

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Пространственно-временное профилирование лазерных импульсов для фотокатодов линейных ускорителей электронов

С.Ю. Миронов, А.В. Андрианов, Е.И. Гачева, В.В. Зеленогорский, А.К. Потемкин, Е.А. Хазанов, П. Бонпорнпрасерт, М. Грос, Д. Гуд, И. Исаев, Д. Калантарян, Т. Козак, М. Красильников, Х. Кьян, К. Ли, О. Лишили, Д. Мелкумян, А. Оппельт, И. Ренье, Т. Рублак, М. Фельбер, Х. Хук, Й. Чен, Ф. Штефан

Рассмотрены методы пространственно-временного профилирования интенсивности лазерных импульсов для облучения фотокатодов ускорителей электронов. Проведён анализ возможности формирования треугольных импульсов и квазиэллипсоидальных структур. Предложенная схема генерации профилированных лазерных импульсов реализована в Институте прикладной физики (ИПФ) РАН. В настоящее время прототип лазерной системы, позволяющей профилировать импульсы, установлен в ускорительном центре DESY на фотоинжекторной установке PITZ (Photo Injector Test facility at DESY, Zeuthen site). На PITZ проведены предварительные эксперименты по генерации электронных пучков с использованием ультрафиолетовых лазерных импульсов из этой системы, в ходе которых получены электронные сгустки с зарядом 0,5 нКл и поперечным нормализованным эмиттансом 1,1 мм мрад. Новая схема для трёхмерного профилирования лазерных пучков с использованием объёмной профилированной решётки Брэгга, предложенная в ИПФ РАН, в настоящее время тестируется для последующих экспериментов по генерации электронных пучков на PITZ.

Ключевые слова: 3D-профилирование лазерных импульсов, фотоинжектор, линейный ускоритель электронов, генерация и ускорение электронных пучков, нормализованный эмиттанс

PACS numbers: 29.20.-c, 29.27.Ac, 42.60.By, 42.60.-v

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038143>

Содержание

1. Введение (1121).
2. Генерация электронных пучков высокой яркости в современных фотоинжекторах (1123).
 - 2.1. Линейный ускоритель PITZ.
 - 2.2. Численная оптимизация фотоинжектора PITZ для различных профилей лазерного излучения.

3. Трёхмерное профилирование лазерных импульсов (1125).
 - 3.1. Катодный лазер для линейного ускорителя электронов PITZ.
 - 3.2. Управление формой импульсов с использованием объёмной профилированной чирпирующей решётки Брэгга.
 - 3.3. Формирование квазиреугольных импульсов в эксперименте.
 4. Генерация и характеристика электронных пучков в фотоинжекторе PITZ (1129).
 5. Заключение (1132).
- Список литературы (1133).

С.Ю. Миронов, А.В. Андрианов, Е.И. Гачева, В.В. Зеленогорский, А.К. Потемкин, Е.А. Хазанов. Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
 П. Бонпорнпрасерт, М. Грос, Д. Гуд, И. Исаев, Д. Калантарян, М. Красильников, Х. Кьян, К. Ли, О. Лишили, Д. Мелкумян, А. Оппельт, И. Ренье, Т. Рублак, Х. Хук, Й. Чен, Ф. Штефан. Deutsches Elektronen-Synchrotron, Platanenallee 6, Zeuthen, D-15738, Germany
 Т. Козак, М. Фельбер. Deutsches Elektronen-Synchrotron, Notkestrasse 85, Hamburg, D-22603, Germany
 E-mail: Sergei.Mironov@mail.ru, alex.v.andrianov@gmail.com, gacheva@appl.sci-nnov.ru, vvmailv@mail.ru, ptmk@appl.sci-nnov.ru, khazanov@appl.sci-nnov.ru, mikhail.krasilnikov@desy.de, frank.stephan@desy.de

Статья поступила 16 мая 2017 г.

1. Введение

В настоящее время одно из важнейших направлений, в котором применяются методы трёхмерного профилирования лазерных импульсов, связано с физикой фотоинжекторов электронов. Здесь лазерные импульсы используются для облучения поверхности фотокатода с целью генерации электронных сгустков в результате фотоэффекта. Как правило, катод размещают в вакуумируемом пространстве внутри сверхвысокочастотного (СВЧ) резонатора. Частота следования лазерных импульсов является субгармоникой СВЧ-поля, что позволяет синхронизовать работу лазера с работой СВЧ-устройств и эффективно ускорять генерируемые электронные сгустки.

Хорошо известно, что распределение интенсивности лазерных импульсов определяет параметры электронных пучков, такие как распределение заряда в пространстве, величину поперечного нормализованного эмиттанса и др. Управление пространственно-временным распределением интенсивности лазерного пучка позволяет контролируемо изменять параметры электронных пучков. Требуемые характеристики электронных пучков определяются задачами, в которых они будут использоваться.

Одно из наиболее перспективных направлений — создание лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) (Free-Electron Laser — FEL), работающих в однопроходном режиме самоусиления спонтанного излучения (Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE) FEL). В этом случае электронные пучки должны отвечать высоким требованиям по пиковой яркости и стабильности, в связи с чем необходима генерация очень коротких электронных пучков с большим током (порядка нескольких килоампер) и очень малым поперечным эмиттансом (~ 1 мм мрад). Эмиссия электронных пучков с подобными свойствами затруднена из-за значительного влияния кулоновских сил отталкивания. Поэтому в современных линейных ускорителях используется схема с последовательным сжатием электронного пучка (например, в магнитном банч-компрессоре). Поскольку динамика электронных пучков в линейном ускорителе предполагает только увеличение поперечного фазового объёма (нормализованного эмиттанса), генерация электронных пучков с малым (< 1 мм мрад) эмиттансом в инжекторе является необходимым условием эффективного функционирования ЛСЭ. Для уменьшения влияния сил пространственного заряда в электронных пучках с характерным зарядом ~ 1 нКл и энергией 5–7 МэВ в современных фотоинжекторах применяются лазерные пучки пикосекундной длительности (1–30 пс).

В настоящее время работы по генерации таких электронных пучков ведутся в крупнейших ускорительных центрах мира, а именно: в Германии в ускорительном центре DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), который имеет филиалы в Гамбурге (ускоритель FLASH — Free-electron LASer in Hamburg) и Цойтене (фотоинжектор PITZ), в Японии в Организации по изучению высокоэнергетических ускорителей (КЕК), в России в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) (Дубна) и Институте прикладной физики (ИПФ) РАН (Нижний Новгород), а также в США (Аргоннская национальная лаборатория и Национальная ускорительная лаборатория SLAC).

Другая особенность современных ЛСЭ — это возможность формирования последовательности (пачек, пучков) микроимпульсов, что является необходимым условием для проведения большого количества экспериментов с излучением ЛСЭ и для значительного улучшения статистической выборки измерений. Так, в Европейском рентгеновском ЛСЭ (European XFEL) предусмотрена возможность генерации пучков из 2700 микроимпульсов (временной промежуток между импульсами в пучке 222 пс) с частотой повторения 10 Гц.

В качестве примера приведём наиболее яркие результаты последнего времени по генерации электронных пучков лазерными импульсами. На фотоинжекторе FLASH ускорителя DESY при использовании гауссовых лазерных импульсов длительностью 10 пс сгенериро-

ваны электронные пучки с зарядом 1 нКл и эмиттансом 2,1 мм мрад при энергии 100 МэВ [1]. На фотоинжекторе PITZ при использовании 21,5-пикосекундных лазерных импульсов трапецеидальной формы (квазицилиндрических пучков) с фронтами 2 пс [2] достигнут рекордно малый для электронных пучков с зарядом 1 нКл нормализованный эмиттанс — 0,7 мм мрад [3].

В 1959 г. в работе [4] было показано, что однородно заполненное эллиптическое поперечное фазовое распределение пучка отвечает минимальному нормализованному эмиттансу. Такое распределение называют распределением Капчинского–Владимирского. Основным преимуществом данного распределения является то, что кулоновские силы расталкивания пространственного заряда линейны и они могут быть компенсированы средствами электронной оптики. Численные расчёты показали, что обобщение этого распределения для трёхмерного (3D) случая (3D-эллипсоида) соответствует значительному снижению эмиттанса пучка. До настоящего времени такие электронные пучки, организованные в пачки (пучки), не были реализованы в экспериментах.

Первым шагом на пути к формированию эллипсоидальных электронных пучков является генерация соответствующей формы лазерных импульсов, используемых для фотоэмиссии электронов. У таких импульсов распределение интенсивности внутри эллипсоидального объёма однородно, а снаружи строго равно нулю. Однако до сих пор не были развиты экспериментально приемлемые методы формирования эллипсоидальных структур у лазерных импульсов. Важно подчеркнуть, что с экспериментальной точки зрения генерация подобных лазерных импульсов невозможна из-за бесконечных значений производной поля на границе. Фактически ограничение связано с бесконечным пространственным и частотным спектром. Следовательно, в дальнейшем мы будем описывать электрическое поле таких лазерных импульсов подходящей гладкой функцией, например супергауссовой, а соответствующее распределение называть квазиэллипсоидальным.

Большинство современных исследований, направленных на профилирование лазерных импульсов, посвящено управлению распределением интенсивности либо во времени, либо в пространстве. Примеры полноценного 3D-профилирования представлены в немногих пионерских работах. Так, в работе [2] получены ультрафиолетовые цилиндрические пучки при использовании независимого последовательного профилирования во времени и пространстве. Метод основан на использовании поляризационного фильтра Шольца. Временное профилирование осуществлялось с помощью 10 одноосных кристаллов, повёрнутых относительно друг друга. Разность групповых скоростей обыкновенной и необыкновенной волн позволяет реализовывать одномерное профилирование.

