

## ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ЗАПУСКА ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ

© 2021 г. К. А. Алабин<sup>а</sup>, Н. С. Воробьев<sup>а,\*</sup>, А. И. Заровский<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН*

*Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38*

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

Поступила в редакцию 23.06.2020 г.

После доработки 06.07.2020 г.

Принята к публикации 17.07.2020 г.

Представлена методика измерения времени срабатывания (мертвого времени) электронно-оптических камер (э.о.к.) для нескольких длительностей развертки. Как правило, время срабатывания э.о.к. измеряется только для самой короткой развертки, что усложняет синхронизацию запускающего импульса э.о.к. с исследуемым процессом при работе на других развертках. Использование в качестве метки светового импульса лазерного диода с фронтом  $\leq 1$  нс позволило существенно уменьшить неопределенность отсчета момента появления импульса на камере. Кроме того, предложенная методика позволяет учитывать все возможные задержки срабатывания, что повышает точность измерений, а также измерять длительность разверток э.о.к.

DOI: 10.31857/S0032816221010018

### ВВЕДЕНИЕ

Хронографические электронно-оптические камеры (э.о.к.) с линейной разверткой (стрик-камеры) находят широкое применение в исследованиях световых быстропротекающих процессов, поскольку позволяют проводить их прямые временные измерения [1]. Существенное значение приобретает время срабатывания камеры, особенно при регистрации однократных процессов [2]. В данной работе на примере э.о.к. PS-1/S1, разработанной в ИОФ РАН и широко используемой в физическом эксперименте [1, 3], описана методика измерения ее времени срабатывания для нескольких длительностей развертки.

### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Время срабатывания э.о.к. — это интервал между моментом прихода запускающего электрического импульса и моментом появления развертки на экране камеры. Момент появления развертки можно установить, например, с помощью зарегистрированного в начале развертки светового короткого импульса, что и даст возможность оценить время срабатывания камеры.

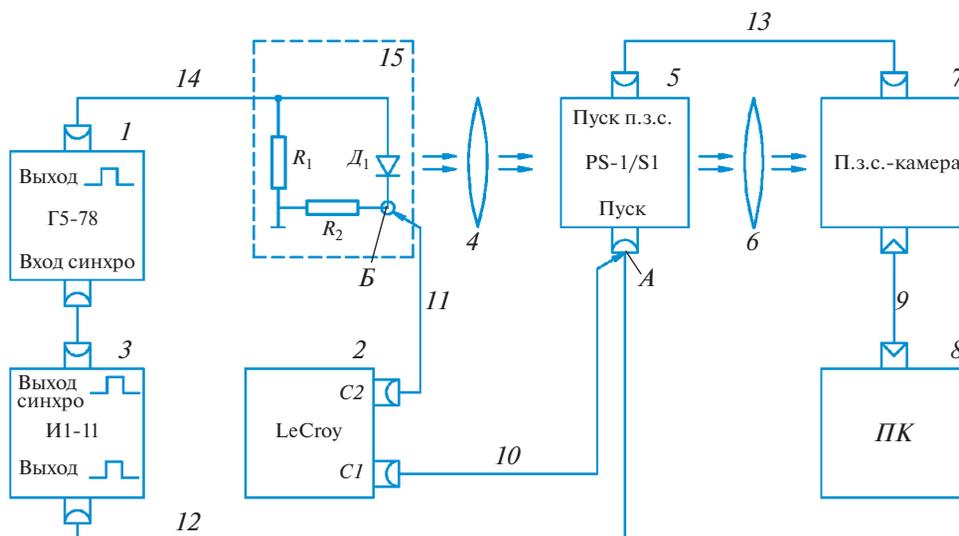
Авторами работы [2] для определения времени срабатывания э.о.к. применена ртутная лампа-вспышка ДРШ350-2. Эта лампа-вспышка формирует световой импульс с длительностью фронта  $\sim 300$  нс [2], что вносит большую неопределен-

ность в отсчет момента появления импульса на экране камеры, особенно на коротких развертках ( $\leq 10$  нс), и, как следствие, большую погрешность в измерениях времени срабатывания э.о.к.

Источником импульсов света с более коротким фронтом могут быть, например, полупроводниковые лазерные диоды. Современные серийно выпускаемые лазерные диоды имеют длительность фронта 0.1–1 нс.

