

Использование пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 для диагностики многоканальных лазерных установок

С.Г.Гаранин, С.А.Бельков, Г.С.Рогожников, Н.Н.Рукавишников, В.В.Романов, И.Н.Воронич, Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, В.И.Лозовой, М.Я.Щелев

Разработанная и изготовленная в ИОФ РАН пикосекундная электронно-оптическая камера (ЭОК) PS-1/S1 с щелевой разверткой (стрик-камера) использована для измерения пространственно-временных характеристик ультракоротких лазерных импульсов, генерируемых петаваттной лазерной установкой «ФЕМТО» в Институте лазерно-физических исследований в Сарове. Установлено, что камера пригодна для измерения пространственно-временных параметров одиночных лазерных импульсов с погрешностью около одной пикосекунды. Показано, что временной профиль интенсивности цуга пикосекундных импульсов может быть определен для отстоящих друг от друга импульсов на единицы пикосекунд. Камера позволяет определить контраст излучения с высокой (не менее 10^3) точностью; пространственное распределение лазерных импульсов может быть оценено с точностью до десятков микрон, а временное разделение одиночных лазерных импульсов может быть установлено с точностью 1–1.5 пс.

Ключевые слова: стрик-камера, временное разрешение, пико-фемтосекундный импульс.

1. Введение

Для эффективного применения лазерного излучения высокой энергии в экспериментальной физике, в том числе в опытах по взаимодействию такого излучения с веществом и высокотемпературной плазмой, важно иметь точную информацию о пространственно-временном поведении пикосекундных лазерных импульсов в каждой точке на всем оптическом пути многоканальной лазерной установки, а также о разделении одиночных лазерных импульсов в пространстве и времени. Поэтому имеется потребность в диагностической системе, которая позволит производить пространственно-временные измерения с требуемой точностью и будет легко интегрироваться в управляющую компьютерную систему.

С учетом нашего более чем 50-летнего опыта в создании и применении электронно-оптических стрик-камер, мы полагаем, что именно высокоскоростные электронно-оптические стрик-камеры [1] способны прецизионно оценивать пространственно-временные характеристики многоканальной лазерной установки. Эти уникальные диагностические устройства обеспечивают прецизионные измерения в спектральном диапазоне от мягкого рентгеновского (0.1 нм) до ближнего ИК (1.6 мкм) с субпикосекундным временным разрешением и десятимикронным (не менее 30 пар лин./мм) пространственным разрешением.

Работы по электронно-оптическому приборостроению в пико-фемто-аттосекундном диапазоне, ориентирован-

ному на применение в лазерной физике и физике лазерной плазмы [2], были начаты в ФИАНе (с конца 1960-х гг.), а затем продолжены в ИОФ РАН (с 1983 г. по настоящее время).

В нашей работе приводятся результаты использования пикосекундной стрик-камеры модели PS-1/S1, разработанной в ИОФ РАН, для пространственно-временных измерений ультракоротких лазерных импульсов, генерируемых петаваттной лазерной установкой «ФЕМТО» в Институте лазерно-физических исследований в Сарове [3].

2. Электронно-оптическая стрик-камера PS-1/S1

Основой камеры PS-1/S1 является весьма надежный и хорошо воспроизводимый пикосекундный времяанализирующий ЭОП – стрик-трубка модели ПИФ-01 (рис.1). Предельное временное разрешение трубки ПИФ-01, предсказанное теоретически, в центре фотокатода стремится к 300 фс при напряженности электрического поля вблизи

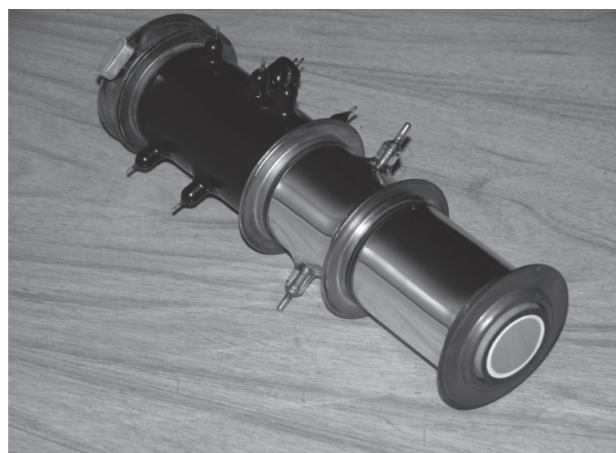


Рис.1. ПИФ-01 – пикосекундный ЭОП, разработанный и изготовленный в Отделе фотоэлектроники ИОФ РАН.