Отметим, что цилиндрические импульсы уже позволили получить серьёзный выигрыш в эмиттансе по сравнению с эмиттансом при инъекции непрофилированного (гауссова) пучка. В работе [5] предложен весьма оригинальный, но далеко не универсальный подход к формированию квазиэллипсоидальных пучков, основанный на применении прибора Dazzler французской фирмы Faslite и линзы со значительной хроматической аберрацией. 3D-эллипсоидальная структура в этом случае фор-

мируется в дальней зоне. Авторы работы [6] предложили создать эллипсоидальный электронный пучок уже после стадии инжекции, в так называемом режиме выдувания. В этом случае катод должен облучаться ультракоротким фемтосекундным лазерным импульсом, а электрическое поле в момент эмиссии должно достигать достаточно больших амплитуд ($> 100 \text{ МВ м}^{-1}$ для практических значений заряда пучка).

Рассмотренные подходы имеют принципиальные ограничения по энергии импульса и не годятся для формирования электронных сгустков с зарядом $\sim 1 \text{ нКл}$, что требует развития альтернативных подходов. Один из перспективных методов управления пространственно-временным распределением интенсивности основан на использовании спектронов — импульсов со значительной линейной частотной модуляцией [7]. В случае, когда длительность импульса значительно больше своего фурье-предела, управление формой частотного спектра соответствует управлению распределением интенсивности во времени. В связи с этим для формирования цилиндрических импульсов необходимо сформировать прямоугольное распределение интенсивности частотного спектра и квазиплоское поперечное распределение интенсивности. Такая задача успешно решена в [8] с использованием программируемых модуляторов света (Spatial Light Modulator — SLM), и цилиндрические импульсы длительностью 42 пс были получены в экспериментах. В той же работе продемонстрирован оригинальный подход к созданию квазиэллипсоидальных лазерных импульсов. Импульсы обладают 90° -ной осевой симметрией и в двух взаимно ортогональных продольных сечениях представляют собой эллипсы.

В работе [9] предложено использовать профилированную чирпирующую решётку Брэгга для формирования 3D-эллипсоидальных импульсов из цилиндрических. Насколько известно авторам настоящей статьи, это первая успешная реализация в экспериментах 3D-эллипсо-

идальных импульсов с осевой симметрией. Длительность импульсов составила 264 пс.

В настоящей статье рассматриваются особенности действующего линейного ускорителя электронов PITZ и созданной для него лазерной системы с возможностью генерации профилированных импульсов ультрафиолетового диапазона. Обсуждается метод формирования предельно коротких (длительностью несколько пикосекунд) эллипсоидальных импульсов с использованием профилированной решётки Брэгга и программируемого пространственного модулятора света, представлены результаты по генерации электронных сгустков на ускорителе PITZ. Рассмотрен подход к формированию аксиально-симметричных квазиэллипсоидальных структур с линейным возрастанием интенсивности от начала импульса к его "хвосту", а также представлены экспериментальные результаты по формированию треугольных импульсов.

2. Генерация электронных пучков высокой яркости в современных фотоинжекторах

2.1. Линейный ускоритель PITZ

Фотоинжектор PITZ с момента создания предназначался для разработки и оптимизации источников электронных пучков высокой яркости для современных ЛСЭ, в частности для пользовательских установок на основе сверхпроводящих линейных ускорителей. Выбор технологии фотоинжектора обусловлен исключительными требованиями к свойствам электронных пучков — большая плотность фазового объёма при высокой стабильности и скважности. Принципиальная схема линейного ускорителя PITZ представлена на рис. 1.

Источником электронов фотоинжектора PITZ является СВЧ-фотопушка на основе ускоряющей структуры с $1\frac{1}{2}$ ячейками и двумя магнитными (соленоидными)

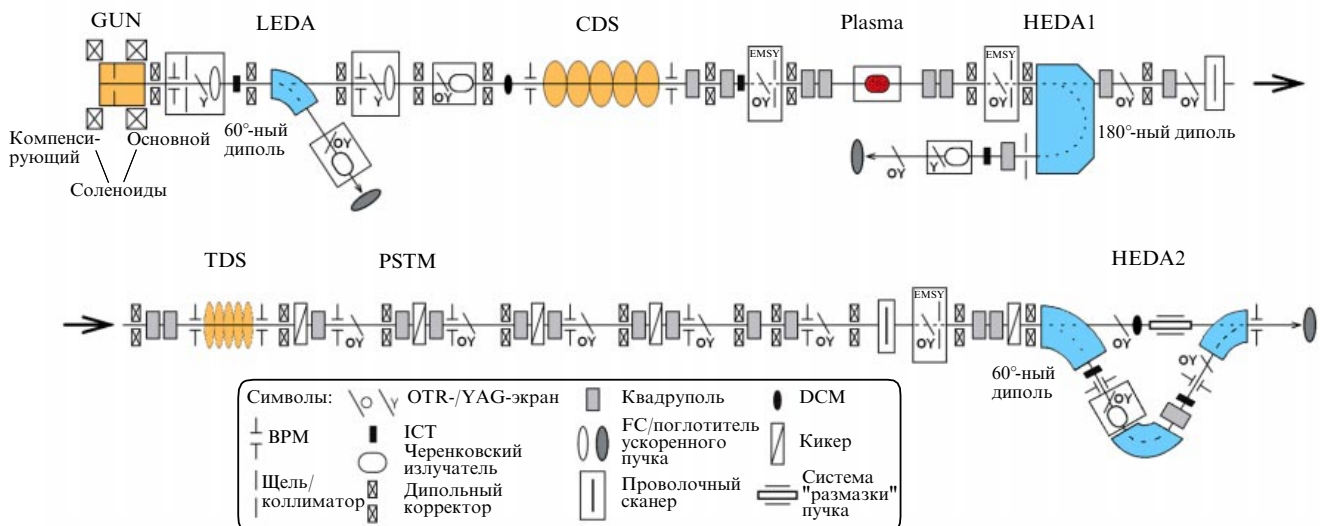


Рис. 1. Схема линейного ускорителя PITZ: GUN — СВЧ-фотопушка, CDS (CutDisk Structure) — линейная ускоряющая секция (бустер), TDS (Transverse Deflecting System) — поперечно отклоняющая СВЧ-структура, LEDA (Low Energy Dispersive Arm) и HEDA1,2 (High Energy Dispersive Arms) — дипольные магниты для измерения продольного момента электронных сгустков, PSTM (Phase Space Tomography Module) — периодическая система квадрупольных магнитов для томографии поперечного фазового пространства электронных пучков, Plasma — плазменная секция для изучения плазменного кильватерного ускорения, EMSY (Emittance Measurement System) — система измерения эмиттанса пучка, BPM (Beam Position Monitor) — монитор положения пучка, ICT (Integrating Current Transformer) — пояс Роговского, OTR (Optical Transition Radiation screen) — экран оптического переходного излучения, DCM (Dark Current Monitor) — монитор темного тока.

линзами для компенсации поперечного эмиттанса. Десятимегаваттный клистрон со средней частотой 1,3 ГГц обеспечивает пиковую мощность стоячей волны в ускоряющей структуре пушки, соответствующую максимальной напряжённости электрического поля на поверхности фотокатода порядка 60 МВ м^{-1} , что отвечает максимальному ускорению электронов до 6,5 МэВ. Дальнейшее ускорение электронных сгустков до энергий 20–25 МэВ осуществляется в бустерной ускорительной секции (CDS booster). Высокая квантовая эффективность Cs_2Te -фотокатода ($\sim 5\text{--}10\%$), расположенного в центре задней стенки СВЧ-пушки, обеспечивает генерацию электронных пучков с большим зарядом (до 5 нКл). Пучки, следующие с частотой повторения 1 МГц, группируются в цуги до 600 штук, частота повторения цугов составляет 10 Гц. Такая временная структура обеспечивается благодаря соответствующей организации импульсов фотокатодного лазера.

В настоящее время основная лазерная система, применяемая в PITZ, разработана в Институте Макса Борна (Max-Born-Institute) в Берлине. Эта система уже предусматривает возможность временного формирования цилиндрических лазерных импульсов: продольное распределение интенсивности импульсов может варьироваться от гауссова (полная ширина на половине высоты (FWHM) $\sim 11,5$ пс) до трапецеидального (20–22 пс (FWHM) с фронтами 2 пс) [2].

