненты: —,
—,
—,
—,
—,
—,
—,
—

Ведущая организация: —

Защита состоится **DD mmmmmmmm 2025 г. в XX часов** на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)» по адресу: Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2, 125412.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке —.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2, 125412, ученому секретарю диссертационного совета Д 002.110.02.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm**2025 года.
Телефон для справок: **+7 (999) 888-77-66**.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.02,
канд. физ.-мат. наук

Тимофеев Алексей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Лазерно-плазменное ускорение заряженных частиц является перспективным направлением исследований. В последнее время большое количество исследовательских программ включают в себя лазерно-плазменное ускорение частиц, например международный проект EuPRAXIA [1]. Главным преимуществом лазерно-плазменных ускорителей над их классическими аналогами является величина ускоряющего электрического поля, которую можно достичь в плазменной структуре. Так, в классических ускорителях величина поля в значительной степени ограничена сверху из-за возможного пробития стенок волновода. В связи с этим поле в классических ускорителях не может превышать значений порядка 100–200 МВ/м [2], в то время как в плазме возможно достижения величины ускоряющего поля на несколько порядков выше. При нынешнем уровне развития области и технологий уже возможно получение электронных пучков с энергиями ГэВ и более. Например, в работе [3] было экспериментально продемонстрировано возможность ускорения электронов в поле кильватерной волны до энергий порядка 8 ГэВ на относительно небольших расстояниях порядка 10 см.

Можно выделить несколько направлений исследований, которым посвящена данная работа: лазерно-плазменная инжекция электронов, лазерно-плазменное кильватерное ускорение электронных сгустков и генерация ускоренными лазерно-плазменными методами электронами вторичного излучения и частиц.

Решение проблемы инжекции электронов в лазерно-плазменный ускоритель имеет ключевое значение для получения качественно ускоренных электронных сгустков. Это связано с тем, что начальная фаза инжекции во многом предопределяет конечные характеристики ускоренного пучка. Было разработано несколько механизмов инжекции фоновых электронов плазмы в ускоряющую фазу кильватерной волны. Из них можно выделить инжекцию на градиентах плотности плазмы [4], ионизационную инжекцию с использованием примесей в фоновой плазме [5–8], инжекцию при столкновении лазерных импульсов [9] и двухцветную инжекцию [10].

Одними из требований для ускорения электронного сгустка с сохранением высокого качества в кильватерном поле лазера являются его малые пространственными размерами и низкий начальный энергетический разброс. В частности, размер сгустка не должен быть больше нескольких микрон, а длительность — нескольких фемтосекунд. Более короткий сгусток проходит через более однородное ускоряющее поле (если пренебречь его собственным полем), что, в свою очередь, ведет к получению более моноэнергетического пучка [11–13]. Кроме того малая длительность сгустка способствует сдерживанию роста эмиттанса [14].

Теоретическое моделирование в одномерной геометрии [15–17] указывает на то, что при прохождении лазерного импульса через плазму нарастающей плотности могут формироваться исключительно короткие электронные сгустки, длительностью около 100 аттосекунд и менее. После захвата такие сгустки могут быть ускорены до энергий в сотни МэВ, сохраняя свою малую протяженность. Изменяя степень надпороговости процесса захвата, в частности за счет изменения амплитуды лазерного импульса, и форму профиля плотности можно управлять характеристиками захваченных сгустков (такими как длительность, заряд и энергетический разброс). Инжектор, работающий на данном принципе, может быть бесшовно сопряжен с последующими каскадами лазерно-плазменного ускорителя.

Эти пучки впоследствии могут быть инжектированы в секции лазерно-плазменного кильватерного ускорителя, чтобы достичь энергий в сотни ГэВ. Такие сгустки сверхрелятивистских электронов могут найти применение в исследованиях физики элементарных частиц, нацеленных, в частности, на проверку Стандартной модели и изучение свойств бозона Хиггса. Для подобных исследований столкновения лептонов предпочтительнее столкновений нуклонов из-за отсутствия у них внутренней структуры [18]. Например, эксперименты в CERN на Большом электрон-позитронном коллайдере (LEP) позволили детально изучить электрослабое взаимодействие [19]. Аналогично, в 1979 году на электрон-позитронном коллайдере PETRA в DESY было получено первое экспериментальное подтверждение существования глюонов [18]. При столкновении пучков с энергиями около 200 ГэВ становится возможной генерация самых тяжелых частиц Стандартной модели, а именно бозона Хиггса и t -кварка, измерение характеристик которых предоставило бы более детальное понимание Стандартной модели [20]. Разработка подобного лазерно-плазменного ускорителя позволит вплотную приблизиться к созданию лептонного коллайдера ТэВ-ного энергетического диапазона.

Взаимодействие электронных пучков, имеющих энергию порядка десятков ГэВ, с лазерным излучением мощностью в несколько ПВт способны порождать электрон-позитронные пары. Данный процесс, известный как процесс Брейта-Уилера, протекает в два этапа: на первом этапе электроны генерируют гамма-кванты, которые затем в сильном поле лазера распадаются на электрон-позитронные пары. Экспериментально данный эффект был подтвержден в SLAC, где при столкновении электронного пучка с энергией ~ 50 ГэВ и лазерного импульса с интенсивностью $1 \cdot 10^{18}$ Вт \cdot см $^{-2}$ было задетектировано рождение пар [21]. Электрон-позитронные пары, полученные этим методом, обладают широким спектром потенциальных применений. Среди них — создание в лабораторных условиях электрон-позитронных облаков [22] для изучения динамики магнитосферы пульсаров и их вклада в формирование гамма-всплесков [23; 24], а также для проверки фундаментальных симметрий и исследования гравитационных эффектов [25].

Однако, хоть и существует ряд проектов, нацеленных на создание подобных лазерно-плазменных ускорителей, до сих пор не удалось построить экспериментальную установку, способную обеспечить стабильное многостадийное ускорение электронов до высоких энергий с сохранением высокого качества ускоряемого сгустка. Так, хоть уже экспериментально удалось получить сгустки с энергией порядка 10 ГэВ и зарядом в несколько десятков пКл, но разброс по энергии высокоэнергетической части сгустка составлял в лучшем случае порядка 10 % и параметры этого сгустка менялись от выстрела к выстрелу. Это связано с рядом существенных вопросов, решение которых является принципиальным для достижения цели создания лазерно-плазменного ускорителя с высокой степенью повторяемости результата. Одно из ограничений плазменных ускорителей связано с собственным полем ускоряемого пучка, возникающем вследствие его движения в плазме [26]. Данный эффект обратного влияния ограничивает заряд, который можно ускорить, поскольку продольная компонента этого поля имеет обратный знак в сравнении с исходным ускоряющим полем кильватерной волны, что главным образом сказывается на темпе ускорения хвоста пучка. Это приводит к уменьшению энергии частиц в хвосте пучка в частности, к уменьшению энергии пучка в целом и следующему из этого увеличению разброса по энергии ускоренных частиц для больших зарядов пучка [27]. Поэтому рассмотрение этого эффекта является очень важной задачей, особенно если целью является получение ускоренных пучков с как можно меньшим разбросом по энергии. Для примера, в работах [28; 29] были рассмотрены процессы ускорения пучков электронов с зарядами порядка 1 пКл и были исследованы способы оптимизации различных стадий ускорения для уменьшения разброса по энергии и увеличения конечной энергии, в том числе процессов инжекции его в кильватерную волну и последующего вывода его из плазмы в конце зоны ускорения. Однако, величина заряда, рассматриваемая в этих работах является относительно маленькой, и возможно, что для на порядок больших величин зарядов будет необходимо использовать другие способы оптимизации процесса ускорения.

