

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

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Управление параметрами лазерных импульсов для генерации  
электронных сгустков высокой яркости»**

**Аспирант:** Кузьмин Игорь Валерьевич

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель:**

Миронов Сергей Юрьевич

д.ф.-м.н., зав. лаб. 374 ИПФ РАН

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.21 Лазерная физика

**Форма обучения:** очная

## Актуальность темы исследования

В настоящее время управление трёхмерным распределением интенсивности лазерных импульсов находит применение в ускорительной физике. В стартовой части современных линейных ускорителей применяются фотоинжекторы, в которых генерация электронов осуществляется с поверхности катода за счет фотоэмиссии, происходящей из-за действия лазерного излучения [1–3]. Катод помещают внутрь сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора [4], при этом для эффективного ускорения электронных сгустков необходимо синхронизировать работу лазера с СВЧ-приборами. Синхронизация осуществляется за счет того, что частота следования лазерных импульсов является гармоникой СВЧ-поля.

Подобные источники электронов применяются во всём мире. В том числе в Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах (ЛСЭ) (European XFEL, Германия), в проекте LCLS (Linac Coherent Light Source) на базе Стэнфордского линейного ускорителя (SLAC, США), в Организации по изучению высокоэнергетических ускорителей (КЕК, Япония) и в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ, Россия). Управление пространственно-временным распределением интенсивности в лазерном импульсе, используемом для облучения поверхности фотокатода является основным инструментом для генерации электронных пучков с поперечным нормализованным эмиттансом  $\sim 1$  мм·мрад и величиной заряда в электронном сгустке  $\sim 1$  нКл. После прохождения ускорительной секции энергия сгустков составляет 10–100 МэВ [5, 6]. Такие пучки необходимы для ЛСЭ, работающих в однопроходном режиме самоусиления спонтанного излучения (Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE-FEL). Эмиссия сгустков с малым эмиттансом и зарядом  $\sim 1$  нКл затруднительна из-за значительного влияния кулоновских сил отталкивания, поэтому электронный банч должен иметь эллипсоидальное распределение электронной плотности (распределение Владимирского-Капчинского [7]). В этом случае кулоновские силы расталкивания пространственного заряда линейны, и они могут быть скомпенсированы с помощью электронной оптики. Таким образом, форма и параметры электронного сгустка полностью зависят от пространственно-временной 3D формы лазерного импульса, то есть, для минимизации поперечного нормализованного эмиттанса необходимо использовать лазерные импульсы с 3D эллипсоидальным распределением интенсивности в пространстве [8].

Профилирование лазерных импульсов необходимо и при ускорении электронных сгустков в поле кильватерной волны, возбуждаемой в плазме или электродинамических замедляющих структурах. В последнем случае кильватерная волна возбуждается с помощью сил пространственного заряда управляющего электронного пучка, в отличие от лазерно-плазменного ускорения [9, 10], в котором колебания электронной плотности возбуждаются с помощью короткого лазерного импульса [11]. Возбужденная кильватерная волна следует за управляющим пучком и ускоряет инжектированный рабочий электронный пучок. Для повышения КПД перекачки энер-

гии пучка в кильватерную волну необходимо использовать профилированные в пространстве и во времени электронные сгустки. В частности, в работе [12] показано, что для управляющего электронного пучка с треугольным распределением электронной плотности во времени КПД значительно выше по сравнению с использованием непрофилированных сгустков, т.к. при той же энергии пучка увеличивается ускоряющее поле.

Использование фотокатодов перспективно и в системах лазерно-плазменного ускорения электронов. С их помощью можно осуществить генерацию короткого электронного банча для внешней инжекции пучка в сформированную кильватерную волну. Этот способ может обеспечить уменьшение энергетического разброса ускоренного электронного сгустка по сравнению с традиционными методами (автоинжекция и контролируемая инжекция), использующими захват плазменных электронов [13, 14].