Результаты экспериментальной оптимизации поперечного нормализованного эмиттанса приведены на рис. 2 как функция заряда пучка в сравнении с результатами соответствующих расчётов динамики пучка. Расчёты проводились с использованием программного кода ASTRA [10]. Синие кривые соответствуют номинальным параметрам фотоинжектора Европейского рентгеновского ЛСЭ: амплитуде электрического СВЧ-поля на катоде $60,6 \text{ МВ м}^{-1}$ и трапецеидальным (flattop) лазерным импульсам. Красные кривые отвечают стартовым параметрам той же установки: амплитуде 53 МВ м^{-1} и гауссову профилю (11,5 пс (FWHM)) фотокатодного лазерного импульса. Эти экспериментальные кривые также сравниваются с результатами численных расчётов. Представ-

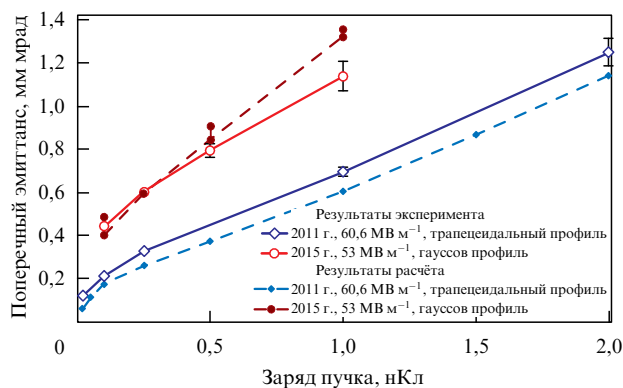


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Измеренный (сплошные кривые) и расчётный (пунктирные кривые) нормализованный эмиттанс в зависимости от заряда пучка. Красные кривые соответствуют амплитуде СВЧ-поля на катоде $60,6 \text{ МВ м}^{-1}$ при использовании трапецеидальных фотокатодных импульсов длительностью 21,5 пс (FWHM) и длиной фронтов порядка 2 пс. Синие кривые получены для меньшего поля на катоде (53 МВ м^{-1}) при применении гауссовых лазерных импульсов длительностью 11,5 пс (FWHM).

ленные на рис. 2 результаты наглядно демонстрируют важность профилирования фотокатодных лазерных импульсов и необходимость достижения высоких электрических полей на фотокатоде.

2.2. Численная оптимизация фотоинжектора PITZ для различных профилей лазерного излучения

Из сравнения кривых эмиттанса для различных профилей импульсов фотокатодного лазера (см. рис. 2) видно, что переход от продольного гауссова профиля к продольному трапецеидальному приводит к значительному уменьшению поперечного эмиттанса для всего диапазона заряда пучка. Однако в случае, представленном на рис. 2, измерения (а также соответствующие расчёты) проводились при разных значениях электрического поля на фотокатоде, которое также оказывает влияние на яркость электронного источника, поэтому выделить "чистое" влияние именно формы импульса на величину эмиттанса затруднительно. В связи с этим были проведены расчёты динамики пучка при различных формах фотокатодных лазерных импульсов, но при фиксированной амплитуде электрического поля. Результаты таких расчётов приведены ниже.

Известно, что в фотоинжекторах электронов основной причиной возрастания поперечного эмиттанса пучка являются кулоновские силы расталкивания пространственного заряда. Нелинейный характер сил приводит к нелинейным искажениям поперечного фазового пространства и к увеличению эмиттанса. Известно также, что поле заряда, равномерно распределённого внутри эллипсоида, является линейным и, следовательно, не приводит к нелинейным искажениям фазового пространства. Этот факт и стимулировал разработку лазерной системы для генерации эллипсоидальных электронных пучков посредством соответствующего профилирования лазерных импульсов. Расчёты для различных профилей лазерного импульса для фотоинжектора PITZ были проведены с использованием кода ASTRA [10] для параметров, приведённых в таблице, где также представлены результаты оптимизации поперечного нормализованного эмиттанса электронного пучка.

В расчётах использовались три характерных профиля излучения фотокатодного лазера (рис. 3): два цилиндрических — с гауссовым и трапецеидальным временным распределением — и трёхмерный — с эллипсоидальным однородным распределением интенсивности. Численная оптимизация нормализованного эмиттанса проводилась

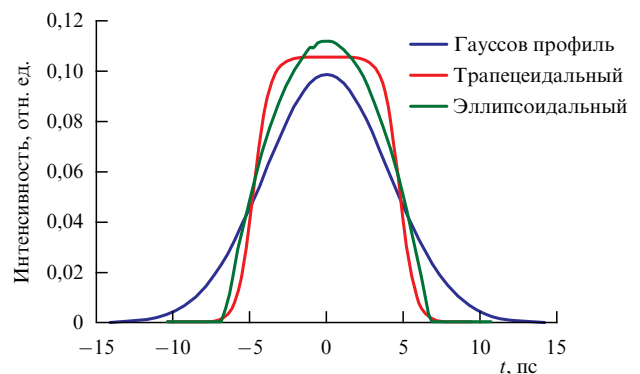


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Продольные профили лазерных импульсов, используемых для численного моделирования.

Таблица. Параметры численных расчётов для фотоинжектора PITZ с применением различных профилей импульса фотокатодного лазера: цилиндрического с гауссовым и трапецидальным временным распределением и эллипсоидального

Условия и параметры		Трёхмерная структура		
		Цилиндр		Эллипсоид
		Гауссов продольный профиль	Трапецидальный продольный профиль	Однородное заполнение
Фото-катодный лазер	Длительность импульса (FWHM)	9,5 пс		
	Поперечное распределение	Равномерное радиальное распределение		Однородное заполнение
	Среднеквадратичный (rms) поперечный размер	0,385 мм	0,423 мм	0,353 мм
СВЧ-пушка	Электрическое поле на катоде	60 МВ м ⁻¹		
	Фаза*	-1,2°	-4,2°	-2,8°
	Поле соленоида (максимальное)	-0,2247 Тл	-0,2248 Тл	-0,2260 Тл
Бустер	Электрическое поле (максимальное)	17,1 МВ м ⁻¹		
	Фаза*	0		
Электронный пучок ($z = 5,277$ м)	Заряд	0,5 нКл		
	Средняя кинетическая энергия	21,0 МэВ	21,0 МэВ	21,0 МэВ
	Нормализованный поперечный эмиттанс (проектный)	0,80 мм мрад	0,64 мм мрад	0,35 мм мрад
	Усреднённый локальный (slice) поперечный эмиттанс	0,49 мм мрад	0,57 мм мрад	0,33 мм мрад
	Длина банча (rms)	1,44 мм	1,20 мм	1,34 мм
	Пиковый ток пучка	35,4 А	39,5 А	37,8 А
	Продольный эмиттанс пучка	34 мм кэВ	22 мм кэВ	12,5 мм кэВ

* По отношению к фазе максимального набора энергии пучка.

для пучка с зарядом 0,5 нКл и позиции в линейном ускорителе 5,277 м, в которой измерялось поперечное фазовое пространство. Длина импульса фотокатодного лазера выбиралась близкой к экспериментальным значениям при измерениях, представленных в данной статье. Минимизация эмиттанса проводилась варьированием основных параметров фотоинжектора: тока основного соленоида, поперечного размера лазерного пучка на катоде и начальной фазы СВЧ-пушки. Остальные параметры соответствуют номинальным экспериментальным значениям PITZ.

Результаты оптимизации приведены в таблице и на рис. 4, на котором помимо нормализованных эмиттансов показаны также поперечные и продольные фазовые пространства и профили электронных пучков.

Особый интерес представляет фазовое распределение вдоль электронного пучка. Локальный (slice) эмиттанс показан на рис. 5 вместе с профилем тока пучка для трёх профилей излучения фотокатодного лазера. Из сравнения локальных эмиттансов также видно значительное уменьшение локального фазового объёма электронного пучка, полученного с применением эллипсоидальных лазерных импульсов. Из приведённых результатов расчётов следует, что применение эллипсоидальных лазерных импульсов приводит к значительному улучшению свойств электронного пучка: сокращению поперечного и продольного гало и снижению степени нелинейности продольного фазового пространства. Предварительный анализ формы электронного пучка, полученного с использованием эллипсоидальных лазерных импульсов,

показывает, что в результате действия пространственного заряда (включая силы со стороны заряда изображения в процессе фотоэмиссии) эллипсоидальная форма первоначального пучка деформируется. Это свидетельствует о возможной дальнейшей оптимизации фотоинжектора посредством соответствующей деформации лазерного импульса с целью генерации электронного эллипсоида.

3. Трёхмерное профилирование лазерных импульсов

3.1. Катодный лазер

для линейного ускорителя электронов PITZ

Лазерная система состоит из волоконного лазера, дискового Yb:KGW-усилителя¹ с диодной накачкой, формирователя пространственно-временной структуры, генераторов второй гармоники (ГВГ) и четвёртой гармоники (ГЧГ), а также системы диагностики параметров излучения. Принципиальная схема представлена на рис. 6. Волоконная часть включает в себя: задающий генератор (ЗГ), генерирующий импульсы длительностью 200 фс с частотой повторения 27 МГц, волоконный стретчер, предварительный усилитель, систему формирования пучков импульсов (макроимпульсов), делитель излучения на два канала (рабочий и диагностический) и два

¹ KGW — калий-гадолиниевый вольфрамат.

