

## Миниатюрные электронно-оптические камеры для измерения временных характеристик оптических импульсов в нано- и пикосекундном диапазонах

Михаил Викторович Канзюба<sup>1✉</sup>, Григорий Геннадьевич Фельдман<sup>2</sup>, Виталий Борисович Лебедев<sup>3</sup>, Вячеслав Семенович Иванов<sup>4</sup>

1, 2, 3, 4 Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

<sup>1</sup>[mkanzyuba@vniiofi.ru](mailto:mkanzyuba@vniiofi.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0975-3944>

<sup>2</sup>[feld@vniiofi.ru](mailto:feld@vniiofi.ru), <sup>3</sup>[vlebedev@vniiofi.ru](mailto:vlebedev@vniiofi.ru), <sup>4</sup>[vsivanov@vniiofi.ru](mailto:vsivanov@vniiofi.ru)

**Аннотация.** Рассмотрена задача исследования временной структуры оптических импульсов в нано- и пикосекундном диапазонах и измерения временных характеристик импульсов. Для решения этой задачи созданы средства измерений временных характеристик оптических импульсов – миниатюрные электронно-оптические камеры, обладающие пикосекундным временным разрешением. Описаны функциональные возможности и примеры применения указанных камер. Рассмотрены принцип их работы, конструкция, характеристики и функции. Описан технологический процесс изготовления времяанализирующих электронно-оптических преобразователей для данных камер, проводимый на уникальном высоковакуумном технологическом комплексе. Рассмотрены функциональные возможности программного обеспечения для управления процессом съёмки, а также для обработки и анализа изображений, полученных с помощью электронно-оптических камер. Приведены метрологические и основные технические характеристики миниатюрных электронно-оптических камер. С применением миниатюрной пикосекундной электронно-оптической камеры исследована временная структура излучения полупроводникового импульсного лазера, определена форма импульсов и измерена их длительность с оценкой погрешности измерений. Показано, что миниатюрные пикосекундные электронно-оптические камеры являются эффективным инструментом контроля параметров излучения нано- и пикосекундных импульсных лазеров в процессе их разработки, наладки, испытаний и применения. Информация о реальной временной форме лазерных импульсов, полученная с помощью электронно-оптических камер, актуальна для разработчиков импульсных лазеров, а также для специалистов в областях лазерной дальнометрии и спектроскопии.

**Ключевые слова:** электронно-оптическая камера, электронно-оптический преобразователь, импульсный лазер, длительность импульса, средство измерений, метрология лазерного излучения

**Финансирование:** работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

**Для цитирования:** Канзюба М. В., Фельдман Г. Г., Лебедев В. Б., Иванов В. С. Миниатюрные электронно-оптические камеры для измерения временных характеристик оптических импульсов в нано- и пикосекундном диапазонах // Измерительная техника. 2021. № 11. С. 24–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-11-24-29>

## Miniature image converter streak cameras for measurement of temporal characteristics of optical pulses in nano- and picosecond ranges

Mikhail V. Kanzyuba<sup>1✉</sup>, Grigory G. Feldman<sup>2</sup>, Vitaly B. Lebedev<sup>3</sup>, Vyacheslav S. Ivanov<sup>4</sup>

1, 2, 3, 4 All-Russia Research Institute of Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

<sup>1</sup>[mkanzyuba@vniiofi.ru](mailto:mkanzyuba@vniiofi.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0975-3944>

<sup>2</sup>[feld@vniiofi.ru](mailto:feld@vniiofi.ru), <sup>3</sup>[vlebedev@vniiofi.ru](mailto:vlebedev@vniiofi.ru), <sup>4</sup>[vsivanov@vniiofi.ru](mailto:vsivanov@vniiofi.ru)

**Abstract.** The problem of investigating the temporal structure of optical pulses in nano- and picosecond ranges and measuring their temporal characteristics is considered. In order to solve the problem, measuring instruments of temporal characteristics of optical pulses have been created – the miniature image converter streak cameras having picosecond temporal resolution. The functional capabilities and application examples of the cameras are described. Operating principle, design, features and functions of the created cameras are considered. The technological process of manufacturing of the image converter streak tubes for the image converter streak cameras implemented on the unique high-vacuum technological complex is described. Features of the software used to control the image acquisition process as well as for processing and analysis of the images captured by the image converter streak

cameras, are considered. Metrological and main technical specifications of the miniature image converter streak cameras are given. Using the miniature image converter streak camera, the temporal structure of emission of a semiconductor pulsed laser was investigated, the pulse shape was determined and the pulse duration was measured with error estimation. It is demonstrated that the miniature picosecond image converter streak cameras are effective instruments for emission parameters control of nano- and picosecond pulsed lasers during their development, setup, tests and operation. The information about real temporal shape of laser pulses obtained by means of image converter streak cameras is relevant for designers of pulsed lasers as well as for specialists in laser ranging and spectroscopy.

