

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В НАНО- И МИКРОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2020 г. К. А. Алабин^а, Н. С. Воробьев^{а,*}, А. И. Заровский^а,
В. И. Пелипенко^а, Н. З. Чиковани^б

^а Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

^б Государственное научно-производственное объединение
“Сухумский физико-технический институт”

Республика Абхазия, 384914, Сухум, Синоп, Кодорское шоссе, 665

*e-mail: vor@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 12.12.2019 г.

На основе электронно-оптического преобразователя ПИФ-01 создана хронографическая электронно-оптическая камера, предназначенная для получения пространственно-временной информации при исследовании световых процессов в нано- и микросекундном диапазоне. Длительность разверток может изменяться в пределах от 0.5 до 10 мкс на экране камеры диаметром 25 мм с предельным временным разрешением ≤ 2 нс. Приведены примеры применения разработанной камеры для спектрально-временных измерений процессов в экспериментах по исследованию электровзрыва вольфрамовых проволочек.

DOI: 10.31857/S0032816220030076

ВВЕДЕНИЕ

Среди богатого арсенала исследовательских методов и средств, применяемых в современной экспериментальной физике, особое место занимает хронография быстропротекающих процессов с использованием времяанализирующих электронно-оптических преобразователей (э.о.п.). В настоящее время это прямой метод регистрации изображений, одним из главных преимуществ которого является возможность получения многоканальной пространственной информации об исследуемых процессах в широком спектральном и временном диапазонах. Созданные на основе э.о.п. электронно-оптические камеры (э.о.к.) могут регистрировать как весь быстропротекающий процесс, так и его отдельные фазы.

В настоящее время дальнейшее развитие электронно-оптической хронографии связано в основном с освоением субпикосекундного диапазона. Японская компания Hamamatsu Photonics выпустила стрик-камеру модели FESCA-100 C11853-01 с предельным временным разрешением ~ 100 фс [1]. Однако и более “медленные” камеры нано- и микросекундного диапазона благодаря возможности получения двумерных изображений, по-прежнему, находят широкое применение, например, в исследованиях процессов горения, детона-

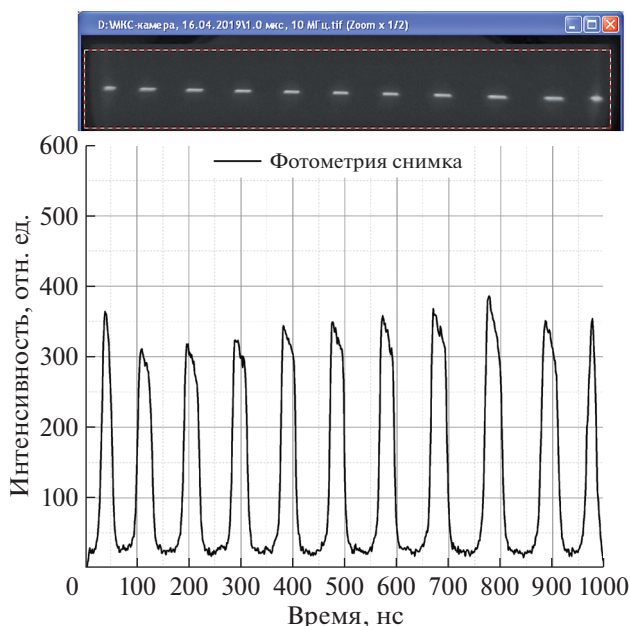


Рис. 1. Фотография световых меток (вверху) и их микрофотограмма (внизу). Развертка — 1 мкс, частота меток — 1 МГц.

ции и взрывов, в физике плазмы, исследованиях электрических пробоев и разрядов и др. [2–5].

Среди отечественных э.о.к., используемых в таких экспериментах, следует отметить камеру К008 [6, 7] (компания БИФО), имеющую два режима работы: однокадровый и режим линейной развертки. Временной диапазон линейной развертки, обеспечиваемый двумя сменными блоками управления, составляет от 1 нс/см до 300 мкс/см. В [8] в качестве временного регистратора использовалась э.о.к. СФЭР-6 (НИИИТ) для исследования импульсных плазменных потоков, создаваемых в Z-пинчевых системах. Максимальная длительность развертки этой камеры ~75 мкс при диаметре экрана 22 мм. Из зарубежных э.о.к. нужно упомянуть Imacon 790 (Hofstra group), снабженную двумя модулями разверток: кадровой и линейной [9], с диапазоном перестройки последней от 100 нс до 1 мкс/см (в опционном предложении от 10 нс до 1 мс/см).