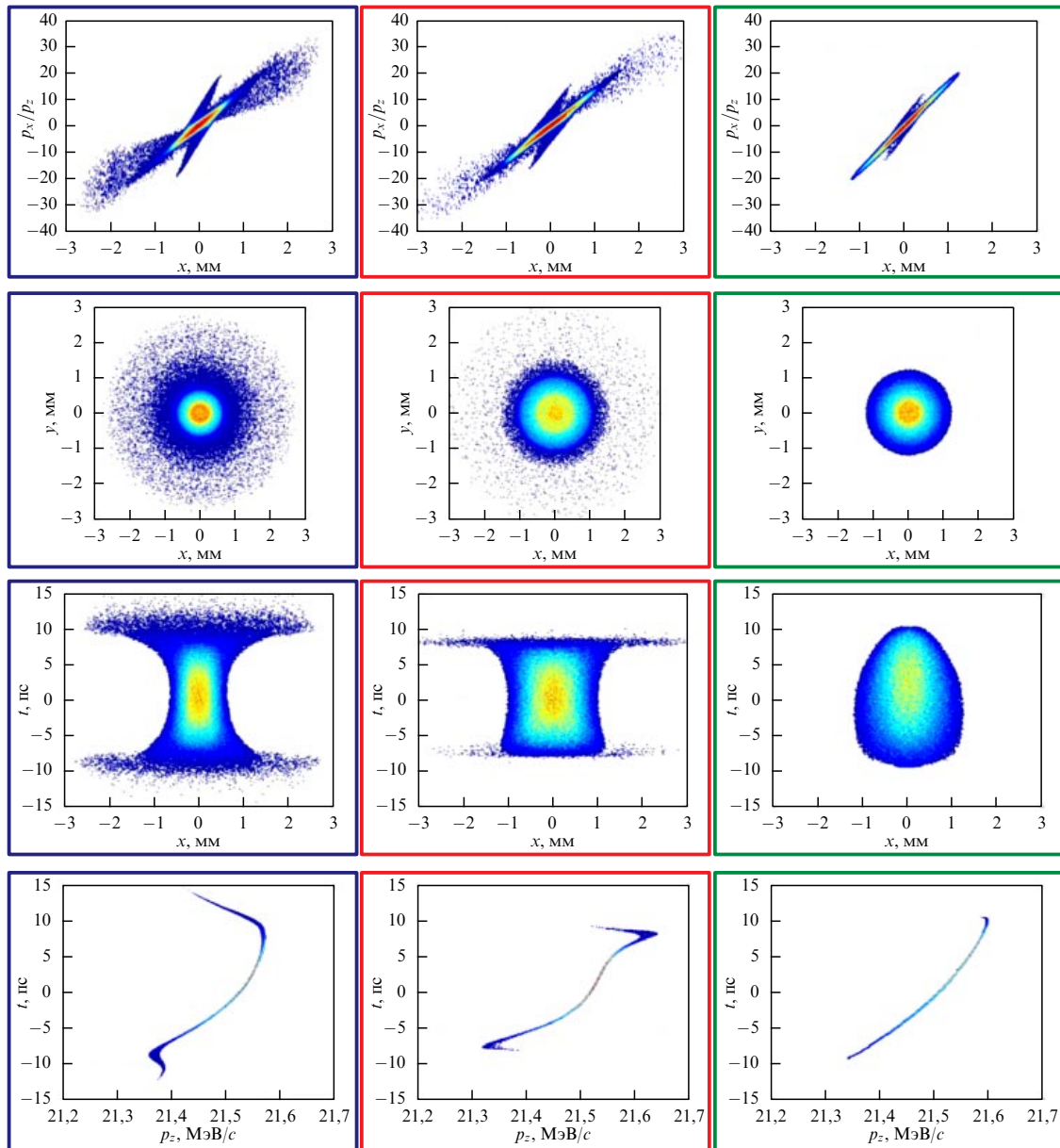


Рис. 4. Результаты численной оптимизации поперечного эмиттанса электронного пучка для гауссова (левая колонка), трапецидального (центральная колонка) и эллипсоидального (правая колонка) лазерного импульсов. 1-й ряд — поперечное (горизонтальное, $x-p_x$) фазовое пространство, 2-й ряд — поперечное $x-y$ -распределение, 3-й ряд — боковая $x-t$ -проекция, 4-й ряд — продольное p_z-t -фазовое пространство электронного пучка.

широкоапертурных волоконных усилителя. Волокно 3Г намотано на барабан из пьезокерамики для прецизионной подстройки частоты следования импульсов в лазере к ближайшей субгармонике частоты клистрона.

Рабочий канал лазера предназначен для дальнейшего усиления, формирования профилируемых импульсов и преобразования их в оптические гармоники (вторую и четвёртую). Излучение диагностического канала используется в кросскорреляторе для измерений пространственно-временных характеристик выходного излучения рабочего канала. В кристалле кросскоррелятора организовано нелинейное взаимодействие (генерация второй гармоники/генерация третьей гармоники) импульсов диагностического канала и профилированных импульсов инфракрасного/ультрафиолетового диапазона. Длительность импульсов диагностического канала, которая

близка к своему фурье-пределу, составляет ≈ 200 фс. Длительность импульсов рабочего канала ≈ 20 пс. В этом случае измеряемый сигнал пропорционален распределению интенсивности в профилированном импульсе. Измерения осуществляются либо с использованием скоростной ПЗС-камеры (ПЗС — прибор с зарядовой связью), либо фотодиода. Переменная линия задержки для быстрого временного сканирования выполнена в виде участка (80 м) волокна диагностического канала, навитого на пьезокерамическую шайбу [11].

Излучение рабочего канала усиливается в многопроходном дисковом усилителе, в котором в качестве активных элементов используются кристаллы Yb:KGW. В усилителе имеется два квантрона. В первом реализовано пять V-проходов сигнала, а во втором — четыре V-прохода. Изображение поверхности активного эле-

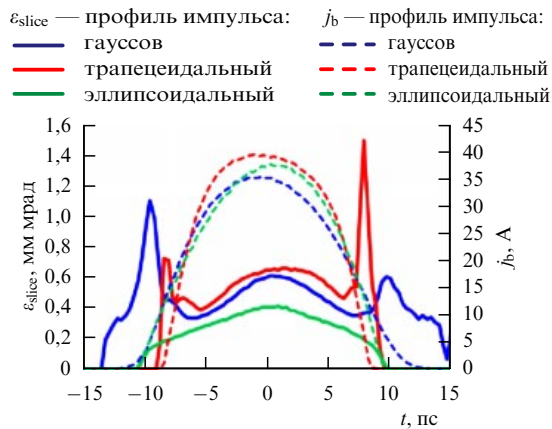


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Локальный эмиттанс ϵ_{slice} оптимизированных электронных сгустков для различных профилей фотокатодных импульсов (сплошные кривые). Соответствующие профили тока j_b пучка (штриховые кривые) относятся к правой оси ординат.

мента (АЭ) одного квантрона переносится без изменения масштаба на поверхность другого АЭ. Зеркала устанавливаются так, чтобы при каждом отражении от АЭ лазерный пучок смещался по поверхности зеркал и через определённое число отражений выводился из усилителя. Астигматизм, вызванный наклонным падением пучка на поверхности сферических зеркал, компенсируется специальной геометрией зеркального телескопа [12]. Усилитель позволяет увеличивать энергию импульса с 0,5 мкДж до 70 мкДж за два прохода.

Между прямым и обратным проходами усилителя установлен формирователь пространственно-временной структуры, который позволяет формировать квазиэллипсоидальные импульсы с 90°-ной симметрией. Распределение интенсивности у таких импульсов в ортогональных сечениях (xt и yt) представляет собой эллипсы.

Формирователь импульсов (рис. 7) представляет собой оптический компрессор, вносящий нулевую частотную дисперсию [8]. Формирователь состоит из двух дифракционных решёток, двух однократных телескопов Кеплера с цилиндрическими и сферическими линзами и двух жидкокристаллических модуляторов света SLM.

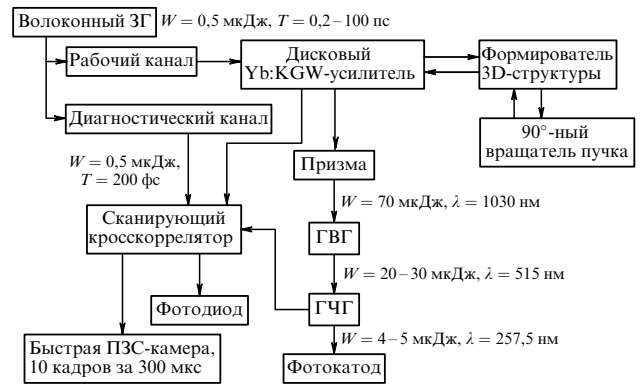


Рис. 6. Блок-схема лазера для линейного ускорителя PITZ DESY.

Модуляторы размещены в фокальных плоскостях телескопа с цилиндрическими линзами, который переносит изображение в меридиональной плоскости с одной дифракционной решётки на другую. В сагитальной плоскости такой трансляции изображения нет, поэтому в ней происходит дифракция. Перенос изображения с одного модулятора света на другой осуществляется телескопом со сферическими линзами. Перед вторым SLM установлена полуволновая пластинка, поворачивающая поляризацию излучения на 45°. Модулятор вносит разность фаз между ортогональными поляризациями в зависимости от подаваемого напряжения. Поляризатор и указанная полуволновая пластинка позволяют использовать SLM2 в режиме пространственно-спектральной амплитудной маски. Схема формирователя позволяет управлять распределением интенсивности спектра в пространстве. Напомним, что импульсы рабочего канала достаточно сильно chirпированы. В этом случае управление интенсивностью спектра соответствует управлению интенсивностью во времени. Более подробную информацию о работе формирователя и экспериментальных результатах генерации квазиэллипсоидальных импульсов можно найти в [8].

