ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 2, с. 120–124

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.082.5

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ВРЕМЯАНАЛИЗИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПИФ-01

© 2025 г. С. В. Андреев[a,*], Н. С. Воробьёв[a,*], П. Б. Горностаев[a], А. В. Смирнов[a], Е. В. Шашков[a]

[a] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук*
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

** e-mail: svandr56@mail.ru*

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

Поступила в редакцию 22.10.2024 г.
После доработки 28.11.2024 г.
Принята к публикации 19.12.2024 г.

Описана одна из возможных модификаций времяанализирующего электронно-оптического преобразователя модели ПИФ-01. Показано, как, не меняя габаритов устройства и требований к обеспечивающей его электронике, можно улучшить временное разрешение преобразователя. Проведено математическое моделирование основных технических параметров модифицированного электронно-оптического преобразователя и приведены результаты экспериментов, подтверждающие проведенные расчеты.

DOI: 10.31857/S0032816225020148, **EDN:** GKSFHO

1. ВВЕДЕНИЕ

Времяанализирующие электронно-оптические преобразователи (ЭОП) имеют удивительно долгую жизнь, и некоторые из них верой и правдой служат десятилетиями и до сих пор успешно используются во времяанализирующих электронно-оптических камерах (ЭОК). Одним из них является ЭОП ПИФ-01 с временным разрешением 1–3 пс [1], созданный в середине восьмидесятых годов в Институте общей физики РАН. В последнее время среди исследователей световых быстропротекающих процессов наблюдается повышенный интерес к приборам с временным разрешением менее 1 пс. Во ВНИИОФИ были разработаны и созданы экспериментальная ЭОК Агат-04М [2] и камера модели К009 [3], имеющие временное разрешение около 200 фс. Японская фирма Hamamatsu сообщила о создании коммерческой ЭОК с временным разрешением около 100 фс [4]. В нашем институте был разработан и изготовлен ЭОП, в котором при скорости развертки $5 \cdot 10^{10}$ см/с и импульсной напряженности электрического поля у фотокатода примерно 13 кВ/мм было достигнуто временное разрешение около 200 фс [5]. Но из-за больших габаритов и сложной электрической схемы (высоковольтное импульсное питание промежутка фотокатод-сетка) данный лабораторный образец ЭОК не был коммерчески реализован.

Один из путей улучшения технических характеристик ЭОП, в частности временного разрешения, – это усовершенствование уже имеющегося, хорошо зарекомендовавшего себя прибора. Как правило, модификация старых разработок позволяет решить эту задачу в более короткие сроки и с меньшими затратами по сравнению с разработкой нового прибора. При таком подходе можно сохранить габариты применяемых ЭОП и основные элементы электронной начинки камер.

Вышеупомянутый преобразователь ПИФ-01 является основным элементом времяанализирующей камеры PS-1/S1 [6], которой успешно пользуются во многих научных центрах России. Для улучшения ее временного разрешения мы пошли по пути модернизации ЭОП с целью

повышения скорости развертки, но с сохранением его габаритов и технических требований к обеспечивающей его функционирование электронике.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОЙ ГЕОМЕТРИИ ЭОП ПИФ-01

В стандартном времяанализирующем ЭОП ПИФ-01 с электростатической фокусировкой, работающем в режиме линейной развертки, расположение электродов следующее: фотокатод, мелкоструктурная ускоряющая сетка, фокусирующие электроды, анод (анодная диафрагма), запирающие пластины, пластины развертки, как правило, раструбного типа и люминесцентный экран. Для такого преобразователя на рис. 1 изображены траектории электронов в области между системой развертки и люминесцентным экраном, эмитируемых фотокатодом с интервалом в 30 пс при типичной для камеры PS-1 скорости развертки $1.2 \cdot 10^{10}$ см/с. Видно, что если изменить положение верхней пластины так, как показано на рисунке штриховой линией, то отсекутся те электроны, которые и так не попадают на экран. При такой конфигурации пластин теряется часть рабочего поля экрана для малых скоростей разверток, зато увеличивается чувствительность отклоняющей системы и, следовательно, скорость развертки. Для задач, где высокое временное разрешение приоритетнее большого рабочего поля экрана, такая модификация вполне оправдана.

