

# 4-Х КАДРОВЫЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОНО-ОПТИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР ПОВЫШЕННОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

## 4 FRAME HIGH SPEED ELECTRO-OPTICAL CAM WITH ENHANCED SPATIAL RESOLUTION

*Д. С. Корниенко, Д. Н. Литвин, А. Г. Кравченко, В. В. Мисько, В. М. Тараканов*

*D. S. Kornienko, D. N. Litvin, A. G. Kravchenko, V. V. Misko, V. M. Tarakanov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ИЛФИ

FSUE RFNC VNIIEF ILFI

Для совершенствования фотохронографических методов регистрации [1, 2], используемых на лазерных установках, разработан новый кадровый регистратор повышенного временного и пространственного разрешения. Прибор имеет следующие характеристики:

- Диапазон спектральной чувствительности, нм – от 400 до 900;
- Количество кадров за один цикл регистрации – 4;
- Пространственное разрешение (при поле зрения 3 мм), мкм – 20;
- Время регистрации, мкс – от 0,4 до 500;
- Длительность экспозиции кадра, мкс – от 0,05 до 16;
- Частота кадров, МГц – до 10;
- Регулируемая задержка запуска, мкс – от 0.2 до 150;
- Внутренний коэффициент усиления – от 1 до 1000;
- Динамический диапазон линейной регистрации – 2000.

Регистратор прошел успешную апробацию в модельных экспериментах и в экспериментах на лазерной установке.

A new frame cam with enhanced temporal and spatial resolution has been developed to improve photochronographical registration methods [1, 2] using at laser facilities. Characteristics of this device are the following:

- Spectral senility range, nm – from 400 to 900;
- Number of frames per registration cycle – 4;
- Spatial resolution (field of view 3 mm),  $\mu\text{m}$  – 20;
- Registration time,  $\mu\text{s}$  – from 0.4 to 500;
- Frame exposition duration,  $\mu\text{s}$  – from 0.05 to 16;
- Frame rate, MHz – up to 10;
- Adjustable start delay,  $\mu\text{s}$  – from 0.2 to 150;
- Internal amplification coefficient – from 1 to 1000;
- Dynamic range of linear registration – 2000.

A frame cam passed testing in model experiments and experiments at laser facility.

### Введение

Для изучения быстропротекающих процессов, таких как возмущение в газах и жидкостях, распространение ударных волн, обтекание тел, кинетика взрывных процессов, динамика выброса частиц из вещества часто используется метод скоростной кадровой съемки.

В ИЛФИ на лазерных моделирующих установках проводятся такие исследования с созданием ударных нагрузок на различные материалы уровня

сотен килобар – десятков мегабар. Основной сложностью в этих исследованиях является необходимость работы с малоразмерными образцами, повышенные требования к быстродействию и пространственному разрешению методик диагностики.

Ранее в ИЛФИ был разработан 9 кадровый регистратор СЭР-7 [1], который использовался для регистрации различных процессов, например динамики плазменных образований.

Результаты проведенных исследований показали насущную потребность в повышении информа-

тивности регистрации. Так СЭР-7, у которого при пространственном разрешении  $\leq 25$  пар штр./мм все девять кадров размещались на выходном экране  $\varnothing 25$  мм. В результате регистрируемые кадры имели размерность не более  $100 \times 100$  разрешаемых элементов. При пространственном разрешении 20 мкм поле зрения имело явно недостаточный размер  $\sim 1$  мм. Кроме того, переход к большим скоростям частиц потребовал сокращения минимальной длительности экспозиции каждого кадра с 1 мкс до не более 100 нс и увеличения частоты съемки до не менее 3 МГц.

Для выполнения этих задач была проведена разработка нового электронно-оптического регистратора СЭР-8, чему и посвящена данная работа.

### 1. Разработка высокоскоростной 4-х кадровой камеры повышенного разрешения СЭР-8

К основным недостаткам существующего варианта камеры СЭР-7 [1], следует отнести:

- Малое количество разрешаемых элементов в изображении.

- Большая минимальная экспозиция 1 мкс.

Для изучения более скоростных процессов требуется уменьшения минимальной длительности экспозиции кадра с 1 мкс до не более 100 нс, при увеличении частоты съемки с 1 МГц до 3 МГц и больше.

Поэтому была проведена разработка новой высокоскоростной многокадровой камеры повышенного разрешения СЭР-8.