После формирования 3D-структуры излучение направляется в нелинейные кристаллы, где последовательно преобразуется во вторую и четвёртую гармо-

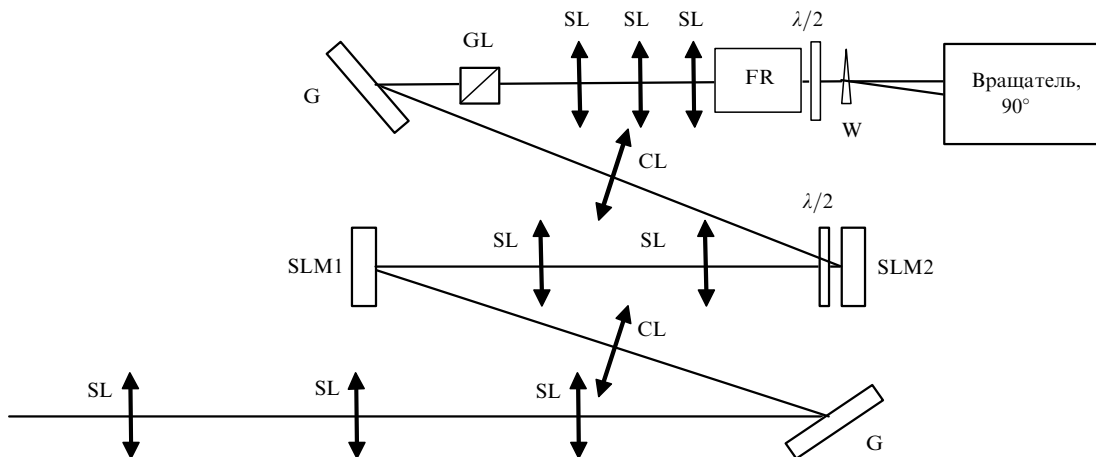


Рис. 7. Принципиальная схема формирователя импульсов с 90°-ной аксиальной симметрией: SL — сферическая линза, CL — цилиндрическая линза, G — дифракционная решётка, SLM — пространственный модулятор света, FR — 45°-ный вращатель Фарадея, W — кальцитовый клин, GL — призма Глана, $\lambda/2$ — полуволновая пластинка.

ники. Для увеличения эффективности преобразования и сохранения 3D-распределения интенсивности создаётся угловой чирп лазерных импульсов. Величина чирпа рассчитывается так, чтобы каждая спектральная компонента в нелинейном кристалле распространялась под оптимальным углом к оптической оси. Угловой чирп может создаваться призмой или дифракционной решёткой. Мы использовали призму. Управлять величиной чирпа можно с помощью телескопов Кеплера.

После генерации гармоник ультрафиолетовое излучение с помощью транспортной линии направляется на фотокатод инжектора. Перед транспортной линией часть излучения ответвляется для диагностики в кросскоррелятор. Отметим также, что в схеме лазера и в транспортной линии реализован перенос изображения для корректной транспортировки профилированных лазерных пучков.

3.2. Управление формой импульсов с использованием объёмной профилированной чирпирующей решётки Брэгга

В ряде задач, связанных с генерацией электронных сгустков с поверхности фотокатода, необходимо использовать 3D-эллипсоидальные импульсы длительностью всего несколько пикосекунд. Требования к фронтам импульса и к отклонению формы трёхмерного распределения интенсивности от идеального эллипсоида определяются необходимыми характеристиками электронных пучков.

В работе [9] предложен и экспериментально подтверждён универсальный метод формирования эллипсоидальных импульсов с использованием пространственного модулятора света (SLM) и объёмной профилированной решётки Брэгга. На объёмную брэгговскую решётку, записанную внутри эллипсоидального объёма (и отсутствующую вне его), направляется цилиндрический импульс. Решётка записывается в объёме фототерморефрактивного стекла [13]. Цилиндрический импульс, который готовится с использованием формирователя пространственно-временной структуры на основе SLM [8, 9], как правило, обладает линейной частотной модуляцией. При отражении от пространственно профилированной брэгговской решётки такой импульс трансформируется в эллипсоидальный (рис. 8).

В процессе формирования импульса с цилиндрическим распределением интенсивности в пространстве с использованием схемы на основе SLM имеется возможность управлять и фронтом, и формой. При фиксированной длительности исходного чирпированного гауссова импульса применение спектральных масок с более резкими фронтами, вырезающих из гауссова спектра квази-прямоугольный, приводит не только к укорочению фронта во временной области, но и к увеличению модуляции продольного (временного) распределения интенсивности [8]. Если исходный гауссов импульс обладает строго

линейной модуляцией частоты, то увеличение его длительности по отношению к его фурье-пределу перед наложением спектральной маски позволяет уменьшить модуляцию во временной области.

Формирование цилиндрического импульса является лишь необходимым первым шагом на пути к формированию 3D-эллипсоидальных структур. Профилированная решётка Брэгга не только производит профилирование распределения интенсивности спектра в пространстве, но и изменяет фазу частотного спектра и, как следствие, длительность импульса. Управлять длительностью импульса можно, изменяя частотный чирп в исходном цилиндрическом импульсе. Это может быть реализовано с использованием как оптического компрессора, так и другой непрофилированной в пространстве брэгговской решётки с противоположной последовательностью отражательных слоёв. Ключевыми параметрами решётки Брэгга являются спектральная полоса отражения и вносимый частотный чирп.

В качестве примера рассмотрим возможность формирования 3D-эллипсоидальных импульсов с длительностью 7 пс в инфракрасном диапазоне длин волн из лазерных импульсов с гауссовым спектром с полной шириной на половине высоты (FWHM) $\Delta\Omega = 22$ нм и центральной длиной волны 1030 нм. Отметим, что с математической точки зрения из гауссова спектра может быть вырезан прямоугольник с произвольной шириной, однако энергетическая эффективность такого вырезания может быть крайне малой. Оптимальная ширина прямоугольника $2A$, вписанного в кривую гауссова распределения, связана с $\Delta\Omega$ следующим соотношением [8]:

$$2A = \frac{\Delta\Omega}{\sqrt{2 \ln 2}}.$$

В этом случае эффективность составляет 48%. Применение двумерной амплитудной маски к поперечному распределению интенсивности позволяет трансформировать гауссов профиль в прямоугольный (рис. 9).

Трёхмерное распределение интенсивности во времени и пространстве представлено на рис. 10. Длительность приведённого эллипсоида 7,4 пс, при этом длительность фронтов составляет 1,6 пс.

Аналогичная структура трёхмерного распределения интенсивности получена в экспериментах, проведённых в ИПФ РАН [9]. Пример экспериментального распределения приведён на рис. 11.

3.3. Формирование квазитреугольных импульсов в эксперименте

В последнее время получил широкое распространение метод ускорения электронов в поле кильватерной волны, возникающей в периодической волноводной структуре при прохождении через неё более мощного электронного пучка с большим зарядом. Наибольшая эффективность может быть достигнута, когда распределение заряда в инициирующем пучке представляет собой треугольник во времени. Такие пучки могут быть созданы на стадии инжекции с поверхности фотокатода.

Для этого может использоваться метод управления пространственно-временным распределением интенсивности лазерных импульсов на основе пространственного модулятора света, описанный выше. В этом случае из гауссова спектра необходимо вырезать треугольник.

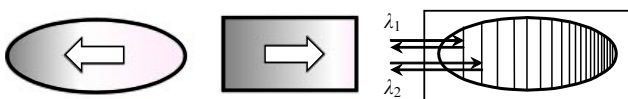


Рис. 8. Принципиальная схема формирования 3D-эллипсоидальных импульсов с использованием объёмной профилированной решётки Брэгга.

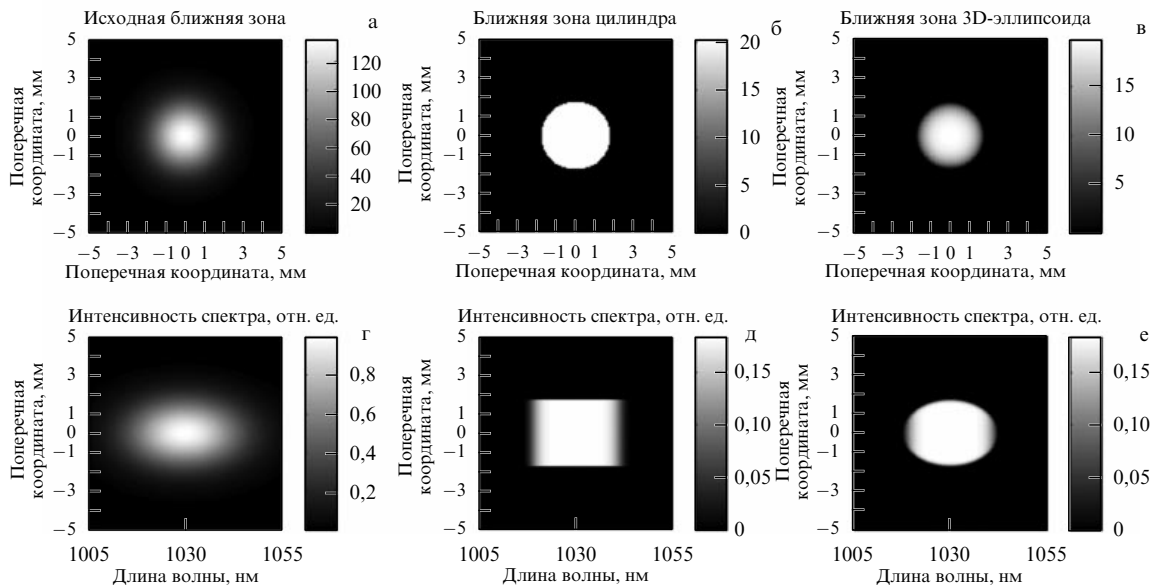


Рис. 9. Трансформация 3D-гауссова импульса в цилиндрический и 3D-эллипсоидальный. (а–в) Последовательная трансформация ближней зоны из гауссовой (исходной) в квазиоднородную и в ближнюю зону 3D-эллипсоида. (г–е) Соответствующая трансформация спектральной интенсивности.