Следующей модификацией для дальнейшего увеличения скорости развертки в ЭОП ПИФ-01 стала перемена мест затворных и разворачивающих пластин. Очевидно, что при таком подходе существенно падает чувствительность системы затвора из-за уменьшения плеча отклонения пучка. Для минимизации потери чувствительности затвора пришлось существенно изменить геометрию пластин и ввести ограничение на высоту входной щели, проецируемой на фотокатод, сократив ее до 5 мм вместо обычных 6 мм, что привело к потере небольшой части рабочего поля по пространственной оси. Расчет показал, что при напряжении 420 В на затворных пластинах (стандартное составляет примерно 350 В) пятимиллиметровое изображение щели на экране, представленное тремя пучками электронов, охватывающими всю высоту щели, полностью уходило с экрана (рис. 2). Это понижение на 20% чувствительности системы затвора в последующем эксперименте привело лишь к незначительному изменению ее электрической схемы.

В результате моделирования и оптимизации, проведенных с использованием пакета прикладных программ по расчету электронной и ионной оптики MASIM [7], получилась новая геометрия затворных и отклоняющих пластин, представленная на рис. 2, 3. В итоге скорость развертки системы увеличилась в полтора раза (с $1 \cdot 10^{10}$ см/с до $1.5 \cdot 10^{10}$ см/с). При этом расчетное временное разрешение для длины волны 800 нм и параболического энергетического рас-

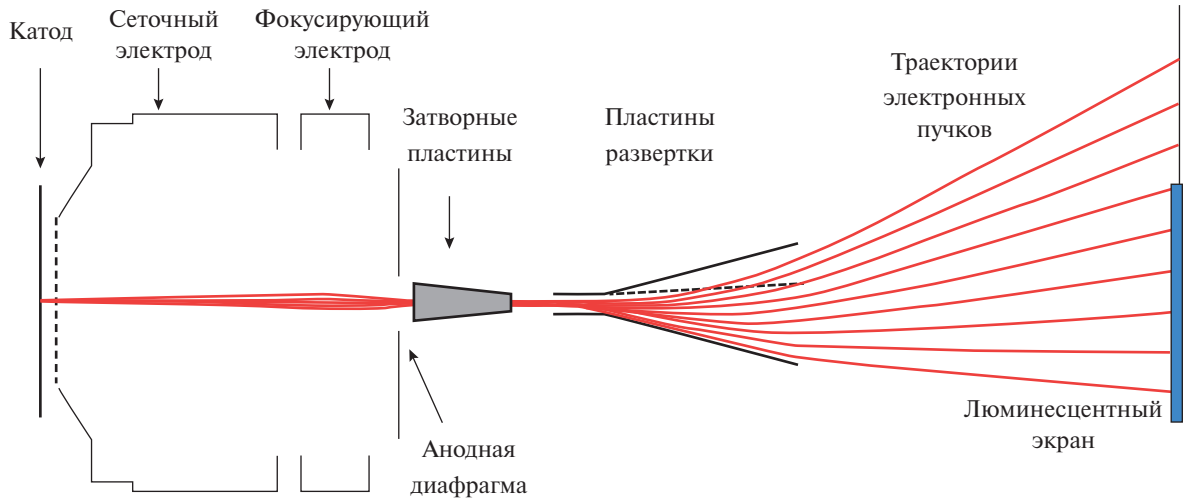

Рис. 1. Расчетная схема стандартного ЭОП ПИФ-01 с траекториями 9 коротких пучков электронов, эмитируемых фотокатодом с интервалом в 30 пс при скорости развертки $1.2 \cdot 10^{10}$ см/с.

