

## СРАВНЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОХРОНОГРАФОВ НА ОСНОВЕ ЭОП РАЗНОГО ТИПА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

*Душина Ляна Александровна, Корниенко Дмитрий Сергеевич, Кравченко Андрей Григорьевич,  
Мисько Владимир Васильевич, Мюсова Айдана Евгеньевна (oefimova@otd13.vniief.ru),  
Стародубцев Константин Владимирович, Тараканов Василий Михайлович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для регистрации временных параметров лазерного импульса используются фотохронографы и методики на их основе [1, 2]. Основное преимущество фотохронографа – возможность регистрировать излучение с высоким временным и пространственным разрешениями, а также большим динамическим диапазоном (~1000). Это становится возможным благодаря техническим характеристикам основной составляющей фотохронографа – электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Одним из параметров, отвечающим за столь высокие выходные характеристики электронно-оптического преобразователя является чувствительность катода на заданной длине волны. Проведено исследование фотохронографов с ЭОП различного типа с целью выбора регистратора с максимальной чувствительностью на основной гармонике моделирующих установок на неодимовом фосфатном стекле. Сравнивались электронно-оптические преобразователи с серебряно-кислородно-цезиевым фотокатодом ПИМ-103 (разработка ВНИИОФИ) [3] в составе регистратора СЭР-5 и СПО-9 (разработка ВНИИА) [6] в составе регистратора СЭР-4 при параллельной регистрации длительности импульса на установке «Луч» [4].

По результатам исследования сделан вывод, что чувствительность прибора СЭР-5 с ЭОП типа ПИМ-103 выше, чем у прибора СЭР-4 с ЭОП типа СПО-9 на длине волны 1054 нм.

**Ключевые слова:** электронно-оптический преобразователь, фотохронограф, неодимовое фосфатное стекло, серебряно-кислородно-цезиевый фотокатод, чувствительность.

## COMPARISON OF SENSITIVITY OF STREAK-CAMERAS BASED ON EOCs OF DIFFERENT TYPES FOR RECORDING DURATION OF A NANOSECOND LASER PULSE

*Lyana Aleksandrovna Dushina, Dmitry Sergeevich Kornienko, Andrey Grigorievich Kravchenko,  
Vladimir Vasilievich Misko, Aйдana Evgenievna Myusova (oefimova@otd13.vniief.ru),  
Konstantin Vladimirovich Starodubtsev, Vasily Mikhailovich Tarakanov*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Streak-cameras and techniques based on them are used to record time parameters of a laser pulse [1, 2]. The main advantage of a streak-camera is the ability to record radiation with high temporal and spatial resolution, as well as a large dynamic range (~1000). This becomes possible due to technical characteristics of the main component of a streak-camera – an electrooptical converter (EOC). Cathode sensitivity at a given wavelength is one of the parameters responsible for such high output performance of the electrooptical converter. Streak cameras with electrooptical converters of various types were studied in order to select a recorder with the maximum sensitivity at the fundamental harmonic of neodymium phosphate glass simulators. We compared electrooptical converters with a silver-oxygen-cesium photocathode PIM-103 (developed by VNIIOFI) [3] as part of a SER-5 recorder and SPO-9 (developed by VNIIA) [6] as part of a SER-4 recorder with parallel recording of the pulse duration at the facility «Luch» [4].

The results of research enabled to conclude that sensitivity of the SER-5 device with an electrooptical converter of PIM-103 type is higher than that of the SER-4 device with an electrooptical converter of SPO-9 at a wavelength of 1054 nm.

**Keywords:** electrooptical converter, streak-camera, neodymium phosphate glass, silver-oxygen-cesium photocathode, sensitivity.

## Фотохронограф

Щелевой фотохронограф включает время нализирующий ЭОП типа СПО-9 или ПИМ-103, усилитель яркости на микроканальной пластине (МКП) типа ЭПМ61Г (МЭЛЗ, г. Москва) и ПЗС-камера S2C-017FO [5] (ООО «НПП СИЛАР», г. Санкт-Петербург). В состав регистратора также входят плата питания и блоки управления, развертки и гашения.

Блок-схема фотохронографа представлена на рис. 1. В приборе предусмотрены оптический и электрический запуски. Предусмотрены статический и импульсный режимы работы: в статическом режиме развертка отключена, питание усилителя яркости постоянное; в импульсном режиме развертка включена, питание усилителя импульсное, с запуском от синхросигнала развертки.