В данной работе представлена разработанная в ИОФ РАН э.о.к., работающая в режиме линейной развертки в нано- и микросекундном диапазоне, приведены ее основные характеристики, а также пример использования этой камеры в физическом эксперименте.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ

Описываемая камера изготовлена на основе э.о.п. ПИФ-01 [10], усилителя яркости ЭП-10 и конструктивно оформлена в корпусе камеры PS-1/S1 [11]. Основные технические характеристики камеры представлены ниже:

Спектральный диапазон регистрируемого излучения (фотокатод S20), нм	400–800
Диаметр фотокатода, мм	6
Пространственное разрешение в центре фотокатода, пар линий/мм	≥20
Электронно-оптическое увеличение	1.7 ± 0.2
Коэффициент преобразования изменяется ступенчато	от 10 ² до 10 ⁴
Длительности разверток, мкс, на экране диаметром 25 мм	0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0
Нелинейность разверток, %	≤±10
Время срабатывания, нс	≤40
Предельное временное разрешение, нс	≤2
Частота калибровочных меток, МГц	1.25 ± 0.0125, 2.5 ± 0.025, 5 ± 0.05, 10 ± 0.1, 20 ± 0.2
Напряжение питания, В, частотой 50 Гц	220
Потребляемая мощность, Вт	≤100 Вт

Запуск камеры осуществляется импульсами положительной полярности амплитудой ≥5 В и длительностью по уровню 0.5 не менее 10 нс. В камере предусмотрена автоблокировка для исключения повторных запусков.

Особенностью изготовленной э.о.к. является наличие встроенного в корпус камеры кварцевого генератора калибровочных меток времени, формирующего синхронизированную с разверткой серию оптических импульсов заданной частоты, испускаемых лазерным диодом мощностью 5 мВт, входящим в комплектацию камеры. Использование калибровочных меток позволяет осуществлять проверку длительности и линейности разверток непосредственно в процессе эксперимента. На рис. 1 представлена фотография зарегистрированных световых меток с частотой следования 10 МГц, иллюстрирующая процесс калибровки длительности и нелинейности развертки 1 мкс, и их микрофотограмма. Запись и цифровая обработка полученного изображения осуществлялись п.з.с.-камерой (п.з.с. — прибор с зарядовой связью) модели С8484-05G (Hamamatsu).

С помощью разработанной камеры на установке “Гелиос-1” в Сухумском физико-техническом институте была исследована динамика поведения оптического спектра излучения электровзрыва вольфрамовой проволоочки. В экспериментах использовался спектрометр, формирующий пространственно разделенные спектральные линии излучения плазмы, возникающей при взрыве. Проекционный объектив отображал этот спектр с необходимым коэффициентом уменьшения (увеличения) на фотокатод камеры, которая разворачивала его во времени. Взаимно перпендикулярное расположение выходной щели спектрометра и входной щели э.о.к. (метод скрещивания) обеспечивало регистрацию двухмерных спектрально-временных картин излучения плазмы.

Результаты исследования динамики поведения спектральной линии водорода во времени с помощью камеры показали, что время появления линии H_α составляет ~100 нс от начала разряда и не зависит от параметров проволоочки и условий проведения эксперимента. На рис. 2 представлены фотографии развертки оптического спектра плазмы при электровзрыве, полученные в двух разных экспериментах. Как видно из рисунка, спектральная линия водорода (H_α) появляется в одно и то же время от начала развертки, несмотря на то что в опыте № 195 предварительный прогрев проволоочки не проводился. Этот факт свидетельствует о том, что водород, наблюдаемый в спектрах излучения, не растворен в объеме проволоочки.

Появление линии водорода раньше сплошной (планковской) составляющей спектра позволяет утверждать, что водород не связан с нали-

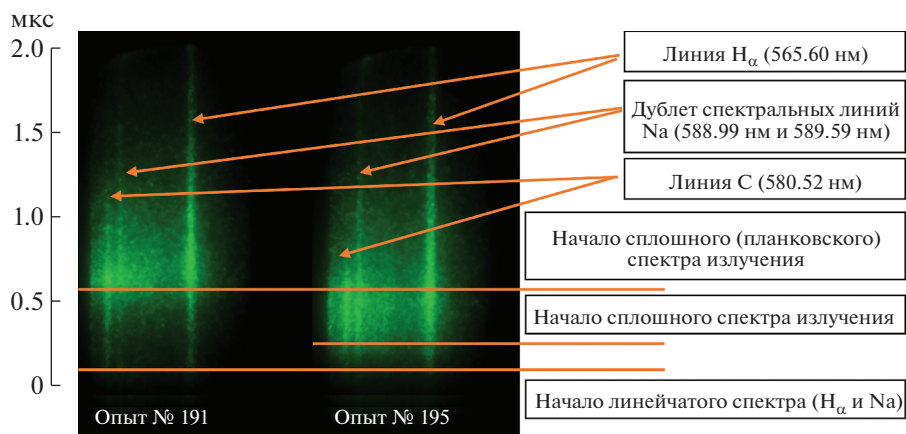


Рис. 2. Фотография развернутого оптического спектра при электровзрыве вольфрамовой проволоочки. Длительность развертки 2 мкс.