Кроме того, лазерные источники релятивистских электронов являются эффективным инструментом генерации γ -излучения в мегаэлектронвольтном диапазоне [30—33], а также нейтронов [34; 35]. Применение коллимированных высокоинтенсивных пучков релятивистских электронов позволяет достигать экстремально высоких интенсивностей подобных источников [36], что обуславливает их использование в радиографии [37; 38], ядерной физике [39], производстве радиоизотопов [40; 41] и иных областях. Ключевыми характеристиками ускоренных электронных пучков, определяющими эффективность создания указанных источников, являются энергетический спектр, угловая расходимость и полный заряд. Перспективный подход к увеличению заряда пучка до значений в нескольких десятках нанокулон и выше при сохранении энергии электронов на уровне десятков–сотен МэВ основан на взаимодействии релятивистского лазерного импульса с плазмой околочритической плотности [42—51]. Критическая плотность

электронов определяется как $n_{cr} = m\omega_0^2/(4\pi e^2)$, где m , e и ω_0 — масса и заряд электрона, а также частота лазерного излучения, соответственно.

Эффективным источником лазерно-плазменных электронов для этих целей являются установки, основанные на механизме прямого лазерного ускорения (Direct Laser Acceleration, DLA) [42]. Современные эксперименты по взаимодействию релятивистски интенсивных ультракоротких лазерных импульсов с протяжённой плазмой околоритической плотности демонстрируют высокую эффективность DLA-ускорения электронов [49; 50]. В отличие от кильватерного ускорения в плазменной волне [52], генерирующего квазимоноэнергетические электронные пучки с зарядом порядка десятков–сотен пикокулон и энергией до нескольких ГэВ, режим DLA-ускорения характеризуется отсутствием сверхвысоких энергий, больцмановским энергетическим распределением и мегаамперными токами. Эффективная температура ускоренных электронов может на порядок превышать пондеромоторный потенциал, а максимальная энергия достигать значений 100–200 МэВ при полном заряде пучка в сотни нанокулон для частиц с энергией выше 7 МэВ [49–51].

При характерных для режима DLA параметрах лазерного импульса и плазмы мощность лазерного импульса на два-три порядка превышает критическую мощность релятивистской самофокусировки $P_{cr} = 16,2n_{cr}/n_e$ ГВт, что приводит к развитию самофокусировки импульса уже на начальной стадии взаимодействия с плазмой. Это обуславливает рост интенсивности излучения и поперечному вытеснению электронов, что способствует формированию ионного канала с пониженной электронной плотностью. В результате возникает радиальное электростатическое поле, тогда как ток ускоренных электронов индуцирует азимутальное магнитное поле [42; 45–49]. Электроны захватываются в плазменном канале и испытывают бетатронные колебания в комбинированных квазистатических полях. При движении вдоль канала бетатронные колебания электронов могут входить в резонанс с доплеровски-смещённой лазерной частотой, обеспечивая эффективную передачу энергии от поля лазерного импульса ускоряемым электронам [42; 45–51].

DLA-ускоренные электронные ступки можно направить на металлическую мишень-конвертер для преобразования энергии ускоренных электронов в энергию жесткого рентгеновского и гамма излучений. Основным механизмом потери энергии высокоэнергетическими электронами в материале является их тормозное излучение. Результаты экспериментов показывают, что коэффициент конверсии энергии лазерного импульса в гамма-кванты с энергией свыше 10 МэВ может достигать значений порядка нескольких процентов [35].

Целью данной работы является определение, анализ параметров и оптимизация лазерно-плазменных источников заряженных частиц – а именно:

1. Определение параметров лазерно-плазменного инжектора ступков электронов на основе взаимодействия сверхинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с плазмой на восходящем профиле её

- докритической концентрации для получения квазимоноэнергетических релятивистских сгустков аттосекундной длительности.
2. Определение параметров лазерно-плазменного кильватерного ускорения электронов до ультрарелятивистских значений энергии (десятки-сотни ГэВ) при взаимодействии интенсивных лазерных импульсов с плазмой малой концентрации ($\sim 1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) с сохранением низких значений величин относительного разброса по энергии (порядка 1 %) и эмиттанса (порядка $1 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$).
 3. Оптимизация процесса конверсии энергии ультрарелятивистских электронов в рентгеновское и гамма-излучение на основе генерации тормозного излучения при прохождении ускоренных электронов металлических мишеней-конвертеров для увеличения количества генерируемых гамма-квантов и уменьшения размера источника излучения для целей диагностики материалов и вещества в экстремальных состояниях.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. С помощью полномасштабного самосогласованного численного моделирования методом частиц в ячейках (Particle-in-Cell, PiC) в трехмерной геометрии исследовать процесс генерации и опрокидывания кильватерной плазменной волны при прохождении сверхинтенсивного лазерного импульса через восходящий профиль плазмы докритической концентрации и последующего захвата электронов в ускоряющую фазу кильватерной волны.
2. На основе теории и полномасштабного численного моделирования в трехмерной геометрии квазистатическим PiC-методом провести анализ влияния собственного тока ускоряемого сгустка на процесс ускорения и конечный разброс по энергии ускоряемого сгустка (эффект самовоздействия, beam-loading) при лазерно-плазменном кильватерном ускорении.
3. С помощью численного моделирования найти параметры многостадийного лазерно-плазменного кильватерного ускорителя, при которых будет достигаться ускорения электронного сгустка до энергий порядка десятков-сотни ГэВ при сохранении разброса на уровне 1–2 % и нормализованного поперечного эмиттанса на уровне $1-2 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$.
4. На основе численного моделирования методами Монте-Карло процесса генерации тормозного излучения и вторичных частиц ускоренными электронами при прохождении вещества провести оптимизацию материала и толщины мишени лазерно-плазменного источника гамма-квантов с целью максимизации суммарного излучения и уменьшения размеров источника.

Научная новизна:

1. С помощью трехмерного самосогласованного численного моделирования впервые были получены характеристики генерируемых аттосекундных сгустков квазимоноэнергетических релятивистских электро-

- нов лазерно-плазменными методами на основе механизма опрокидывания кильватерной волны на восходящем склоне концентрации плазмы.
2. С учетом влияния эффекта самовоздействия (влияния собственного заряда сгустка на ускоряющие электромагнитные поля кильватерной волны плазмы) найдена зависимость однородности ускоряющего поля от параметров плазмы, лазерного импульса и сгустка электронов. Достоверность подтверждена 3-х мерным квазистатистических PiC моделированием.
 3. С помощью полномасштабного самосогласованного трехмерного численного моделирования найдены параметры многостадийного лазерно-плазменного кильватерного ускорения электронных сгустков до ультра-релятивистских энергий с сохранением низких эмиттанса и относительного разброса по энергии с учетом эффекта самовоздействия.
 4. С помощью численного моделирования методами Монте-Карло проведена оптимизация параметров мишени лазерного источника тормозного гамма-излучения с целью увеличения общего потока гамма-квантов и уменьшения размеров данного источника.

Практическая значимость

1. Полученные лазерно-плазменным методом аттосекундные сгустки квазиодноэнергетичных релятивистских электронов на основе механизма опрокидывания кильватерной волны на восходящем склоне концентрации плазмы могут являться эффективными источниками излучения для целей диагностики сверхбыстрых процессов.
2. Учет результатов анализа влияния эффекта самовоздействия (воздействие ускоряемым электронным сгустком на ускоряющие поля в плазме) позволяет получать сверхрелятивистские пучки с энергиями порядка десятки ГэВ с низкими значениями разброса по энергии и нормализованного эмиттанса.
3. Получение на многокаскадных лазерно-плазменных ускорителях пучков сверхрелятивистских электронов высокого качества представляет интерес для фундаментальных исследований физики высоких энергий.
4. Результаты оптимизации лазерно-плазменного источника гамма-квантов и вторичных частиц, основанного на взаимодействии релятивистских электронов, полученных в процессе прямого лазерного ускорения (DLA) с мишенью-конвертером могут быть использованы с целью повышения эффективности источников жесткого излучения и уменьшения их размеров для целей диагностики материалов и вещества в экстремальном состоянии.