В нашей работе для измерения времени срабатывания э.о.к. используется лазерный диод и генераторы импульсов И1-11 и Г5-78. На рис. 1 представлена схема измерения времени срабатывания камеры PS-1/S1 для длительностей разверток 0.2, 2, 10, 20 нс. В данной схеме генератор И1-11 работает в режиме внутреннего однократного запуска и формирует электрические импульсы длительностью 0.1–10 мкс с длительностью фронта  $\leq 1$  нс, амплитудой  $\geq 20$  В на нагрузке 50 Ом. Генератор Г5-78 формирует электрические импульсы длительностью 1–300 нс с длительностью фронта 0.5–50 нс, амплитудой 0–5 В на нагрузке 50 Ом и запускает лазерный диод с длиной волны излучения 635 нм и выходной мощностью 5 мВт.

Генератор И1-11 формирует выходной импульс и синхроимпульс, запускающие соответственно развертку э.о.к. (точка А) и генератор Г5-78. Сигнал в точке А регистрируется каналом С1 осциллографа. Выходной импульс генератора Г5-78 поступает на лазерный модуль. Резистор  $R_1$  обеспе-



**Рис. 1.** Схема измерения времени срабатывания э.о.к. 1 – генератор Г5-78; 2 – осциллограф LeCroy; 3 – генератор импульсов И1-11; 4 – линза; 5 – э.о.к. PS-1/S1; 6 – объектив Helios-44-2; 7 – п.з.с.-камера; 8 – персональный компьютер; 9 – USB-кабель; 10, 11 – кабель LeCroy PP008; 12–14 – коаксиальные кабели РК-50-2-12 с разъемами СР-50-74ПВ; 15 – лазерный модуль ( $R_1, R_2$  – резистор SMD 1206-100 Ом  $\pm 5\%$ ,  $D_1$  – лазерный диод  $P_{\text{вых}} = 5$  мВт).

чивает согласование выходного тракта генератора Г5-78, а резистор  $R_2$  формирует рабочий ток лазерного диода. Сигнал, полученный на резисторе  $R_2$  (точка *Б*), регистрируется каналом *C2* осциллографа.

Сфокусированное линзой 4 излучение лазерного диода попадает на фотокатод э.о.к. Величина задержки выходного синхроимпульса генератора Г5-78 подбирается таким образом, чтобы изображение лазерного импульса появлялось на экране камеры в начале развертки. Это изображение считывается и обрабатывается п.з.с.-камерой и записывается на компьютере.

Для определения времени срабатывания э.о.к. были проведены: измерения задержки электрического импульса пуска лазерного диода, расчет и измерение времени срабатывания лазерного диода (методика описана в [4, 5]), расчеты и измерения оптической задержки лазерного импульса и задержки изображения оптического импульса на экране э.о.к. относительно начала установленной развертки. Кроме того, (это важно для коротких разверток длительностью  $\leq 1$  нс) необходимо учитывать разность задержек измерительных трактов каналов *C1* и *C2* осциллографа и длин соединительных кабелей (10 и 11 на рис. 1).

Таким образом, исходя из вышесказанного можно записать формулу для расчета времени срабатывания  $t_{\text{ср}}$  э.о.к.:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{з.л.д.}} + t_{\text{ср.л.д.}} + t_{\text{о.з.}} \pm t_{\text{к.ос.}} - t_{\text{р.}}$$

Здесь  $t_{\text{з.л.д.}}$  – задержка электрического импульса пуска лазерного диода относительно пускового импульса камеры;  $t_{\text{ср.л.д.}}$  – время срабатывания лазерного диода;  $t_{\text{о.з.}}$  – оптическая задержка лазерного импульса в воздухе и линзе;  $t_{\text{к.ос.}}$  – разность времен срабатывания каналов *C1* и *C2* осциллографа;  $t_{\text{р}}$  – задержка изображения лазерного импульса на экране э.о.к. относительно начала установленной развертки.