**Keywords:** image converter streak camera, image converter streak tube, pulsed laser, pulse duration, measuring instrument, laser radiation metrology

**Введение.** Высокоскоростное метрологическое оборудование широко применяется в различных областях науки и техники для контроля временных характеристик оптических импульсов [1, 2]. В частности, в импульсной лазерной дальнометрии для повышения точности измерений расстояния необходимо уменьшать длительность зондирующего лазерного импульса [3]. Использование для этого пикосекундных импульсных лазеров, излучающих импульсы длительностью  $10^{-12}$ – $10^{-9}$  с, вызывает потребность в средствах измерений временных характеристик одиночных оптических импульсов в указанном временном диапазоне.

Динамические характеристики оптических импульсов обычно измеряются устройством, состоящим из осциллографа и быстродействующего фотодиода. Полоса пропускания существующих осциллографов достигает 110 ГГц (Infiniium UXR-Series Oscilloscopes: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06242/data-sheets/5992-3132.pdf>), что соответствует временному разрешению 4 пс. Однако временное разрешение измерительной системы будет больше, поскольку лучшие образцы полупроводниковых фотодиодов для видимого диапазона имеют полосу пропускания порядка 40–50 ГГц (2021 Optoelectronics & Photonics – MACOM: [Электронный ресурс]. URL: [https://www.macom.com/files/live/sites/ma/files/pdf/2021%20Opto\\_031021\\_r21\\_final\\_lr.pdf](https://www.macom.com/files/live/sites/ma/files/pdf/2021%20Opto_031021_r21_final_lr.pdf)). Стробоскопические осциллографы, эффективная полоса пропускания которых может превышать 100 ГГц, можно применять только при повторяющемся импульсном сигнале. Альтернативой является использование фотохронографических электронно-оптических камер (ЭОК) [4], пригодных для исследования однократных сигналов и обладающих временным разрешением вплоть до 0,1 пс [5–7].

Принцип работы фотохронографической ЭОК проиллюстрирован рис. 1. Оптическое излучение 1 интенсивностью  $I$ , прошедшее через входную щель на фотокатод 2 электронно-оптического преобразователя (ЭОП), преобразуется в поток фотоэлектронов. Этот поток отклоняется (развёртывается) импульсным электрическим полем  $E$  в перпендикулярном щели направлении и попадает на люминесцентный экран 5, нанесённый на волоконно-оптическую пластину (ВОП), где преобразуется в световой поток. Развёрнутое по люминесцентному экрану ЭОП изображение 6 входной щели, яркость  $B$  которого пропорциональна мгновенной мощности излучения, регистрируется с помощью полупроводникового

матричного фотоприёмника (на рис. 1 не показан). По этому изображению можно определить форму оптических импульсов и измерить их временные характеристики.

Цель настоящего исследования – описание функциональных возможностей созданных во ВНИИОФИ миниатюрных ЭОК, позволяющих исследовать временную структуру оптических импульсов с пикосекундным временным разрешением, и опыта их применения для измерения временных характеристик лазерных импульсов в нано- и пикосекундном диапазонах.

**Устройство ЭОК K016.** ЭОК K016 разработаны и производятся во ВНИИОФИ на основе специализированного время-анализирующего ЭОП [8]. ЭОК представляет собой миниатюрную моноблочную конструкцию, её основные элементы (со снятыми внешними панелями корпуса и электромагнитными

