

УДК 53.087.5

## ЦИФРОВОЙ ФОТОХРОНОГРАФИЧЕСКИЙ РЕГИСТРАТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В. П. Андрианов<sup>1</sup>, Ю. Б. Базаров<sup>2</sup>, А. В. Губачев<sup>2</sup>, О. Н. Дулин<sup>1</sup>,  
А. Е. Елгаёнок<sup>2</sup>, В. Г. Каменев<sup>1</sup>, В. М. Кузин<sup>1</sup>, М. С. Литвинова<sup>2</sup>,  
С. А. Лобастов<sup>2</sup>, В. Н. Туркин<sup>1</sup>, А. С. Шубин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ВНИИ автоматики им. Н. Л. Духова, 127055 Москва, vturkin@vniia.net

<sup>2</sup>РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

С целью замены фотопленки в высокоскоростных камерах с зеркальной разверткой (СФР-2М, УСФ-2 и др.) разработан фотохронограф ТКПФ269 с зеркальной разверткой и светочувствительным элементом на базе КМОП-матрицы. Дано краткое описание конструкции фотохронографа ТКПФ269. Для сравнения метрологических характеристик фотохронографа ТКПФ269 и фоторегистрирующей установки УСФ-2 проведена одновременная регистрация этими камерами пространственно-временной картины выхода светового излучения из торцов световодов, возникающей при срабатывании взрывчатого вещества в модельной сборке. Представлены результаты обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: фотохронограф, КМОП-матрица, зеркальная развертка, световое излучение, фокон, лазерные метки.

DOI 10.15372/FGV20180516

Фотохронографы с зеркальной разверткой начали активно использоваться для исследования быстропротекающих процессов с 50-х годов XX в. За это время разработано несколько десятков моделей и множество модификаций. Первым серийным отечественным фотохронографом с зеркальной разверткой был СФР-2М [1], а его современной модификацией является скоростная фоторегистрирующая установка УСФ-2 [2]. Традиционно в таких фотохронографах в качестве чувствительного элемента использовалась фотопленка.

В настоящее время во многих технических устройствах происходит замена фотопленки цифровыми устройствами на базе ПЗС- или КМОП-матриц. Применение цифрового устройства регистрации позволяет сократить время извлечения информации и обработки полученных данных, а также уменьшить погрешность измерений.

Известны зарубежные разработки фотохронографов с зеркальной разверткой и цифровым считывающим устройством. Например, в фоторегистраторе Cordin-131 в плоскости ре-

гистрации расположена система зеркал, которые проецируют изображение на последовательность ПЗС-матриц [3].

Во ВНИИ автоматики работы по созданию приборных комплексов на базе фотохронографов с зеркальной разверткой и светочувствительным элементом на базе КМОП- или ПЗС-матрицы начались более десяти лет назад. На базе фотохронографа УСФ-2 разработано два приборных комплекса (ПК), в которых вместо фотопленки использовались цифровые регистраторы.

В первом ПК диаметр фоточувствительной области ПЗС-матрицы, составлявший  $\approx 20$  мм, позволял при скорости развертки 2.25 км/с регистрировать процессы длительностью до 10 мкс, что накладывало ограничения на его использование в ряде экспериментов. Кроме того, в некоторых случаях появлялась фоновая засветка рабочего кадра из-за применения электромеханического затвора в УСФ-2.

Во втором ПК [4] фоновая засветка была устранена путем установки перед КМОП-матрицей электронно-оптического затвора, открывающегося на время действия управляющего импульса ( $2 \div 32$  мкс с шагом 2 мкс), а размер кадра был увеличен за счет использования матрицы большего ( $28 \times 28$  мм) разме-

© Андрианов В. П., Базаров Ю. Б., Губачев А. В., Дулин О. Н., Елгаёнок А. Е., Каменев В. Г., Кузин В. М., Литвинова М. С., Лобастов С. А., Туркин В. Н., Шубин А. С., 2018.