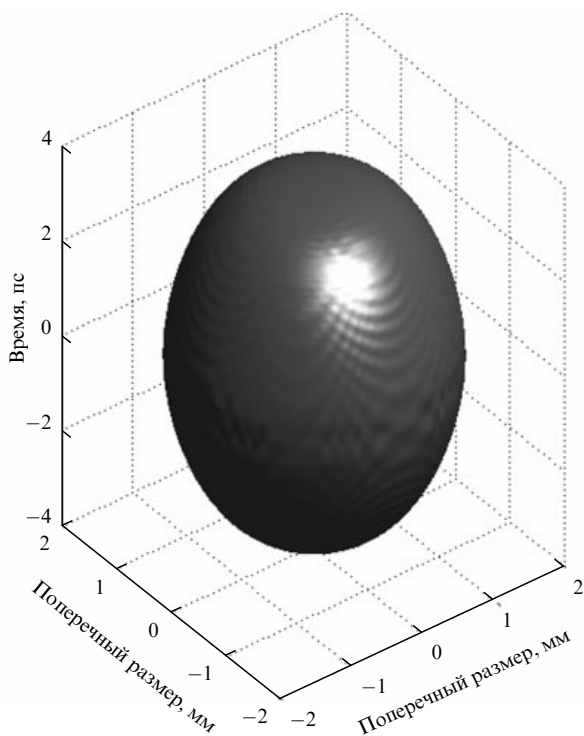


Рис. 10. 3D-распределение интенсивности эллипсоидального импульса.

Если лазерный импульс обладает значительной линейной частотной модуляцией (длительность импульса существенно превышает фурье-предел), то распределение интенсивности во времени также будет треугольным. Управление длительностью треугольного импульса может быть реализовано в экспериментах посредством изменения как фазы спектра, так и длины подошвы спектрального треугольника. Длительность заднего фронта треугольного импульса определяется как остротой спек-

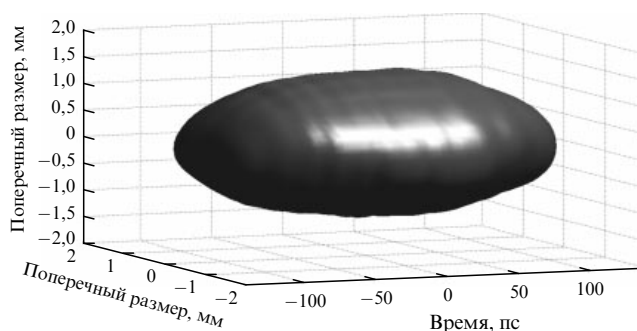


Рис. 11. 3D-квазиэллипсоидальное распределение интенсивности, полученное в эксперименте.

тральной маски, вырезающей из гауссова импульса треугольник, так и величиной линейного chirpa. Экспериментальная реализация треугольных импульсов представлена на рис. 12.

Важно отметить, что лазерные импульсы с треугольным распределением интенсивности во времени и квазиплоским в пространстве могут быть использованы для облучения профилированной решётки Брэгга. В этом случае распределение интенсивности будет обладать аксиальной симметрией, а величина интенсивности будет линейно возрастать во времени. Такие импульсы могут использоваться для облучения фотокатодов с целью формирования квазиэллипсоидальных сгустков с большим пространственным зарядом. Большое поле на хвосте импульса позволит преодолеть кулоновские силы притяжения оторвавшегося от поверхности катода электронного сгустка.

4. Генерация и характеристика электронных пучков в фотоинжекторе PITZ

Первые эксперименты на PITZ по генерации электронных сгустков с использованием лазерной системы, позво-

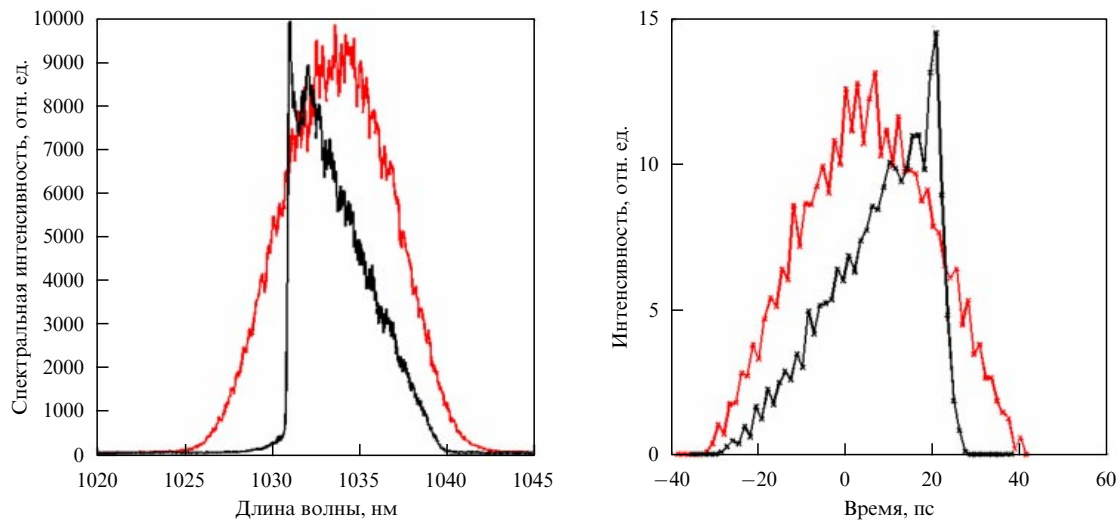


Рис. 12. Формирование треугольных импульсов в эксперименте.

ляющей управлять распределением интенсивности лазерных импульсов, были начаты в декабре 2016 г. Основной задачей являлась демонстрация возможности стандартной оптимизации яркости электронных пучков, что подразумевает измерение поперечного эмиттанса и продольного профиля электронных сгустков. В качестве номинального заряда для этого цикла измерений был выбран заряд пучка 0,5 нКл. Для профилирования лазерного пучка применялась экспериментально подобранная маска пространственного модулятора света (SLM-маска 034). На рисунке 13а приведены полученные с использованием кросскоррелятора профили импульсов инфракрасного (ИК) диапазона с применением и без применения маски на SLM.

Использование маски приводит к значительному укорочению импульса ИК-диапазона от 24–26 пс до 10–12 пс. С учётом ГВГ и ГЧГ длительность ультрафиолетового импульса на фотокатоде ещё более уменьшается — до величины порядка 9–10 пс, что соответствует входным параметрам расчётов, приведённых в разделе 2.2.

Для поперечной диагностики лазерного пучка применялась ПЗС-камера, расположенная в плоскости, оптически эквивалентной поверхности фотокатода. При-

меры полученных изображений пучка без применения и с применением формирующей диафрагмы диаметром 1,2 мм приведены соответственно на рис. 13б и в.

Пиковые мощности СВЧ-излучения 6,4 и 3 МВт для СВЧ-пушки и бустерной ускорительной секции соответственно использовались для генерации и ускорения электронных сгустков. Обе ускоряющие структуры были настроены на фазы максимального ускорения. Результаты измерений — средний продольный импульс $\langle p_z \rangle$ и среднеквадратичный разброс продольных импульсов p_z^{rms} пучка — приведены на рис. 14а и 15а в зависимости от фазы пушки и бустера соответственно. На рисунках 14б и 15б показаны распределения плотности частиц пучка по продольному импульсу p_z для номинальных (нулевых) фаз. В качестве нулевых фаз в обоих случаях выбирались фазы, соответствующие максимальному набору энергии пучка в ускоряющей структуре. Это отвечает среднему продольному импульсу $\langle p_z \rangle$ электронного пучка 6,57 МэВ/с на выходе из пушки и 22,3 МэВ/с после ускорения в бустере. Соответствующие среднеквадратичные разбросы по продольному импульсу составляют 25 и 20 кэВ/с. Минимальные разбросы по продольному импульсу, измеренные для фазы пушки -8° и фазы бустера 1° , — 4,8 и 19,0 кэВ/с соответственно.

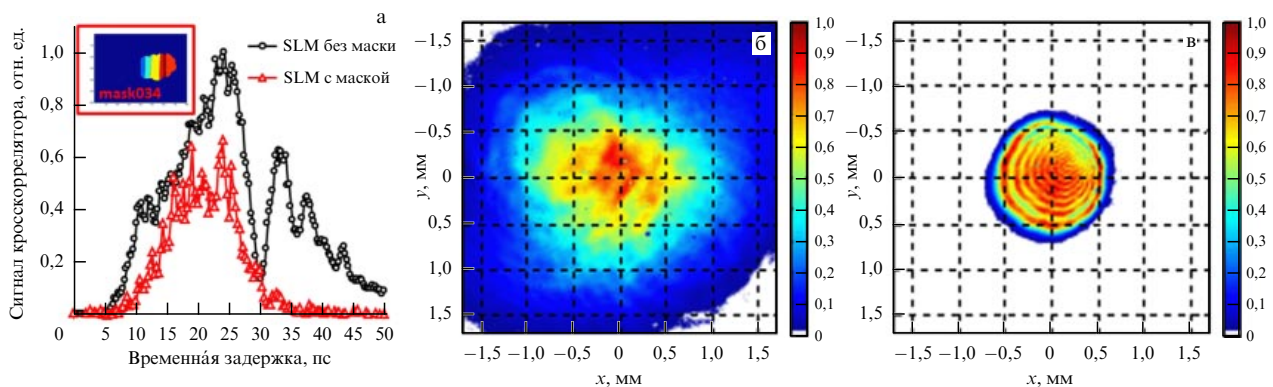


Рис. 13. (В цвете онлайн.) (а) Измерение продольного профиля ИК-импульса фотокатодного лазера с помощью кросскоррелятора. Поперечное распределение интенсивности I (в отн. ед.) фотокатодного лазера: (б) для полного пучка и (в) для пучка, ограниченного диафрагмой диаметром 1,2 мм.