С.Г.Гаранин, С.А.Бельков, Г.С.Рогожников, Н.Н.Рукавишников, В.В.Романов, И.Н.Воронич. Институт лазерно-физических исследований, ФГУП Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров, просп. Мира, 37
Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, В.И.Лозовой, М.Я.Щелев. Институт общей физики им.А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: m.schelev@ran.gpi.ru

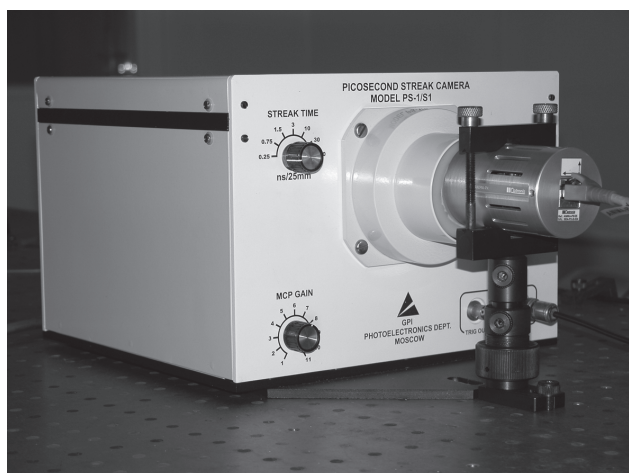


Рис.2. Пикосекундная электронно-оптическая камера PS-1/S1, разработанная и изготовленная в Отделе фотоэлектроники ИОФ РАН.

него 3 кВ/мм, однако наилучший экспериментальный результат лишь приблизился к половине пикосекунды. Серебряно-кислородно-цезиевый (S1) фотокатод трубки ПИФ-01 формируется путем распыления ингредиентов на низкоомную подложку. Нами также изготавливаются стрик-трубки с фотокатодами S20 и S25, что обеспечивает перекрытие диапазона спектральной чувствительности камеры от 115 до 1550 нм.

Пикосекундная стрик-камера PS-1/S1 на основе трубки ПИФ-01 (рис.2) была разработана, изготовлена и испытана еще в 1995 г. [4]. Экспериментально измеренное максимальное временное разрешение стрик-камеры PS-1/S1 при скорости развертки по выходному экрану ЭОП $(1-2) \times 10^{10}$ см/с составляет 1 ± 0.2 пс на длине волны лазерного излучения 800 нм. Минимальная задержка срабатывания камеры составляет 20 нс при нестабильностях срабаты-

ния ± 3 пс. Столь незначительная нестабильность позволяет камере работать в режиме накопления очень слабых входных сигналов пикосекундной длительности.

Как правило, для «съемки» и обработки проанализированных во времени изображений с выходного экрана электронно-оптической камеры (ЭОК) нами используется считывающая ПЗС-система С8484-05G (Hamamatsu, Япония). Экран трубки ПИФ-01 проецируется на ПЗС-матрицу высокоапертурными объективами через внешний усилитель яркости на микроканальной пластине (МКП). В одной из последних конфигураций ЭОК PS-1/S1 была применена считывающая ПЗС-система ANIMAPX-25 (Ortronis, Германия), которая стыкуется с выходным экраном трубки через волоконно-оптический согласователь с коэффициентом отображения 25 мм/11.5 мм. Технические данные ЭОК PS-1/S1 приведены ниже.

Тип времяанализирующего ЭОП	ПИФ-01
Спектральный диапазон фотокатода S1 (нм)	350–1300
Тип усилителя яркости	ЭП-10
Максимальный коэффициент усиления по яркости МКП	3×10^4
Количество ступеней регулировки яркости	11
Длительности развертки на экран 25 мм (нс)	0.21, 0.765, 1.5, 3, 10, 30, 100
Динамическое пространственное разрешение вдоль направления щели (пар лин./мм)	10
Временное разрешение для ЭОП с фотокатодом S1 (пс)	не хуже 1
Динамический диапазон регистрации (при максимальном временном разрешении)	не менее 10
Временная нелинейность разверток (%)	не более 10
Задержка срабатывания (нс)	не более 20
Нестабильности срабатывания (пс)	не более ± 3