Задержка между электрическими импульсами  $t_{\text{з.л.д.}}$  измерялась осциллографом в точках *A* и *B* (см. рис. 1) в момент появления изображения лазерного импульса в начале развертки э.о.к. Порог срабатывания пуска э.о.к. PS-1/S1 равен 2 В. На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов пуска развертки э.о.к. и лазерного диода, полученных при работе камеры на развертке длительностью 2 нс. Задержка  $t_{\text{з.л.д.}}$  между импульсами составила 44.444 нс. Время срабатывания лазерного диода  $t_{\text{ср.л.д.}}$  измерялось и рассчитывалось по методике, описанной в [4, 5], и составило 1.150 нс. Оптическая задержка лазерного импульса в воздухе и линзе  $t_{\text{о.з.}}$  рассчитывалась по измеренной длине оптического пути лазерного импульса от диода до фотокатода э.о.к. с учетом показателя преломления материала фокусирующей линзы и ее толщины и составила 0.25 нс. Поскольку канал *C1* срабатывает на 0.335 нс раньше канала *C2*, в вышеприведенной формуле  $t_{\text{к.ос.}}$  вычитается. Время  $t_{\text{р}}$  определяется из полученного на экране э.о.п. раз-

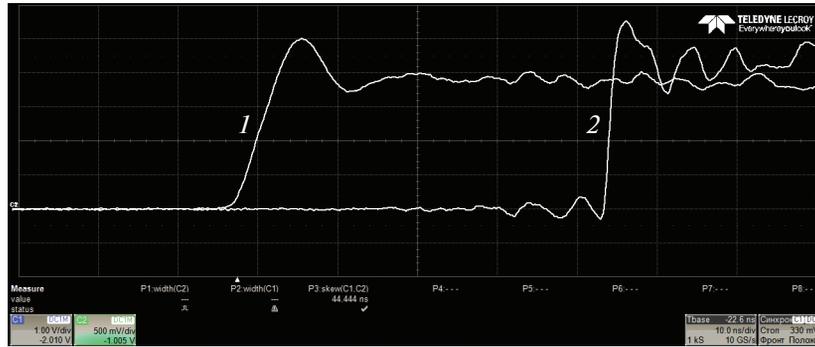


Рис. 2. Осциллограммы: 1 – импульса пуска развертки э.о.к.; 2 – импульса пуска лазерного диода. Задержка между импульсами 44.444 нс.

вернутого изображения зарегистрированного лазерного импульса по формуле:

$$t_p = (L_u/L_p)T_p,$$

где  $L_u$ , мм – расстояние между точками, соответствующими началу развертки и значению амплитуды лазерного импульса, измеренной по уровню 0.1;  $L_p$ , мм – длина развертки на экране э.о.к.;  $T_p$ , нс – длительность установленной развертки.

Погрешность измерения длительностей разверток э.о.к. и их нелинейность, как правило, составляют ~10% каждая. Погрешность измерения расстояний  $L_u$  и  $L_p$  зависит от системы считывания и обработки изображений и в нашем случае меньше 1%. Таким образом, результирующая погрешность измерения задержки лазерного импульса на экране камеры равна ~11%.

Для повышения точности определения  $t_p$  была проведена калибровка длительностей разверток э.о.к. Излучение фемтосекундного лазера Tsunami (длина волны 800 нм, длительность импульса 30 фс, частота повторения 75.3 МГц) пропусклось через установленную перед камерой пару зеркал с коэффициентом отражения ~99% каждое при известном расстоянии между ними (аналог интерферометра Фабри–Перо). По полученным таким образом калибровочным меткам можно измерить длительность и нелинейность конкретной развертки. Зарегистрированное изображение меток считывалось и обрабатывалось п.з.с.-камерой и запоминалось на компьютере (рис. 3а).

Далее, для выбранной развертки эпограмму с изображением меток необходимо совместить с ранее зарегистрированным и обработанным изображением импульса лазерного диода (рис. 3б) так, чтобы начало разверток совпадало (рис. 3в). В этом случае задержку светового импульса относительно начала развертки можно вычислить по формуле (рис. 4):

$$t_p = t_k n + t_u(L_1/L_2 + L_4/L_3),$$

где  $t_k$  – период калибровочных меток;  $n$  – число полных периодов калибровочных меток от начала развертки.