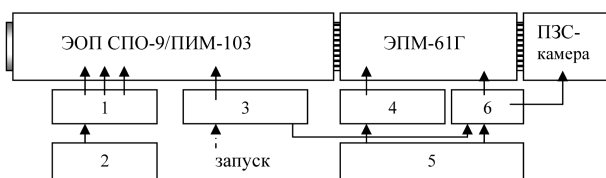


Рис. 1. Структурная схема фотохронографа: 1 – электрическая схема высоковольтного делителя для питания ЭОП, 2 – высоковольтные источники питания, 3 – схема развертки гашения, 4 – электрическая схема высоковольтного делителя для питания ЭПМ-61Г, 5 – источники питания для делителя МКП, 6 – схема импульсного питания МКП

В таблице представлены паспортные характеристики регистраторов СЭР-5 и СЭР-4.

### Паспортные характеристики регистраторов

Вид фотохронографа	СЭР-5	СЭР-4
Временное разрешение, пс	300	50
Пространственное разрешение, пар.шт./мм	20	15
Динамический диапазон	600	100
Длительность развертки, нс	60	9
Абсолютная спектральная чувствительность фотокатода на длине волны 1060 нм, мА/Вт	0,52	0,36

## Оптическая схема

Сравнение чувствительности катодов различных ЭОП проводилось в штатной схеме диагностики временных параметров на основе фотохронографа СЭР-4 с ЭОП СПО-9 первой гармоники установки «Луч». Для этого в схему диагностики дополнительно введен канал измерения, включающий в себя волоконно-оптическую линию связи и регистратор СЭР-5 с ЭОП ПИМ-103. На рис. 2 представлена адаптированная оптическая схема методики регистрации длительности лазерных импульсов.

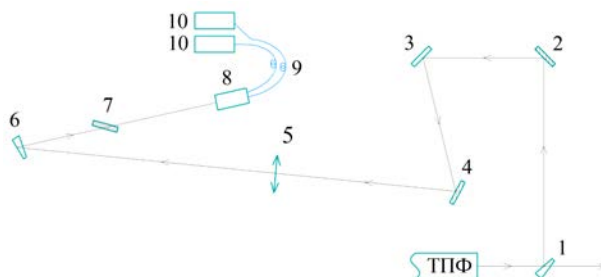


Рис. 2. Схема оптической установки «Луч»: 1, 6 – клинья; 2, 4 – глухие поворотные зеркала, 3 – полупрозрачное поворотное зеркало; 5 – линза; 7 – поляризатор; 8 – блок волоконно-оптического коллектора (БВОК); 9 – волоконно-оптические кабели; 10 – фотохронограф

Отбор части оптического излучения из силового пучка на выходе транспортного пространственного фильтра установки «Луч» (рис. 2) для измерения временных параметров лазерного излучения производится с помощью клина 1. Поворотные зеркала 2, 4, полупрозрачное зеркало 3 и клин 6 транспортируют излучение на БВОК 8. Поляризатор 7 отделяет излучение с s-поляризацией. Линза 5 предназначена для перестроения изображения плоскости выходного окна транспортного пространственного фильтра (ТПФ) на БВОК 8 с заданным масштабом. БВОК 8 предназначена для замешивания и разделения падающего оптического излучение на равные по мощности каналы, сигналы с которых через волоконно-оптические кабели различной длины 9 поступают на регистраторы 10. Кроме этого в БВОК 8 предусмотрена возможность индивидуального ослабления сигналов каждого из полученных каналов [7].

### Калибровочные измерения

Сравнение чувствительности фотохронографов проводится путем сравнения энергии (интеграла

интенсивности во времени) зарегистрированных сигналов. Оптическая схема транспортировки лазерного излучения до фотохронографов одина для обоих каналов до момента замешивания и разделения сигнала с помощью БВОК на две равные части. Кроме этого, диагностика регистрации пространственных параметров первой гармоники установки «Луч» показывает, что лазерное излучение неоднородно и имеет субструктуру в виде спеклов. Поэтому считаем, что основную ошибку измерений будет вносить блок волоконно-оптического коллектора и неоднородность пятна облучения. Для определения количественного значения вносимой погрешности проведены дополнительные калибровочные измерения. Измерения проводились на излучении импульсного неодимового лазера ЛТИ-44 (производство ВНИИОФИ, Москва) на длине волны  $\lambda = 1,054$  мкм. Длительность импульса составляла  $T = 5$  нс, энергия –  $E = 40$  мДж. В качестве регистратора использовалась CCD камера (производства СИЛАР). На рис. 3 представлена оптическая схема для калибровочных измерений.