ра и фокона с входным диаметром 80 мм. При этом длительность регистрации увеличилась до 26 мкс (при скорости развертки 2.25 км/с).

В настоящее время завершена разработка ПК ТКПФ269, предназначенного для цифровой фотохронографической регистрации быстротекущих процессов, сопровождающихся излучением в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах. Внешний вид приборного комплекса приведен на рис. 1.

Приборный комплекс ТКПФ269 обеспечивает:

- 1) чувствительность КМОП-матриц к излучению в диапазоне длин волн  $0.45 \div 0.85$  мкм;
- 2) длительность регистрации при скорости развертки изображения 2.25 км/с до 80 мкс;
- 3) размеры светочувствительной области в устройстве регистрации  $177 \times 40$  мм;
- 4) частоту следования меток времени 1, 2, 5, 10 МГц;
- 5) допусаемую основную абсолютную погрешность измерения интервалов времени не более  $\pm 50$  нс при скорости развертки изображения не менее 2.25 км/с и достоверной вероятности  $P = 0.95$ .

Конструкция устройства цифровой регистрации ТКПФ269 показана на рис. 2. Она представляет собой три склеенных по боковой поверхности фокона 2, на выходных ок-



Рис. 1. Внешний вид приборного комплекса ТКПФ269:

1 — устройство цифровой регистрации, 2 — устройство зеркальной развертки, 3 — входной объектив, 4 — управляющий ноутбук, 5 — пульт управления камерами, 6 — блок задержки

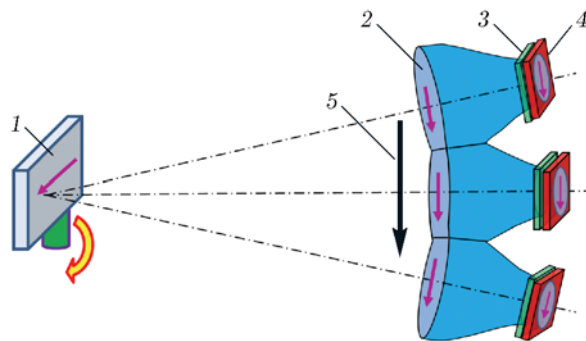


Рис. 2. Конструкция устройства цифровой регистрации приборного комплекса ТКПФ269:

1 — вращающееся зеркало, 2 — блок фокон, 3 — волоконно-оптическая пластина, 4 — КМОП-матрица, 5 — направление развертки изображения

нах которых установлены КМОП-матрицы 4 с волоконно-оптической пластиной 3, которая обеспечивает оптический контакт матрицы и фокона. Фокон уменьшает размеры изображения, поступившего на его входное окно и переносит его на меньшую по размеру КМОП-матрицу. Так как каждый из фокон имеет размер входного окна 60 мм, то при их склейке область регистрации увеличивается до 180 мм в горизонтальном и до 40 мм в вертикальном направлениях. Тем самым при скорости развертки 2.25 км/с обеспечивается длительность регистрации до 80 мкс. Ширина зоны склейки фокон составляет  $\approx 50$  мкм, что обеспечивает отсутствие потерь информации при попадании на нее изображения оптического датчика, диаметр которого равен  $\approx 100$  мкм и не влияет на погрешность измерения временных интервалов.

Для исключения наложения после свечения на полезный сигнал в комплексе использованы КМОП-матрицы, обладающие функцией электронного затвора, что обеспечивает регулируемую экспозицию с минимальным временем накопления 100 мкс и возможностью открытия затвора только на время регистрации полезного сигнала. Использование данных матриц позволило отказаться от электромеханического затвора и тем самым повысить надежность измерений и исключить потерю информации в случае неполного его открытия.