Профилирование лазерных импульсов является необходимым и в задаче, связанной с генерацией излучения в ТГц диапазоне частот. В настоящее время широко распространены измерения с использованием ЛСЭ, проводимые по pump-probe схеме, в которых в качестве накачки (pump) применяются импульсы терагерцового диапазона [15]. С помощью такого инструмента можно проводить эксперименты по взаимодействию излучения с веществом (изучение сильно связанных квантовых систем, высокотемпературной сверхпроводимости, Бозе-конденсации и др.) на атомных и молекулярных временных масштабах [16]. В качестве источников импульсов терагерцового излучения с мДж уровнем энергии и высокой частотой повторения используют ЛСЭ, работающие в режиме самоусиления спонтанного излучения [17]. В таких устройствах использование электронных сгустков длительностью несколько десятков пикосекунд и имеющих периодическую модуляцию электронной плотности с характерным периодом  $\sim 1$  пс во времени позволяет стабилизировать фазу высокочастотного поля относительно огибающей терагерцового импульса и минимизировать временной джиттер между терагерцовым импульсом и электронным пучком. Отметим, что при генерации ТГц излучения также находит применение и очень глубокая модуляция плотности в электронном сгустке – деление сгустка на отдельные слои (т.н. микробанчинг) [18]. Кроме того, профилированные лазерные импульсы используются в задачах современной литографии [19], медицинских приложениях [20], при исследовании нелинейных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом [21], в нелинейной оптической микроскопии [22].

Таким образом, настоящая работа посвящена созданию лазерных импульсов сложной пространственно - временной формы, необходимых для осуществления эффективной генерации электронных сгустков для различных задач ускорительной физики. Стоит отметить, что используемые в фотоинжекторах фотокатоды (например,  $Cs_2Te$ ) обладают наиболее высоким квантовым выходом в ультрафиолетовой области спектра [23]. При этом профилирование лазерных импульсов, как правило, наиболее удобно выполнять в ИК-области спектра (центральные длины

волн излучения 700-1000 нм, ширина спектра по уровню FWHM  $\sim 10$  нм, длительность chirпированных импульсов несколько десятков пс). Тем самым, возникает задача о преобразовании сформированного  $3D(x,y,t)$  распределения интенсивности инфракрасного лазерного импульса в видимый и УФ-диапазоны с минимальными искажениями от созданной  $3D$  структуры поля. Сравним квантовый выход из  $Cs_2Te$  фотокатода в УФ- и ИК- областях спектра. Энергия фотона с длиной волны 744 нм составляет 1.67 эВ, при длине волны 186 нм (четвертая гармоника излучения с длиной волны 744 нм) энергия фотона 6.7 эВ и 5 эВ при 248 нм (третья гармоника излучения с длиной волны 744 нм). Таким образом, в соответствии с [23], квантовый выход из  $Cs_2Te$  фотокатода около 0.1 в УФ-области и  $10^{-7}$  в ИК области спектра. То есть, условия преобразования излучения из ИК в УФ диапазон с сохранением пространственно-временного распределения интенсивности являются важным аспектом в физике фотоинжекторов. Попутной задачей является определение полученной формы импульсов в видимом и УФ-диапазонах, что может быть сделано с использованием сканирующих кросс-корреляторов [24] для соответствующей длины волны излучения.

### Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является развитие методов управления  $3D$  структурой интенсивности лазерных импульсов видимого и УФ-диапазонов сложной пространственно-временной формы для их дальнейшего использования в фотоинжекторах электронов. Задачи работы следующие:

1. Формирование в экспериментах лазерных импульсов длительностью пикосекундной длительности с различной временной формой: а) распределением интенсивности в форме прямоугольного треугольника, б) с периодической модуляцией во времени (период модуляции  $\sim 1$  пс).
2. Поиск оптимальных параметров для высокоэффективного преобразования широкополосного инфракрасного излучения с частотным chirпом и угловым chirпом в видимый и УФ-диапазоны.
3. Оптимизация параметров кросс-корреляционных схем для определения  $3D$  формы импульсов видимого и ультрафиолетового диапазонов в эксперименте.
4. Разработка математической модели трехволнового взаимодействия широкополосных лазерных импульсов для оптимизации параметров работы одноимпульсного автокоррелятора интенсивности второго порядка