Для обеспечения высокого пространственного разрешения была изменена структурная концеп-

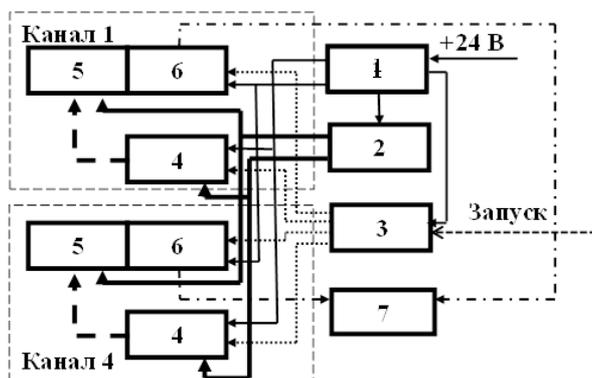
ция регистратора. Было предложено формировать каждый кадр на отдельном ЭОП, сочлененным с собственной ПЗС-камерой. Такой шаг делает не обязательным использование дорогостоящего ЭОП с времяанализирующим каскадом. Достаточным является ЭОП – усилитель яркости с затвором на микроканальной пластине. Длительность и момент экспозиции, а также чувствительность камеры задается импульсом питания МКП, подаваемым в соответствующий момент с требуемой амплитудой. При системе один кадр – один ЭОП, весь размер катода можно использовать для изображения объекта. Рабочий размер катода ЭОП составляет 16 мм – таким образом, пространственное разрешение разрабатываемой камеры возросло примерно в 3 раза.

Количество кадров в разрабатываемой камере задается количеством используемых ЭОП. Опыт работы с камерой СЭР-7 показал, что для проведения измерений динамики какого-либо процесса требуется не менее 3–4 кадров. Исходя из этого, для разрабатываемого регистратора был выбран 4-х кадровый вариант, хотя количество кадров может быть увеличено за счет постановки дополнительных ЭОП и ПЗС-камер.

#### 1.1. Структурная схема СЭР-8

СЭР-8 состоит из 4 одинаковых каналов (рис. 1), а также общих для всех каналов блоков, обеспечивающих их работу:

- Блок низковольтного питания.
- Блок высоковольтного питания.
- Модуль управления.



1. Блок низковольтного питания.
2. Блок высоковольтного питания.
3. Модуль управления.
4. Генератор кадрового импульса.
5. Усилитель яркости
6. ПЗС-камера.
7. Персональный компьютер

- > Низковольтные цепи питания.
- > Высоковольтные цепи питания.
- .....> Низковольтные импульсы запуска.
- -> Высоковольтный кадровый импульс.
- · - ·> ВОЛС к ПК.

Рис. 1. Схема камеры СЭР-8

Модуль управления, подавая поочередно в соответствующие моменты на вход генераторов кадровых импульсов импульсы управления, длительность которых определяет длительность экспозиции кадра. Кроме этого, модуль управления формирует сигналы запуска режима регистрации ПЗС-камер. Общий запуск цикла регистрации камеры осуществляется сигналом, приходящим на вход модуля управления. Предусмотрены электрический, оптический синхросигналы, а также сигнал запуска, формируемый вручную от кнопки. Модуль управления позволяет устанавливать задержку между моментом прихода синхроимпульса и началом цикла регистрации, а также частоту и длительность экспозиции кадров.

Каждый кадровый канал состоит из генератора кадрового импульса (ГКИ), ЭОП (усилителя яркости) и ПЗС-камеры. На рис. 1 для упрощения показаны только два канала.

## 1.2. Электронно-оптический преобразователь

В основу разрабатываемой камеры нами положен обладающий требуемыми техническими характеристиками и доступный усилитель яркости ЭПМ-61Г производства «МЭЛЗ-ФЭУ» с многощелочным фотокатодом и микроканальной пластиной. Прибор снабжен оптоволоконным входом и выходом. Этот ЭОП уже был успешно применен нами в разработанном в 2013 г. фотохронографе СЭР-5 [2]. Основные параметры ЭОП ЭПМ 61Г – диаметр входного и выходного окон ~25 мм, разрешающая способность не менее 36 штрихов/мм, динамический диапазон не менее 4000.

Альтернативой ЭПМ-61Г является бипланарный ЭОП ТПО25, недавно разработанный в ФГУП «ВНИИА». Их преимуществом является почти на 2 порядка меньшая яркость темного фона и в 2,5 раза меньшие габариты, по сравнению с ЭПМ-61Г. Другие основные технические характеристики этих приборов совпадают.