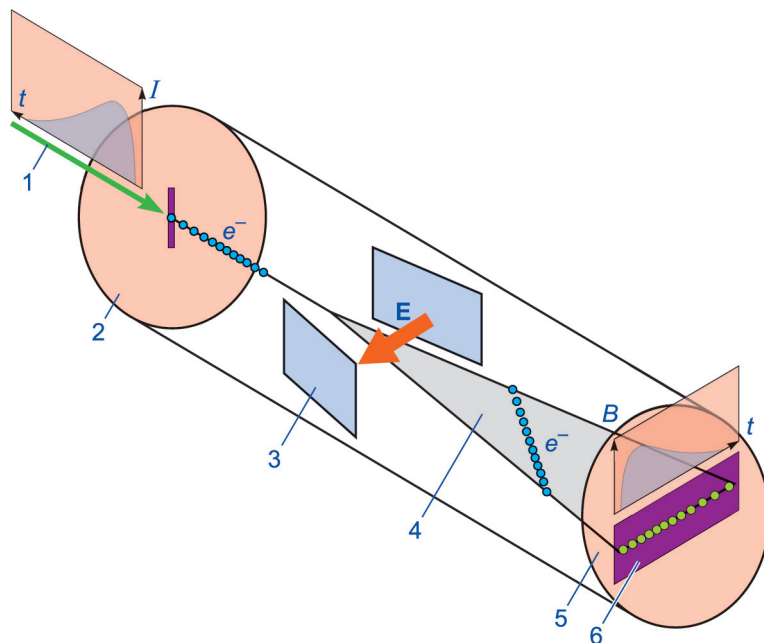


Рис. 1. Принцип работы фотохронографической ЭОК:

1 – входной оптический импульс; 2 – фотокатод; 3 – отклоняющая система конденсаторного типа; 4 – электронный луч; 5 – люминесцентный экран; 6 – изображение развертки оптического импульса;  $I$  – интенсивность падающего излучения;  $B$  – яркость люминесцентного экрана;  $t$  – время;  $e^-$  – фотоэлектроны;  $E$  – отклоняющее импульсное электрическое поле

Fig. 1. Operating principle of an image converter streak camera: 1 – input optical signal; 2 – photocathode; 3 – capacitor type deflection system; 4 – electron beam; 5 – phosphor screen; 6 – sweep image of the optical signal;  $I$  – input radiation intensity;  $B$  – phosphor screen brightness;  $t$  – time;  $e^-$  – photoelectrons;  $E$  – deflecting pulsed electric field

экранами) показаны на рис. 2. Блок входной оптики 3 включает пару объективов оборачивающей системы и набор нейтральных светофильтров между ними. В корпусе ЭОК расположены времяанализирующий ЭОП 4 с фотокатодом, отклоняющей системой и люминесцентным экраном на ВОП, электронно-оптический усилитель яркости 5 с ВОП на входе и выходе, считывающее устройство на базе полупроводникового матричного фотоприёмника 6 с ВОП на входе. ВОП позволяет передавать изображение исследуемого процесса через оптический контакт между времяанализирующим ЭОП, усилителем яркости и матричным фотоприёмником. Исключение промежуточных объективов позволяет минимизировать световые потери, существенно уменьшить массогабаритные размеры ЭОК. В блоках силовой и управляющей электроники 7 использована современная элементная база.

Изображение развёртки оптического сигнала регистрируется с помощью считывающего устройства на базе полупроводникового матричного фотоприёмника с волоконно-оптическим входом (Широкоформатное ПЗС считывающее устройство RU-07 с волоконно-оптическим входом и USB интерфейсом: [Электронный ресурс]. URL: <https://bifocompany.com/rus/p-rs-ru07.php.htm>). Для повышения яркости изображения в камере K016 дополнительно установлен электронно-оптический усилитель яркости с микроканальной пластиной, сочленённый волоконной оптикой с времяанализирующим ЭОП и считывающим устройством.

**Изготовление и сборка времяанализирующего ЭОП.** Для камеры K016 был разработан времяанализирующий ЭОП

ПВ-207, который является усовершенствованной металло-керамической версией ЭОП ПВ-206 (ПВ-206 – электронно-оптический преобразователь: [Электронный ресурс]. URL: <https://bifocompany.com/rus/p-tub-pv206.php.htm>). ЭОП ПВ-207 имеет фотокадод на увиолевом стекле, ускоряющий сеточный электрод вблизи фотокаатода, фокусирующий электрод, отклоняющую систему с двумя парами пластин, отклоняющих электронный пучок во взаимно перпендикулярных направлениях, люминесцентный экран на ВОП.

