

ИСКАЖЕНИЯ ФОКУСИРОВКИ В ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ НА ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ РАЗВЕРТКИ

© 2023 г. А. И. Заровский^а, С. В. Андреев^{а,*}, Н. С. Воробьев^{а,**}, П. Б. Горностаев^а

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

*e-mail: svandr56@mail.ru

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

Поступила в редакцию 16.06.2022 г.

После доработки 02.08.2022 г.

Принята к публикации 19.09.2022 г.

Проведены измерения временного и пространственного разрешения электронно-оптической камеры PS-1/S1 в зависимости от скорости развертки. Камера имеет электронно-оптический преобразователь ПИФ-01 с отклоняющими пластинами развертки конденсаторного типа. Показано, что получение минимальной полуширины пространственно-временной аппаратной функции по двум взаимно перпендикулярным направлениям (времени и пространству) может быть достигнуто подбором оптимального напряжения на фокусирующем электроде. Экспериментально определена разница оптимальных статических и динамических напряжений фокусировки по пространству и времени, которая составила 450 В для скорости развертки $1.56 \cdot 10^{10}$ см/с. Выполнено компьютерное моделирование процессов, влияющих на оптимальное разрешение.

DOI: 10.31857/S0032816223010305, EDN: PWOIOL

ВВЕДЕНИЕ

Высокоскоростная развертка изображений, используемая в хронографических щелевых (стрик-) электронно-оптических камерах (ЭОК), является прямым способом измерения быстропротекающих процессов. Для таких камер наиболее важными характеристиками, определяющими качество развернутых на экране изображений, являются:

- временное и пространственное разрешение,
- динамический диапазон регистрации,
- спектральная чувствительность фотокатода.

Величина предельного временного разрешения современных коммерческих и лабораторных пико- и субпикосекундных ЭОК составляет от сотен фемтосекунд [1–3] до единиц пикосекунд [4, 5] при достаточно высоком пространственном разрешении (не хуже 100 мкм). Помимо этого, стрик-камеры дают возможность получения многоканальной пространственной (до 10^2 – 10^3 разрешаемых элементов вдоль щели) информации об исследуемых процессах. В реальных физических экспериментах с использованием таких камер для получения динамической двумерной картины изображения (пространство–время) необходимо иметь сфокусированное изображение как по временной, так и по пространственной оси.

Как было показано в работах [6, 7], при развертке под действием динамического отклоняющего поля происходит искажение пространственной фокусировки (расфокусировка) изображения на экране ЭОК в направлении развертки. Такая расфокусировка при значительных скоростях развертки (выше 10^{10} см/с) существенно ухудшает временное разрешение прибора. Это ухудшение можно устранить изменением напряжения на фокусирующем электроде (подфокусировкой). Однако при этом происходит расфокусировка в перпендикулярном направлении (динамическое пространственное разрешение). В некоторых случаях при работе на больших скоростях развертки необходимо сохранить достаточно высокое динамическое пространственное разрешение подбором оптимального напряжения на фокусирующем электроде, даже иногда в ущерб временному разрешению.

В данной работе выполнены измерения и проведены расчеты зависимости величины временного и динамического пространственного разрешения от напряжения на фокусирующем электроде при различных скоростях развертки. О подобных измерениях динамического пространственного разрешения нам не известно. Эксперименты были выполнены на ЭОК PS-1/S1 (разработка ИОФ РАН) [8, 9], снабженной электронно-оптическим

Таблица 1. Ширина щели в горизонтальном (временном) направлении в зависимости от напряжения на фокусирующем электроде

$-U_{\phi}$, кВ	Ширина щели, мкм
10.45	150
10.50	120
10.55	100
10.60	80
10.65	113
10.70	140
10.75	155

Примечание. Статический режим работы ЭОК. Масштаб на экране камеры 8 мкм/пиксель, погрешность измерения 1 пиксель или примерно ± 8 мкм

преобразователем (ЭОП) ПИФ-01 с отклоняющими пластинами развертки конденсаторного типа и усилителем яркости ЭПМ-81.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Временное и пространственное разрешения ЭОК определяются как основными характеристиками ЭОК (скоростью развертки, напряженностью у сетки и т.п.), так и степенью аппаратных искажений, вносимых как самой камерой, так и устройством регистрации, а также способом последующей обработки зарегистрированных изображений. Для описания искажений, присущих ЭОК, введем понятие аппаратной функции — как временной (ВАФ), так и пространственной (ПАФ). Величина ВАФ определяется как измеренная длительность очень короткого входного оптического импульса (δ -импульса), а ПАФ — как измеренная ширина изображения узкой (по сравнению с ожидаемой ПАФ) входной щели. Будем считать, что введенные величины являются предельными временным и пространственным разрешениями ЭОК.