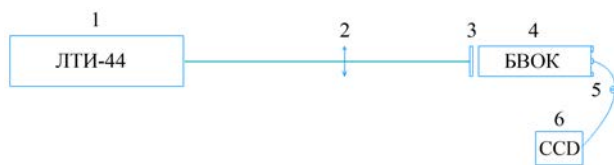


Рис. 3. Оптическая схема для калибровочных измерений: 1 – ЛТИ-44- импульсный лазер, 2 – объектив, 3 – набор ослабляющих фильтров, 4 – блок волоконно-оптического коллектора, 5 – волоконно-оптическая линия связи ВОЛС, 6 – CCD камера

Для симуляции неоднородности пятна облучения лабораторным лазером создавалось пятно, заведомо меньшим входного торца БВОК. Перемещая пятно облучения от центра к краю входного торца БВОК, наблюдали изменение интенсивностей зарегистрированных сигналов. Причиной такого расхождения является неравномерность замешивания излучения и разделения по каналам в блоке волоконно-оптического коллектора. На рис. 4 представлен график неоднородности интенсивности.

В результате калибровочных опытов обнаружено, что разброс значений интенсивностей сигнала зависит от пространственной неоднородности падающего пучка и может варьироваться в пределах 2–5 раз.

Дополнительно необходимо отметить, что в БВОК присутствует неоднородность замешивания и разделения по каналам даже при однородной заливке входного торца. Разница между каналами может составлять до двух раз.

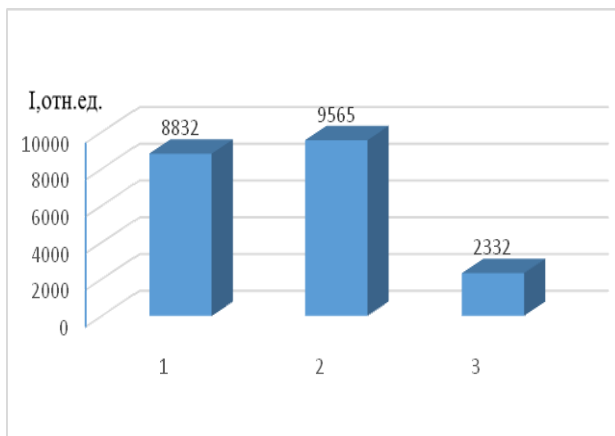


Рис. 4. График разброса интенсивности между сдвигами в калибровочных экспериментах: 1 – положение пятна по центру торца БВОК, 2 – по краю БВОК, 3 – пятно обрезано торцом БВОК

Результат калибровочных экспериментов позволяет предположить наличие разброса в измерениях параметров чувствительности ЭОП в схеме диагностики первой гармоники на установке «Луч». Данный разброс в основном имеет случайный характер, связанный с неидеальным положением на входном торце волоконного коллектора и меняющегося характера спекловой структуры пятна лазерного излучения. Поэтому, за счет статистического набора большого числа экспериментальных данных, можно надеяться, что присутствующий разброс результатов измерений не мешает проведению исследования чувствительности различного типа ЭОП.

### Анализ экспериментальных данных

Для сравнения чувствительности ЭОП на длине волны 1054 нм было проведено более 50 экспериментов на установке «Луч». При обработке зарегистрированных сигналов вычитался фоновый сигнал в полученной регистрации, с помощью собственного специального программного обеспечения «Image Viewer» прописывали рабочий сигнал, а также производилось вычисление интегрального по времени значения мощности.

Для демонстрации в одной координатной плоскости полученных значений ввели поправочный коэффициент, учитывающий различия длительностей разверток и ослабление светофильтров в каждом канале. На рис. 5 изображена зависимость интегральной во времени мощности полученных сигналов от энергии, измеренной в эксперименте на длине волны 1054 нм.