ЭОП ПВ-207 изготовлен во ВНИИОФИ на уникальном высоковакуумном технологическом комплексе (ФГУП ВНИИОФИ: Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений – 31.08.2016 | Первый в России: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vniiofi.ru/news-list/pervyj-v-rossii.html>). Комплекс позволяет исследовать свойства фотоэмиттеров, эмиссионных усилителей тока, электронно-чувствительных матриц и других компонентов вакуумных фотоэлектронных приборов и изготавливать эти компоненты. С его помощью можно изготавливать и собирать высокоскоростные ЭОП с субпикосекундным временным разрешением. На рис. 3 схематически изображён технологический комплекс с местом оператора (расположено за комплексом). Технологический комплекс состоит из нескольких высоковакуумных камер 4, 7–9, вакуумных манипуляторов 3, системы холодной опрессовки 5 внутри высоковакуумного объёма, а также системы управления технологическим процессом, смонтированной в отдельно стоящую стойку 10. Высоковакуумные камеры имеют многоступенчатые системы откачки и соединены последовательно через вакуумные затворы 6.

Технологический процесс изготовления и сборки ЭОП происходит следующим образом. Подложка фотокаатода размещается в контейнере и напаивается на откачной пост, в котором отдельно от остального конструктива ЭОП изготавливается фотокадод и оценивается его качество. Затем конструктив ЭОП без фотокаатода располагается внутри технологического комплекса в специальной оснастке, находящейся в камере холодной опрессовки 4. Контейнер с фотокадодом помещается в вакуумную камеру 9. После прогрева и откачки всего комплекса контейнер с фотокадодом перемещается в вакуумную камеру 8, где вскрывается с помощью вакуумного манипулятора 3. После вскрытия контейнера подложка с фотокадодом перемещается в камеру холодной опрессовки, устанавливается напротив конструктива ЭОП и запрессовывается в специальное место этого конструктива. Управление и контроль технологическим процессом осуществляется оператором через стойку управления 10.

**Программное обеспечение.** Регистрируемое многоэлементным фотоприёмником изображение по интерфейсу USB вводится в компьютер с программным обеспечением Fast Glance. Основными функциями Fast Glance являются вывод на дисплей и обработка изображений, полученных с помощью ЭОК, а также измерение временных характеристик оптических импульсов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 11554-2008

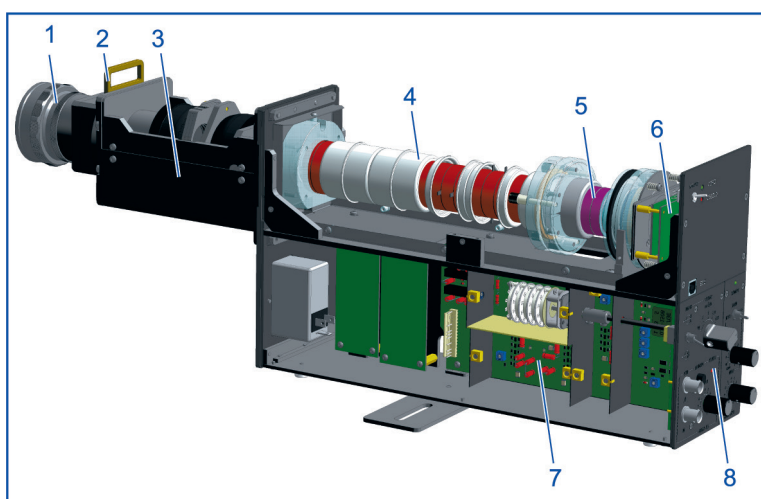


Рис. 2. Основные элементы конструкции ЭОК K016:

1 – входной объектив; 2 – сменная входная щель; 3 – блок входной оптики, включающий пару объективов оборачивающей системы и набор нейтральных светофильтров между ними; 4 – времяанализирующий ЭОП ПВ-207; 5 – электронно-оптический усилитель яркости; 6 – полупроводниковый матричный фотоприёмник; 7 – блоки силовой и управляющей электроники; 8 – элементы управления ЭОК

Fig. 2. Main structural elements of the K016 image converter streak camera: 1 – input objective; 2 – removable input slit; 3 – input optics unit, including the pair of objectives of the inverting system and the set of neutral density filters between them; 4 – PV-207 image converter streak tube; 5 – image intensifier; 6 – semiconductor image sensor; 7 – power and control electronics units; 8 – streak camera controls