Методология и методы исследования. Анализ, основанный на теоретических моделях. Моделирование процессов различными методами: PiC-методом и методами Монте-Карло.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. С помощью самосогласованного трехмерного численного моделирования определены параметры сверхрелятивистских субфемтосекундных электронных сгустков, получаемых на основе механизма опрокидывания кильватерной волны при взаимодействии сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного импульса с неоднородной плазмой докритической концентрации.
2. Посредством полномасштабного самосогласованного численного моделирования найдены параметры многокаскадного лазерно-плазменного кильватерного ускорителя сгустков электронов с зарядом 70 пКл до энергий порядка десятков ГэВ в нескольких стадиях ускорения с учетом эффекта самовоздействия, при которых сохраняются низкие значения разброса по энергии и эмиттанса (на уровне 1 % и 1 мм · мрад).
3. С помощью моделирования методами Монте-Карло проведена оптимизация материала и толщины конвертера источника гамма-квантов и вторичных частиц, основанного на взаимодействии релятивистских электронов, полученных в процессе прямого лазерного ускорения, с мишенью-конвертером для максимизации выхода вторичных частиц или гамма квантов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием надёжных физических моделей и применением теоретических методов, имеющих строгое математическое обоснование. При моделировании использовались проверенные численные методы и их реализации, находящиеся в открытом и свободном доступе и используемые многими специалистами данной области исследования. Результаты аналитических оценок сопоставлялись с данными, полученными при моделировании данными методами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 14 международных и российских конференциях:

1. *Umarov I.R., Andreev N.E.,* Beam loading effect in laser wakefield acceleration of a finite charge electron beam — XXXVII International Conference on Equations of State for Matter, March 1–6 2022, Elbrus Kabardino-Balkaria, Russia
2. *Умаров И.Р., Андреев Н.Е.,* Жуковский, Россия, – Влияние собственного заряда электронного сгустка на процессы лазерно-плазменного ускорения в кильватерных полях — 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 29 ноября–3 декабря, 2021, Долгопрудный
3. *Pugachev L., Umarov I., Popov V., Andreev, N., Stegailov V., Timofeev A.,* PiConGPU on Desmos Supercomputer: GPU Acceleration, Scalability and Storage Bottleneck — Russian Supercomputing Days, September 26–27, 2022, Moscow, Russia.

4. Umarov I., Andreev N., Charge optimization of electron beam in laser wakefield acceleration taking into account beam loading effect, VI International Conference on Ultrafast Optical Science, October 03–07, 2022, Moscow, Russia
5. Umarov I.R., Andreev N.E., Investigation of beam-loading effect in laser wakefield acceleration — XXXVIII Fortov International Conference on Interactions of Intense Energy Fluxes with Matter (ELBRUS 2023), March 1–6, 2023, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia.
6. Andreev N.E., Umarov I.R., Popov V.S., Intense laser sources of gamma radiation and neutrons based on high-current beams of super-ponderomotive electrons — XXXVIII Fortov International Conference on Interactions of Intense Energy Fluxes with Matter (ELBRUS 2023), March 1–6, 2023, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia.
7. Umarov I.R., Andreev N.E., Charge optimization of electron beam in laser wakefield acceleration taking into account beam loading effect — L International Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, 20–24 March, 2023, Zvenigorod, Moscow reg.
8. Умаров И.Р., Андреев Н.Е. Исследование влияния эффекта самовоздействия на процесс лазерно-плазменного ускорения сгустка заряженных частиц — 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 3–8 апреля, 2023, Долгопрудный, Московская обл., Россия.
9. Umarov I. R., Andreev N. E., Laser source of gamma radiation and neutron beams based on DLA-accelerated electron bunches — VII International Conference on Ultrafast Optical Science, 02–04 October, 2023, Moscow, Russia.
10. Умаров И.Р., Оптимизация лазерных источников гамма-излучения на основе сгустков электронов, ускоренных методом прямого лазерного ускорения. II школа для молодых ученых «Источники синхротронного излучения и нейтронов на принципах лазерного ускорения заряженных частиц», 30–31 октября 2023 г., Нижний Новгород, Россия.
11. Умаров И.Р., Исследование влияния эффекта самовоздействия при лазерно-плазменном кильватерном ускорении электронного сгустка — XXI научная школа «Нелинейные Волны — 2024», 3–10 ноября 2024 г., Нижний Новгород, Россия
12. Umarov I.R., Andreev N.E., Investigation of beam-loading effect in laser-wakefield acceleration of electron bunch and its influence on electron bunch energy spread — 21th International Workshop “Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation”, April 7–11 2025, Moscow, Russia
13. Umarov I.R., Investigation of energy spread in laser-wakefield acceleration of electron bunch in non-linear regime — XL Fortov International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, March 1–6, 2025, Elbrus, Kabardino-Balkaria

14. Умаров И.Р., Андреев Н.Е., Исследование влияния эффекта самовоздействия при лазерно-плазменном ускорении сгустка электронов на разброс по энергии ускоряемого сгустка — 67-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия, 31 марта–5 апреля 2025

Личный вклад. Основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. В частности, все моделирования и их анализ в приведённых работах были выполнены автором данной диссертации.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 6 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 1 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена лазерно-плазменному инжектору релятивистских электронов, основанному на механизме опрокидывания (самоинжекции) кильватерной волны. Эта волна возбуждается при взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса с плазмой, концентрация электронов в которой ниже критической, на участке с восходящим градиентом электронной концентрации.

Существует два основных подхода к инжекции электронного сгустка в ускоряющую фазу кильватерной волны. Первый подход — внешняя инжекция. В этом случае заранее сформированный и ускоренный до определенной энергии электронный сгусток вводится в плазму извне с синхронизацией с лазерным импульсом, возбуждающим кильватерную волну. Подобные пучки могут быть получены на традиционных ускорителях и инжектированы в лазерно-плазменный ускоритель для последующего ускорения до высоких энергий. Второй подход заключается в захвате фоновых электронов плазмы кильватерной волной в ее ускоряющую фазу. В результате этого захвата формируется электронный сгусток, который затем ускоряется в данной лазерно-плазменной структуре.

В разделе 1.1 изложены теоретические оценки критерия опрокидывания волны и начала захвата фоновых электронов плазмы в ускоряющую фазу кильватерной волны. Существует несколько критериев для этого режима захвата. Первый критерий требует выполнения условия квазиодномерности процесса [16]. Для его обеспечения необходимо подобрать параметры лазерного импульса таким образом, чтобы позади него не формировалась каверна, а движение фоновых электронов плазмы в поле сильно нелинейной плазменной волны оставалось квазиодномерным.

Второй критерий заключается в требовании к величине осцилляторной энергии \mathcal{E}_{os} продольных колебаний электронов плазмы в кильватерной волне. Эта энергия должна превышать пороговое значение, необходимое для опрокидывания кильватерной волны [15; 16; 53]: $\mathcal{E}_{os,th} = mc^2 \gamma_{ph}$, где $\gamma_{ph} = 1/\sqrt{1 - V_{ph}^2/c^2}$ — “лоренц-фактор” кильватерной волны, определяемый её фазовой скоростью V_{ph} . Поскольку осцилляторная энергия электронов зависит от интенсивности лазерного импульса, возбуждающего волну, варьирование его параметров позволяет управлять характеристиками генерируемого электронного сгустка, такими как размеры и величина заряда.