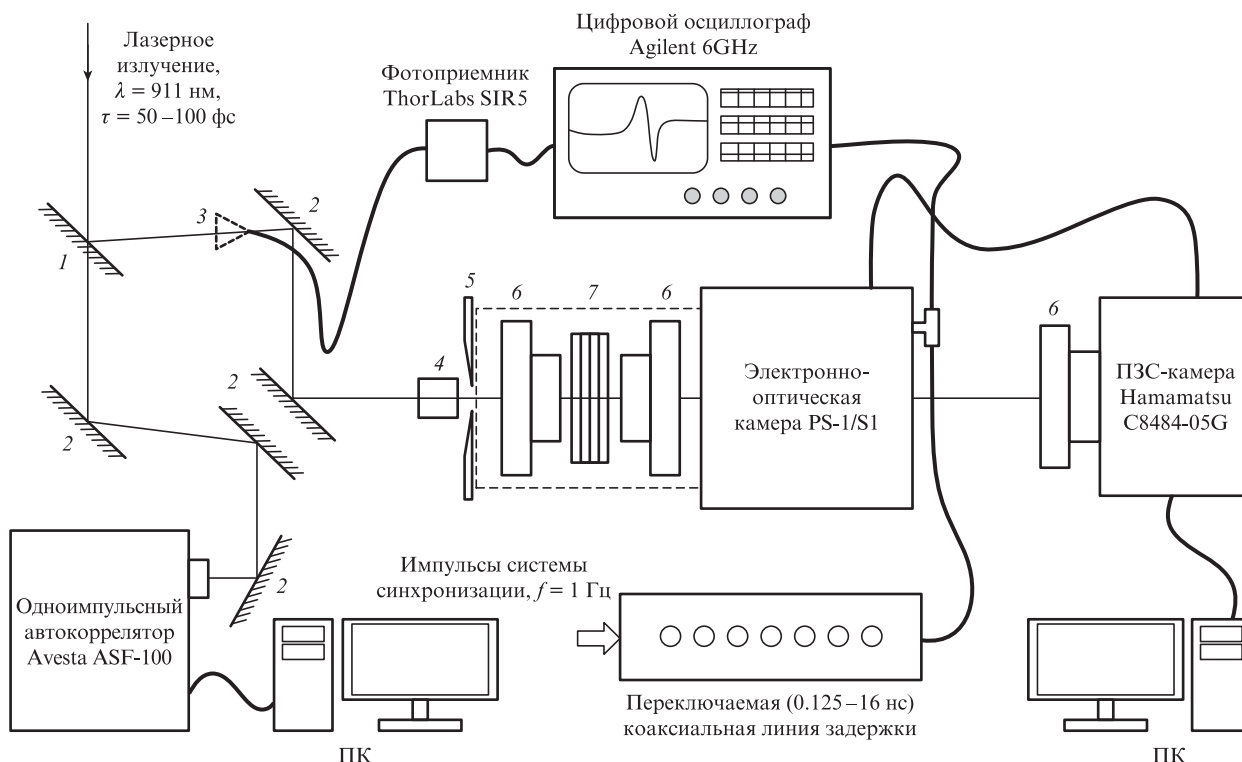


Рис.3. Схема экспериментальной установки по тестированию ЭОК PS-1/S1: 1 – полупрозрачное зеркало; 2 – глухие зеркала; 3 – многомодовое оптоволокно; 4 – делительная пластина; 5 – микрометрическая щель; 6 – объективы «Гелиос-44»; 7 – набор светофильтров.

3. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для испытания пикосекундной ЭОК PS-1/S1 показана на рис.3. Одиночные лазерные импульсы длительностью 50–100 фс на длине волны 911 нм генерируются с частотой повторения 1 Гц в одном из каналов установки «ФЕМТО» [5]. Выходная энергия одиночного импульса близка к 10 мДж. Автокорреляционная функция одиночного лазерного импульса, зарегистрированная автокоррелятором Авеста ASF-100, показана на рис.4.

Небольшая часть выходного лазерного излучения направлялась на входную щель ЭОК через калиброванную плоскопараллельную стеклянную пластину, которая перекрывала половину высоты входной щели. Запуск ЭОК производился с помощью системы синхронизации, включающей высокоточную, переключаемую коаксиальную линию задержки (0.125–16 нс). Для контроля времени задержки использовался осциллограф Agilent (6 ГГц). Входная оптическая система, состоящая из двух объективов «Гелиос 44 М-4», отображала плоскость входной щели на плоскость фотокатода ЭОП в масштабе 1:1. Между объективами могли помещаться светофильтры, не приводящие к дефокусировке входной щели.

Изображения с выходного экрана ПИФ-01 отображались через внешний усилитель яркости на МКП (модель ЭП-10) и через репродукционные объективы на ПЗС-камеру C8484-05G. Специализированная программа обеспечивала полный набор функций обработки регистрируемых хронограмм: измерение профиля интенсивности во времени, измерение длительности лазерных импульсов по полувысоте или по любому другому уровню, временное разделение одиночных импульсов, измерение нелинейности скорости щелевой развертки вдоль экрана, а также вычит шума и повышение отношения сигнал/шум в зарегистрированных картинах и т. д.