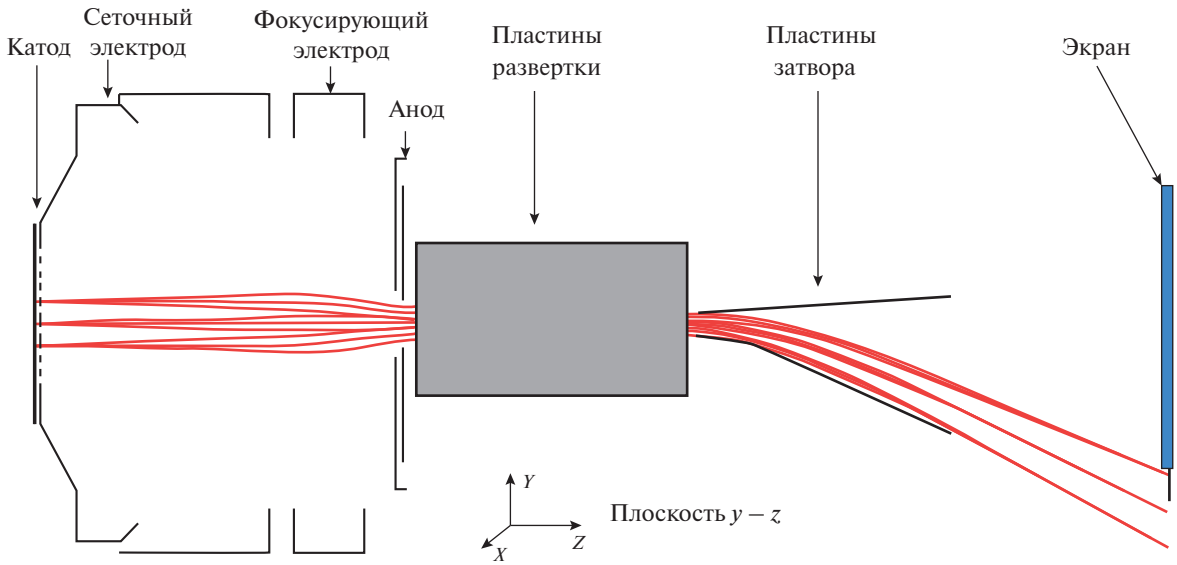

Рис. 2. Расчетная схема модифицированного ЭОП ПИФ-01 в сечении плоскости, перпендикулярной пластинам затвора, с траекториями трех пучков электронов, эмитируемых с краев и центра пятимиллиметровой щели на катоде в режиме затвора.

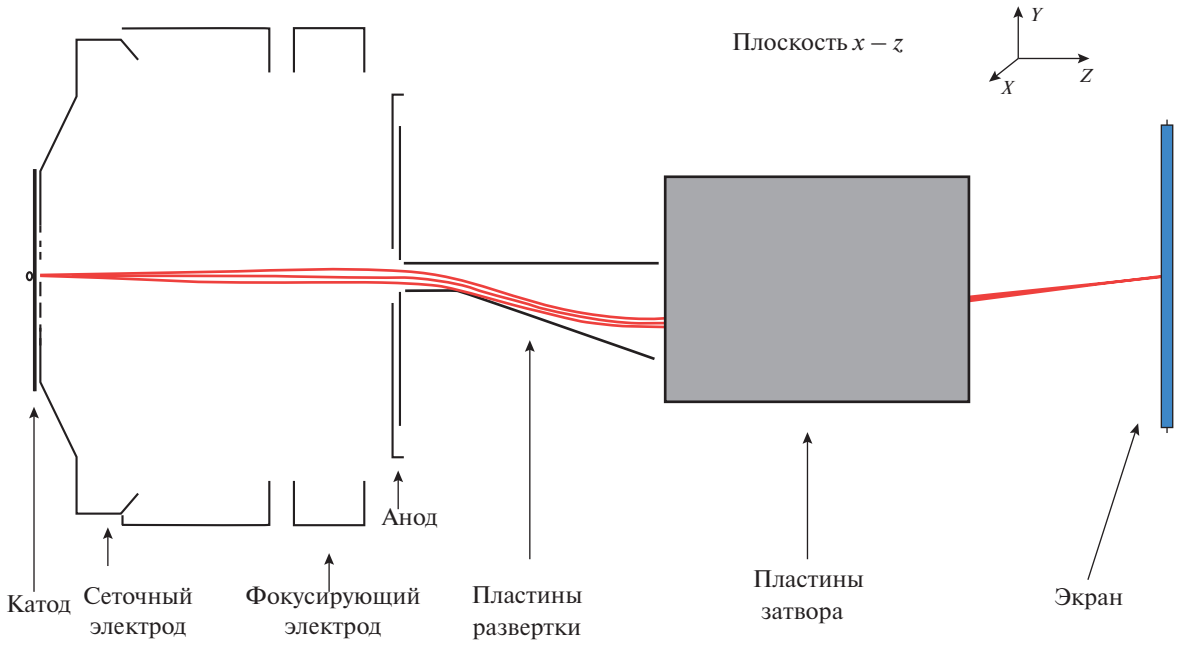

Рис. 3. Расчетная схема модифицированного ЭОП ПИФ-01 в сечении плоскости, перпендикулярной пластинам развертки, с траекториями пучка электронов, эмитируемых из центра пятимиллиметровой щели на катоде в режиме развертки.

