

Разработка автономной тераваттной системы на основе Ti:сапфирового лазера с трехмерным профилированием импульса для ГТГ*

Х.Томизава, Х.Дева, Х.Ханаки, Ф.Мацуи

Разработана автономная УФ лазерная система с трехмерным профилированием импульса для фотоинжектора (фотокаатода радиочастотной электронной пушки) рентгеновского лазера на свободных электронах, позволившая улучшить до 0.2%–0.3% (10 имп./с, мощность 0.4 ТВт в фемтосекундном режиме) среднеквадратичную стабильность энергии импульса основного излучения, а среднеквадратичную стабильность третьей гармоники – до 0.7%–1.4%. Такая стабильность круглосуточно поддерживалась на протяжении пяти месяцев. Полученные показатели отражают возможность стабилизации лазерной системы в оптически чистой комнате с контролируемым уровнем влажности. Стабильность энергии фемтосекундного генератора с синхронизацией мод непрерывно поддерживалась на уровне 0.3% на протяжении такого же периода. Кроме того, для подавления эмиттанса сгустка электронного пучка, генерируемого фотокаатодом радиочастотной пушки, чрезвычайно важны идеально воспроизводимые пространственный и временной профили импульса УФ лазера. Для одновременного пространственно-временного профилирования пучка использовались деформируемое зеркало с обратной связью на базе генетического алгоритма, которое автоматически формирует пространственный профиль УФ импульса, и импульсный накопитель для формирования временного профиля. Пространственная структура лазерного импульса представляет собой цилиндрическое распределение с плоской вершиной (top-hat), временная – составной импульс прямоугольной формы. Оценка эмиттанса электронного пучка, генерируемого профилированным лазерным импульсом, осуществлялась методом сканирования. При использовании профилированного лазерного импульса длительностью 10 пс (по полувысоте) с диаметром пучка у катода 0.8 мм был получен минимальный нормированный горизонтальный эмиттанс 1.4π -мм-мрад с энергией пучка 26 МэВ при заряде сгустка электронов 0.4 нК/имп. При большем заряде (1.0 нК/имп.) с эквивалентным диаметром и длительностью лазерного импульса 20 пс (по полувысоте) минимальный эмиттанс пучка составил 2.3π -мм-мрад. Рассмотрен короткий (5–20 пс), профилированный во времени и в пространстве лазерный импульс в качестве идеального источника излучения для долговременной стабильной генерации высокозарядного (1–2 нК/имп.) электронного пучка с малым эмиттансом. Описан принцип работы и процесс создания нашей системы контроля качества пучка.

Ключевые слова: контроль качества пучка, Ti:сапфировый лазер, тераваттный фемтосекундный лазер, автономная лазерная система, долговременная непрерывная стабильная работа, пространственное профилирование, профилирование пучка, трехмерное профилирование пучка, адаптивная оптика, деформируемое зеркало, генетический алгоритм, пространственный модулятор света, моделируемые алгоритмы, фотоинжектор, источники рентгеновского излучения, лазер на свободных электронах, энергия регенерации линейного ускорителя, фотокаатод радиочастотной электронной пушки.

1. Введение

Начиная с 1996 г. мы работали в SPring-8 (Synchrotron Radiation Research Group – Исследовательская группа излучения синхротрона) над созданием стабильного и высокоэффективного источника УФ лазерного излучения для фотокаатода радиочастотной (РЧ) электронной пушки [1], которая в свою очередь формирует электронный пучок высокой интенсивности для будущих источников рентгеновских лучей (лазер на свободных электронах (ЛСЭ), обратное комптоновское рассеяние и т. д.). Источник электронного излучения для нескольких проектов рентгеновских ЛСЭ [2–4] должен обеспечивать элект-

ронный пучок с очень малым ($\sim 1\pi$ -мм-мрад) эмиттансом (с высокой яркостью). Наиболее надежным вариантом такого электронного источника является фотокаатод РЧ пушки. В пушке этого типа электронный сгусток генерируется фотокаатодом, освещенным лазерным излучением. Наша разработка подобной пушки ориентирована на систему с повышенной стабильностью, предназначенную для проведения различных экспериментов. Для медного катода такой пушки необходим УФ лазерный импульс с длительностью $\tau_p \sim 10$ пс и энергией фотона ~ 4 эВ. Когда мы приступили к разработке тестового оборудования для лазера, возникли две проблемы, связанные с источником лазерного излучения. Одна из них – это стабильность энергии УФ источника излучения (см. разд.2). Поэтому мы стабилизировали генерацию третьей гармоники (ГТГ) Ti:сапфировой тераваттной лазерной системы с усилением chirпированного импульса (рис.1),* рассматриваемой в качестве источника излучения для РЧ пушки SPring-8.

* Перевела с англ. В.В.Кошечкина.

H.Tomizawa, H.Dewa, H.Hanaki. Accelerator Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute (SPring-8), Kouto, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan
F.Matsui. Creative & Advanced Research Department, Industrial Technology Center of Fukui Prefecture 61, Kawaiwashitsuka-cho, Fukui City 910-0102, Japan

Поступила в редакцию 12 марта 2007 г.

* Цветные изображения всех рисунков статьи помещены на сайте «Квантовой электроники»: <http://www.quantum-electron.ru>