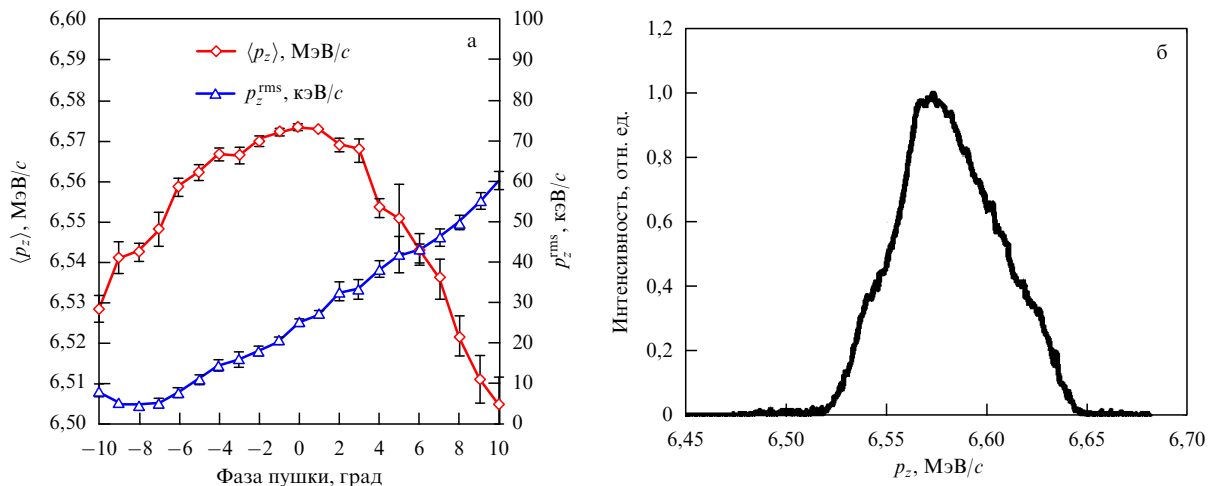


Рис. 14. (В цвете онлайн.) Продольный импульс электронного пучка на выходе из пушки: (а) в зависимости от фазы СВЧ-пушки; (б) проекция распределения, измеренного для нулевой фазы пушки.

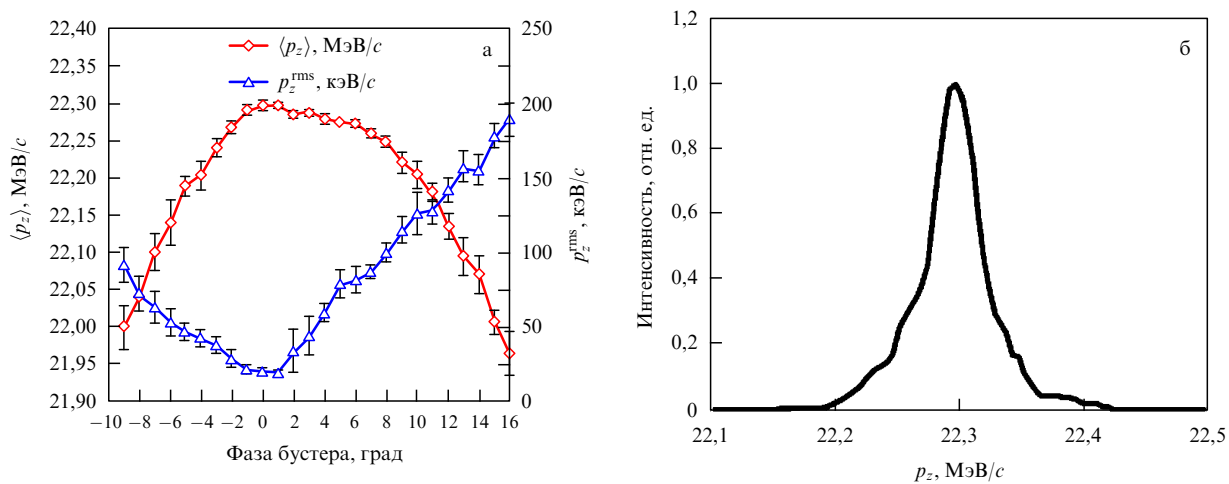


Рис. 15. (В цвете онлайн.) Продольный импульс электронного пучка после бустера: (а) в зависимости от фазы бустера; (б) проекция распределения, измеренного для нулевой фазы бустера. Фаза пушки для всех измерений зафиксировалась в нуле.

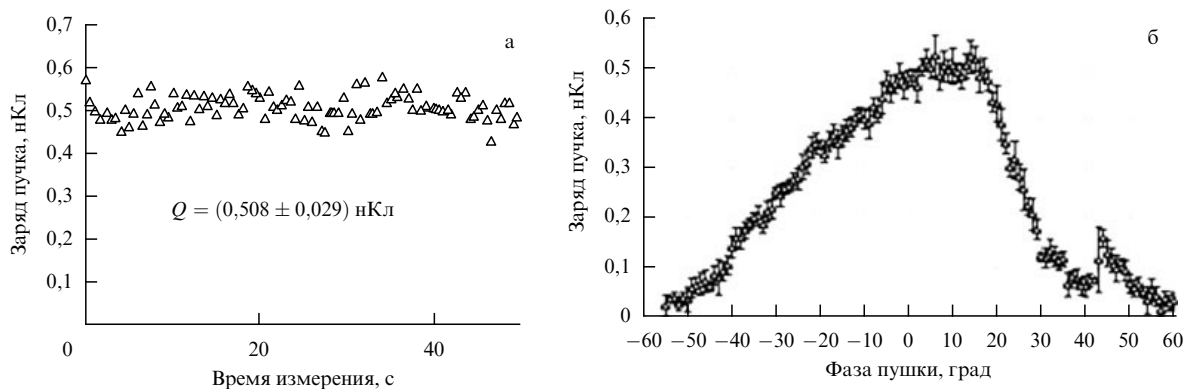


Рис. 16. Измеренный заряд пучка: (а) для нулевой фазы пушки, (б) в зависимости от фазы пушки.

Энергия использованного импульса фотокатодного лазера обеспечивала заряд пучка 0,5 нКл для нулевой фазы пушки (см. рис. 14) для лазерного пучка диаметром 1,2 мм на катоде. Заряд измерялся и контролировался с помощью пояса Роговского (производства компании Bergoz Instrumentation), расположенного на расстоянии

0,9 м от фотокатода. Типичные результаты измерения заряда пучка в этих условиях показаны на рис. 16. Из измерения фазовой зависимости видно, что выбранный режим фотоинжектора отвечает наличию значительных сил пространственного заряда пучка, что было также подтверждено измерениями длины электронных банчей.

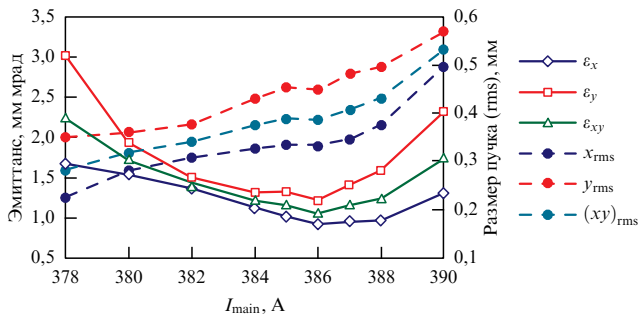


Рис. 17. (В цвете онлайн.) Поперечный эмиттанс и среднеквадратичный поперечный размер электронного пучка, измеренные в зависимости от тока основного соленоида.

Измерение поперечного эмиттанса в зависимости от тока основного соленоида проводилось с помощью стандартного для PITZ метода — сканирования 10-микрометровой вольфрамовой щелью. Лазерный пучок, как и в предыдущих измерениях, был ограничен диафрагмой диаметром 1,2 мм. Результаты измерений представлены на рис. 17, где помимо поперечного нормализованного эмиттанса показаны поперечные размеры пучка на сцинтилляционном экране из алюмоиттриевого граната (YAG) в точке измерения эмиттанса. Приведённые на рис. 17 величины размера пучка $(xy)_{\text{rms}}$ и эмиттанса ϵ_{xy} представляют собой средние геометрические соответствующих вертикальных и горизонтальных значений.

Поперечное распределение электронного пучка, горизонтальное и вертикальное фазовые пространства

для оптимального тока (386 А) соленоида показаны на рис. 18. Соответствующие значения измеренного эмиттанса: $\epsilon_{n,x} = 0,93$ мм мрад, $\epsilon_{n,y} = 1,22$ мм мрад, $\epsilon_{n,xy} = \sqrt{\epsilon_{n,x} \epsilon_{n,y}} = 1,06$ мм мрад.

Временной (продольный) профиль электронных пучков с зарядом 0,5 нКл измерялся с использованием поперечной отклоняющей СВЧ-структуры (Transverse Deflecting Structure — TDS). Профиль тока электронного сгустка показан на рис. 19а. Распределение плотности отклонённого пучка на первом экране после отклоняющей структуры показано на рис. 19б. Вертикальная ось на рис. 19б прокалибрована в пикосекунды в соответствии с фазой TDS (резонансная частота 2,998 ГГц) и согласуется с горизонтальной шкалой на рис. 19а. Измеренная длина электронного импульса $15,2 \pm 0,5$ пс. Аналогичные измерения для заряда (0,22 нКл) показали значительное уменьшение длительности электронного банча — величины $8,2 \pm 0,8$ пс. Это ещё одно непосредственное свидетельство значительного влияния пространственного заряда пучка на его длину, особенно в окрестности фотокатода, где энергия пучка ещё достаточно мала.