При проведении измерений получают три кадра, сшивка которых в единую панораму осуществляется программно. Для повышения точности измерения интервалов времени

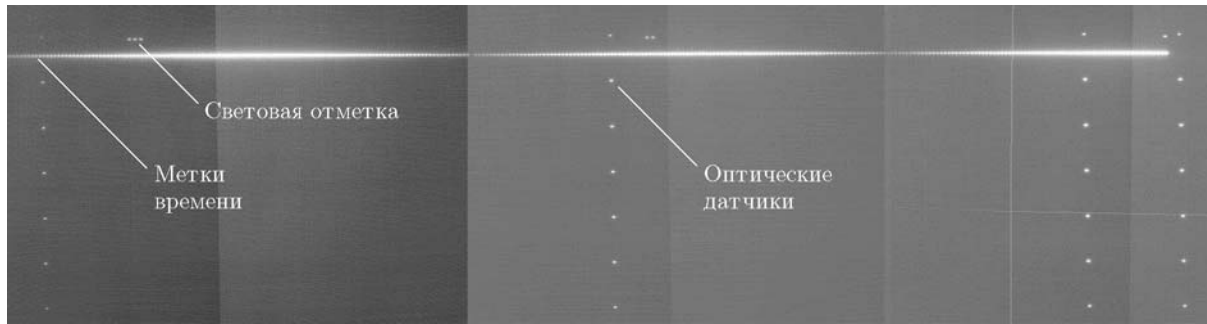


Рис. 3. Пример панорамы получаемого изображения

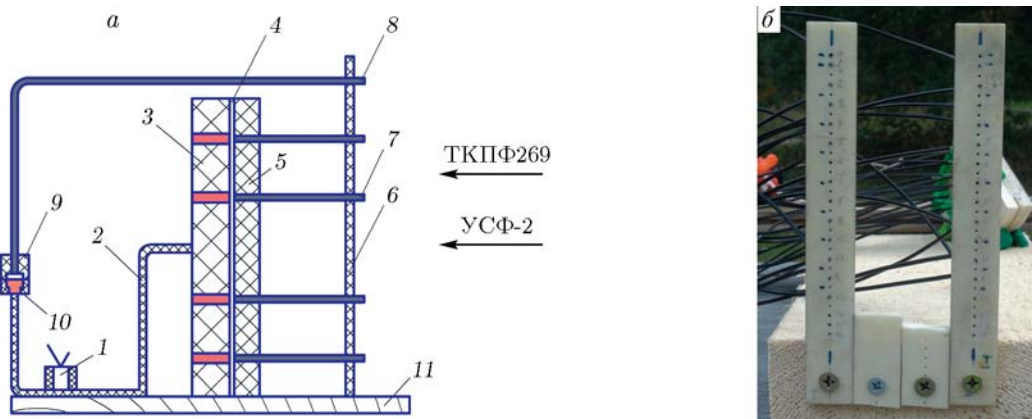


Рис. 4. Конструкция экспериментальной сборки (а) и фотография со стороны панелей (б):

1 — электродетонатор, 2 — пруток из ВВ, 3 — детонационная разводка, 4 — диск из пенопласта, 5 — приемник с вклеенными световодами, 6 — планка из пенопласта (2 шт.), 7 — световод (16 шт.), 8 — нулевой световод (4 шт.), 9 — приемник с вклеенными нулевыми световодами, 10 — нулевая шашка, 11 — подставка

на КМОП-матрицу наносятся периодический световой сигнал (метки времени) и световая отметка, задержанная относительно момента инициирования процесса на известное время (рис. 3). При этом погрешность измерения временных интервалов не превышает  $\pm 50$  нс при  $P = 0.95$ .

Для сравнения метрологических характеристик ПК ТКПФ269 и фотохронографа УСФ-2 выполнена регистрация пространственно-временной картины выхода светового излучения из торцов световодов диаметром 1 мм, возникающей при срабатывании взрывчатого вещества в модельной сборке. Конструкция сборки и ее общий вид представлены на рис. 4. Световоды 7 устанавливались в двух вертикальных планках б — по 8 шт. в каждой. Кроме того, в планки устанавливалось по два световода 8 для формирования вспышки (нуль-отметки) в момент срабатывания электродетонатора 1.