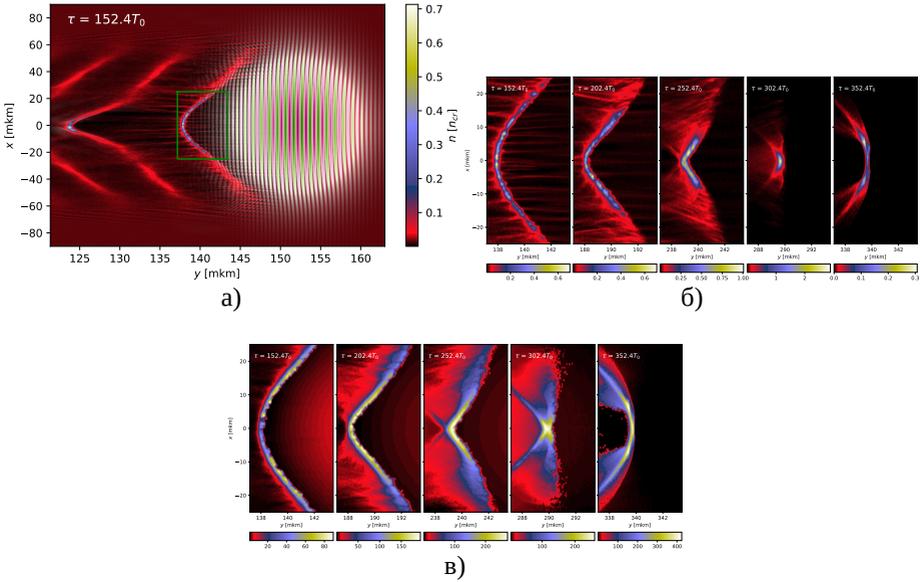


Рисунок 1 — Пространственное распределение в плоскости (x, y) плотности электронов плазмы, нормированной на критическую плотность (а,б), и средней энергии электронов, нормированной на энергию покоя электронов (в), в различные моменты времени.

Раздел 1.2 содержит оценки, основанные на одномерной теории, необходимых параметров лазерного импульса и плазмы для реализации данного механизма, а также параметров генерируемого электронного сгустка [A1]. Подбор параметров выполнен с учётом потенциальной возможности проведения эксперимента на планируемом к постройке исследовательском комплексе XCELS [54]. Ожидаемая энергия на один лазерный канал в этом комплексе составит $E_L = 100\text{--}300$ Дж при фемтосекундной длительности импульса. Согласно теоретическим оценкам в рамках квазиодномерной модели, для выбранных пара-

метров должны быть достигнуты: радиус сгустка $r_b \approx 5$ мкм, полный заряд $Q_b \approx 50$ пКл и относительный разброс по энергии $\Delta E/E \approx 5\%$. Эти параметры являются подходящими для последующего лазерно-плазменного ускорения сформированного сгустка на последующих этапах [A1].

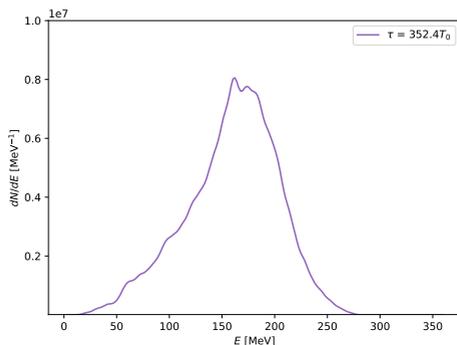


Рисунок 2 — Спектр электронного сгустка при пространственном ограничении расстояния электронов до оси лазерного импульса 3 мкм, соответствующий моменту времени $352T_0$.

В разделе 1.3 представлены результаты трёхмерного моделирования методом частиц в ячейке (PiC) с использованием кода PIConGPU [55; A2] (рис. 1) и проведено сравнение с теоретическими оценками.

Толщина слоя захваченных и ускоряемых электронов существенно меньше поперечных размеров сформированного сгустка, что согласуется с представлением о квазиодномерности процесса генерации при выбранных параметрах лазерного импульса. После опрокидывания волны и захвата сгустка электроны подвергаются ускорению в кильватерном поле при прохождении через область постоянной концентрации плазмы. При этом формируется платообразный энергетический спектр, аналогичный наблюдаемому в одномерных исследованиях, хотя на его образование существенно влияют трёхмерные эффекты. Под действием сильной фокусирующей силы сгусток сжимается до поперечного размера ~ 1 мкм [A1; A3].

Продольная длительность сгустка при этом стабилизируется на уровне менее 1 фс. В результате для выбранных параметров формируется пространственно компактный субфемтосекундный электронный сгусток. Однако нормализованный эмиттанс всего сгустка в расчёте составляет ~ 100 мм · мрад. Выявлена группа электронов с энергиями, близкими к максимальной в спектре (рис. 2), локализованных вблизи оси распространения. Для этой группы нормализованный эмиттанс составляет ~ 8 мм · мрад при заряде ~ 100 пКл, что хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями.

Таким образом, продемонстрирована возможность генерации квазиодноэнергетических субфемтосекундных электронных сгустков с энергией в сотни МэВ и зарядом в сотни пикокулон.

Вторая глава посвящена исследованию процесса лазерно-плазменного кильватерного ускорения. Раздел 2.1 рассматривает проблему влияния собственного заряда ускоряемого сгустка на ускоряющие поля (эффект самовоздействия, beam-loading effect). Этот эффект способен существенно изменять ускоряющие поля и оказывать значительное влияние на конечные параметры сгустка, в частности, на его энергетический разброс [27]. Приведены основные уравнения, описывающие влияние самовоздействия на ускоряющие поля [56]. С использованием трёхмерного самосогласованного квазистатического моделирования методом частиц в ячейке (PiC) исследован захват низкоэнергетического электронного сгустка кильватерной волной с учётом эффекта самовоздействия [A4]. Установлено, что самовоздействие может существенно влиять на продольный размер сгустка после захвата (рис. 3). Так, показано, что при больших значениях заряда конечная длина сгустка может превышать начальную, если инжекция производилась в максимум потенциала с низкой начальной энергией.

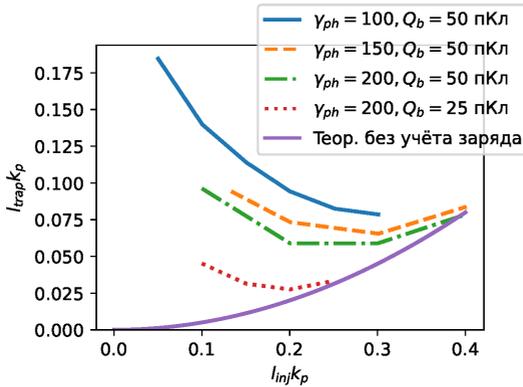


Рисунок 3 — Зависимость длины сгустка электронов после захвата ($\sigma_{1,trap}$) от его длины в момент инжекции в кильватерную волну ($\sigma_{1,inj}$). $E_{inj} = 1,2 mc^2$.

В разделе 2.2 проведён теоретический анализ влияния эффекта самовоздействия на однородность ускоряющего поля. Получено аналитическое выражение для неоднородности ускоряющего поля на длине сгустка в зависимости от параметров ускоряемого сгустка, лазерного импульса и концентрации плазмы. Выполнена оптимизация величины этой неоднородности по заряду сгустка, в результате чего определена зависимость параметров сгустка, минимизирующая вариацию ускоряющего поля на его длине. Таким образом, при оптимальном выборе параметров можно ожидать минимизации относительного энергетического разброса ускоряемого сгустка. Проиллюстрирована зависимость оп-

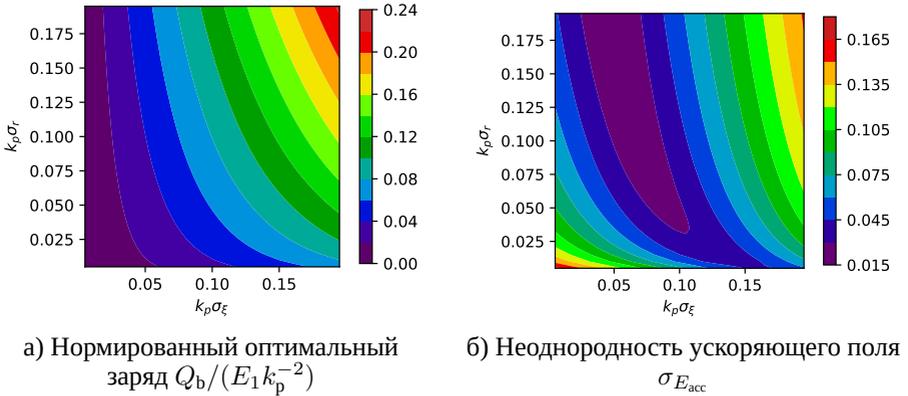


Рисунок 4 — Зависимость различных величин от размеров ускоряемого электронного сгустка

тимального заряда от размеров гауссова сгустка при фиксированных остальных параметрах (рис. 4а). Показано, что даже незначительное отклонение от оптимума может приводить к многократному увеличению неоднородности поля (рис. 4б). Проведено сравнение с результатами трёхмерного квазистатистического PiC-моделирования. Теоретические предсказания находятся в хорошем согласии с результатами серии расчётов для слабонелинейного режима.