4. Экспериментальные результаты

Для определения скорости и нелинейности развертки на выходном экране ЭОК была использована стеклянная пластинка (К-8) толщиной 15 мм, которая помещалась на входе камеры, закрывая половину высоты ее входной щели. Калиброванная временная задержка между верхней и нижней частями пучка составляла 25 пс. На рис.5 показаны зарегистрированная хронограмма и соответствующая микроденситограмма при толщине стеклянной пластинки 1 мм. Максимальная скорость развертки составила 160 фс/пк.

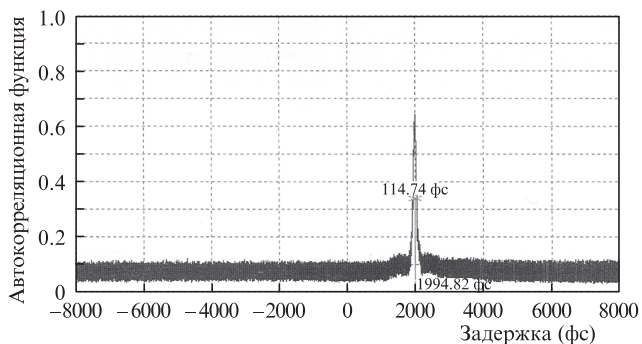


Рис.4. Автокорреляционная функция одиночных лазерных импульсов, генерируемых установкой «ФЕМТО».

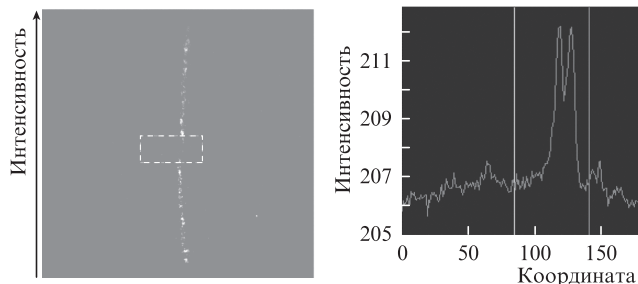


Рис.5. Фотография с экрана развернутого во времени изображения щели и пропись выделенной области для пластины толщиной 1 мм; расстояние между «верхней» и «нижней» частями импульса 1.66 пс.

Эксперименты по измерению предельной временной аппаратной функции камеры PS-1/S1 показали, что её значение колеблется в пределах 1–2 пс. Минимальное значение временной аппаратной функции составило по полувысоте 1.1 пс (6.99 пк). Автокорреляционная функция для именно этого входного лазерного импульса дает значение, равное 100 фс.

5. Заключение

Итак, на основе экспериментальных результатов, полученных в ходе испытаний пикосекундной стрик-камеры PS-1/S1 на лазерной установке «ФЕМТО», можно сделать следующие выводы:

– ЭОК PS-1/S1 вполне пригодна для измерения одиночных лазерных импульсов с временным разрешением около одной пикосекунды, а также цуга одиночных лазерных импульсов, следующих с таким же периодом.

– ЭОК PS-1/S1 может быть использована для контроля пространственного распределения лазерного излучения, облучающего мишень.

– Благодаря большому диапазону скорости щелевой развертки, ЭОК PS-1/S1 может быть использована для регистрации лазерных импульсов нано- и субнаносекундной длительности, что позволяет использовать её для контроля силовых каналов многоканальных лазерных установок.

– Отметим возможность использования стрик-камеры в фемтосекундном временном диапазоне (ранее мы сообщали о достижении временного разрешения 200 фс на экспериментальном ЭОП типа ПВ-ФС [6]).

Авторы благодарят сотрудников Института лазерно-физических исследований РФЯЦ–ВНИИЭФ и Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН за их добрую помощь в организации и успешном проведении испытаний ЭОК PS-1/S1 на лазерной установке «ФЕМТО».

1. Андреев А.Н., Дубовик А.С., Дегтярева В.П. и др. *Высокоскоростная фотография и фотоника в исследовании быстропротекающих процессов* (М.: Логос, 2002).
2. Щелев М.Я. *УФН*, **170** (9), 1002 (2000); *УФН*, **182** (6), 649 (2012).
3. Гаранин С.Г., Бельков С.А. и др. *Труды XXXIX Межд. конф. по физике плазмы и УТС* (Звенигород, 2012, докл. 12).
4. Lozovoi V.I., Vorob'ev N.S., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2869**, 179 (1996).
5. Рогожников Г.С., Рукавишников Н.Н. и др. *Доклады 22-й Межд. конф. «Лазеры. Измерения. Информация»* (Санкт-Петербург, 2012, с. 134).
6. Прохоров А.М., Воробьев Н.С. и др. *Квантовая электроника*, **32** (4), 283 (2002).