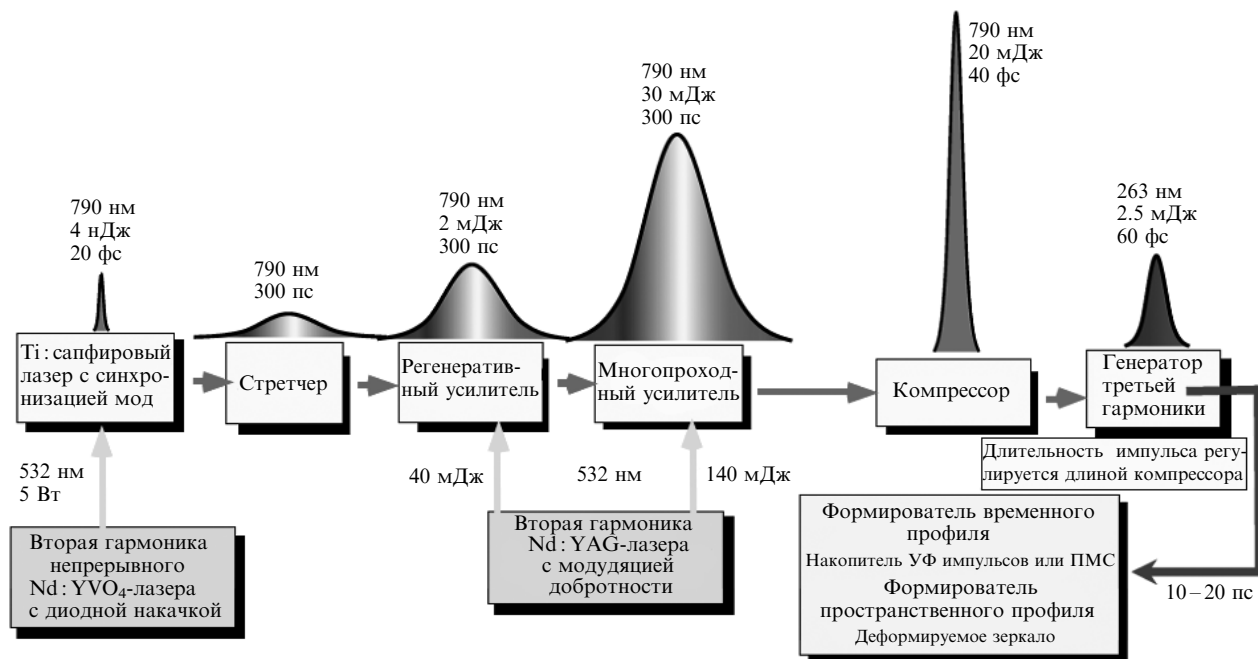


Рис. 1. Усиление лазерного импульса и процесс его трехмерного (пространственного и временного) профилирования. Длительность импульса третьей гармоники (263 нм) зависит от длины компрессора на основной длине волны (790 нм). Для получения импульса длительностью 20 пс путем накопления восьми микроимпульсов (три этапа накопления) необходимо сначала подготовить микроимпульс длительностью 2.5 пс путем изменения длины компрессора.

Другая проблема касается пространственно-временной формы импульса (см. разд.3). Для сокращения эмиттанта фотокатода РЧ пушки необходима трехмерная оптимизация формы лазерного импульса. За последние пять лет на испытательном стенде источника излучения фотокатода SPring-8 путем комбинации пространственных (поперечные координаты x , y) и временных (продольная ось z) методов формирования импульса было создано несколько систем трехмерного профилирования (рис.1). Для изменения пространственной структуры следует использовать массив микролинз [5] или деформируемое зеркало (ДЗ) [6]. Кроме того, необходимо менять форму импульса во времени при помощи пространственного модулятора света (ПМС) [6, 7] или импульсного накопителя, описанного в настоящей работе. Одним из вариантов надежного трехмерного профиля была цилиндрическая форма импульса (пространственное распределение top-hat и прямоугольная форма импульса во времени). Наименьший эмиттанс пучка в 1.2 μ -мм-мрад при заряде 1.0 нК/имп. и прямоугольной форме лазерного импульса длительностью 9 нс достигнут Ж.Янгом и др. [7]. Ранее мы уже демонстрировали УФ излучение с квазиравномерной пространственной структурой пучка, полученной путем автоматической оптимизации при помощи адаптивного зеркала с обратной связью на базе генетического алгоритма. При такой пространственной структуре лазерного импульса (диаметр пятна на катоде 1.0 мм) длительностью 5 пс (следует отметить, что его форма не была прямоугольной во времени) мы смогли получить генерацию электронного пучка с низким эмиттансом (1.7 μ -мм-мрад) [6] при заряде 0.1 нК/имп. Однако при больших зарядах эмиттанс пучка оказывался гораздо большим из-за слишком высокой плотности заряда. Из этого следует, что длительность импульса 5 пс слишком мала для диаметра лазерного пятна 1 мм. Поэтому для получения меньшего эмиттанта в случае более высо-

ких плотностей зарядов мы приготовили более длинные (10 и 20 пс) лазерные импульсы прямоугольной формы, полученные путем накопления равноценно расщепленных импульсов гауссовой формы с $\tau_p = 2.5$ пс. После трех этапов накопления из восьми микроимпульсов длительностью 2.5 пс можно получить импульс длительностью 20 пс. Лазерные импульсы большей длительности необходимы для уменьшения диаметра лазерного пятна на катоде при одновременном уменьшении плотности заряда. Малый размер пучка способствует уменьшению начального (теплового) эмиттанта (при нулевом электронном заряде), а малая плотность заряда подавляет эффект пространственного заряда. Следовательно, более длинный лазерный импульс эффективнее, особенно в области высокой плотности заряда. Трехмерное моделирование трассировки частиц показало, что меньший эмиттанс пучка можно получить при $\tau_p = 20$ пс и заряде 1.0 нК/имп. [8]. Результат моделирования позволяет сделать важное предположение о том, что благодаря компрессии электронного сгустка в РЧ резонаторе его длительность можно поддерживать в районе 10 пс при $\tau_p = 10$ нс и даже 20 пс.

2. Разработка лазерного источника с долговременной стабильностью

В качестве источника излучения для РЧ пушки SPring-8 была выбрана третья гармоника Ti:сапфировой тераваттной лазерной системы с усилением chirпированных импульсов (частота следования импульсов 10 Гц). При ГТГ (центральная длина волны 263 нм) энергия фемтосекундного УФ импульса составляет 2.5 мДж. Среднеквадратичная стабильность энергии лазерного импульса σ была доведена до 0.2%–0.3% на основной длине волны (10 имп./с, 0.4 ТВт, фемтосекундный режим) и до 0.7%–1.4% на длине волны третьей гармоники. На те-

кущей стадии разработки указанные показатели стабильности непрерывно поддерживались в течение пяти месяцев (отметим, что лампу накачки для YAG-лазера накачки следует заменять каждые два месяца). В результате оптимизации установки, не относящейся непосредственно к лазерному источнику, была достигнута стабилизация как самой лазерной системы, так и параметров окружающей среды. Для уменьшения электростатического разряда на оптике была установлена система контроля влажности, которая поддерживала в оптически чистой комнате влажность на уровне 55% (флуктуации менее 2%). Эта система отводит пыль от оптики и таким образом позволяет избежать прогорания покрытий. Температура основания лазера контролировалась и постоянно поддерживалась на уровне $21 \pm 0.3^\circ\text{C}$. Улучшение стабильности ГТГ связано с возможностью стабилизации лазерных источников накачки усилителей (YAG-лазер с модуляцией добротности) посредством температурного контроля базового основания в оптически чистом помещении с контролируемым уровнем влажности. Температура основания для стабилизации YAG-лазера поддерживалась на уровне 25°C (флуктуации менее 0.1%). Кроме того, сейчас тестируется система обратной связи контроля долговременного дрейфа YAG-лазера для поддержания высокой стабильности энергии лазерного импульса описанным выше способом. Это связано со сроком службы лампы накачки, который сейчас ограничен пятью месяцами непрерывной работы (по нашим сведениям, максимальное число импульсов составило 119380846).

В отличие от долговременного дрейфа источника накачки на основе YAG-лазера, долговременная стабильность всей лазерной системы (для ГТГ) зависит только от стабильности синхронизации мод задающего лазера. Новый задающий лазер (Femtosource Synergy; Femtolasers Produktions GmbH) был установлен в нашу систему в апреле 2005 г. Для пассивной стабилизации этого лазера использовалась термостабилизированная плита ($21 \pm 0.1^\circ\text{C}$). Во время первого длительного испытания в непрерывном режиме работы стабильность синхронизации

мод поддерживалась в течение месяца без какой-либо активной стабилизации (рис.2,а). Однако параметры лазера менялись, из чего следует, что смещения пучка лазера накачки или самофокусировка лазерного излучения в кристалле (в результате изменения длины резонатора) приводят к долговременному дрейфу (1–2 недели). Когда из-за этого меняется конфигурация резонатора, режим синхронизации мод становится неустойчивым. Поэтому при проведении второго испытания для стабилизации геометрической конфигурации лазерного резонатора использовались две системы активной обратной связи – Femto-align и Femto-lock (Femtolasers Produktions GmbH).