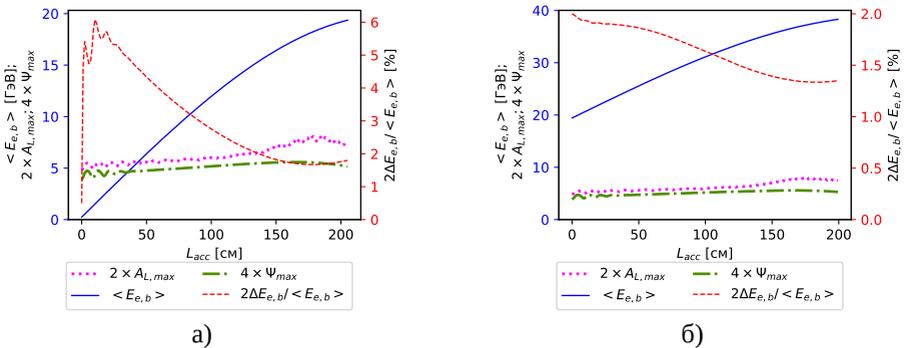


Рисунок 5 — Зависимость от длины ускорения L_{acc} средней энергии электронов в сгустке $\langle E_{e,b} \rangle$ и относительного разброса по энергиям электронов в сгустке $2\Delta E_{e,b} / \langle E_{e,b} \rangle$, а также максимального значения безразмерной напряженности поля $A_{L,max}$ и кильватерного потенциала Ψ_{max} на оси распространения $0z$ лазерного импульса в двух ускорительных стадиях.

Раздел 2.3 посвящен анализу параметров многостадийного лазерно-плазменного кильватерного ускорения для параметров лазерных импульсов планируемого к постройке комплекса XCELS [54]. На основе анализа, проведенного в предыдущих разделах, выбраны параметры лазерного импульса, плазмы и ускоряемого электронного сгустка, позволяющие достичь энергий порядка единиц ГэВ за несколько ступеней [A5]. Методом полноразмерного самосогласованного трёхмерного PiC-моделирования продемонстрирована возможность ускорения электронов до энергий в десятки–сотни ГэВ при сохранении относительного энергетического разброса на уровне 1% (рис. 5).

Третья глава посвящена оптимизации одного из приложений электронных сгустков, генерируемых лазерно-плазменными методами, — их использования для генерации вторичного гамма-излучения и частиц. Основу подобного источника составляет взаимодействие релятивистских электронов с мишенью-конвертером (рис. 6a), приводящее к генерации фотонов посредством тормозного излучения (рис. 6b) и вторичных частиц: позитронов (образующихся при взаимодействии высокоэнергетических гамма-квантов с полем ядра) и нейтронов (в результате фотоядерных реакций).

Раздел 3.1 содержит краткое описание механизма прямого лазерного ускорения (Direct Laser Acceleration, DLA), выбранного для получения требуемых релятивистских сильноточных электронных сгустков. Суть механизма заключается во взаимодействии релятивистски интенсивного лазерного импульса с плазмой околоритической плотности, что приводит к формированию плазменного канала с пониженной электронной концентрацией [42]. Электроны, захваченные в канале, совершают бетатронные колебания относительно его оси в возникающих электромагнитных полях. При резонансе частоты этих колебаний с доплеровски сдвинутой частотой лазерного поля происходит эффективная передача энергии лазера электронам. Ключевое преимущество данного метода — высокая эффективность преобразования энергии лазерного импульса в энергию ускоренных электронов. В качестве примера приведены результаты ряда экспериментальных исследований DLA-ускорения электронов [49; 50].

Раздел 3.2 содержит теоретический анализ процесса генерации тормозного излучения. Получены аналитические оценки зависимости выхода фотонов от энергии электронов пучка, атомного номера материала и толщины мишени. Установлено хорошее согласие этих оценок с результатами моделирования методами Монте-Карло. В результате, для максимизации выхода излучения и минимизации размеров источника, оптимальным материалом конвертера выбрано золото (Au), обладающее высоким атомным номером и плотностью.

Раздел 3.3 исследует генерацию тормозного излучения от DLA-ускоренных электронов для параметров двух установок:

1. PHELIX (субпикосекундный импульс, энергия в пятне $E_{FWHM} = 17,5$ Дж) [49; 50; A6]
2. XCELS (фемтосекундный импульс, $E_{FWHM} = 150$ Дж) [54; A7].

Целью исследования было:

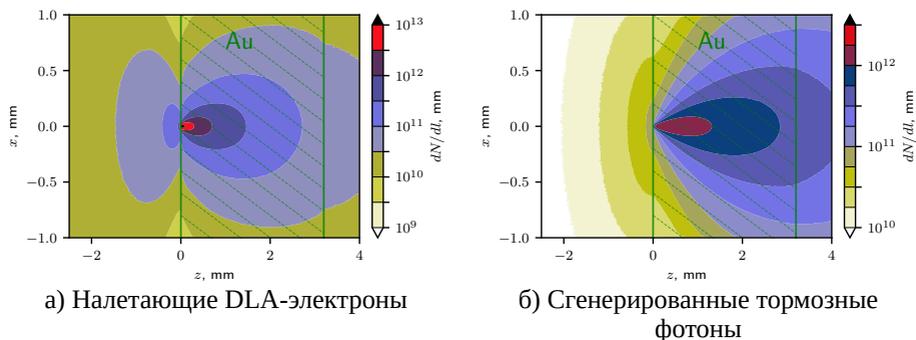


Рисунок 6 — Траектории частиц в золотом конвертере.

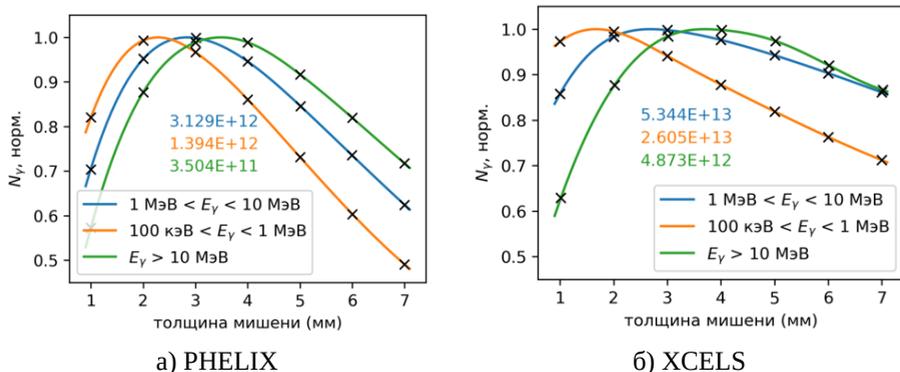


Рисунок 7 — Зависимость общего количества фотонов с тыльной стороны конвертера для различных диапазонов энергий фотонов для двух лазерных установок — PHELIX и XCELS — от толщины конвертера

1. Максимизация полного потока гамма-квантов для диагностики плотных сред
2. Минимизация размера источника при сохранении высокой эффективной яркости ($d^2N_\gamma/dS_\perp d\Omega$), критичной для пространственного разрешения.