## Научная новизна

1. Исследована возможность формирования лазерных импульсов с квазитреугольным распределением интенсивности в ИК-области спектра, с использованием аналитических и численных методов найдены оптимальные условия для их генерации. В экспериментах сформированы лазерные импульсы пикосекундной длительности ( $\sim 30$  пс, длина волны 1036 нм, ширина спектра 8 нм) с квазитреугольным распределением интенсивности во времени.
2. Предложен метод создания управляемой по глубине и периоду модуляции во временном распределении интенсивности у широкополосных линейно chirпированных лазерных импульсов за счет внесения дополнительной гармонической модуляции в фазу спектра.
3. Предложено использовать интерферометры Маха-Цендера и Майкельсона для создания периодической модуляции с характерным периодом (1-5 пс) у исходных chirпированных широкополосных ( $\sim 8$  нм) лазерных импульсов с характерной длительностью 15-50 пс
4. На примере лазерных импульсов с 3D эллипсоидальным распределением интенсивности продемонстрирована возможность высокоэффективной генерации излучения второй и четвертой гармоник с сохранением формы за счет использования углового chirпирования.
5. Определены условия, при которых возможно определить длительность однопериодных лазерных импульсов ИК диапазона с использованием одноимпульсного автокоррелятора интенсивности второго порядка. Показано, что для спектрально-ограниченных импульсов точность восстанавливаемой длительности зависит как от толщины кристалла генератора второй гармоники, так и от угла схождения пучков в нем..

## Научная и практическая значимость

Профилированные лазерные импульсы УФ-диапазона необходимы для решения задач современной ускорительной физики. В стартовой части современных ускорителей используются фотоинжекторы, в которых электронные сгустки образуются за счет облучения фотокатода лазерными импульсами. Представленные в работе методы получения лазерных импульсов с периодической модуляцией интенсивности актуальны для создания терагерцовых источников излучения на базе лазеров на свободных электронах, работающих в режиме самоусиления спонтанного излучения. Лазерные импульсы с квазилинейным профилем интенсивности востребованы при ускорении заряженных частиц в поле кильватерной волны (Plasma Wake-Field Acceleration, PWFA). При использовании управляющего электронного пучка с треугольным распределением электронной плотности во времени значительно увеличивается ускоряющее поле при данной энергии пучка.

3. Интерферометры Маха-Цендера и Майкельсона могут быть использованы для создания периодической модуляции во временном распределении интенсивности с характерным периодом 1-5 пс у широкополосных линейно chirпированных лазерных импульсов, растянутых до длительности 15-50 пс;

4. Применение углового chirпирования позволяет реализовать высокоэффективную генерацию второй и четвертой гармоник с сохранением трехмерного распределения интенсивности, в том числе и при наличии периодической модуляции интенсивности во времени;

5. Использование импульсов первой и второй гармоник с угловыми chirпами в процессе неколлинеарного трехволнового взаимодействия в нелинейном кристалле позволяет сгенерировать коллимированное излучение третьей гармоники;

6. Применение кристалла KDP толщиной до 10 мкм в схеме одноимпульсного автокоррелятора интенсивности второго порядка позволяет диагностировать длительность малопериодных лазерных импульсов с центральными длинами волн 910 нм и 780 нм с точностью не хуже 10

#### Основные положения, выносимые на защиту

1. Управление амплитудой спектра линейно chirпированных широкополосных лазерных импульсов позволяет сформировать квазитреугольное распределение интенсивности во времени с характерной длительностью 20-50 пс.
2. Внесение гармонической модуляции в фазу спектра широкополосных линейно chirпированных лазерных импульсов может быть использовано для создания управляемой по глубине и периоду модуляции во временном распределении интенсивности.
3. Интерферометры Маха-Цендера и Майкельсона могут быть использованы для создания периодической модуляции во временном распределении интенсивности с характерным периодом 1-5 пс у широкополосных линейно chirпированных лазерных импульсов, растянутых до длительности 15-50 пс.
4. Применение углового chirпирования позволяет реализовать высокоэффективную генерацию второй и четвертой гармоник с сохранением трехмерного распределения интенсивности, в том числе и при наличии периодической модуляции интенсивности во времени.
5. Использование импульсов первой и второй гармоник с угловыми chirпами в процессе неколлинеарного трехволнового взаимодействия в нелинейном кристалле позволяет сгенерировать коллимированное излучение третьей гармоники.
6. Применение кристалла KDP толщиной до 10 мкм в схеме одноимпульсного автокоррелятора интенсивности второго порядка позволяет диагностировать длительность малопериодных

одных лазерных импульсов с центральными длинами волн 910 нм и 780 нм с точностью не хуже 10%.

## Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, обозначены цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы. Приведены личный вклад автора и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен численный анализ формирования квазитреугольного распределения интенсивности, определены основные закономерности формирования квазитреугольных временных распределений интенсивности и найдены условия для их оптимального получения. Приведены экспериментальные результаты по формированию чирпированных лазерных импульсов пикосекундной длительности с квазитреугольным распределением интенсивности во времени с хорошим согласием численных оценок и экспериментальных результатов. В главе указано, что при различных условиях эксперимента наблюдаются периодические искажения у профиля распределения интенсивности во времени, связанные с использованием матрицы SLM. Обнаруженный эффект линейен и не связан с самовоздействием лазерного излучения в оптическом волокне. Таким образом, SLM вносит периодическую фазовую модуляцию в спектр импульса, что приводит к появлению осцилляций на огибающей. Такой подход можно использовать в конструктивных целях. В главе предложен метод создания управляемой периодической модуляции распределения интенсивности чирпированных лазерных импульсов со сложной пространственно-временной структурой за счет внесения дополнительной периодической модуляции фазы спектра. Численно и аналитически (для гауссова распределения интенсивности) показана зависимость глубины модуляции (параметра  $PV_0$ ) от амплитуды модуляции фазы  $A_0$ , периода модуляции  $T$  и параметра линейного чирпа  $\varphi_1$ . Величина  $PV_0$  осциллирующим образом зависит от периода модуляции  $T$  (периода модуляции во времени  $L$ ), причем период этой зависимости уменьшается с ростом  $T$  (уменьшением  $L$ ). Показано, что существуют оптимальные наборы параметров, при которых в распределении интенсивности наблюдаются минимальные искажения. В том случае, когда периодическая фазовая модуляция является нежелательным эффектом, с ней можно бороться за счет незначительного изменения длительности импульса. При изменении длительности импульса на единицы процентов, амплитуда осцилляций интенсивности снижается в 4 раза и более. Показано, что использование периодической модуляции фазы спектра с амплитудой ( $\sim \pi$ ) позволяет получить из одного чирпированного широкополосного лазерного импульса последовательность импульсов с контролируемой скважностью. Длительность импульса в последовательности зависит от глубины и периода модуляции вносимой гармонической модуляции в фазу спектра. С использованием аналитических методов найдены условия при которых в последовательности импульсов возникают сателлиты. Также в главе

проведено исследование по использованию интерферометров Маха-Цендера и Майкельсона для создания периодической модуляции с характерным периодом (1-5 пс) у исходных chirпированных широкополосных ( $\sim 8$  нм) лазерных импульсов с характерной длительностью 15-50 пс.

Во второй главе получена система дифференциальных уравнений, описывающих трехволновое взаимодействие сверхширокополосных лазерных импульсов. Упрощенная система уравнений в этой главе была использована для численного моделирования генерации второй, третьей и четвертой гармоник лазерными импульсами с частотными и угловыми chirпами. С помощью численного моделирования показана возможность получения лазерных импульсов второй, четвертой и третьей гармоник Ti:Sa лазера с сохранением заданного в первой гармонике 3D эллипсоидального пространственно-временного распределения интенсивности при использовании углового chirпирования. Рожденные импульсы второй и четвертой гармоник обладают наклонным пространственно-временным распределением интенсивности, при этом амплитудный наклон может быть убран, например, отражением от дифракционной решетки. В главе показано, что ненаклонный импульс третьей гармоники в случае неколлинеарного трехволнового оо-е взаимодействия может быть получен с использованием импульсов со специально подобранными амплитудными наклонами. Использование углового chirпирования при ГТГ позволяет управлять пространственно-временным распределением интенсивности. Проведенное в главе исследование показывает, что оба пути получения требуемого УФ-излучения - генерация третьей и четвертой гармоники позволяют сохранить 3D структуру поля при высокой эффективности преобразования. При использовании генерации третьей гармоники значительно ниже КПД преобразования из первой гармоники и больше искажения пространственно-временного распределения интенсивности. При повышении КПД третьей гармоники коэффициенты подобия преобразования уменьшаются. Кроме того, с помощью численного моделирования показана возможность высокоэффективного преобразования 3D-лазерных импульсов с модуляцией интенсивности во вторую и четвертую гармоники с сохранением модулированной 3D структуры (центральная длина волны 1034 нм). Для этого используется угловой chirп (амплитудный наклон), который после преобразования излучения также можно убрать за счет отражения импульсов от дифракционной решетки. В отличие от излучения на основной частоте, излучение на четвертой гармонике будет иметь модуляцию не только во временном распределении интенсивности, но и в спектральном. Кроме того, в главе продемонстрирована высокая эффективность генерации второй гармоники лазерными импульсами, имеющими равный по модулю и противоположный по знаку частотный chirп. Такой подход позволяет реализовать высокоэффективную ГВГ без углового chirпирования. Пространственно-временное распределение интенсивности полностью сохраняется (в том числе и при наличии периодической модуляции интенсивности), а сам импульс становится узкополосным. Этот факт позволяет получить четвертую гармонику коллинеарным способом без углового chirпирования с высокой эффективностью даже при наличии