Система Femto-align разработана для компенсации долговременных нестабильностей, вызванных внешними источниками, такими как тепловые деформации или дрейф направления пучка накачки. В системе сделан упор на точность и надежность, что позволяет избежать сбоев при синхронизации мод и уменьшает вероятность случайных колебаний. Система контролирует выходную мощность и каждый раз оптимизирует работу при возникновении отклонений. Активное контрольное зеркало может компенсировать долговременные нестабильности всей лазерной системы. С другой стороны, Femto-lock – это субпикосекундная синхронизация джиттера генераторов, позволяющая замыкать частоту обхода резонатора для генератора на заданный опорный РЧ источник (ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG: SMHU). В состав системы входят скоростной пьезотранслятор и подвижка с большим ходом. Такая конструкция позволяет устройству компенсировать как быстрые (килогерцовые) флуктуации, так и медленные долговременные сдвиги (например, механические деформации из-за температурного дрейфа). Комбинация этих двух видов обратной связи обеспечивает многомесячную работу без ухода параметров.

Во время второго теста на долговременную стабильность для стабилизации генератора использовались обе системы – Femto-align и Femto-lock, а сам генератор работал в режиме синхронизации мод при частоте 89.25

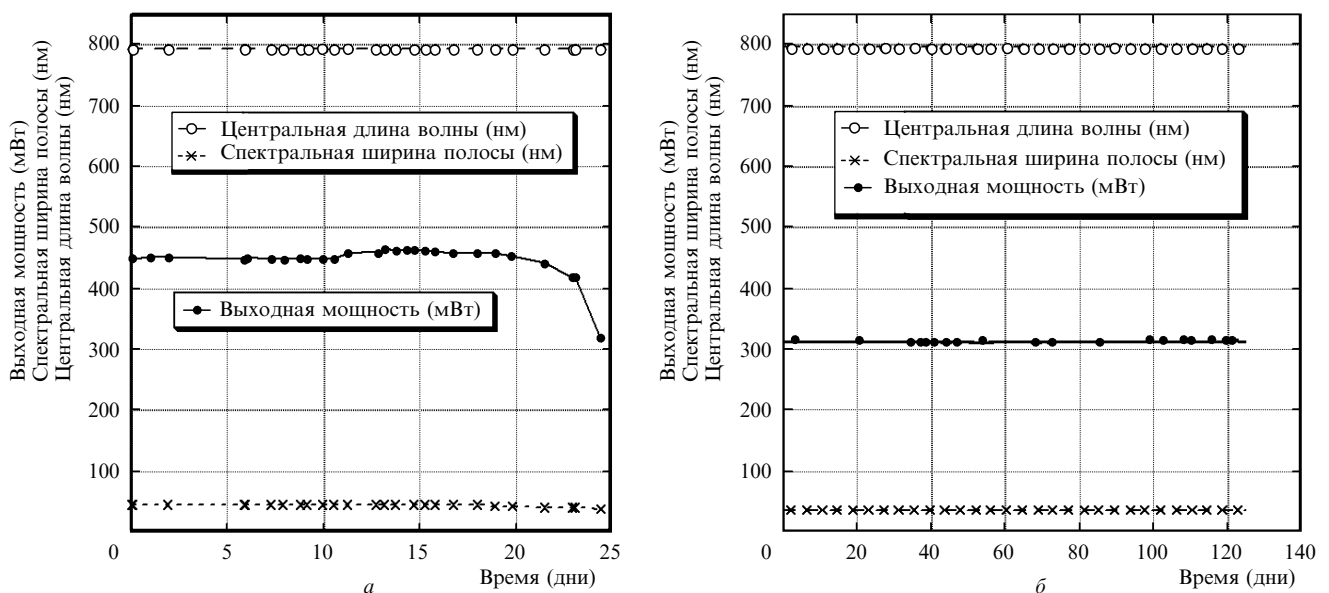


Рис.2. Улучшение долговременной стабильности лазерного генератора (а – только пассивная стабилизация, б – полностью активная стабилизация, Femto-align и Femto-lock); режим синхронизации мод и спектральное распределение поддерживались постоянными при полностью активной обратной связи.

МГц. Этот тест пришлось прервать для поддержания инфраструктуры. Стабильность энергии фемтосекундного генератора в режиме синхронизации мод при температурном контроле основания ($21 \pm 0.1^\circ\text{C}$) непрерывно поддерживалась на уровне 0.3 % в течение пяти месяцев (рис.2,б). За исключением мгновенного падения зависимости из-за естественных природных явлений (молния и др.) или из-за необходимости поддержания инфраструктуры, этот генератор обеспечивал непрерывную длительную работу с неизменными лазерными параметрами (энергия импульса, длительность импульса, спектр и т. д.). Параметры лазера были постоянны без каких-либо признаков нестабильности. Это доказывает, что деформации геометрической конфигурации лазера можно локализовать в пределах стабильности режима синхронизации мод.

3. Эксперимент по трехмерному профилированию УФ лазерного импульса

Система трехмерного профилирования УФ лазерного импульса, совмещающая в себе деформируемое зеркало (двумерный поперечный профиль) и импульсный накопитель (продольный профиль), показана на рис.3. При использовании описанного выше УФ лазерного источника с долговременной стабильностью эта система

может генерировать трехмерный цилиндрический лазерный импульс. Обе методики формирования импульса описаны в следующих разделах.

3.1. Оптимизация цилиндрического пространственного профиля (top-hat) при помощи автоматизированного деформируемого зеркала

Для формирования пространственного профиля мы использовали автоматизированное ДЗ (правая верхняя фотография на рис.3). Зеркало представляет собой многослойную мембрану из нитрида кремния с алюминиевым покрытием, снабженную 59 миниатюрными подвижками, расположенными позади отражающего слоя; расстояние между центрами соседних элементов составляет 1.75 мм. Для обеспечения коэффициента отражения в УФ области $\sim 80\%$ внешний слой отражающей мембраны защищен покрытием из MgF_2 . Управляющие напряжения на контрольных электродах граничных подвижек позволяют точно управлять каждой подвижкой зеркала. Рабочая область контрольных напряжений находится в диапазоне 0–250 В, при шаге 1 В возможны 250^{59} ($\sim 10^{141}$) сочетаний положений подвижек, что дает возможность формировать произвольные пространственные профили. Однако при таких широких возможностях позиционирования ни ручное управление, ни применение простых алгоритмов управления невозможны.