Методом Монте-Карло для параметров обеих лазерных установок определена оптимальная толщина золотой мишени (рис. 7а, 7б). Для фотонов $E_\gamma > 1$ МэВ оптимальная толщина составляет $\sim 3-4$ мм, близкую к радиационной длине золота ($l_{\text{rad}} = 3,4$ мм). Для $E_\gamma < 1$ МэВ оптимальная толщина снижается до ~ 2 мм из-за меньшей длины поглощения низкоэнергетических фотонов.

Однако, размер источника в данном случае может достигать значений вплоть до 1 мм, что может являться неприемлемым для некоторых задач, в кото-

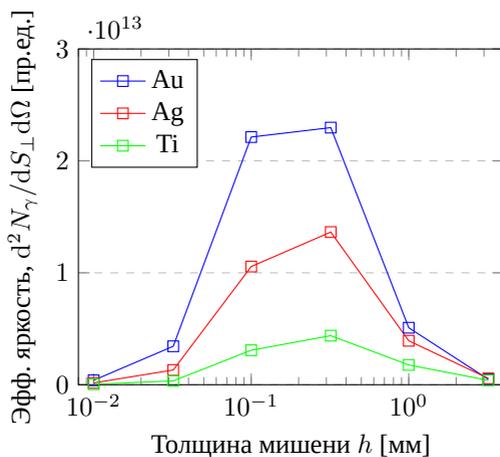


Рисунок 8 — Зависимость эффективной яркости источника для параметров PHELIX от толщины конвертера

рых необходима диагностика вещества, имеющего более мелкую структуру. Для таких целей была проведена оптимизация источника для параметров PHELIX с целью уменьшения размеров источника с сохранением высокого значения эффективной яркости (Рис. 8). Установлено, что для минимизированного источника (~ 100 мкм) оптимальная толщина составляет $\sim 0,1-0,3$ мм.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. В результате PIC-моделирования в реальной трехмерной геометрии определены параметры релятивистских субфемтосекундных электронных сгустков на основе механизма опрокидывания кильватерной волны на восходящем профиле концентрации плазмы при взаимодействии сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного импульса с плазмой докритической концентрации.
2. Результаты анализа влияния эффекта самовоздействия (воздействие ускоряемым электронным сгустком на ускоряющие поля в плазме): предложен метод оптимизации процесса кильватерного ускорения электронов фемтосекундными лазерными импульсами в разреженной плазме в линейном и умеренно-нелинейном режимах до сверхрелятивистских энергий порядка десятков ГэВ с целью уменьшения относительного разброса по энергии.
3. Посредством PIC-моделирования найдены параметры многокаскадного лазерно-плазменного кильватерного ускорения электронного сгустка с зарядом порядка сотни пКл до энергий в десятки ГэВ в нескольких стадиях ускорения с сохранением высокого качества ускоряемого сгустка.

4. В результате моделирования методами Монте-Карло проведена оптимизация материала и толщины конвертера источника гамма-квантов и вторичных частиц, основанного на взаимодействии релятивистских электронов, полученных в процессе прямого лазерного ускорения (DLA), с мишенью-конвертером для максимизации выхода вторичных частиц или гамма квантов.

Список литературы

1. EuPRAXIA Conceptual Design Report [Text] / R. W. Assmann [et al.] // The European Physical Journal Special Topics. — 2020. — Dec. — Vol. 229, no. 24. — P. 3675—4284. — DOI: [10.1140/epjst/e2020-000127-8](https://doi.org/10.1140/epjst/e2020-000127-8).
2. *Döbert, S.* RF breakdown in high frequency accelerator [Text] / S. Döbert // Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium, 2004 and 2004 High-Voltage Workshop. — 2004. — P. 60—63. — DOI: [10.1109/MODSYM.2004.1433506](https://doi.org/10.1109/MODSYM.2004.1433506).
3. Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide [Text] / A. J. Gonsalves [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — Feb. 25. — Vol. 122, no. 8. — P. 084801. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.122.084801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.084801).
4. Particle injection into the wave acceleration phase due to nonlinear wake wave breaking [Text] / S. Bulanov [et al.] // Phys. Rev. E. — 1998. — Nov. — Vol. 58, issue 5. — R5257—R5260. — DOI: [10.1103/PhysRevE.58.R5257](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.R5257).
5. Electron injection and trapping in a laser wakefield by field ionization to high-charge states of gases [Text] / M. Chen [et al.] // Journal of Applied Physics. — 2006. — Vol. 99, no. 5. — P. 056109. — DOI: [10.1063/1.2179194](https://doi.org/10.1063/1.2179194).
6. Injection and Trapping of Tunnel-Ionized Electrons into Laser-Produced Wakes [Text] / A. Pak [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Jan. — Vol. 104, issue 2. — P. 025003. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.104.025003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.025003).
7. Ionization Induced Trapping in a Laser Wakefield Accelerator [Text] / C. McGuffey [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Jan. — Vol. 104, issue 2. — P. 025004. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.104.025004](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.025004).
8. Self-Guided Laser Wakefield Acceleration beyond 1 GeV Using Ionization-Induced Injection [Text] / C. E. Clayton [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2010. — Sept. — Vol. 105, issue 10. — P. 105003. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.105.105003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.105003).
9. Electron Optical Injection with Head-On and Countercrossing Colliding Laser Pulses [Text] / H. Kotaki [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2009. — Nov. — Vol. 103, issue 19. — P. 194803. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.103.194803](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.194803).

10. Two-Color Laser-Ionization Injection [Text] / L.-L. Yu [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2014. — Mar. — Vol. 112, issue 12. — P. 125001. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.125001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.125001).
11. *Andreev, N. E.* Laser Wakefield Acceleration of Finite Charge Electron Bunches [Text] / N. E. Andreev, S. V. Kuznetsov // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2008. — Vol. 36, no. 4. — P. 1765—1772. — DOI: [10.1109/TPS.2008.2000887](https://doi.org/10.1109/TPS.2008.2000887).
12. *Andreev, N. E.* Monoenergetic laser wakefield acceleration [Text] / N. E. Andreev, S. V. Kuznetsov, I. V. Pogorelsky // Phys. Rev. ST Accel. Beams. — 2000. — Feb. — Vol. 3, issue 2. — P. 021301. — DOI: [10.1103/PhysRevSTAB.3.021301](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.3.021301).
13. *Andreev, N.* Laser wakefield acceleration of short electron bunches [Text] / N. Andreev, S. Kuznetsov // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2000. — Vol. 28, no. 4. — P. 1211—1217. — DOI: [10.1109/27.893309](https://doi.org/10.1109/27.893309).
14. *Veisman, M.* Dependence of emittance on the length of an electron bunch during laser-plasma acceleration in guiding structures [Text] / M. Veisman, N. Andreev // Quantum Electronics. — 2020. — Apr. — Vol. 50, no. 4. — P. 392—400. — DOI: [10.1070/qel17306](https://doi.org/10.1070/qel17306).
15. *Кузнецов, С. В.* Генерация коротких электронных сгустков при прохождении лазерным импульсом резкой границы неоднородной плазмы [Текст] / С. В. Кузнецов // ЖЭТФ. — 2016. — Т. 150, 2(8). — С. 195—213. — DOI: [10.7868/S0044451016080010](https://doi.org/10.7868/S0044451016080010).
16. *Кузнецов, С. В.* Генерация сгустков электронов лазерным импульсом ультрарелятивистской интенсивности, пересекающим границу неоднородной плазмы [Текст] / С. В. Кузнецов // Письма в ЖТФ. — 2019. — Т. 45, вып. 13. — С. 48—51. — DOI: [10.21883/PJTF.2019.13.47959.17758](https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.13.47959.17758).
17. *Кузнецов, С. В.* Оптимизация толщины переходного слоя для генерации сверхкоротких сгустков электронов лазерным импульсом, воздействующим на полугораниченную плазму [Текст] / С. В. Кузнецов // Письма в ЖТФ. — 2022. — Т. 48, вып. 16. — С. 21—24. — DOI: [10.21883/PJTF.2022.16.53202.19290](https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.16.53202.19290).
18. *Joshi, C.* Perspectives on the generation of electron beams from plasma-based accelerators and their near and long term applications [Text] / C. Joshi, S. Corde, W. B. Mori // Physics of Plasmas. — 2020. — Vol. 27, no. 7. — P. 070602. — DOI: [10.1063/5.0004039](https://doi.org/10.1063/5.0004039).
19. 200 GeV achieved for 2000 [Text] // CERN Courier. — 1999. — Oct.
20. *Doebert, Steffen.* Towards TeV-scale electron-positron collisions: the Compact Linear Collider (CLIC) [Text] / Doebert, Steffen, Sicking, Eva // Europhysics News. — 2018. — Vol. 49, no. 1. — P. 24—28. — DOI: [10.1051/epn/2018102](https://doi.org/10.1051/epn/2018102).