В наших экспериментах были проведены измерения ВАФ и ПАФ стрик-камеры PS-1/S1 [4, 10] в статическом и динамическом режимах. В качестве источника излучения использовался лазер на титанате сапфира ($\lambda = 800$ нм, частота повторения 75 МГц, длительность импульса не более 100 фс). Ширина входной щели 10 мкм была выбрана с учетом ожидаемой ПАФ, величина которой для данной камеры порядка 100 мкм [10]. Для считывания и обработки изображений с выходного экрана ЭОК, размер которого составляет 25 мм, использовалась ПЗС-камера C8484-05G (Hamamatsu, Япония). Центральная часть (около 10 мм) выходного экрана камеры проецировалась на ПЗС-матрицу объективом с коэффициентом уменьшения 1.15.

В статическом режиме процесс определения пространственного разрешения, как правило, состоит в визуальном наблюдении на экране камеры изображения стандартных штриховых миш с прямоугольным профилем пропускания, например миш ГОИ. При этом за величину отсчета принимают тот участок миш, на изображениях которого наблюдатель еще может видеть отдельные штрихи во всех четырех направлениях. При таком определении величина пространственного разрешения является вырожденным случаем частотно-контрастной характеристики и отражает лишь единственную точку на ее кривой, соответствующую контрасту в изображении, который оценивается глазом наблюдателя (5–15%). Учет этого обстоятельства крайне важен при проведении количественных измерений, так как с использованием методов обработки изображений минимально обнаруживаемый контраст может отличаться от контраста, измеренного приведенным выше способом. В случае стрик-камеры процесс определения статического пространственного разрешения с помощью миш можно заменить простым измерением ширины входной щели. Тогда при облучении достаточно узкой “ δ -щели” можно непосредственно прямым измерением получить величину ПАФ.

При облучении входной щели камеры в статическом режиме ширина ее изображения измерялась как в горизонтальном, так и вертикальном направлении (по времени и пространству соответственно). При стандартных электрических напряжениях на электродах ЭОП ПИФ-01 (катод — $U_k = -12$ кВ, сетка — $U_c = -9$ кВ, фокус — $U_f = -10.6$ кВ, анод — $U_a = 0$) при электронно-оптическом увеличении 1.9 и максимальном коэффициенте преобразования усилителя яркости измеренная нами по полувысоте (FWHM) ширина изображения щели (величина ПАФ) составила примерно 80 мкм. При этом напряжение на фокусирующем электроде (-10.6 кВ) оказалось оптимальным, что согласуется и с расчетом (рис. 1). В табл. 1 приведены результаты измерений в горизонтальном (временном) направлении ширины зарегистрированного изображения щели в зависимости от напряжения на фокусирующем электроде. Измерения ширины щели в вертикальном направлении (поворот щели на 90°) дали практически такие же результаты.

Для анализа результатов, получаемых в эксперименте, с помощью программы MASIM [11] было осуществлено компьютерное моделирование процессов, происходящих в ЭОП, и проведен расчет временного, пространственного разрешений и электронно-оптического увеличения в режиме работы ЭОК, соответствующем условиям эксперимента. При расчетах использовались следующие характеристики фотокатода S1 для лазер-

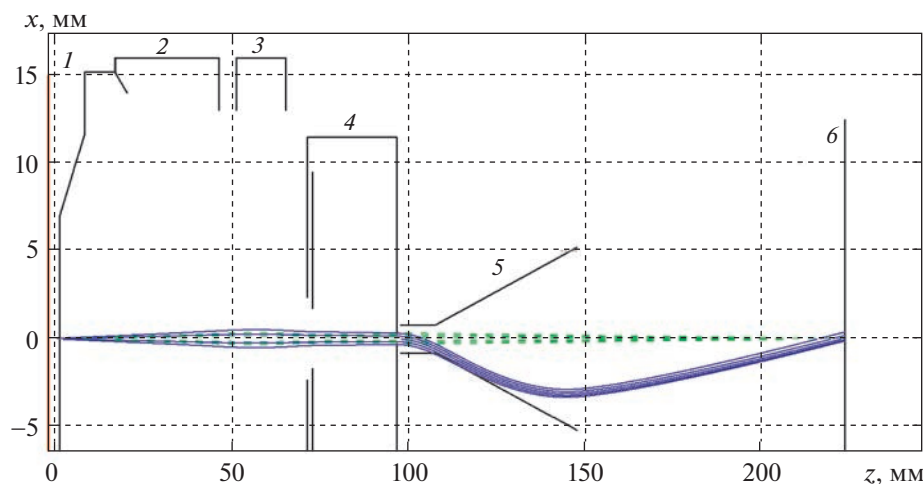


Рис. 1. Траектории электронов в статическом (зеленая прерывистая линия) и динамическом (синяя сплошная линия) режимах работы ЭОК при оптимальной фокусировке -10.6 кВ в статическом режиме. 1 – катод, 2 – ускоряющая сетка, 3 – фокусирующий электрод, 4 – анод, 5 – развертывающие пластины, 6 – экран.