периодической модуляции интенсивности.

В третьей главе показано, что корректно определить 3D-форму профилированного лазерного импульса (с характерной длительностью  $\sim 20$  пс) можно при использовании сканирующего кросс-коррелятора интенсивности на основе генерации суммарной (для диагностики импульсов ИК и видимого диапазонов) и разностной частоты (УФ-диапазон). В том числе рассмотрена ситуация, когда диагностируемый импульс имеет периодическую модуляцию интенсивности и угловой чирп. Кроме того, в главе определены условия, при которых возможно определить длительность однопериодных лазерных импульсов ИК диапазона (центральные длины волн 910 нм и 780 нм) с использованием одноимпульсного автокоррелятора интенсивности второго порядка. Показано, что точность восстанавливаемой длительности для Фурье-ограниченных импульсов зависит как от толщины нелинейного кристалла, так и от угла схождения пучков первой гармоники. При этом существует оптимальный угол, при котором восстановление длительности происходит с наименьшей ошибкой. При диагностике сверхширокополосных лазерных импульсов необходимо использовать кристаллы KDP толщиной не более 10 мкм, что позволит обеспечить точность определения длительности не хуже 5%. Тем не менее, для определения длительности импульса около десяти периодов оптических колебаний толщина кристалла может быть выбрана равной 1 мм. В этом случае при оптимальном угле схождения пучков первой гармоники точность определения длительности лучше 2%.

### Личный вклад автора

Все основные результаты, включенные в диссертационную работу, получены автором лично или при его непосредственном участии. Постановка задач, определение подходов к их решению и обсуждение полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. С.Ю. Мироновым.

Расчеты выполнялись автором на основе оригинальных вычислительных программ, созданных автором самостоятельно.

Экспериментальные результаты были получены автором самостоятельно, на базе установки, созданной А.К. Потемкиным и к.ф.-м.н. Е.И. Гачевой.

### Основные публикации по теме работы

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 5 статей [А1—А5] в реферируемых журналах и 10 работ [А6—А15] в трудах конференций. Основные результаты работы докладывались а также на внутренних семинарах ИПФ РАН и конкурсе молодых ученых ИПФ РАН 2019 года. Результаты работы обсуждались на следующих конференциях: Сессия молодых ученых (естественные, математические науки, Арзамас, 2017-2019 гг.); XI Всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых уче-

ных и специалистов (Саров, 2017 г.); 13th School on Acousto-Optics and Applications ( Москва, 2017 г.); Ежегодная научная конференция по радиофизике (Нижний Новгород, 2018-2019 гг.); International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, 2018); CLEO/Europe - EQEC (Мюнхен, 2019 г.); Advanced Solid State Lasers (Вена, 2019 г.); International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, 2020);