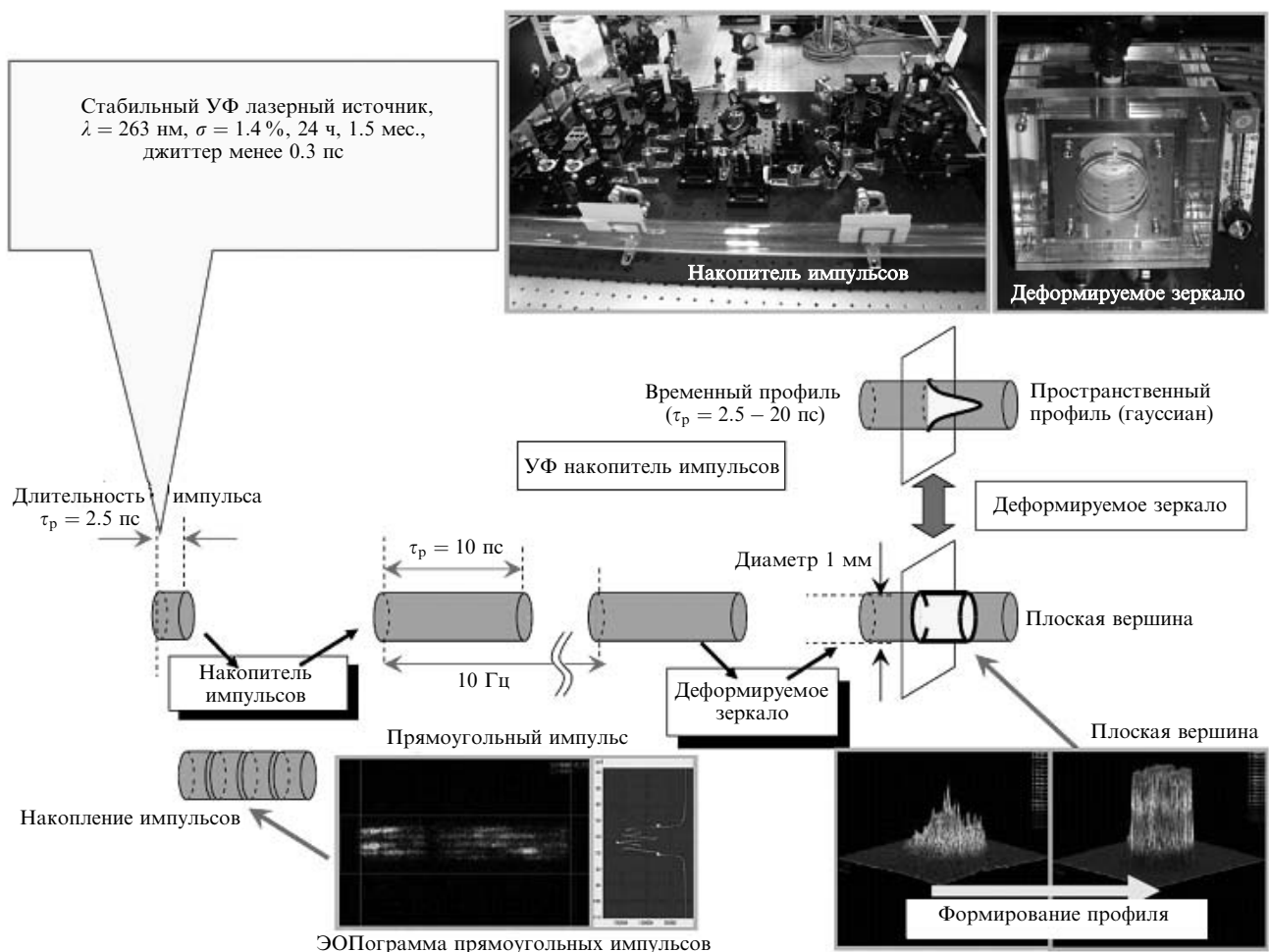


Рис.3. Система трехмерного (двумерного пространственного и одномерного временного) профилирования УФ лазерного импульса, состоящая из деформируемого зеркала (ДЗ) и импульсного накопителя. Оба метода профилирования можно оптимизировать независимо, поскольку они не связаны друг с другом. На схематическом изображении накопления импульсов показана генерация импульса с $\tau_p = 10 \text{ пс}$ посредством накопления четырех микроимпульсов с $\tau_p = 2.5 \text{ пс}$ (две ступени импульсного накопителя).

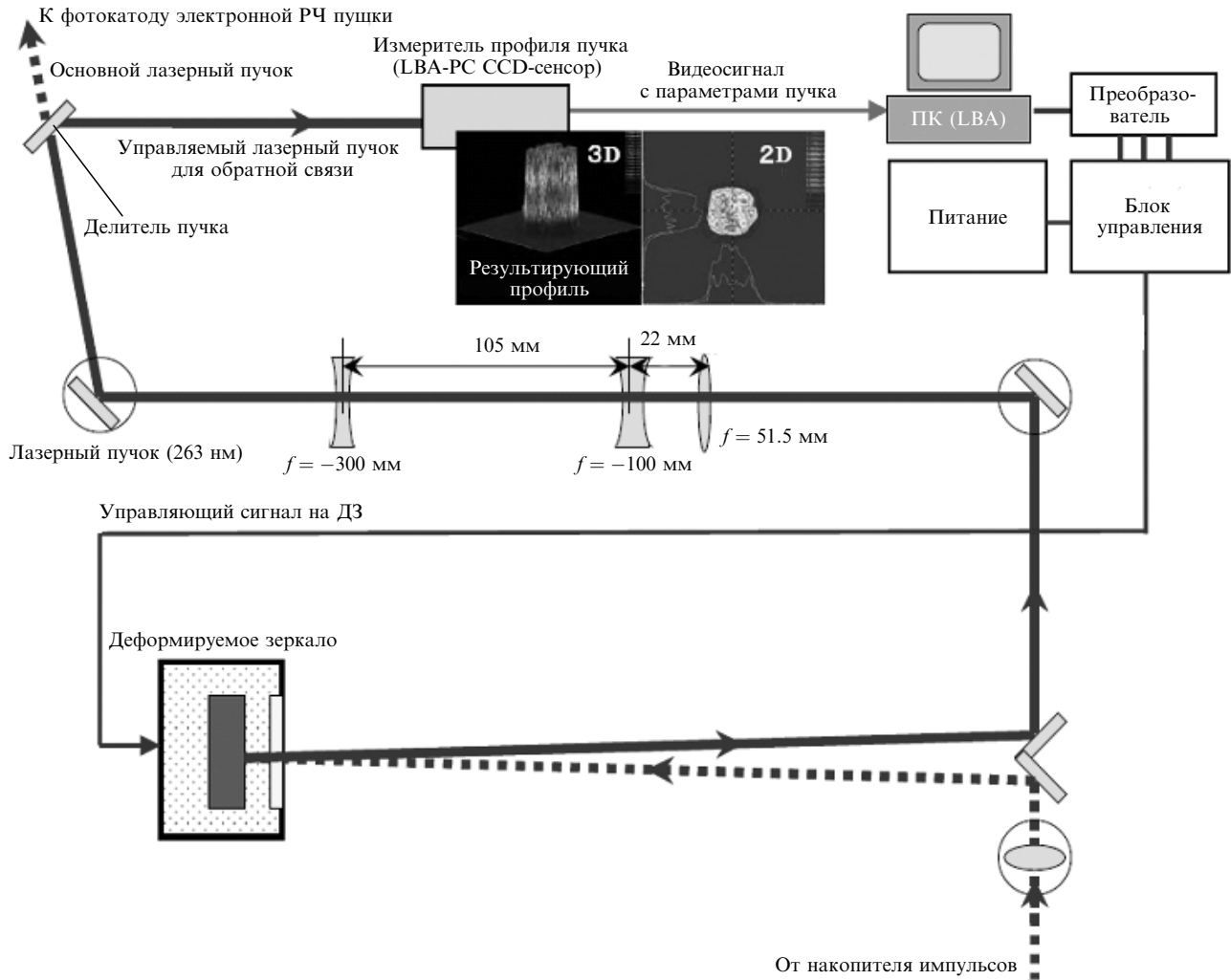


Рис.4. Замкнутая система контроля эксперимента. Согласно с данными измерителя профиля пучка (LBA300-PC), автоматизированное ДЗ оптимизирует пространственное распределение для получения требуемого цилиндрического профиля (top-hat).