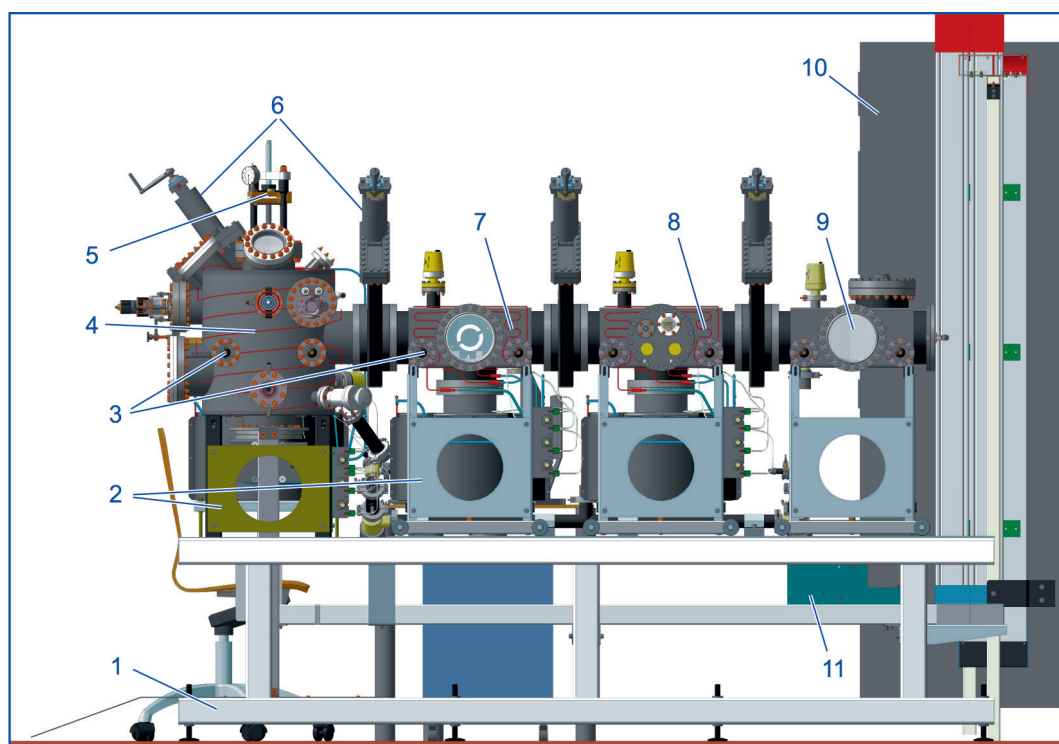


Рис. 3. Высоковакуумный технологический комплекс со стойкой управления и местом оператора: 1 – рама; 2 – регулируемые опоры; 3 – вакуумные манипуляторы; 4 – камера холодной опрессовки; 5 – система холодной опрессовки; 6 – вакуумные затворы; 7–9 – камеры соответственно передачи, вскрытия, и загрузки контейнеров; 10 – стойка управления; 11 – система пневмопитания

Fig. 3. The ultrahigh vacuum technological complex with the control rack and operator's workplace: 1 – frame; 2 – adjustable supports; 3 – vacuum manipulators; 4 – cold pressing chamber; 5 – cold pressing system; 6 – vacuum seals; 7–9 – container transfer, opening and loading chambers, accordingly; 10 – control rack; 11 – pneumatic supply system

«Лазеры и лазерные установки (системы). Методы испытаний лазеров и измерений мощности, энергии и временных характеристик лазерного пучка» (ISO 11554:2006 “Optics and photonics – Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam power, energy and temporal characteristics”). Программа Fast Glance корректирует геометрические и фотометрические искажения изображения, возникающие в электронно-оптическом тракте камеры. Поддерживается съёмка с накоплением и усреднением, при этом возможна программная коррекция джиттера. Также можно выполнять арифметические операции с изображениями, определять различные числовые характеристики изображения, строить профили яркости вдоль пространственной и временной осей и измерять интервалы между курсорами, измерять временные характеристики одного или нескольких импульсов. Изображения на дисплее компьютера могут быть представлены в нескольких вариантах псевдоокрашивания, что увеличивает число визуально различимых уровней яркости. Функция экспорта изображения в графический формат TIFF позволяет при необходимости применять сторонние средства обработки изображений.

**Характеристики ЭОК K016.** ЭОК K016 прошла испытания с целью утверждения типа средств измерений (регистрационный № 71686-18) и зарегистрирована в качестве средства измерений временных характеристик оптических импульсов [9].

#### Основные технические характеристики ЭОК K016

Максимальная частота запуска камеры, не менее .....	8 Гц
Габаритные размеры* (высота×ширина×длина), не более .....	225×115×610 мм
Масса*, не более.....	10 кг
Напряжение питания от сети с частотой 50–60 Гц.....	85–264 В
Мощность, потребляемая от питающей сети, не более.....	35 Вт
Условия эксплуатации:	
температура окружающего воздуха.....	15–35 °С
относительная влажность воздуха, не более.....	80 %
атмосферное давление .....	94–106 кПа

\*Указаны без учёта входного объектива

Более подробно технические характеристики ЭОК представлены на веб-странице (Пикосекундная электронно-оптическая камера K016: [Электронный ресурс]. URL: <https://bifocompany.com/rus/p-cam-k016.php.htm>).