нием воды на стенках колбы и конструкционных частях установки. Согласно приведенным снимкам, динамика сплошной (планковской) части спектра во времени различается для разных экспериментов, что, по-видимому, определяется их условиями.

Кроме того, достаточно высокое пространственное разрешение камеры позволило зарегистрировать и исследовать динамику поведения нескольких наиболее ярких спектральных линий. Ими оказались: дублет спектральных линий Na (588.99 нм и 589.59 нм, спектральное разрешение спектрометра не позволяло его разделить) и линия углерода (580.52 нм). Дублет во всех сериях экспериментов появляется одновременно с линией H_{α} и повторяет ее динамику, однако на данном этапе сложно назвать причину появления натрия в спектрах. Наличие спектральных линий углерода, по нашему мнению, свидетельствует о попадании паров масла из форвакуумной части установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и изготовлена хронографическая электронно-оптическая камера с встроенным генератором оптических калибровочных меток, работающая в диапазоне длительностей разверток от 0.5 до 10 мкс. Результаты применения микросекундной э.о.к. в экспериментах по исследованию динамики излучения плазмы, возникающей при электровзрыве вольфрамовой проволоочки, подтвердили ее технические возможности и надежность в эксплуатации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность П.Г. Горностаеву, С.Е. Курбатову и Г.П. Левиной за участие в изготовлении камеры, а также А.В. Смирнову за помощь при подготовке статьи к публикации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-52-40002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamamatsu News. 2017. Issue. 02. P. 32.
2. Волков А.А., Гребенев Е.В., Дыдыкин П.С., Ермолович В.Ф., Иванов М.М., Ивановский А.В., Карелин В.И., Орлов А.П., Репин П.Б., Савченко Р.В., Селемиур В.Д., Селявский В.Т. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 5. С. 115.
3. Basko M.M., Drozdovskii A.A., Golubev A.A., Gubskii D.D., Iosseliani S.M., Kantsyrev A.V., Karpov M.A., Kuznetsov A.P., Novozhilov Yu.B., Pronin O.V., Savin S.M., Sasorov P.V., Sobur D.A., Sharkov B.Yu., Yanenko V.V. // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2008. V. 5. № 7. P. 582. <https://doi.org/10.1134/S1547477108070091>
4. Fan Ye, Yi Qin, Shuqing Jiang, Feibiao Xue, Zhenghong Li, Jianlun Yang, Rongkun Xu, Anan'ev S.S., Dan'ko S.A., Kalinin Yu.G. // Review of Scientific Instruments. 2009. V. 80. P. 106105-1. <https://doi.org/10.1063/1.4974771>
5. Кравченко А.Г., Литвин Д.Н., Мисько В.В., Сенюк А.В., Стародубцев К.В., Тараканов В.М. // ПТЭ. 2014. № 2. С. 90. <https://doi.org/10.7868/S0032816214020190>
6. Лебедев В.Б., Фельдман Г.Г., Карпов М.А., Фёдоров А.В., Меньших А.В., Назаров Д.В., Финюшин С.А., Давыдов В.А. // SPIE. 2005. V. 5580. P. 881.
7. Митрофанов К.Н., Крауз В.И., Мялтон В.В., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В., Грабовский Е.В.,

- Данько С.А., Зеленин А.А., Медовщиков С.Ф., Мокеев А.Н.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 2. С. 134.
<https://doi.org/10.7868/S0367292114020036>
8. *Ананьев С.С., Данько С.А., Мялтон В.В., Калинин Ю.Г., Крауз В.И., Виноградов В.П., Виноградова Ю.В.* // ВАНТ. 2013 Т. 36. № 4. С. 102.
9. <https://hofstragroup.com/nanosecond-imaging.html> // Imacon 790 Streak and Framing Camera.
10. *Degtyareva V.P., Kulikov Yu.V., Monastyrskiy M.A., Platonov V.N., Postovalov V.E., Prokhorov A.M., Ulasyuk V.N., Ushakov V.K.* // SPIE. 1984. V. 491. P. 239.
<https://doi.org/10.1117/12.967917>
11. *Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Смирнов А.В., Щелев М.Я., Шашков Е.В.* // ПТЭ. 2016. № 4. С. 72.
<https://doi.org/10.7868/S0032816216030289>