ного излучения с длиной волны 800 нм: параболическое энергетическое распределение фотоэлектронов с наиболее вероятной энергией фотоэмиссии 0.5 эВ и ламбертовское угловое распределение.

На рис. 1 изображены расчетная схема ЭОП ПИФ-01 и вид траекторий электронов, сфокусированных в статическом и динамическом режимах. Наряду с величинами статических напряжений в преобразователе, указанными выше, были введены следующие расчетные данные: размер пятна засветки на катоде 10 мкм, электронно-оптическое увеличение 1.9 , длина пластин развертки 50 мм, скорость развертки $1.56 \cdot 10^{10}$ см/с (160 пс на экран 25 мм). Расчетные размеры пятен на экране: в статическом режиме – 73 мкм, в динамическом режиме – 244 мкм.

Согласно рис. 1, в динамическом режиме наблюдается значительная расфокусировка пучка и размер пятна на экране увеличивается с 10 до 244 мкм, что согласуется с данными эксперимента (табл. 2). Что касается статического режима, то размер пятна (73 мкм) практически совпадает с экспериментально полученной величиной ПАФ 80 мкм (см. табл. 1).

По аналогии с расчетом ВАФ [12], величина ПАФ может быть также найдена из соотношения свертки двух функций: функции, описывающей распределение падающей на фотокатод интенсивности излучения $I(x)$ по соответствующей оси, и ПАФ стрик-камеры:

$$B(x') = \int I(x)A(x, x')dx, \quad (1)$$

где $B(x')$ – интенсивность свечения экрана; x' – координата по пространственной оси; $A(x, x')$ – ПАФ камеры.

Как правило, решение такого уравнения является достаточно сложной задачей, которая может существенно упроститься, если заранее известны формы пространственного распределения интенсивности излучения и аппаратной функции. В случае синусоидального распределения интенсивности излучения и гауссовой формы аппаратной функции в результате решения уравнения (1) получаем простую формулу для вычисления FWHM ПАФ:

$$M = M_{\text{вх}} \exp[-\pi^2 d^2 / (4 \ln 2 \cdot D^2)]. \quad (2)$$

Здесь M – измеренный коэффициент модуляции (контраст) интенсивности свечения экрана, равный $[(I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}) / (I_{\text{макс}} + I_{\text{мин}})]$, где $I_{\text{макс}}$ и $I_{\text{мин}}$ –

Таблица 2. Зависимость величины ВАФ от скорости развертки при оптимальном и фиксированном (оптимальном для статического режима) напряжениях на фокусирующем электроде

Скорость развертки, см/с	$U_{\text{ф}}$, кВ (ВАФ, мкм)	ВАФ, мкм, при $U_{\text{ф}} = -10.6$ кВ
$2.5 \cdot 10^7$	-10.70 (80)	80
$8.3 \cdot 10^7$	-10.65 (80)	90
$2.5 \cdot 10^8$	-10.70 (82)	97
$8.3 \cdot 10^8$	-10.80 (82)	158
$1.66 \cdot 10^9$	-10.85 (82)	190
$3.33 \cdot 10^9$	-10.90 (100)	200
$1.56 \cdot 10^{10}$	-11.05 (140)	235 (см. рис. 1)

Примечание. Масштаб – 8 мкм/пиксель; погрешность измерения: ± 8 мкм для разверток от $2.5 \cdot 10^7$ до $1.66 \cdot 10^9$; ± 10 мкм – для $3.33 \cdot 10^9$; ± 15 мкм – для $1.56 \cdot 10^{10}$

максимальная и минимальная интенсивности в результирующем распределении; $M_{\text{вх}}$ — коэффициент модуляции интенсивности на входе камеры; d — FWHM ПАФ; D — измеренная частота модуляции.

Для определения ПАФ с помощью формулы (2) мы выполнили измерения контраста изображения штриховой миры с периодом 15 и 20 пар линий/мм и прямоугольным профилем модуляции. Мира, освещенная излучением лазера, устанавливалась на место щели во вращающуюся оправку, и ее изображение проецировалось входной оптикой камеры на фотокатод. В зарегистрированном на экране ЭОК изображении миры измерялся его контраст в горизонтальном и вертикальном направлениях.