5. Заключение

С использованием лазерной системы, разработанной в Институте прикладной физики РАН для фотоинжектора PITZ, получены электронные сгустки с зарядом 0,5 нКл и поперечным эмиттансом 1,1 мм мрад. Лазерная система позволяет управлять пространственно-временным распределением интенсивности лазерных импульсов. В

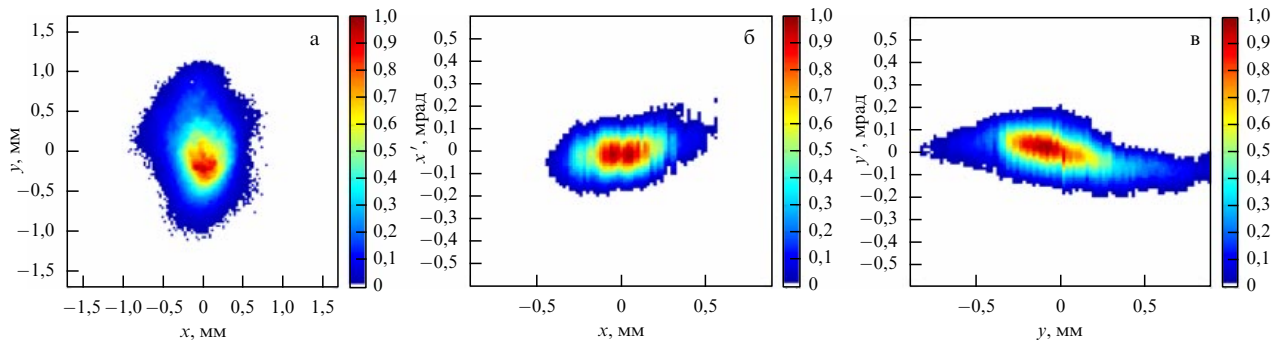


Рис. 18. (В цвете онлайн.) Экспериментально оптимизированный эмиттанс: (а) поперечное распределение электронного пучка на сцинтилляционном экране, (б) горизонтальное фазовое пространство, (в) вертикальное фазовое пространство.

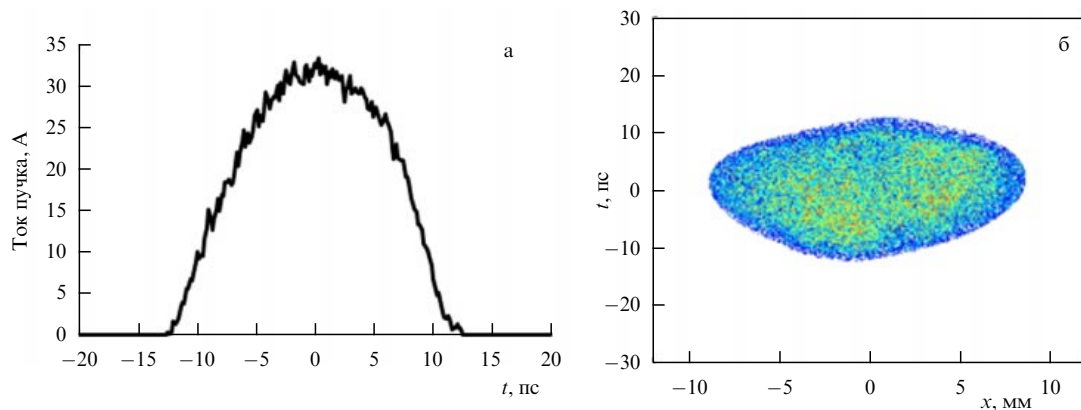


Рис. 19. (В цвете онлайн.) (а) Продольный профиль электронного пучка — распределение тока банча. (б) Измеренная форма банча — распределение плотности электронного пучка, отклонённого в вертикальном направлении.

статье рассмотрены методы формирования 3D-эллипсоидальных импульсов с использованием программируемых пространственных модуляторов света и профилированной объёмной чирпирующей решётки Брэгга. Внедрение этих методов в лазерную систему, используемую для генерации электронных сгустков с поверхности фотокатода, позволит в значительной степени уменьшить поперечный эмиттанс электронных пучков.

Работа выполнена в рамках государственного задания Российской Федерации 0035-2014-0016, а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 14.Z50.31.0007).

Авторы выражают благодарность Г. Асовой (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук (INRNE-BAS) (София, Болгария), Г. Амадуни, Н. Газарян, Б. Григоряну, Л. Хакобян и другим сотрудникам Института синхротронных исследований КЕНДЛ (Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission) (Ереван, Армения), принимавшим участие во вводе в эксплуатацию новой лазерной системы на линейном ускорителе PITZ.

Список литературы

1. Interim Report of the Scientific and Technical Issues (XFEL-STI) Working Group on a European XFEL Facility in Hamburg (Hamburg: DESY, 2005)
2. Will I, Klemz G *Opt. Express* **16** 14922 (2008)
3. Krasilnikov M et al. *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **15** 100701 (2012)
4. Kapchinskij I M, Vladimirskij V V, in *Proc. of 2nd Conf. on High Energy Accelerators and Instrumentation, 14 - 19 September, CERN, Geneva, 1959* (Ed. L Kowarski) (Geneva: CERN, 1959) p. 274
5. Li Y, Chemerisov S, Lewellen J *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12** 020702 (2009)
6. Musumeci P et al. *Phys. Rev. Lett.* **100** 244801 (2008)
7. Ахманов С А, Выслоух В А, Чиркин А С *Оптика фемтосекундных лазерных импульсов* (М.: Наука, 1988) с. 41; Пер. на англ. яз.: Akhmanov S A, Vysloukh V A, Chirkin A S *Optics of Femtosecond Laser Pulses* (New York: AIP, 1992)
8. Mironov S Yu et al. *Appl. Opt.* **55** 1630 (2016)
9. Mironov S Yu et al. *Laser Phys. Lett.* **13** 055003 (2016)
10. ASTRA particle tracking code, <http://www.desy.de/~mpyflo/>
11. Зеленогорский В В и др. *Квантовая электроника* **44** 76 (2014); Zelenogorskii V V et al. *Quantum Electron.* **44** 76 (2014)
12. Gacheva E I et al. *Opt. Express* **23** 9627 (2015)
13. Efimov O M et al. *Appl. Opt.* **38** 619 (1999)

Spatio-temporal shaping of photocathode laser pulses for linear electron accelerators

S.Yu. Mironov⁽¹⁾, A.V. Andrianov⁽¹⁾, E.I. Gacheva⁽¹⁾, V.V. Zelenogorskii⁽¹⁾, A.K. Potemkin⁽¹⁾, E.A. Khazanov⁽¹⁾, P. Boonpornprasert⁽²⁾, M. Gross⁽²⁾, J.D. Good⁽²⁾, I. Isaev⁽²⁾, D. Kalantaryan⁽²⁾, T. Kozak⁽³⁾, M. Krasilnikov⁽²⁾, H. Qian⁽²⁾, X. Li⁽²⁾, O. Lishilin⁽²⁾, D. Melkumyan⁽²⁾, A. Oppelt⁽²⁾, Y. Renier⁽²⁾, T. Rublack⁽²⁾, M. Felber⁽³⁾, H. Huck⁽²⁾, Y. Chen⁽²⁾, F. Stephan⁽²⁾

⁽¹⁾ Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁽²⁾ Deutsches Elektronen-Synchrotron, Platanenallee 6, Zeuthen, D-15738, Germany

⁽³⁾ Deutsches Elektronen-Synchrotron, Notkestrasse 85, Hamburg, D-22603, Germany

E-mail: ⁽¹⁾Sergei.Mironov@mail.ru, ⁽¹⁾alex.v.andrianov@gmail.com, ⁽¹⁾gacheva@appl.sci-nnov.ru, ⁽¹⁾vymaily@mail.ru,

⁽¹⁾ptmk@appl.sci-nnov.ru, ⁽¹⁾khazanov@appl.sci-nnov.ru, ⁽²⁾mikhail.krasilnikov@desy.de, ⁽²⁾frank.stephan@desy.de

Methods for the spatio-temporal shaping of photocathode laser pulses for generating high brightness electron beams in modern linear accelerators are discussed. The possibility of forming triangular laser pulses and quasi-ellipsoidal structures is analyzed. The proposed scheme for generating shaped laser pulses was realised at the Institute of Applied Physics (IAP) RAS. Currently, a prototype of the pulse shaping laser system is installed at the Photo Injector Test facility at DESY, Zeuthen site (PITZ). Preliminary experiments on electron beams generation using ultraviolet laser pulses from this system were carried out at PITZ, in which electron bunches with 0.5 nC charge and a transverse normalized emittance of 1.1 mm mrad were obtained. A new scheme for the three-dimensional shaping of laser beams using a volume Bragg grating is proposed at IAP RAS and is currently being tested for further electron beam generation experiments at the PITZ photoinjector.

Keywords: 3D shaping of laser pulses, photoinjector, linear electron accelerator, generation and acceleration of electron beams, normalized transverse emittance

PACS numbers: **29.20.-c**, 29.27.Ac, 42.60.By, **42.60.-v**

Bibliography — 13 references

Received 16 May 2017

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (10) 1121–1133 (2017)

Physics – Uspekhi **60** (10) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.03.038143>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.03.038143>