## Список литературы

- [1] E. I. Gacheva, V. V. Zelenogorskii, A. V. Andrianov, M. Krasilnikov, M. A. Martyanov, S. Y. Mironov, A. K. Potemkin, E. M. Syresin, F. Stephan, and E. A. Khazanov, “Disk yb:KGW amplifier of profiled pulses of laser driver for electron photoinjector”, *Optics Express*, vol. 23, no. 8, p. 9627, 2015. DOI: 10.1364/oe.23.009627.
- [2] A. K. Potemkin, E. I. Gacheva, V. V. Zelenogorskii, E. V. Katin, I. E. Kozhevnikov, V. V. Lozhkarev, G. A. Luchinin, D. E. Silin, E. A. Khazanov, D. V. Trubnikov, G. D. Shirkov, M. Kuriki, and J. Urakava, “Laser driver for a photocathode of an electron linear accelerator”, *Quantum Electronics*, vol. 40, no. 12, pp. 1123–1130, 2011. DOI: 10.1070/qe2010v040n12abeh014435.
- [3] I. Will and G. Klemz, “Generation of flat-top picosecond pulses by coherent pulse stacking in a multicrystal birefringent filter”, *Optics Express*, vol. 16, no. 19, p. 14922, 2008. DOI: 10.1364/oe.16.014922.
- [4] A. Arnold, H. Büttig, D. Janssen, T. Kamps, G. Klemz, W. Lehmann, U. Lehnert, D. Lipka, F. Marhauser, P. Michel, K. Möller, P. Murcek, C. Schneider, R. Schurig, F. Staufenberg, J. Stephan, J. Teichert, V. Volkov, I. Will, and R. Xiang, “A high-brightness SRF photoelectron injector for FEL light sources”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 593, no. 1-2, pp. 57–62, 2008. DOI: 10.1016/j.nima.2008.04.035.
- [5] W. G. on a European XFEL Facility, “Interim report of the scientific and technical issues”, Hamburg, Tech. Rep., 2005.
- [6] M. Krasilnikov, F. Stephan, G. Asova, H.-J. Grabosch, M. Groß, L. Hakobyan, I. Isaev, Y. Ivanisenko, L. Jachmann, M. Khojoyan, G. Klemz, W. Köhler, M. Mahgoub, D. Malyutin, M. Nozdrin, A. Oppelt, M. Otevrel, B. Petrosyan, S. Rimjaem, A. Shapovalov, G. Vashchenko, S. Weidinger, R. Wendorff, K. Flöttmann, M. Hoffmann, S. Lederer, H. Schlarb, S. Schreiber, I. Templin, I. Will, V. Paramonov, and D. Richter, “Experimentally minimized beam emittance from anL-band photoinjector”, *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, vol. 15, no. 10, 2012. DOI: 10.1103/physrevstab.15.100701.
- [7] I. Kapchinskij and V. Vladimirkij, “Limitations of proton beam current in a strong focusing linear accelerator associated with the beam space charge”, in *2nd Conf. on High Energy Accelerators and Instrumentation* (Geneva: CERN), 1959.
- [8] M. Khojoyan, M. Krasilnikov, F. Stephan, and G. Vashchenko, “Beam dynamics optimization for the high brightness pitz photo injector using 3D ellipsoidal cathode laser pulses”, in *FEL 2013: Proceedings of the 35th International Free-Electron Laser Conference, 2013*, ISBN: 9783954501267.
- [9] T. Tajima and J. M. Dawson, “Laser electron accelerator”, *Physical Review Letters*, vol. 43, no. 4, pp. 267–270, 1979. DOI: 10.1103/physrevlett.43.267.
- [10] T. Tajima, “Prospect for extreme field science”, *The European Physical Journal D*, vol. 55, no. 2, pp. 519–529, 2009. DOI: 10.1140/epjd/e2009-00107-8.
- [11] M. Litos, E. Adli, W. An, C. I. Clarke, C. E. Clayton, S. Corde, J. P. Delahaye, R. J. England, A. S. Fisher, J. Frederico, S. Gessner, S. Z. Green, M. J. Hogan, C. Joshi, W. Lu, K. A. Marsh, W. B. Mori, P. Muggli, N. Vafaei-Najafabadi, D. Walz, G. White, Z. Wu, V. Yakimenko, and G. Yocky, “High-efficiency acceleration of an electron beam in a plasma wakefield accelerator”, *Nature*, vol. 515, no. 7525, pp. 92–95, 2014. DOI: 10.1038/nature13882.