21. Positron Production in Multiphoton Light-by-Light Scattering [Text] / D. L. Burke [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 1997. — Sept. — Vol. 79, issue 9. — P. 1626—1629. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.79.1626](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.1626).
22. A new frontier in laboratory physics: magnetized electron-positron plasmas [Text] / M. R. Stoneking [et al.] // Journal of Plasma Physics. — 2020. — Vol. 86, no. 6. — P. 155860601. — DOI: [10.1017/S0022377820001385](https://doi.org/10.1017/S0022377820001385).
23. Electron–Positron Pair Flow and Current Composition in the Pulsar Magnetosphere [Text] / G. Brambilla [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2018. — May. — Vol. 858, no. 2. — P. 81. — DOI: [10.3847/1538-4357/aab3e1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab3e1).
24. Rylov, Y. A. Electron-positron pairs production in the pulsar magnetosphere [Text] / Y. A. Rylov // Astrophysics and Space Science. — 1981. — Apr. — Vol. 75, no. 2. — P. 423—436. — DOI: [10.1007/BF00648653](https://doi.org/10.1007/BF00648653).
25. Multi-GeV electron-positron beam generation from laser-electron scattering [Text] / M. Vranic [et al.] // Scientific Reports. — 2018. — Mar. — Vol. 8, no. 1. — P. 4702. — DOI: [10.1038/s41598-018-23126-7](https://doi.org/10.1038/s41598-018-23126-7).
26. Beam Loading in Plasma Accelerators [Text] / T. C. Katsouleas [et al.] // Part. Accel. — 1987. — Vol. 22. — P. 81—99.
27. Observation of Beam Loading in a Laser-Plasma Accelerator [Text] / C. Rechatin [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2009. — Nov. — Vol. 103, issue 19. — P. 194804. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.103.194804](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.194804).
28. Simulations of laser-wakefield acceleration with external electron-bunch injection for REGAE experiments at DESY [Text] / J. Grebenyuk [et al.] // AIP Conference Proceedings. — 2012. — Vol. 1507, no. 1. — P. 688—692. — DOI: [10.1063/1.4773781](https://doi.org/10.1063/1.4773781).
29. Beam quality preservation studies in a laser-plasma accelerator with external injection for EuPRAXIA [Text] / E. Svystun [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2018. — Vol. 909. — P. 90—94. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.02.060> ; — 3rd European Advanced Accelerator Concepts workshop (EAAC2017).
30. Power Scaling for Collimated γ -Ray Beams Generated by Structured Laser-Irradiated Targets and Its Application to Two-Photon Pair Production [Text] / T. Wang [et al.] // Phys. Rev. Appl. — 2020. — May. — Vol. 13, issue 5. — P. 054024. — DOI: [10.1103/PhysRevApplied.13.054024](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.13.054024).
31. Observation of a highly directional γ -ray beam from ultrashort, ultraintense laser pulse interactions with solids [Text] / P. A. Norreys [et al.] // Physics of Plasmas. — 1999. — May. — Vol. 6, no. 5. — P. 2150—2156. — DOI: [10.1063/1.873466](https://doi.org/10.1063/1.873466).

32. Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of Petawatt laser pulses with solid targets [Text] / S. P. Hatchett [et al.] // *Physics of Plasmas*. — 2000. — May. — Vol. 7, no. 5. — P. 2076–2082. — DOI: [10.1063/1.874030](https://doi.org/10.1063/1.874030).
33. Gamma photons and electron-positron pairs from ultra-intense laser-matter interaction: A comparative study of proposed configurations [Text] / Y.-J. Gu [et al.] // *Matter and Radiation at Extremes*. — 2019. — Oct. — Vol. 4, no. 6. — P. 064403. — DOI: [10.1063/1.5098978](https://doi.org/10.1063/1.5098978).
34. Ultrashort Pulsed Neutron Source [Text] / I. Pomerantz [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — Oct. — Vol. 113, issue 18. — P. 184801. — DOI: [10.1103/PhysRevLett.113.184801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.184801).
35. Forward-looking insights in laser-generated ultra-intense γ -ray and neutron sources for nuclear application and science [Text] / M. M. Günther [et al.] // *Nature Communications*. — 2022. — Jan. — Vol. 13, no. 1. — P. 170. — DOI: [10.1038/s41467-021-27694-7](https://doi.org/10.1038/s41467-021-27694-7).
36. Недорезов, В. Г. Ядерная фотоника: результаты и перспективы [Текст] / В. Г. Недорезов, С. Г. Рыкованов, А. Б. Савельев // *Усп. физ. наук*. — 2021. — Т. 191, № 12. — С. 1281–1306. — DOI: [10.3367/UFNr.2021.03.038960](https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.03.038960).
37. Hard X-Ray Radiography for Density Measurement in Shock Compressed Matter [Text] / A. Ravasio [et al.] // *Physics of Plasmas*. — 2008. — June 10. — Vol. 15, no. 6. — P. 060701. — DOI: [10.1063/1.2928156](https://doi.org/10.1063/1.2928156).
38. Developments toward Hard X-ray Radiography on Heavy-Ion Heated Dense Plasmas [Text] / K. Li [et al.] // *Laser and Particle Beams*. — 2014. — Dec. — Vol. 32, no. 4. — P. 631–637. — DOI: [10.1017/S0263034614000652](https://doi.org/10.1017/S0263034614000652).
39. Laser Driven Nuclear Physics at ELI-NP [Text] / F. Negoita, M. Roth, P. Thirolf, [et al.] // *Romanian Reports in Physics*. — 2021. — Vol. 68. — S37–S144.
40. *Habs, D.* Production of Medical Radioisotopes with High Specific Activity in Photonuclear Reactions with γ -Beams of High Intensity and Large Brilliance [Text] / D. Habs, U. Köster // *Applied Physics B*. — 2011. — May 1. — Vol. 103, no. 2. — P. 501–519. — DOI: [10.1007/s00340-010-4278-1](https://doi.org/10.1007/s00340-010-4278-1).
41. Photonuclear Production of Medical Isotopes $^{62,64}\text{Cu}$ Using Intense Laser-Plasma Electron Source [Text] / Z. Ma [et al.] // *Matter and Radiation at Extremes*. — 2019. — Sept. 24. — Vol. 4, no. 6. — P. 064401. — DOI: [10.1063/1.5100925](https://doi.org/10.1063/1.5100925).
42. *Pukhov, A.* Particle Acceleration in Relativistic Laser Channels [Text] / A. Pukhov, Z.-M. Sheng, J. Meyer-ter-Vehn // *Physics of Plasmas*. — 1999. — July 1. — Vol. 6, no. 7. — P. 2847–2854. — DOI: [10.1063/1.873242](https://doi.org/10.1063/1.873242).
43. High-Power, Kilojoule Laser Interactions with near-Critical Density Plasma [Text] / L. Willingale [et al.] // *Physics of Plasmas*. — 2011. — Apr. 25. — Vol. 18, no. 5. — P. 056706. — DOI: [10.1063/1.3563438](https://doi.org/10.1063/1.3563438).