3.1.1. Эксперимент по организации замкнутой системы пространственного профилирования

Система замкнутого цикла (рис.4) необходима для автоматической оптимизации пространственного профиля лазерного пучка при помощи ДЗ. Персональный компьютер используется для контроля напряжения на электродах ДЗ и для контроля пространственного профиля измерителем профиля пучка (LBA300-PC, Spigicon Inc.). При отражении лазерного излучения деформируемым зеркалом в его структуру вносятся искажения, регистрируемые измерителем пучка, программное обеспечение которого позволяет оценивать множество параметров профиля. Программное обеспечение находится под дистанционным контролем Active-X [9] (Object Linking and Embedding), позволяя таким образом управлять деформируемым зеркалом при контроле параметров лазерного пучка.

3.1.2. Алгоритм автоматического контроля

Метод пространственного профилирования при помощи адаптивной оптики требует использования сложного алгоритма управления. Мы разработали программное обеспечение, основанное на генетическом алгоритме (ГА), для автоматической оптимизации формы ДЗ. На-

пряжения всех электродов ДЗ интерпретируются как элементы хромосом. Вначале в качестве исходной популяции мы заготовили 50 хромосом и использовали метод минимального интервала популяции (МИП) для выбора выживающих хромосом. Напряжения 59 электродов ДЗ выбирались независимо в диапазоне 0–250 В и кодировались 59 элементами хромосомы. В деформируемом зеркале данного типа (на основе электростатических подвижек) смещение центральной области мембраны было пропорционально квадрату напряжения на электродах. В исходной популяции приложенные к электродам напряжения (значения элементов хромосомы) случайным образом выбирались из набора дискретных значений (0, 42, 70, 93, 113, 131, 147, 162, 176, 189, 201, 213, 225, 236, 250 В) для линейного изменения смещения. При этом осуществлялась следующая обработка хромосом.

1. Создание семьи из четырех хромосом. Две хромосомы случайным образом выбираются из начальной популяции для формирования семьи и позиционируются как «Родители». Затем от скрещивания хромосом «Родителей» получают две другие хромосомы – «Дети». В нашей программе были заложены три различных способа скрещивания: случайное (в нашем случае – 58-точечное скрещивание), одноточечное и двухточечное. Таким образом подготавливается набор из четырех хро-

Табл.1. Показатели качества и их назначение в составе целевой функции при оценке оптимизации пространственного профиля.

Параметры целевой функции	Назначение параметров
Центр пучка	Минимизация отклонения от начального положения центра (x, y)
Показатель цилиндричности (ПЦ)	Максимизация ПЦ (0–1) (для цилиндрического импульса ПЦ равен 1.0, для гауссиана – 0.5)
Эффективная площадь	Максимизация интегральной энергии в пределах заданной площади круга
Эффективный диаметр	Минимизация отклонения от диаметра заданного круга
Плоскостность	Минимизация среднеквадратичного отклонения, деленного на среднюю площадь плоской вершины
Разброс амплитуд	Минимизация разности между максимальным и минимальным значениями амплитуды в пределах площади плоской вершины
Диаметр пучка	Минимизация отклонения от заданного диаметра
Горячая точка (максимум)	Минимизация максимума в площади плоской вершины
Темная точка (минимум)	Максимизация минимума в площади плоской вершины

сом, который трактуется как «Семья», а в ГА называется «Популяцией».

2. Управление деформируемым зеркалом и измерение параметров пространственного профиля лазерного пучка. С использованием метода МИП четыре выбранные хромосомы в «Семье» сравниваются, и две лучшие выживают как более развитые. Управление ДЗ осуществляется путем подачи на электроды напряжений, соответствующих элементам хромосом четырех членов «Семьи» (в последовательности «Отец», «Мать», двое «Детей»); параметры пучка вычисляются с помощью программы анализатора профиля лазерного пучка. Параметры пространственного распределения лазерного пучка необходимы для оценки на следующем этапе.

3. Оценка полученных параметров посредством целевой функции. Полученные результаты оцениваются при помощи целевой функцией цилиндрического профиля – линейной комбинацией девяти параметров (табл.1) с весовыми множителями. Если хромосома имеет высокое значение целевой функции цилиндрического профиля, она перемещается на следующую ступень в «семейной» иерархии. Таким образом, порядок расположения хромосом определяется путем сравнения значений целевой функции.

4. Две лучшие хромосомы возвращаются в популяцию как сильнейшие. Эта процедура определяет развитие одного поколения, и популяция обновляется для развития следующего поколения.

3.1.3. Использование целевой функция для оптимизации пространственного профиля путем оценки параметров пучка

Для оценки цилиндрических профилей мы выбрали девять основополагающих параметров [6] (табл.1). Целевая функция определяется линейной комбинацией этих параметров и используется как показатель работы сложного программного ГА. Чем ближе профиль лазерного пучка к заданному (цилиндрическому), тем больше значение целевой функции. Она вычисляется для пространственного профиля, соответствующего каждой хромосоме, и при этом оцениваются пространственное распределение, диаметр пятна и положение центра профиля. Максимизируя значение целевой функции посредством программы ГА, автоматизированное ДЗ оптимизирует профиль в заданном направлении. Наиболее ёмким параметром является показатель цилиндричности (ПЦ) [10], который определяется как интегральная функция доли энергии (рис.5). Через 2500 поколений неравномерный пространственный профиль был приведен к квазцилиндрическому профилю (рис.6).

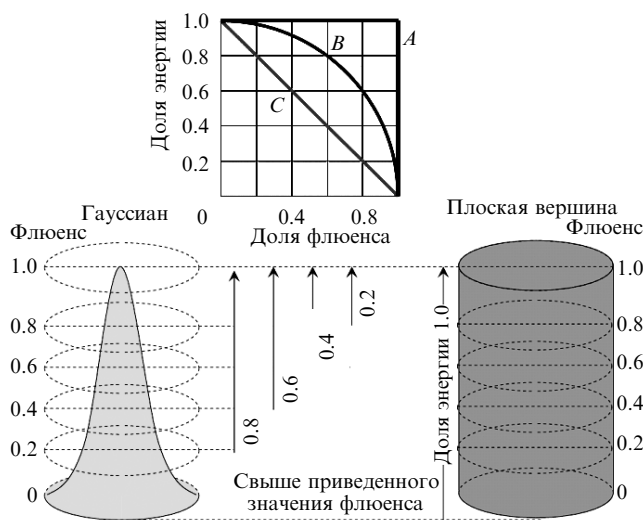


Рис.5. ПЦ [10] для оценки профилей (кривая A соответствует профилю с ПЦ, равному 1.0, C – гауссову профилю, B – промежуточному профилю). Максимальный флюенс и профили плоской вершины нормированы на единицу, доля энергии определяется как доля полной энергии свыше приведенного значения флюенса.