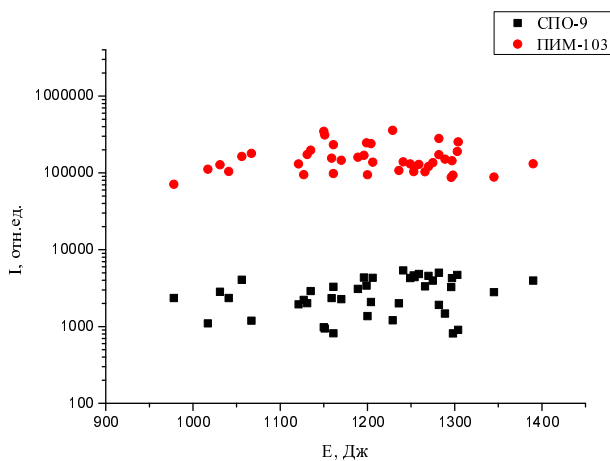


Рис. 5. Зависимость интегральной во времени мощности от энергии в эксперименте

Чувствительность фотохронографа СЭР-5 на основе ЭОП ПИМ-103 больше в 60 раз по сравнению с СЭР-4 на основе СПО-9 на длине волны 1054 нм. Как и предполагалось, имеется разброс значений интегральной во времени мощности в пределах 2–5 раз из-за неравномерной пространственной картины пятна облучения и неравномерного замешивания и разделения лазерного излучения в БВОК.

Дополнительно оценили чувствительность ПИМ-103 на длине волны 527 нм. Измерения проводились в штатной схеме диагностики второй гармоники аналогично измерениям, проводимым на первой гармонике. На рис. 6 представлена зависимость интегральной во времени мощности полученных сигналов от энергии, измеренной в эксперименте на длине волны 527 нм.

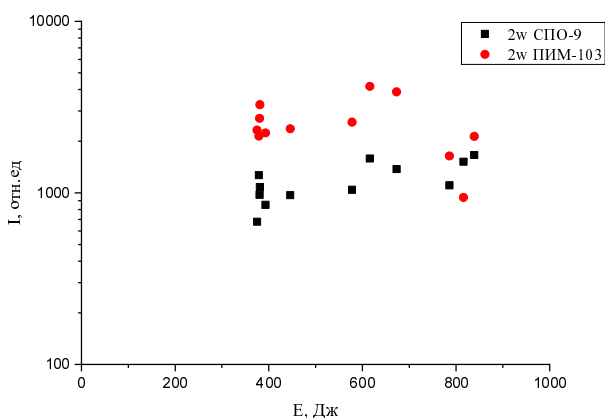


Рис.6. Зависимость интеграла мощности во времени от энергии в эксперименте

Как видно из графика на рис. 6 чувствительность фотохронографа СЭР-5 на длине волны 527 нм сравнима с чувствительностью фотохронографа СЭР-4.

## Выводы

Проведено исследование чувствительности фотохронографов с ЭОП различного типа в штатной методике измерения формы лазерного импульса на установке «Луч». Анализ полученных данных показал, что чувствительность фотохронографа СЭР-5 на основе ЭОП ПИМ-103 больше в 60 раз по сравнению с СЭР-4 на основе СПО-9 на длине волны 1054 нм. Чувствительность фотохронографа СЭР-5 на длине волны 527 нм сравнима с чувствительностью фотохронографа СЭР-4. Таким образом, показано, что оптимально использовать хронограф СЭР-5 в методике регистрации длительности импульса основной гармоники установок на неодимовом фосфатном стекле, в том числе и на установке нового поколения.

## Список литературы

1. Душина Л. А., Кравченко А. Г., Литвин Д. Н. и др., Регистрация профиля фронта лазерного импульса с пикосекундным разрешением и большим динамическим диапазоном на многоканальных установках // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 2. С. 219–222.
2. Корниенко Д.С., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н. и др., Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 2. С. 78–89.
3. Муругов В. М., Окутин Г. П., Петров С. И., Панкратов В. И., Применение электронно-оптических преобразователей для регистрации излучения йодного лазера субнаносекундной длительности // Приборы и техника эксперимента. 1993. № 2. С. 155–161.
4. Voronich I. N., Galakhov I. V., Garanin S. G. et al. // Quantum Electron. 2003. Vol. 33, N 6. P. 485.
5. Цифровая телевизионная ФПЗС-камера S2C-077, техническое описание и инструкция по эксплуатации // НПП Силар, 2015 г.
6. Фотоэлектронные приборы для исследования быстротекущих процессов // ФГУП ВНИИА, [www.vniia.ru/vakum/vakum.html](http://www.vniia.ru/vakum/vakum.html).
7. Пат. 2620783, РФ, G02B 6/32 (2006.01), H04B 10/25 (2013.01) Устройство ввода импульсного лазерного пучка в волоконно-оптическую линию связи / Сенюк А. В., Седов Д. С., Улановский М. В. // Бюллетень изобретений. 2017. № 16.