- [12] G. Loisch, J. Good, M. Gross, H. Huck, I. Isaev, M. Krasilnikov, O. Lishilin, A. Oppelt, Y. Renier, F. Stephan, R. Brinkmann, F. Grüner, and I. Will, “Photocathode laser based bunch shaping for high transformer ratio plasma wakefield acceleration”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 909, pp. 107–110, 2018. DOI: 10.1016/j.nima.2018.02.043.
- [13] X. Li, A. Mosnier, and P. A. P. Nghiem, “Design of a 5 GeV laser–plasma accelerating module in the quasi-linear regime”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 909, pp. 49–53, 2018. DOI: 10.1016/j.nima.2018.02.104.
- [14] A. Rossi, V. Petrillo, A. Bacci, E. Chiadroni, A. Cianchi, M. Ferrario, A. Giribono, A. Marocchino, M. R. Conti, L. Serafini, and C. Vaccarezza, “Plasma boosted electron beams for driving free electron lasers”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 909, pp. 54–57, 2018. DOI: 10.1016/j.nima.2018.02.092.
- [15] M. C. Hoffmann and M. E. Kozina, “Terahertz-pump experiments on complex solids at x-ray FELs”, in *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications IX*, M. Razeghi and A. N. Baranov, Eds., SPIE, 2018. DOI: 10.1117/12.2322169.
- [16] E. A. Schneidmiller, M. V. Yurkov, M. Krasilnikov, and F. Stephan, “Tunable IR/THz source for pump probe experiments at the european XFEL”, in *Advances in X-ray Free-Electron Lasers II: Instrumentation*, T. Tschentscher and K. Tiedtke, Eds., SPIE, 2013. DOI: 10.1117/12.2017014.
- [17] P. Tan, J. Huang, K. Liu, Y. Xiong, and M. Fan, “Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications”, *Science China Information Sciences*, vol. 55, no. 1, pp. 1–15, 2011. DOI: 10.1007/s11432-011-4515-1.
- [18] S. Antipov, M. Babzien, C. Jing, M. Fedurin, W. Gai, A. Kanareykin, K. Kusche, V. Yakimenko, and A. Zholents, “Subpicosecond bunch train production for a tunable mJ level THz source”, *Physical Review Letters*, vol. 111, no. 13, 2013. DOI: 10.1103/physrevlett.111.134802.
- [19] R. Bartels, S. Backus, E. Zeek, L. Misoguti, G. Vdovin, I. P. Christov, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, “Shaped-pulse optimization of coherent emission of high-harmonic soft x-rays”, *Nature*, vol. 406, no. 6792, pp. 164–166, 2000. DOI: 10.1038/35018029.
- [20] Y. Silberberg, “Quantum coherent control for nonlinear spectroscopy and microscopy”, *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 60, no. 1, pp. 277–292, 2009. DOI: 10.1146/annurev.physchem.040808.090427.
- [21] N. S. Vorob’ev, A. A. Manenkov, A. A. Murav’ev, A. V. Smirnov, and E. V. Shashkov, “Temporal shaping of ultrashort laser pulses by volume bragg gratings”, *Quantum Electronics*, vol. 41, no. 6, pp. 501–503, 2011. DOI: 10.1070/qe2011v041n06abeh014545.
- [22] W. Akemann, J.-F. Léger, C. Ventalon, B. Mathieu, S. Dieudonné, and L. Bourdieu, “Fast spatial beam shaping by acousto-optic diffraction for 3d non-linear microscopy”, *Optics Express*, vol. 23, no. 22, p. 28 191, 2015. DOI: 10.1364/oe.23.028191.
- [23] S. H. Kong, J. Kinross-Wright, D. C. Nguyen, and R. L. Sheffield, “Cesium telluride photocathodes”, *Journal of Applied Physics*, vol. 77, no. 11, pp. 6031–6038, 1995. DOI: 10.1063/1.359188.

- [24] V. V. Zelenogorskii, A. V. Andrianov, E. I. Gacheva, G. V. Gelikonov, M. Krasilnikov, M. A. Mart'yanov, S. Y. Mironov, A. K. Potemkin, E. M. Syresin, F. Stephan, and E. A. Khazanov, "Scanning cross-correlator for monitoring uniform 3D ellipsoidal laser beams", *Quantum Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 76–82, 2014, ISSN: 1063-7818. DOI: 10.1070/QE2014v044n01ABEH015224. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1063-7818/44/i=1/a=76?key=crossref.c3b70d0aa7c08b6c664ca9223d27fc5e>.