пределения с наиболее вероятной энергией 0.25 эВ, соответствующей фотокатоду S1, оказалось равным 420 фс при напряженности поля на фотокатоде 5 кВ/мм. Расчеты показали, что только одновременное увеличение напряженности поля на фотокатоде и скорости развертки могут обеспечить такое временное разрешение.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения скорости развертки и временного разрешения камеры PS-1/S1, включающей в себя модернизированный ЭОП ПИФ-01, проводились с помощью титан-сапфирового лазера, генерирующего световые импульсы на длине

волны 800 нм длительностью около 30 фс с частотой повторения примерно 75 МГц. Ячейка Поккельса с амплитудным контрастом около 1000 обеспечивала выделение одиночного импульса из цуга генерации, благодаря чему при его регистрации значительно возрастало отношение сигнал/шум. Для получения щелевого изображения с максимальным пространственным разрешением и во избежание временного уширения лазерного импульса перед фотокатодом камеры устанавливалась цилиндрическая линза вместо традиционной двухобъективной входной оптики. Регистрация и обработка получаемых на выходном экране камеры изображений лазерных импульсов осуществлялись с помощью ПЗС-системы считывания C8484-05G (Hamamatsu, Япония).

Достигнутая величина скорости развертки оказалась равной $1.9 \cdot 10^{10}$ см/с, в отличие от величины 10^{10}–$1.3 \cdot 10^{10}$ см/с, характерной для традиционных образцов камеры PS-1/S1 [6]. При стандартных отрицательных значениях анодного и сеточного напряжений –12 кВ и –9 кВ соответственно (напряжение промежутка фотокатод–сетка 3 кВ), и при найденном оптимальном значении фокусного напряжения (–10.6 кВ) для этой скорости развертки измеренная величина временного разрешения лежала в диапазоне 0.8–1.2 пс.

Как известно, помимо скорости развертки, к основным параметрам, влияющим на временное разрешение, относится напряженность поля в промежутке фотокатод-сетка. Для стандартных камер PS-1/S1 при скоростях развертки 10^{10}–$1.3 \cdot 10^{10}$ см/с оптимальное значение напряженности поля лежит в пределах 2–3 кВ/мм. Увеличение напряженности выше 3 кВ/мм посредством повышения потенциала на ускоряющей сетке не только не приводило к улучшению временного разрешения, но и вызывало его ухудшение. Это связано с тем, что при увеличении напряженности поля растет электронно-оптическое увеличение (рис. 4) и, как следует из формулы для экспериментальной оценки технического временного разрешения

$$T_{\text{тех}} = \frac{\Delta x_{\text{э}}}{V_{\text{р}}} = \frac{M \cdot \Delta x_k}{V_{\text{р}}},$$

начиная с некоторой ширины, происходит снижение временного разрешения при увеличении напряженности. Здесь Δx_k, $\Delta x_{\text{э}}$ – соответственно ширины изображения щели на катоде и на экране, M – электронно-оптическое увеличение, $V_{\text{р}}$ – скорость развертки.

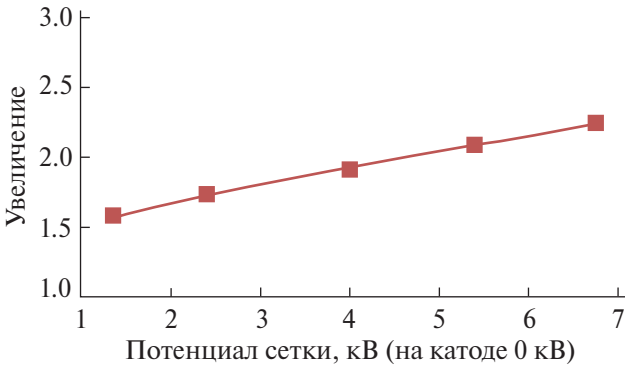

Рис. 4. Зависимость электронно-оптического увеличения в ЭОП ПИФ-01 от напряженности электрического поля в промежутке фотокатод – сетка.

Экспериментально полученное оптимальное значение напряженности, при котором временное разрешение модернизированного преобразователя составило примерно 0.7 пс, находилось в пределах 4–4.5 кВ на промежутке фотокатод–сетка 1 мм (фокусное напряжение равно –10.8 кВ). Полученное значение временного разрешения – это усредненная величина по 50 измерениям при максимальном разбросе в диапазоне 0.5–1 пс. При этом для регистрации изображений использовалась центральная часть выходного экрана камеры размером 10×10 мм^2. При более высокой напряженности поля рост коэффициента увеличения катод/экран приводит к ухудшению пространственного и, соответственно, временного разрешения.