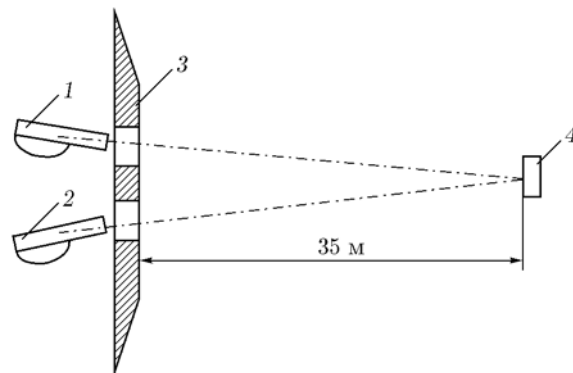


Рис. 5. Схема регистрации параметров срабатывания модельной сборки приборным комплектом ТКПФ269 и фотохронографом УСФ-2: 1 — фотохронограф УСФ-2, 2 — приборный комплект ТКПФ269, 3 — броня каземата с двумя амбразурами, 4 — модельная сборка

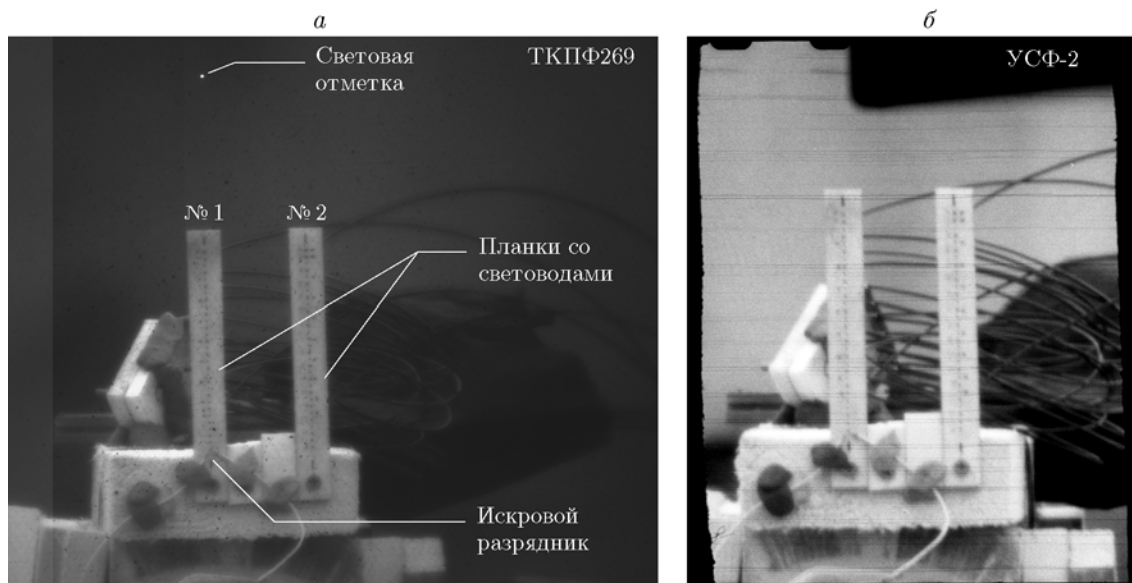


Рис. 6. Предварительные снимки планок со световодами и расположенной относительно них отметкой, полученные с помощью приборного комплекса ТКПФ269 (а) и фотохронографа УСФ-2 (б)



Рис. 7. Фотохронограмма, полученная приборным комплексом ТКПФ269



Рис. 8. Фотохронограмма, полученная фотохронографом УСФ-2

Измерение интервалов времени проводилось в соответствии со схемой, представленной на рис. 5. Управление фотокамерами УСФ-2 и ТКПФ269 осуществлялось от общего пульта управления. Скорость вращения зеркала в обе-

их фотокамерах составляла 45 000 об/мин, что соответствовало скорости линейной развертки изображения по чувствительной поверхности фотоприемного устройства 2.25 мм/мкс.