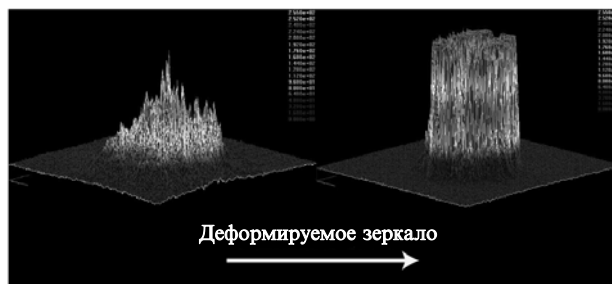


Рис.6. Результат оптимизации пространственного распределения при помощи ДЗ (измеритель профиля пучка LVA300-PC).

3.2. Формирование прямоугольного профиля импульса во времени при помощи УФ импульсного накопителя

3.2.1. Принцип работы и конфигурация импульсного накопителя, свободного от интерференции

Импульсный накопитель представляет собой набор полуволновых пластин и светоделительных поляризационных кубиков. Одна ступень импульсного накопителя состоит из пары светоделителей и полуволновой пластины. Пучок s-поляризованного излучения посредством полуволновой пластины поворачивается на 45°, а затем при помощи первого светоделительного поляризацион-

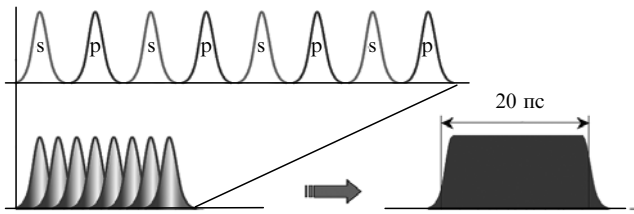


Рис.7. Принцип накопления chirпированных импульсов (восемь импульсов, три этапа). Во избежание интерференции микроимпульсы с s- и p-поляризациями накапливаются отдельно с оптической задержкой, равной длительности отдельного импульса.

ного кубика на каждом этапе делится на импульсы с s- и p-поляризациями. Импульс с p-поляризацией задерживается линией оптической задержки, после чего объединяется с s-поляризованным импульсом при помощи следующего светоделительного поляризационного кубика. Наконец, как показано на рис.7, на каждом этапе лазерный импульс длительностью 2.5 пс накапливается линией задержки, в результате чего образуется более длинный импульс прямоугольной формы. Накапливая по восемь микроимпульсов на трех этапах, можно получить комбинированный импульс прямоугольной формы длительностью 20 пс. Из-за высокой плотности мощности УФ лазерного импульса светоделительные поляризационные кубики первой и второй ступени изготовлены на основе оптического контакта (Showa Optronics Co. Ltd). Светоделительный поляризационный кубик третьей ступени изготовлен с использованием оптического клея, поскольку здесь плотность мощности ниже.

Схема оптической системы и временная диаграмма трехступенчатого импульсного накопителя приведены на рис.8. На каждой ступени этого накопителя положение импульса с s-поляризацией на первом светоделителе всегда определяет начало оптической временной задержки (см. временную диаграмму на рис.8). Это позволяет обеспечивать неизменность начала любой временной задержки, даже если комбинированный прямоугольный импульс длительностью 5, 10 или 20 пс получается в ре-

зультате присоединения импульса с p-поляризацией на соответствующем этапе.

3.2.2 Поиск начала оптических линий задержки

Для получения длинного импульса без каких бы то ни было временных лагун или наложений начало линий задержки должно быть определено с точностью, лучшей 1 пс. В данной работе начало определяется положением микрометра, при котором импульсы с s- и p-поляризациями одновременно достигают катода. Процедура нахождения начала линии с использованием генерированного фотокатодом сгустка электронного луча сводится к следующему [8]. Энергия электронного сгустка измеряется для двух лазерных импульсов, полученных делением импульса на каждой ступени накопителя, и определяется по положению следа сгустка на флуоресцентном экране после отклоняющего магнита резонатора РЧ пушки. Для уменьшения влияния разброса позиционирования и мгновенного временного дрейфа положения пучка измерения проводятся 5000 раз. За несколько итераций смещение микрометра для импульса с p-поляризацией подстраивается по мере того, как два сгустка электронного пучка попадают в одну точку на экране. Временная точность установки начала линии, измеренная по распределению разброса положения, составляла ~0.5 пс.

4. Заключение. Дальнейшие перспективы

Оптимизация пространственной структуры лазерного излучения возможна при помощи управляемого компьютером ДЗ. В частности, при использовании новой программы, основанной на ГА, за короткое время было получено цилиндрическое распределение (top-hat). В настоящее время не представляет сложности получить равномерный или цилиндрический профиль. Однако недавно для достижения еще более низкого эмиттанса была предложена другая надежная форма импульса [11, 12] – эллипсоидальная с эквивалентным потоком во времени. В этом случае массив микролинз или адаптивное зеркало не в состоянии сформировать подобное трехмерное эл-

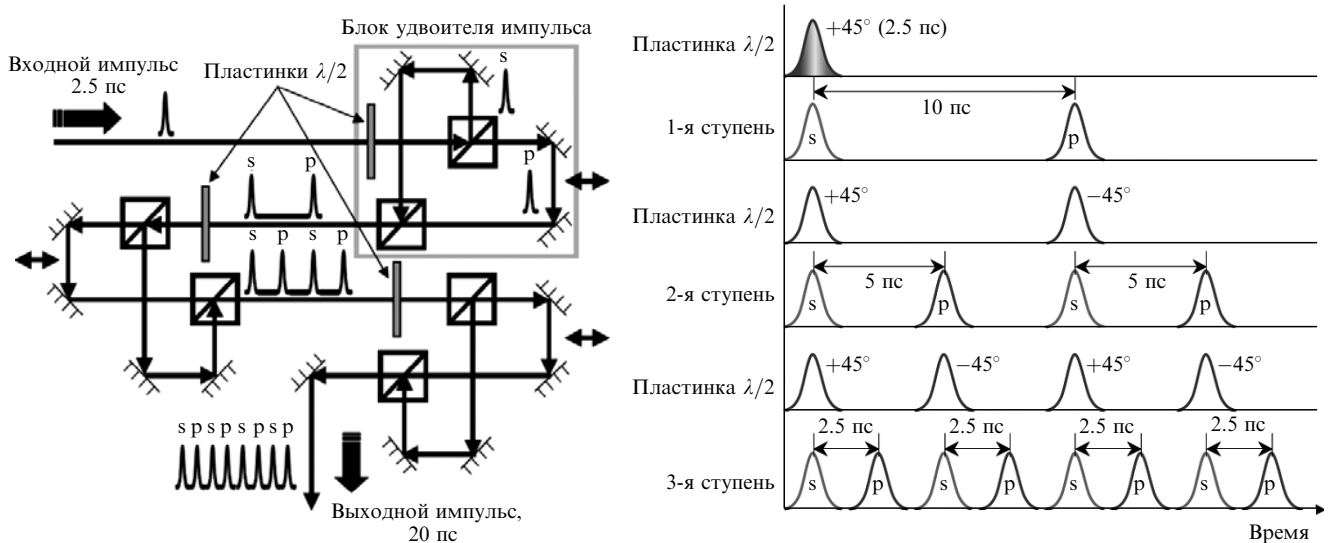


Рис.8. Оптическая система (слева) и временная схема (справа) импульсного накопителя УФ лазера. Рисунки соответствуют случаю трех ступеней импульсного накопителя (пары поляризационных кубиков для УФ лазерного пучка). Для генерации составного макроимпульса длительностью ~20 пс начальная длительность УФ лазерного импульса устанавливается равной 2.5 пс. Оптическая система этого импульсного накопителя коммерчески доступна в Luminex Trading, Inc. (<http://www.luminex.co.jp/>) по лицензии SPring8/JASRI.