ЭОК K016 обладает пикосекундным временным разрешением и способна выявлять тонкую временную структуру лазерного импульса. Эту структуру невозможно обнаружить при осциллографических измерениях из-за недостаточной ширины полосы пропускания осциллографа или фотодиода, используемого для преобразования оптического сигнала

в электрический [10]. Метрологические характеристики ЭОК K016 приведены в таблице.

**Применение ЭОК K016 для измерения временных характеристик лазерных импульсов.** Для иллюстрации возможностей ЭОК K016 на рис. 4 показана зарегистрированная с помощью камеры этого типа форма импульса пикосекундного полупроводникового лазерного излучателя L-04 (Пикосекундный лазерный генератор оптических импульсов L-04: [Электронный ресурс]. URL: <https://bifocompany.com/rus/p-light-L04.php.htm>), работающего в режиме модуляции усиления (англ. gain switching). Длительность импульса по уровню 0,5 максимума интенсивности, измеренная в соответствии

с ГОСТ Р ИСО 11554-2008 (ISO 11554:2006), составляет 34,9 пс. Нормированный предел погрешности измерения составляет  $\pm 15\%$  (см. таблицу). Таким образом, результат измерения длительности импульса в данном примере ( $35 \pm 5$ ) пс. Измеренная длительность импульса по уровню 0,1 максимума интенсивности составила 420 пс.

Применению ЭОК K016 для измерения временных параметров импульсов излучения нано- и пикосекундных твердотельных лазеров посвящены публикации [10, 11].

**Заключение.** Рассмотренные характеристики ЭОК K016 и примеры применения позволяют сделать вывод, что подобные миниатюрные пикосекундные ЭОК являются эффективным инструментом для контроля параметров излучения нано- и пикосекундных импульсных лазеров в процессе их разработки, наладки, испытаний и применения. Эти ЭОК можно использовать при контроле режима излучения лазера (одно- или многоимпульсный), а также при измерениях параметров лазерных импульсов (длительности, временного интервала между импульсами, соотношения интенсивностей импульсов в цуге).

Метрологические характеристики ЭОК K016

Характеристика	Диапазон развёртки, нс/см				
	0,1	0,3	1,0	3,0	10,0
Предел измерения временных интервалов, нс, не менее	0,16	0,50	1,70	5,00	18,00
Временное разрешение при ширине щели 50 мкм на длине волны 532 нм, пс, не более	5	7	17	50	150
Предел основной погрешности измерения временных интервалов при их длительности не менее двух временных разрешений на соответствующем диапазоне развёртки, %	$\pm 15$				
Область спектральной чувствительности, нм	400–800				