## Публикации по теме работы

- [A1] I. Kuzmin, S. Mironov, E. Gacheva, V. Zelenogorsky, A. Potemkin, E. Khazanov, A. Kanareykin, S. Antipov, M. Krasilnikov, G. Loisch, and F. Stephan, “Shaping triangular picosecond laser pulses for electron photoinjectors”, *Laser Physics Letters*, vol. 16, no. 1, p. 015001, 2018. DOI: 10.1088/1612-202x/aaef95.
- [A2] E. I. Gacheva, A. K. Potemkin, I. V. Kuzmin, and S. Y. Mironov, “Distortion-free temporal profiling of chirped picosecond laser pulses by spectral shaping with opaque solid masks”, *Laser Physics*, vol. 30, no. 2, p. 025004, 2020. DOI: 10.1088/1555-6611/ab5e24.
- [A3] I. V. Kuzmin, S. Y. Mironov, E. I. Gacheva, A. K. Potemkin, E. A. Khazanov, M. A. Krasilnikov, and F. Stephan, “Shaping picosecond ellipsoidal laser pulses with periodic intensity modulation for electron photoinjectors”, *Applied Optics*, vol. 59, no. 9, p. 2776, 2020. DOI: 10.1364/ao.383181.
- [A4] I. V. Kuzmin, S. Y. Mironov, and E. A. Khazanov, “Accuracy of the duration estimates of ultrashort laser pulses using a single-shot second-order intensity autocorrelator”, *Quantum Electronics*, vol. 50, no. 4, pp. 354–360, 2020. DOI: 10.1070/qe117310.
- [A5] I. V. Kuzmin, S. Y. Mironov, E. I. Gacheva, A. K. Potemkin, and E. A. Khazanov, “Retaining 3d shape of picosecond laser pulses during optical harmonics generation”, *Applied Optics*, vol. 58, no. 10, p. 2678, 2019. DOI: 10.1364/ao.58.002678.
- [A6] I. Kuzmin, S. Y. Mironov, E. Gacheva, A. Potemkin, and E. Khazanov, “Preserving triangular pulse shape at second and fourth harmonic generation processes”, in *2018 International Conference Laser Optics (ICLO), IEEE*, 2018. DOI: 10.1109/lo.2018.8435188.
- [A7] I. V. Kuzmin, S. Y. Mironov, E. I. Gacheva, A. K. Potemkin, E. A. Khazanov, M. Krasilnikov, and F. Stephan, “Generation of ellipsoidal laser pulses with periodic intensity modulation for photoinjectors”, in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), IEEE*, 2019. DOI: 10.1109/cleoe-eqec.2019.8872946.
- [A8] I. V. Kuzmin, S. Y. Mironov, E. I. Gacheva, A. K. Potemkin, and E. A. Khazanov, “Retaining 3d laser pulse shape at sum frequency generation processes”, in *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), IEEE*, 2019. DOI: 10.1109/cleoe-eqec.2019.8872321.
- [A9] И. Кузьмин и С.Ю.Миронов, “Измерение длительности ультракоротких лазерных импульсов с использованием одноимпульсного автокоррелятора интенсивности второго порядка”, в *трудах 23-й научной конференции по радиофизике*, 2019.
- [A10] I. Kuzmin and S. Mironov, “Accuracy of temporal diagnostic of single cycle laser pulses at using of single shot intensity autocorrelator”, in *Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C), OSA*, 2019. DOI: 10.1364/assl.2019.jw2a.12.
- [A11] И. Кузьмин, С. Миронов, Е. Гачева и А. Потемкин, “Сохранение формы коротких лазерных импульсов в процессах генерации второй, третьей и четвертой гармоник”, в *трудах 22-й научной конференции по радиофизике*, 2018.
- [A12] I. V. Kuzmin, S. Y. Mironov, E. I. Gacheva, A. K. Potemkin, and E. A. Khazanov, “Generation of picosecond chirped laser-pulses with quasi-triangular intensity distribution”, in *13th School on Acousto-Optics and Applications*, 2017.

- [A13] И.В.Кузьмин, С. Миронов, Е.И.Гачева и А.К.Потемкин, “Получение chirpированных лазерных импульсов пикосекундной длительности с квази-треугольной огибающей”, в трудах XI Всероссийской школы по лазерной физике и лазерным технологиям для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, 2017.
- [A14] I. Kuzmin, S. Mironov, E. Gacheva, A. Potemkin, and E. Khazanov, “Mach-zehnder and michelson interferometers for formation laser pulses with periodic intensity modulation”, in 2020 International Conference Laser Optics (ICLO), 2020.
- [A15] I. Kuzmin, S. Mironov, A. Potemkin, E. Gacheva, and E. Khazanov, “Cross-correlator schemes for diagnostic of visible and uv shaped laser pulses”, in 2020 International Conference Laser Optics (ICLO), 2020.