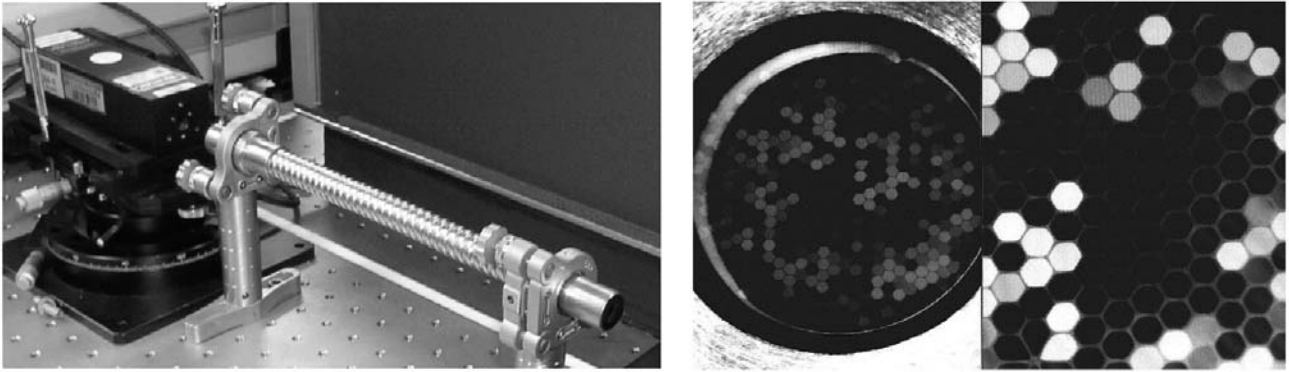


Рис.9. Структура торца жгута световодов (диаметр 8 мм, набор из 1300 волокон). При разработке компактной системы для обратной подсветки фотокатода с высокой квантовой эффективностью была исследована комбинация синего лазерного диода (404 нм) и системы трехмерного профилирования на основе жгута световодов (фото слева).

липсоидальное распределение. В [11] в качестве источника эллипсоидального импульса была предложена разновидность импульсного накопителя, контролирующего продольный поток, однако этот способ довольно сложен с точки зрения юстировки. Один из методов, позволяющих избежать сложной юстировки различных оптических составляющих, заключается в использовании жгута световодов [13]. Это практичный способ одновременного формирования пространственного и временного профилей во время распространения лазерного импульса. На практике основу метода составляют тысячи импульсных накопителей в разреженном объеме. Однако этот метод имеет существенный недостаток: при реальных рабочих расстояниях ~ 1 м и стандартном освеще-

нии катода получить на нем лазерное пятно размером менее 1 мм затруднительно. Поэтому с целью сокращения рабочего расстояния такой способ был предложен только для обратной подсветки катода, для чего был разработан прозрачный катод. С помощью жгута световодов диаметром 8 мм, состоящего из 1300 волокон, сплавленных на конце жгута (рис.9), было продемонстрировано пространственное и временное профилирование, результаты которого представлены на рис.10.

С учетом постоянной времени полупроводниковых фотокатодов и точности юстировки пока еще рано утверждать, что мы обладаем надежным решением для генерации эллипсоидального электронного пучка с фотокатода. Однако мы планируем использовать адаптивную

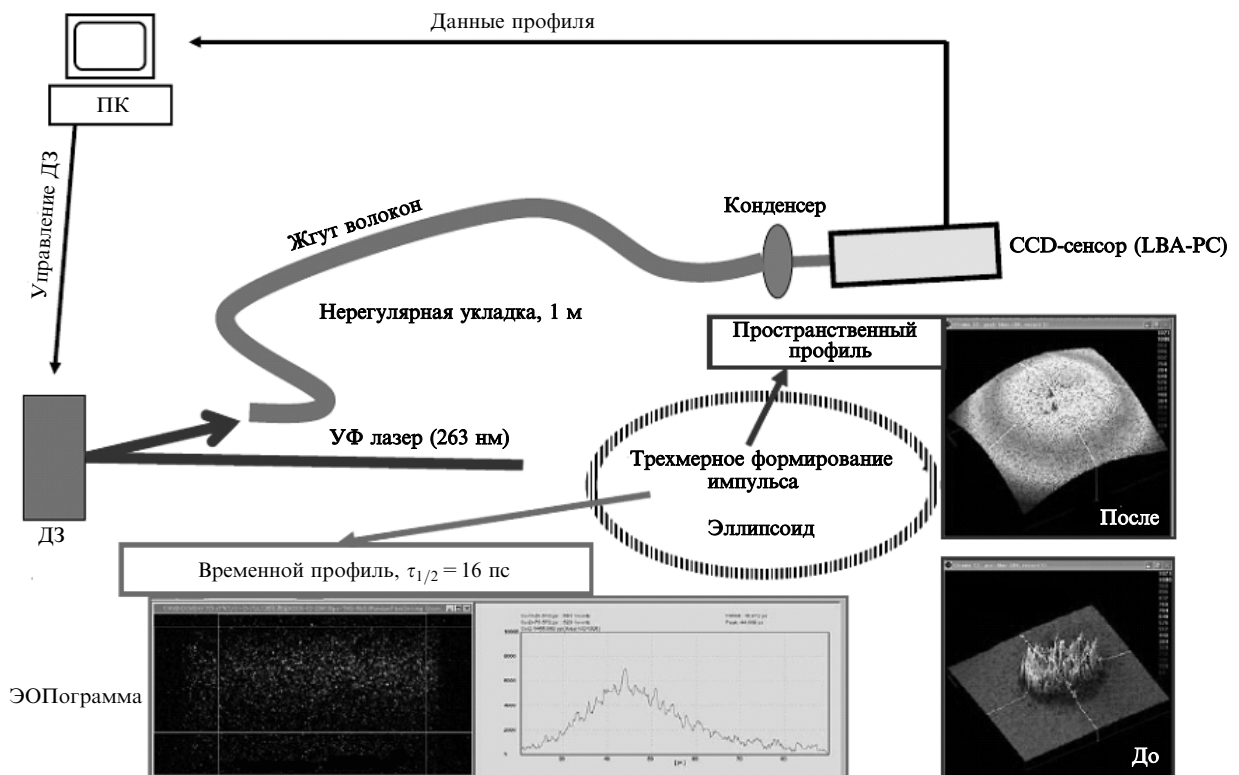


Рис.10. Замкнутая система контроля на основе жгута световодов с автоматизированным ДЗ. Достигнута великолепная однородность пространственного распределения лазерного излучения, и в то же время временной профиль имеет эллиптическую форму. Представленные результаты пространственного и временного профилирования были получены при использовании только формирователя на основе жгута световодов. Возможно получение трехмерного квазиэллипсоидального импульса без ДЗ и ГА. При использовании автоматизированного ДЗ, как показано на этом рисунке, возможна точная оптимизация трехмерного профиля импульса.