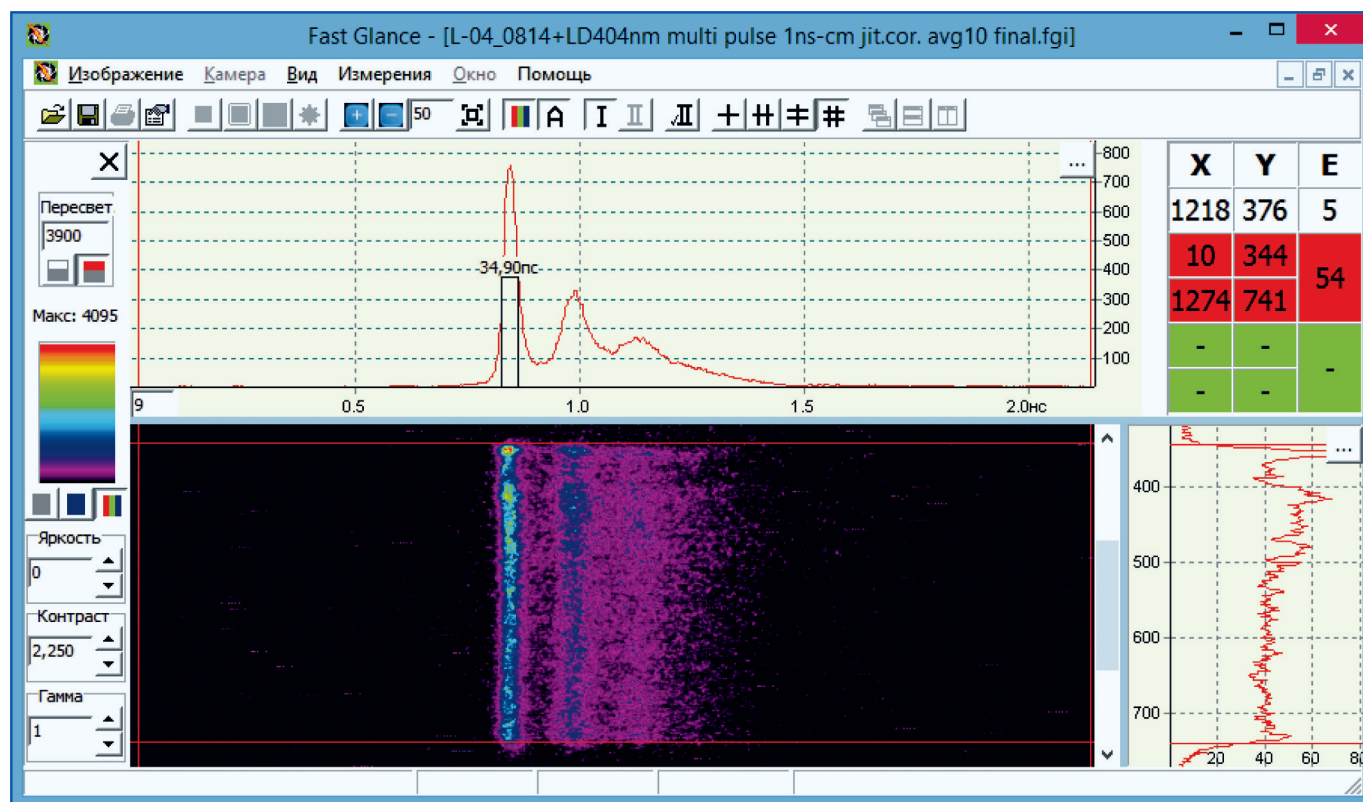


Рис. 4. Рабочее окно программы Fast Glance с изображением импульса пикосекундного полупроводникового лазерного излучателя L-04, зарегистрированного с помощью ЭОК K016, и полученной в результате анализа изображения формой импульса; диапазон и длительность развёртки ЭОК 1 нс/см и 2,12 нс соответственно

Fig. 4. Main window of the Fast Glance software showing the image of the pulse of the L-04 picosecond semiconductor laser, captured with the K016 image converter streak camera, and the pulse shape obtained as a result of the image analysis; sweep range and sweep duration are 1 ns/cm and 2.12 ns, accordingly

Кроме того, в импульсной лазерной спектроскопии существенное влияние на результат оказывают сверхкороткие пики внутри лазерных импульсов, что может приводить к нежелательным эффектам вследствие значительного превышения плотности энергии лазерных импульсов. Поэтому информация о реальной форме лазерных импульсов, полученная с помощью ЭОК, важна не только при разработке, но и при использовании нано- и пикосекундных лазеров.

Список источников

1. Андреев А. Н., Дубовик А. С., Дежарева В. П., Монастырский М. А., Щелев М. Я. Высокоскоростная фотография и фотоника в исследовании быстропротекающих процессов: учебное пособие для студентов вузов / Под ред. А. М. Прохорова. М.: Логос, 2002. 464 с.
2. Щелев М. Я. Пикосекундная электронно-оптическая диагностика в лазерных исследованиях // Труды ФИАН. 1985. Т. 155. С. 3–145.
3. Бокианский В. Б., Бондаренко Д. А., Вязовых М. В. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учеб. пособие / Под ред. В. Е. Карасика. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 96 с.
4. Завойский Е. К., Фанченко С. Д. Физические основы электронно-оптической хронографии // Доклады АН СССР. 1956. Т. 108. № 2. С. 218–221.
5. Degtyareva V. P., Belolipetski V. S., Bryukhnevich G. I., Ivanova S. R., Levina G. P., Makushina V. A., Polikarkina N. D., Semichastnova Z. M., Schelev M. Ya., *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4948, pp. 281–290. <https://doi.org/10.1117/12.516876>
6. Ageeva N. V., Andreev S. V., Degtyareva V. P., Greenfield D. E., Ivanova S. R., Kaverin A. M., Kulechenkova T. P., Levina G. P., Makushina V. A., Monastyrskiy M. A., Polikarkina N. D., Schelev M. Ya., Semichastnova Z. M., Skaballanovich T. A., Sokolov V. E., *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7126, 71261B. <https://doi.org/10.1117/12.821666>
7. Kinoshita K., Ishihara Y., Ai T., Hino S., Inagaki Y., Mori K., Goto M., Niikura F., Takahashi A., Uchiyama K., Abe S., *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, Osaka, Japan, November 7–10, 2016, Osaka, Osaka University, 2016, pp. 305–310.
8. Lebedev V. B., Demchenko A. A., Krutikov V. N., Feldman G. G., *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, Osaka, Japan, November 7–10, 2016, Osaka, Osaka University, 2016, pp. 271–276.
9. Канзюба М. В. Метрологическое обеспечение измерений временных характеристик импульсного лазерного излучения в пикосекундном диапазоне // Фотоника. 2019. № 7. С. 670–675. <https://doi.org/10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.670.675>
10. Kanzyuba M. V., Lebedev V. B., Feldman G. G., *Proceedings of International Conference Laser Optics 2020 (ICLO 2020)*, St. Petersburg, Russia, November 2–6, 2020, New York, IEEE, 2020, p. 185. <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285478>