На рис. 6 приведены статические (предва-

Номер световода	Измеренный интервал времени от нуль-отметок до момента срабатывания световодов, мкс	
	ТКПФ269	УСФ-2
1	35.854	35.841
2	35.823	35.81
3	35.761	35.804
4	35.811	35.795
5	35.875	35.851
6	35.831	35.804
7	35.800	35.79
8	35.807	35.804
9	35.811	35.815
10	35.810	35.82
11	35.753	35.784
12	35.773	35.797
13	35.877	35.887
14	35.835	35.863
15	35.826	35.845
16	35.838	35.863
$T_{cp}$	35.818	35.823
СКО*	0.036	0.031

\*СКО — среднеквадратическое отклонение.

рительные) снимки планок со световодами, полученные цифровым регистратором ТКПФ269 и фотохронографом УСФ-2 на фотопленке, а соответствующие фотохронограммы процесса представлены на рис. 7 и 8 (ИЭ — инициирующие элементы).

Время срабатывания световодов в модельной сборке, зарегистрированное двумя способами, определялось с помощью программного обеспечения ПК ТКПФ269 по максимальному значению кода яркости в каждой точке. В таблице представлены результаты измерения интервалов времени от нуль-отметок до момента выхода излучения на торцы световодов.

На рис. 9 приведена диаграмма результатов расчета временных интервалов, в соответствии с которой их средняя величина от нуль-отметок до появления вспышки в световодах составила:

–  $35.818 \pm 0.036$  мкс по фотохронограмме ПК ТКПФ269,

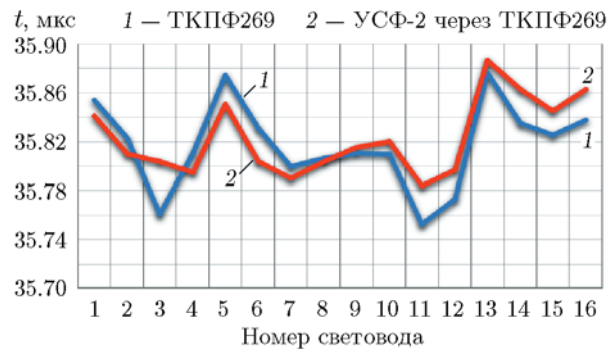


Рис. 9. Диаграмма результатов расчета временных интервалов

–  $35.823 \pm 0.031$  мкс по фотохронограмме УСФ-2.

Итак, в данной работе кратко описан разработанный приборный комплекс ТКПФ269 для цифровой фотохронографической регистрации быстротекущих процессов, сопровождающихся излучением в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах, обеспечивающий длительность регистрации до 80 мкс при скорости развертки 2.25 км/с.

Основная абсолютная погрешность измерения интервалов времени приборного комплекса ТКПФ269 при скорости развертки изображения не менее 2.25 км/с не превышает  $\pm 50$  нс при доверительной вероятности  $P = 0.95$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. — М.: Наука, 1975.
2. Установка скоростная фоторегистрирующая. Руководство по эксплуатации. — УСФ-2 РЭ. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
3. Leahy R. S., Ovellette J. W., Holtman S. H., Larkin W. L. Digital streak camera with rotating mirror: United States Pat. — No US9,020,336 B1. — Apr. 28, 2015.
4. Дулин О. Н., Кузин В. М., Туркин В. Н., Захаров А. Е., Казачков Ю. П., Скегин В. Р. Приборный комплекс СКПФ254 для цифровой фотохронографической регистрации быстротекущих процессов // Приборы и техника эксперимента. — 2015. — № 4. — С. 144–146.

Поступила в редакцию 29/III 2018 г.