44. Non-Maxwellian Electron Distributions Resulting from Direct Laser Acceleration in near-Critical Plasmas [Text] / T. Toncian [et al.] // Matter and Radiation at Extremes. — 2016. — Jan. 28. — Vol. 1, no. 1. — P. 82—87. — DOI: [10.1016/j.mre.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.mre.2015.11.001).
45. The Unexpected Role of Evolving Longitudinal Electric Fields in Generating Energetic Electrons in Relativistically Transparent Plasmas [Text] / L. Willingale [et al.] // New Journal of Physics. — 2018. — Sept. — Vol. 20, no. 9. — P. 093024. — DOI: [10.1088/1367-2630/aae034](https://doi.org/10.1088/1367-2630/aae034).
46. Beyond the Ponderomotive Limit: Direct Laser Acceleration of Relativistic Electrons in Sub-Critical Plasmas [Text] / A. V. Arefiev [et al.] // Physics of Plasmas. — 2016. — Apr. 20. — Vol. 23, no. 5. — P. 056704. — DOI: [10.1063/1.4946024](https://doi.org/10.1063/1.4946024).
47. Universal Scalings for Laser Acceleration of Electrons in Ion Channels [Text] / V. Khudik [et al.] // Physics of Plasmas. — 2016. — Oct. 20. — Vol. 23, no. 10. — P. 103108. — DOI: [10.1063/1.4964901](https://doi.org/10.1063/1.4964901).
48. Acceleration of Electrons under the Action of Petawatt-Class Laser Pulses onto Foam Targets [Text] / L. P. Pugachev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — Sept. 1. — Vol. 829. — P. 88—93. — (2nd European Advanced Accelerator Concepts Workshop - EAAC 2015). — DOI: [10.1016/j.nima.2016.02.053](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.02.053).
49. Interaction of Relativistically Intense Laser Pulses with Long-Scale near Critical Plasmas for Optimization of Laser Based Sources of MeV Electrons and Gamma-Rays [Text] / O. N. Rosmej [et al.] // New Journal of Physics. — 2019. — Apr. — Vol. 21, no. 4. — P. 043044. — DOI: [10.1088/1367-2630/ab1047](https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab1047).
50. High-Current Laser-Driven Beams of Relativistic Electrons for High Energy Density Research [Text] / O. N. Rosmej [et al.] // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2020. — Oct. — Vol. 62, no. 11. — P. 115024. — DOI: [10.1088/1361-6587/abb24e](https://doi.org/10.1088/1361-6587/abb24e).
51. Efficiency Improvement of the Femtosecond Laser Source of Superponderomotive Electrons and X-ray Radiation Due to the Use of near-Critical Density Targets [Text] / N. Andreev [et al.] // Quantum Electronics. — 2021. — Nov. 1. — Vol. 51, no. 11. — P. 1019—1025. — DOI: [10.1070/QEL17648](https://doi.org/10.1070/QEL17648).
52. *Esarey, E.* Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators [Text] / E. Esarey, C. B. Schroeder, W. P. Leemans // Rev. Mod. Phys. — 2009. — Aug. — Vol. 81, issue 3. — P. 1229—1285. — DOI: [10.1103/RevModPhys.81.1229](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1229).
53. *Кузнецов, С. В.* Физический механизм генерации сгустков электронов при прохождении лазерным импульсом ультрарелятивистской интенсивности резкой границы плазмы [Текст] / С. В. Кузнецов // Квантовая электроника. — 2018. — Т. 48, вып. 10. — С. 945—953. — DOI: [10.1070/QEL16743](https://doi.org/10.1070/QEL16743).

54. XCELS – Международный центр исследований экстремальных световых полей [Текст] / Е. А. Хазанов [и др.] // Квантовая Электроника. — 2023. — Т. 53, № 2. — С. 95—122.
55. PIconGPU: A Fully Relativistic Particle-in-Cell Code for a GPU Cluster [Текст] / Н. Burau [и др.] // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2010. — Т. 38, № 10. — С. 2831—2839. — DOI: [10.1109/TPS.2010.2064310](https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2064310).
56. Beam Loading in Plasma Accelerators [Text] / Т. С. Katsouleas [et al.] // Part. Accel. — 1987. — Vol. 22. — P. 81—99.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Кузнецов, С. В. Лазерно-плазменный инжектор сгустка электронов, генерируемого ультрарелятивистским лазерным импульсом [Текст] / С. В. Кузнецов, И. Р. Умаров, Н. Е. Андреев // Вестник Объединенного института высоких температур. — 2022. — Т. 7. — С. 70—74.
- A2. PIconGPU on Desmos Supercomputer: GPU Acceleration, Scalability and Storage Bottleneck [Text] / L. Pugachev [et al.] // 8th Russian Supercomputing Days, RuSCDays 2022, Moscow, Russia, September 26–27, 2022, Revised Selected Papers. Vol. 13708. — 2022. — P. 290—302. — (Lecture Notes in Computer Science). — DOI: [10.1007/978-3-031-22941-1_21](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22941-1_21).
- A3. Кузнецов, С. В. Лазерно-плазменный инжектор ультракороткого сгустка электронов [Текст] / С. В. Кузнецов, И. Р. Умаров, Н. Е. Андреев // Квантовая Электроника. — 2023. — Т. 53, вып. 3. — С. 194—199. — DOI: [10.3103/S1068335623190119](https://doi.org/10.3103/S1068335623190119).
- A4. Умаров, И. Р. Моделирование многостадийного лазерно-плазменного ускорения электронного сгустка с учётом эффекта обратного воздействия [Текст] / И. Р. Умаров // Вестник Объединенного института высоких температур. — 2025. — Т. 17. — принята.
- A5. Многокаскадное лазерно-плазменное ускорение ультракоротких сгустков электронов и позитронов [Текст] / М. Е. Вейсман [и др.] // Квантовая Электроника. — 2023. — Т. 53, вып. 2. — С. 182—188. — DOI: [10.3103/S1068335623180124](https://doi.org/10.3103/S1068335623180124).
- A6. Андреев, Н. Е. Интенсивные лазерные источники гамма-излучения и нейтронов на основе сильноточных пучков суперпандеромоторных электронов [Текст] / Н. Е. Андреев, И. Р. Умаров, В. С. Попов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2023. — Вып. 8. — С. 3—10. — DOI: [10.31857/S1028096023070026](https://doi.org/10.31857/S1028096023070026).

- A7. *Андреев, Н. Е.* Яркие источники ультрарелятивистских частиц и гамма-квантов для междисциплинарных исследований [Текст] / Н. Е. Андреев, И. Р. Умаров, В. С. Попов // *Квантовая Электроника*. — 2023. — Т. 53, вып. 3. — С. 236—241. — DOI: [10.3103/S1068335623190028](https://doi.org/10.3103/S1068335623190028).
- A8. *Умаров, И. Р.* Влияние оптической ионизации на генерацию кильватерных полей фемтосекундными лазерными импульсами в неоднородной плазме [Текст] / И. Р. Умаров, Н. Е. Андреев // *Квантовая Электроника*. — 2020. — Т. 50, вып. 8. — С. 770—775. — DOI: [10.1070/QEL17312](https://doi.org/10.1070/QEL17312).

Умаров Искандер Рашидович

Моделирование и оптимизация лазерно-плазменных источников релятивистских частиц
и гамма-излучения

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____