11. Kanzyuba M. V., Lebedev V. B., Feldman G. G. *Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2021): Abstracts of XV International Conference*, Tomsk, Russia, September 12–17, 2021, Tomsk, STT, 2021, p. 87.

References

1. Andreev A. N., Dubovik A. S., Degtyareva V. P., Monastyrskiy M. A., Schelev M. Ya. *Vysokoskorostnaya fotografiya i fotonika v issledovanii bystroprotekayushchikh protsessov: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov [High-speed photography and photonics in fast processes research: Textbook for university students]*, ed. A. M. Prokhorov, Moscow, Logos Publ., 2002, 464 p. (In Russ.)
2. Schelev M. Ya., Picosecond electron-optical diagnostics in laser research, *Trudy FIAN*, 1985, vol. 155, pp. 3–145. (In Russ.)
3. Bokshanskii V. B., Bondarenko D. A., Vyazovykh M. V., *Lazernye pribory i metody izmereniya dal'nosti: ucheb. posobie [Laser devices and methods of measuring distance: Textbook]*, ed. V. E. Karasik, Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012, 96 p. (In Russ.)
4. Zavoisky E. K., Fanchenko S. D., Physical principles of electron-optical chronography, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1956, vol. 108, no. 2, pp. 218–221. (In Russ.)
5. Degtyareva V. P., Belolipetski V. S., Bryukhnevich G. I., Ivanova S. R., Levina G. P., Makushina V. A., Polikarkina N. D., Semichastnova Z. M., Schelev M. Ya., *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4948, pp. 281–290. <https://doi.org/10.1117/12.516876>
6. Ageeva N. V., Andreev S. V., Degtyareva V. P., Greenfield D. E., Ivanova S. R., Kaverin A. M., Kulechenkova T. P., Levina G. P., Makushina V. A., Monastyrskiy M. A., Polikarkina N. D., Schelev M. Ya., Semichastnova Z. M., Skaballanovich T. A., Sokolov V. E., *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7126, 71261B. <https://doi.org/10.1117/12.821666>
7. Kinoshita K., Ishihara Y., Ai T., Hino S., Inagaki Y., Mori K., Goto M., Niikura F., Takahashi A., Uchiyama K., Abe S., *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, Osaka, Japan, November 7–10, 2016, Osaka, Osaka University, 2016, pp. 305–310.
8. Lebedev V. B., Demchenko A. A., Krutikov V. N., Feldman G. G., *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, Osaka, Japan, November 7–10, 2016, Osaka, Osaka University, 2016, pp. 271–276.
9. Kanzyuba M. V., *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 7, pp. 670–675. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/1992-7296.FRos.2019.13.7.670.675>
10. Kanzyuba M. V., Lebedev V. B., Feldman G. G., *Proceedings of International Conference Laser Optics 2020 (ICLO 2020)*, St. Petersburg, Russia, November 2–6, 2020, New York, IEEE, 2020, p. 185. <https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285478>
11. Kanzyuba M. V., Lebedev V. B., Feldman G. G., *Pulsed Lasers and Laser Applications (AMPL-2021): Abstracts of XV International Conference*, Tomsk, Russia, September 12–17, 2021, Tomsk, STT, 2021, p. 87.

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 05.09.2021; принята к публикации 12.09.2021. The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 05.09.2021; accepted for publication 12.09.2021.