При таком измерении задержки лазерного импульса относительно начала развертки погрешность установления длительности разверток э.о.к. и их нелинейность практически сводятся к минимуму и точность определения  $t_p$  зависит от погрешности системы считывания. Для развертки 2 нс, представленной на рис. 3а и 3б, величина  $t_p = 0.685$  нс. Необходимо отметить, что основной вклад в

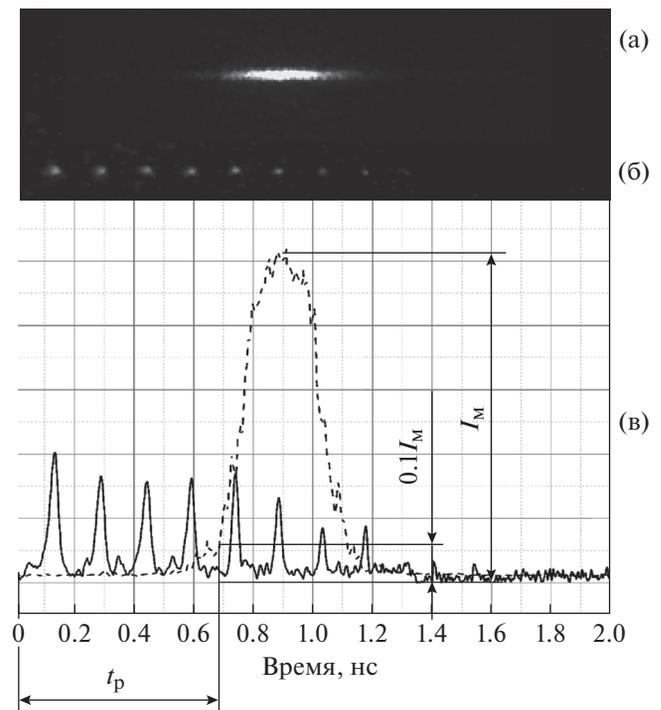
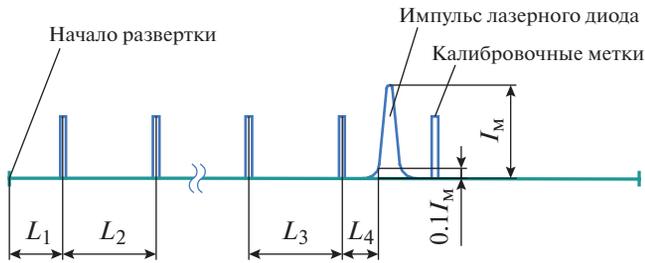


Рис. 3. Эпограммы импульса лазерного диода (а) и калибровочных меток с периодом 150 пс (б); фотометрия эпограмм (в). Длительность развертки э.о.к. PS-1/S1 – 2 нс,  $t_p = 0.685$  нс,  $I_M$  – амплитуда импульса лазерного диода.



**Рис. 4.** Схема расчета задержки изображения импульса лазерного диода.  $I_M$  — амплитуда импульса лазерного диода.

погрешность измерения  $t_p$  и соответственно  $t_{cp}$  вносит нестабильность времени срабатывания (джиттер) э.о.к., которая для камеры PS-1/S1 лежит в пределах  $\pm 15$  пс [1].

Таким образом, рассчитанное и измеренное время срабатывания э.о.к. PS-1/S1 с учетом всех выше перечисленных компонентов для разверток 0,2, 2, 10, 20 нс составило соответственно 25,1, 46,2, 136,8, 223,0 нс.

Кроме того, устанавливая генератором Г5-78 соответствующую задержку выходного импульса, при которой фронт оптического импульса лазерного диода появляется в начале и в конце развертки э.о.к., можно измерять длительность развертки как разность задержек импульсов, измеренных в точке *Б*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика измерения времени срабатывания хронографических э.о.к. с использованием серийного лазерного диода и генераторов И1-11, Г5-78 позволяет измерять время срабатывания как на коротких ( $\leq 0.5$  нс), так и на длинных развертках ( $\geq 1$  мкс).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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>
2. Аббасов Т.С., Калинин А.И., Пузырёв В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Фахриев Б.Р., Якушев О.Ф. // ПТЭ. 2018. № 3. С. 70. <https://doi.org/10.7868/S0032816218030011>
3. Schelev M.Ya., Monastyrskiy M.A., Vorobiev N.S., Garinov S.V., Greenfield D.E. Aspects of Streak Image Tube Photography / Advances in Imaging and Electron Physics, Adv. Imag. Electron Phys., 180, Elsevier Academic Press Inc, 2013, VII+. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407755-3.00001-7>
4. Зу С. Физика полупроводниковых приборов. Книга 2. М.: Мир, 1984. С. 331.
5. Fukushima T., Kasukawa A., Iwase M., Namegaya T., Shibata M. // IEEE Photonics Technology Lett. 1993. V. 5. № 2. С. 117. <https://doi.org/10.1109/68.195976>