оптику с обратной связью, например деформируемые зеркала, для автоматической оптимизации импульса электронного пучка даже при меньшем эмиттансе. Возможна комбинация жгута световодов и ДЗ с целью контроля пространственного распределения падающего лазерного излучения для точного формирования эллипсоидного профиля электронного пучка. Автоматическая оптимизация при помощи ДЗ, управляемого генетическим алгоритмом, является мощным инструментом оптимизации трехмерного профиля электронного сгустка, если наиболее вероятное решение находится в поле поиска алгоритма (рис.10).

Для оптимизации профиля каждого лазерного импульса необходима пассивная стабилизация лазерной системы путем контроля параметров окружающей среды. В настоящее время долговременная стабильность энергии ГТГ (непрерывная работа в течение полутора месяцев) была улучшена до 1.4%. Этого достаточно для автоматической оптимизации лазерной системы при помощи адаптивной оптики. На данный момент при контроле параметров окружающей среды режим синхронизации мод лазерного генератора при частоте синхронизации 89.25 МГц оставался стабильным в течение пяти месяцев. Кроме того, достигнута непрерывная работа YAG-лазера в течение этого времени, что обусловлено сроком службы лампы накачки (согласно нашим подсчетам, максимальное число импульсов составляет 119380846). Непрерывная работа при постоянно возрастающем рабочем напряжении лампы накачки увеличивает срок службы лампы в пять раз без потери стабильности энергии лазерного импульса. Если генератор стабилен без срыва режима синхронизации мод, вся лазерная система может стабильно работать на протяжении длительного времени с указанной выше стабильностью энергии импульса. Во время такой потенциально непрерывной работы каждый параметр лазера поддерживался постоянным без каких бы то ни было признаков нестабильности.

Продемонстрировано трехмерное профилирование (временное и двумерное пространственное) коротких импульсов (2–20 пс) лазерного излучения как идеального источника долговременной стабильной генерации высокозарядного электронного пучка с низким эмиттансом. В настоящий момент для автоматического профилирования пространственной структуры излучения УФ лазера используются ДЗ с обратной связью на базе ГА и импульсный накопитель для временного профилирования. Пространственная структура импульса представляет собой цилиндрическое распределение (top-hat), во времени импульс имеет прямоугольную форму. При использовании профилированного лазерного импульса с диаметром 0.8 мм на катоде и длительностью 10 пс (по полувысоте) мы получили минимальный горизонтальный эмиттанс 1.4π -мм-мрад с энергией пучка 26 МэВ при плотности его заряда 0.4 нК/имп. При более высоких плотностях заряда с эквивалентным диаметром и длительностью импульса 20 пс (по полувысоте) минимальный горизонтальный эмиттанс составляет 2.3π -мм-мрад. Этот электронный источник высокой яркости при непрерывной работе в течение длительного времени поддерживал низкий эмиттанс, почти достаточный с точки зрения требований рентгеновского ЛСЭ. Обеспечив высокую точность оптимизации трехмерного профиля лазерного импульса, мы ставим перед собой задачу создания

электронного луча высокой яркости с возможно меньшим эмиттансом.

Для достижения адаптивного контроля временных параметров лазерных импульсов нами разрабатывается программируемая система профилирования импульса на основной длине волны на базе ПМС, основой которого являются пластины кварцевого стекла (Cyber Laser Inc.) [14]. Временная форма импульса регистрируется при помощи стрик-камеры или частотно-разрешенного оптического стробирования (FROG). Мы используем адаптивную оптическую систему профилирования импульса, которая содержит как ДЗ, так и пространственный модулятор в выходной секции лазерной системы. Сейчас в процессе разработки находится сложная программа, предназначенная для исследования возможностей профилирования пространственной и временной структур неравномерного профиля УФ излучения. В будущем мы планируем использовать этот адаптивный оптический комплекс с обратной связью (ДЗ и ПМС) для непосредственной оптимизации трехмерного профиля сгустка электронного пучка, генерируемого фотокатодом, с целью дальнейшего сокращения эмиттанса. Ожидается, что посредством этой процедуры можно будет получить более надежный профиль электронного пучка с компенсацией некоторых оптических искажений и неравномерной квантовой эффективности поверхности катода. Однако необходимо прояснить явления, связанные с попаданием лазерного излучения на катод, поэтому эта проблема будет тщательно исследоваться вместе с физикой поверхности катода.

В исследование проблем долговременной стабильности нашей лазерной системы и в разработку надежного способа профилирования излучения третьей гармоники внесли вклад многие компании. Авторы выражают благодарность всему коллективу Femtolasers Produktions GmbH, H.Jousselin (THALES LASER Co., Ltd) и K.Takasago (Cyber-Laser Inc.). Часть этой работы по созданию пространственного модулятора света на основе пластин из кварцевого стекла поддерживалась проектом Advanced Compact Accelerator Development (Япония).

1. Taniuchi T. et al. *Proc. 18th. Int. Free Electron Laser Conf.* (Rome, Italy, 1996, p. 137–139).
2. Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report, SLAC-R-593, April 2002.
3. TESLA Techn. Design Report, PART V, The X-Ray Free Electron Laser (March 2001). Ed. by G.Materlik and Th.Tschentscher.
4. Rivers J. SCSS X-FEL Conceptual Design Report, RIKEN, May 2005.
5. Tomizawa H. et al. *Proc. EPAC2002* (Paris, 2002, p. 1819–1821).
6. Tomizawa H. et al. *Proc. 27th. Int. Free Electron Laser Conf.* (Stanford, US, 2005, p. 138–141).
7. Yang J. et al. *J. Appl. Phys.*, **92**, 1608 (2003).
8. Dewa H. et al. *Proc. 28th. Int. Free Electron Laser Conf.* (Berlin, Germany, 2006), in press.
9. Operator's Manual, Model LBA PC Series, Version 2.50, Spiricon Inc.: chapter 9 "ActiveX".
10. Operator's Manual, Model LBA PC Series, Version 2.50, Spiricon Inc.: chapter 6.19 "Top Hat Factor".
11. Limborg-Deprey C., Bolton P.R. *Nucl. Instr. and Meth. A*, **557**, 106 (2006).
12. Limborg-Deprey C., Tomizawa H. *Proc. Phys. Appl. High Brightness Electron Beams* (Erice, Italy, 2005), in press.
13. Tomizawa H. et al. *Nucl. Instr. and Meth. A*, **557**, 117 (2006).
14. Tomizawa H. et al. *Proc. LINAC 2004* (Luebeck, Germany, 2004, p. 207–209).