## 1.3. Устройство съема информации

Для считывания кадра с экрана ЭОП была применена ПЗС камера S2C-017 APF производства АО «НПП СИЛАР». Она имеет волоконно-оптическую пластину на входе, что обеспечивает непосредственный контакт экрана усилителя яркости и ПЗС камеры. Как по пространственному разрешению, размерам, так и по остальным характеристикам ЭОП и матрица хорошо сочетаются между собой. Основные характеристики камеры: число пикселей – 1040×1160, размер пикселя – 16×16 мкм, динамический диапазон – 4000.

Зарегистрированные ПЗС-камерами кадры передаются в персональный компьютер (см. рис. 1).

## 1.4. Параметры регистратора СЭР-8

Подводя итоги этого раздела, приведем характеристики созданной 4-х кадровой камеры СЭР-8:

- частота кадров до 10 МГц;
- время обзора от 400 нс до 500 мкс;
- длительность экспозиции кадра от 50 нс до 16 мкс;
- время задержки пуска от 150 нс до 150 мкс.

## 2. Оптическая схема регистратора СЭР-8

Лучшим вариантом оптической схемы является деление входного пучка с помощью светоделительных кубов. Такая схема имеет не очень большие габариты и проста в настройке [3]. Поэтому для разрабатываемой камеры было применено именно деление светового пучка с помощью светоделительных кубов, как показано на рис. 2. Основные требования к кубам: обеспечение требуемого пространственного разрешения, коэффициенты деления должны обеспечить примерно одинаковую интенсивность на камерах, кубы должны быть неполяризующими, чтобы сохранились коэффициенты деления при последовательной их постановке.

Измерительный объектив устанавливается вне корпуса камеры. Такой подход делает систему более гибкой, легко адаптируемой к условиям и целям эксперимента. За счет выбора типа, фокусного расстояния, положения объектива можно менять масштаб построения объекта, пространственное разрешение и поле зрения.

Проверка пространственного разрешения регистратора проводилась при двух масштабах построения изображения.

В первом случае в качестве объекта была взята мира ГОИ № 4. Изображение на входе ЭОПов строилось с помощью объектива О-2 с фокусом  $f = 60$  см. Масштаб перестроения составлял М1:1.

Обработка показала, что предельное пространственное разрешение (при контрасте  $K = 3 - 5\%$ ) для всех 4-х каналов составило 25 штр/мм, что примерно соответствует ожидаемому пространственному разрешению системы из двух соединенных последовательно элементов с пространственным разрешением 33 пары линий на миллиметр.

Для проверки соответствия камеры предъявляемым к ней требованиям по предельному пространственному разрешению была проведена

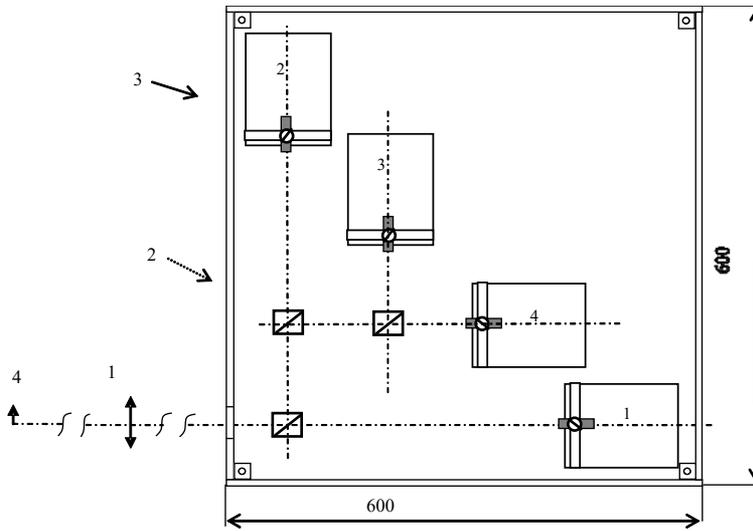


Рис. 2. Оптическая схема 4-х кадрового регистратора. 1 – объектив, 2 – светоделительные кубы, 3 – ЭОПы с ПЗС камерами, 4 – мира ГОИ № 4

25 поле

Пропись 25 поля:

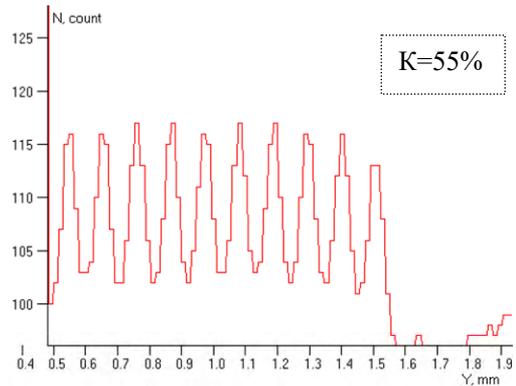
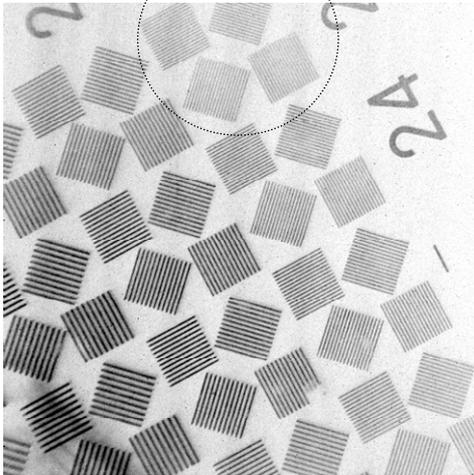


Рис. 3. Изображения миры № 3, при съемке с оптическим увеличением М5:1

съемка тест-объекта – миры ГОИ № 3 с масштабom перестроения М5:1. На рис. 3 приведены результаты съемки миры ГОИ № 3.

Период 25 поля миры № 3 составляет 20 мкм (50 пар штрихов на миллиметр). На прописи полученного изображения шаг миры составил 0,1 мм, что с учетом масштаба увеличения оптической схемы соответствует 20 мкм по объекту. Таким образом, показано, что при съемке с масштабom увеличения М5:1, методика обладает пространственным разрешением не хуже 20 мкм при этом коэффициент контраста составляет  $K = 55\%$ .

Рабочий размер фотокатода составляет 16 мм. При съемке с оптическим увеличением М5:1 поле зрения методики составляет не менее 3 мм.

### 3. Экспериментальная проверка работоспособности регистратора

С целью проверки работоспособности регистратора в условиях реального эксперимента были сделаны модельные эксперименты на электроразрядном генераторе. С помощью специального генератора осуществлялся быстрый взрыв проволоочки, разлетающиеся фрагменты которой регистрировались камерой СЭР-8.

Для съемки были выбраны следующие режимы работы камеры: задержка съемки после пуска в первом срабатывании – 10 мкс, во втором – 30 мкс. Экспозиция кадров – 0,5 мкс, период следования кадров – 5 мкс.

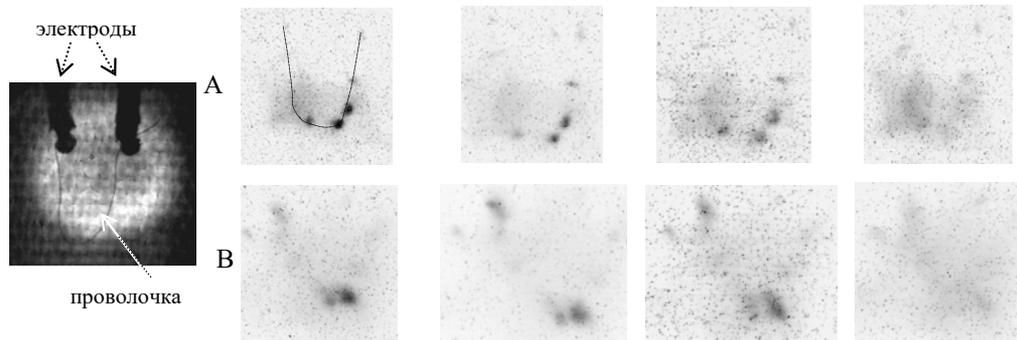


Рис. 4. Результаты регистрации 4-х кадровой камерой. А – разлет проволочки, снятый с задержкой 10 мкс после срабатывания генератора, В – с задержкой 30 мкс. Нумерация кадров слева, построчно. На 1 кадре регистрации А условно показано начальное положение проволочки

Полученная регистрация, представленная на рис. 4, демонстрирует динамику свечения и разлета элементов проволочки. Увеличение задержки запуска во втором срабатывании позволило увидеть более позднюю фазу взрыва проволочки.

Обработка полученных кадров дала следующие результаты: скорость разлета частиц проволочки составила  $V = 120 \text{ м/с} (\pm 20 \%)$ . Размер частиц –  $1 \text{ мм} (\pm 20 \%)$ .