На рис. 5 представлена фотография двух импульсов с полушириной (FWHM) не более 0.7 пс, записанных на экране ЭОК с модернизированным ПИФ-01, и их микрофотограмма. Импульсы получены путем отражения одиночного лазерного импульса от стеклянной подложки толщиной 1 мм.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зачастую разработчики времяанализирующих камер ставят задачу создания универсального прибора, одновременно соблюдающего ряд условий: высокое временное разрешение, большое рабочее поле, режимы покадровой и линейной развертки, режим синхроскана и т. п. При попытке соблюдения такого набора условий возникает ряд труднопреодолимых препятствий. Например, большое рабочее поле и покадровый

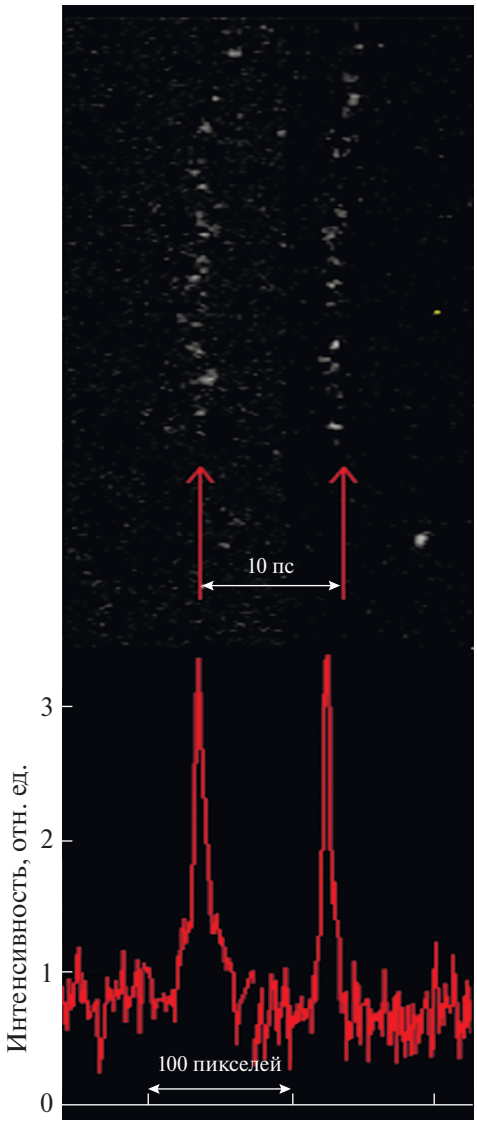

Рис. 5. Фотография двух импульсов с полушириной (FWHM) не более 0.7 пс и их микрофотограмма. Скорость развертки $1.9 \cdot 10^{10}$ см/с, масштаб 0.1 пс/пиксель.

режим, как правило, требуют скругленности фотокатода во избежание временной дисторсии вдоль пространственной оси. Но, как показывает опыт, при таком фотокатоде трудно реализовать высокую напряженность поля из-за возрастающей вероятности электрического пробоя промежутка катод – сетка.

В данной работе мы попытались сузить круг решаемых задач с целью сделать надежными реализации режимов с субпикосекундным временным разрешением. Подытожим результаты модификации ЭОП ПИФ-01.

1. Пластины развертки перенесены к анодной диафрагме, что в совокупности с изменением геометрии пластин (использование асимметричности) дало увеличение скорости развертки до величины $1.9 \cdot 10^{10}$ см/с.

2. Пластины затвора перенесены к экрану и изменена их геометрия. В итоге затворное напряжение увеличилось с 350 В до 420 В.

3. Измеренное временное разрешение оказалось равным примерно 0.7 пс при напряженности электрического поля на фотокатоде 4–4.5 кВ/мм.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем признательность сотрудникам технологической цепочки отдела колебаний ИОФ РАН, сумевшим качественно изготовить сложнейший (требующий микронной точности сборки) ЭОП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Degtyareva V.P., Kulikov Yu. V., Monastyrski M.A. et. al.* // Proc. 16th Intl Congress on High Speed Photography and Photonics. 1985. V. 0491. P. 239. https://doi.org/10.1117/12.967917
2. *Брехов О.М., Лебедев В.Б. и др.* // Труды 14-го Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. Москва, 1980. С. 253.
3. *Ivanov V.S., Zolotarevsky Yu. M., Krutikov V.N., Lebedev V .B., Feldman G.G.* // Proc. 27th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. 2007. V. 6279. P. 627908. https://doi.org/10.1117/12.725059
4. Hamamatsu News. 2017. № 02. P. 32. https://www.hamamatsu-news.de/issues/hamamatsu_news_02_2017_DkJrT9ybnV/32/
5. *Прохоров А.М., Воробьев Н.С., Лозовой В.И., Смирнов А.В., Щелев М.Я.* // КЭ. 2002. Т. 32. № 4. С. 283.
6. *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
7. *Monastyrskiy M.A., Greenfield D.E., Tarasov V.A.* Software Demonstrations Abstract Book. CPO-7 International Conference, Cambridge, UK, 2006. P. 23.