Проведенные эксперименты показали работоспособность регистратора СЭР-8.

#### 4. Проверка регистратора в реальных экспериментах

Для проверки камеры в реальных условиях было решено изучить динамику разлета мишени на установке «ИСКРА-5».

Суть проводимого опыта – выстрел лазером в полую сферическую мишень, как показано на рис. 5. Данный рисунок – это настроечный кадр камеры перед опытом, видны сфера и подвес.

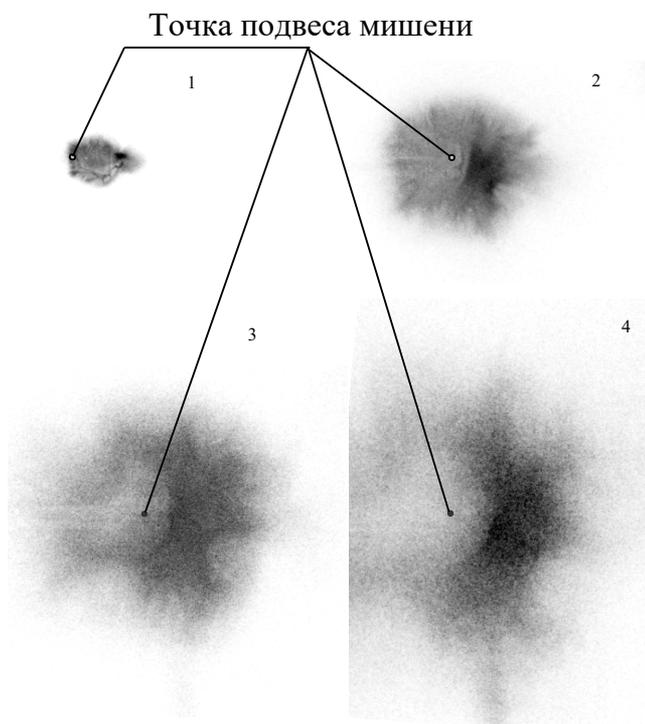


Рис. 6. Регистрация разлета сферы

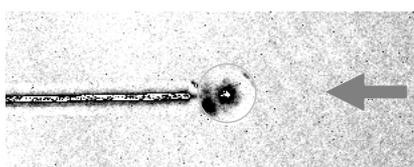


Рис. 5. Настроечный кадр, опыта со сферой

Настройки камеры были следующие – задержка  $\sim 50 \text{ нс}$ , период  $250 \text{ нс}$ , экспозиция  $50 \text{ нс}$ .

Полученные кадры разлета сферы представлены на рис. 6.

Измеренная скорость разлета мишени  $V \sim 40 \text{ км/с}$ .

#### Заключение

Создан 4-х кадровый высокоскоростной электронно-оптический регистратор повышенного пространственного разрешения, со следующими характеристиками:

- Диапазон спектральной чувствительности, нм – от 400 до 900.
- Количество кадров за один цикл регистрации – 4.
- Пространственное разрешение (при поле зрения 3 мм), мкм – 20.
- Время регистрации, мкс – от 0,4 до 500.

- Длительность экспозиции кадра, мкс – от 0,05 до 16.
- Частота кадров, МГц – до 10.
- Регулируемая задержка запуска, мкс – от 0,2 до 150.
- Внутренний коэффициент усиления – от 1 до 1000.
- Динамический диапазон линейной регистрации – 2000.
- Возможность индивидуальной настройки чувствительности кадров.

### Список литературы

1. Душина Л. А., Корниенко Д. С., Кравченко А. Г. и др. «Многокадровый оптический фото-

хронограф микросекундного диапазона СЭР-7 и методики регистрации быстропротекающих процессов на его основе». Сборник докладов 13 научно-технической конференции «Молодежь в науке». Саров. 2015. С. 187–193.

2. Корниенко Д. С., Кравченко А. Г., Литвин Д. Н., Мисько В. В., Рукавишников А. Н., Сенник А. В., Стародубцев К. В., Тараканов В. М., Чаунин А. Е. «Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза». Приборы и Техника Эксперимента, 2014, № 2. С. 78–89.

3. Ананьев С. С., Казаков Е. Д., Шведов А. А. Беспараллаксная шестикадровая электронно-оптическая камера для исследований в области импульсного утс и других импульсных процессов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2012. Вып. 2. С. 89–93.