При дальнейшем расчете d по формуле (2) учитывалось электронно-оптическое увеличение ЭОП, равное 1.9, и проводился пересчет контраста от миры с прямоугольным профилем к мире с синусоидальным профилем по формуле Колтмана [13]:

$$M_{\text{син}}(D) = (4/\pi)[M_{\text{пр}}(D) + M_{\text{пр}}(3D) + M_{\text{пр}}(5D) + \dots],$$

где $M_{\text{син}}(D)$ — контраст изображения синусоидальной миры с частотой D ; $M_{\text{пр}}(D)$ — контраст изображения прямоугольной миры с частотой D . Пренебрегая вкладом пространственных гармоник выше первой, получим, что наблюдаемый контраст синусоидальной миры должен быть увеличен в $4/\pi$ (1.27) раз. Таким образом, считая, что $M_{\text{вх}} = 1$, получаем

$$d = D[-\ln(1.27M)]^{1/2}. \quad (3)$$

В результате проведенных измерений и расчетов получены следующие значения ПАФ:

— горизонтальное направление (временная ось) — $d = 82$ мкм (15 пар линий/мм), $d = 77$ мкм (20 пар линий/мм);

— вертикальное направление (пространственная ось) — $d = 77$ мкм (15 пар линий/мм), $d = 70$ мкм (20 пар линий/мм).

Измерения проводились при напряжении на фокусирующем электроде -10.6 кВ, оптимальном для достижения максимальной фокусировки в статическом режиме. Таким образом, наши эксперименты показали обоснованность применения формулы (2) для определения ПАФ косвенным способом и возможность ее применения для расчетов динамического пространственного разрешения ЭОК.

При работе камеры в режиме линейной развертки определение пространственного разрешения вдоль временной оси (горизонтальное направление) фактически совпадает с определением временного разрешения. Что же касается вертикального (пространственного) направления, то в режиме линейной развертки вводится

понятие динамического пространственного разрешения, предельную величину которого можно считать динамической ПАФ. Для ее измерения нужно развернуть во времени отрезок горизонтальной “ δ -щели”.

В проведенном эксперименте входная щель ЭОК размером 10 мкм устанавливалась горизонтально. Выполненные измерения показали, что величина динамической ПАФ практически не зависит от скорости развертки и сохраняет свое статическое значение, примерно равное 80 мкм при $U_{\text{ф}} = -10.6$ кВ. Небольшая подфокусировка ($U_{\text{ф}} = -10.4$ кВ) требуется только при максимальной скорости развертки — $1.56 \cdot 10^{10}$ см/с (рис. 2а).

Для определения динамической ПАФ ЭОК косвенным способом с входной вертикальной щелью камеры совмещают горизонтальную штриховую миру с переменной частотой и, регистрируя таким образом развернутое изображение, строят график частотно-контрастной характеристики. Используя преобразование Фурье, можно восстановить вид динамической ПАФ, предполагая при этом, что аппаратная функция симметрична, а ее преобразование Фурье положительно.

В нашем случае для косвенного определения динамической ПАФ можно воспользоваться формулой (3), измерив контраст зарегистрированного изображения миры с известным периодом. Наилучшая четкость зарегистрированного изображения обеспечивается подбором оптимального напряжения на фокусирующем электроде. Результаты измерений, выполненных со штриховой мирой с периодом 15 пар линий/мм, и дальнейший расчет показали, что для всех скоростей разверток в диапазоне $2.5 \cdot 10^7$ – $1.56 \cdot 10^{10}$ см/с величина ПАФ практически постоянна и лежит в пределах 80 ± 10 мкм при изменении $U_{\text{ф}}$ от -10.65 до -10.55 кВ. Следует отметить, что для повышения точности измерений контраста ширина входной щели ЭОК была увеличена, так что ее размер на экране стал примерно равен 400 мкм (рис. 2б).

Таким образом, результаты прямых и косвенных измерений динамической ПАФ хорошо согласуются и подтверждают тот факт, что ее величина практически не зависит от скорости развертки и сохраняет статическое значение. Только при больших скоростях развертки, при условии сохранения высокого пространственного разрешения, необходима незначительная подфокусировка.

В табл. 2 приведены результаты измерений ВАФ с помощью лазерного δ -импульса при оптимальном и фиксированном (оптимальном для статического режима) напряжениях на фокусирующем электроде в зависимости от скорости развертки. Измеренное значение ВАФ или предельное временное разрешение ЭОК при максимальной скорости развертки и оптимальном фокусиру-

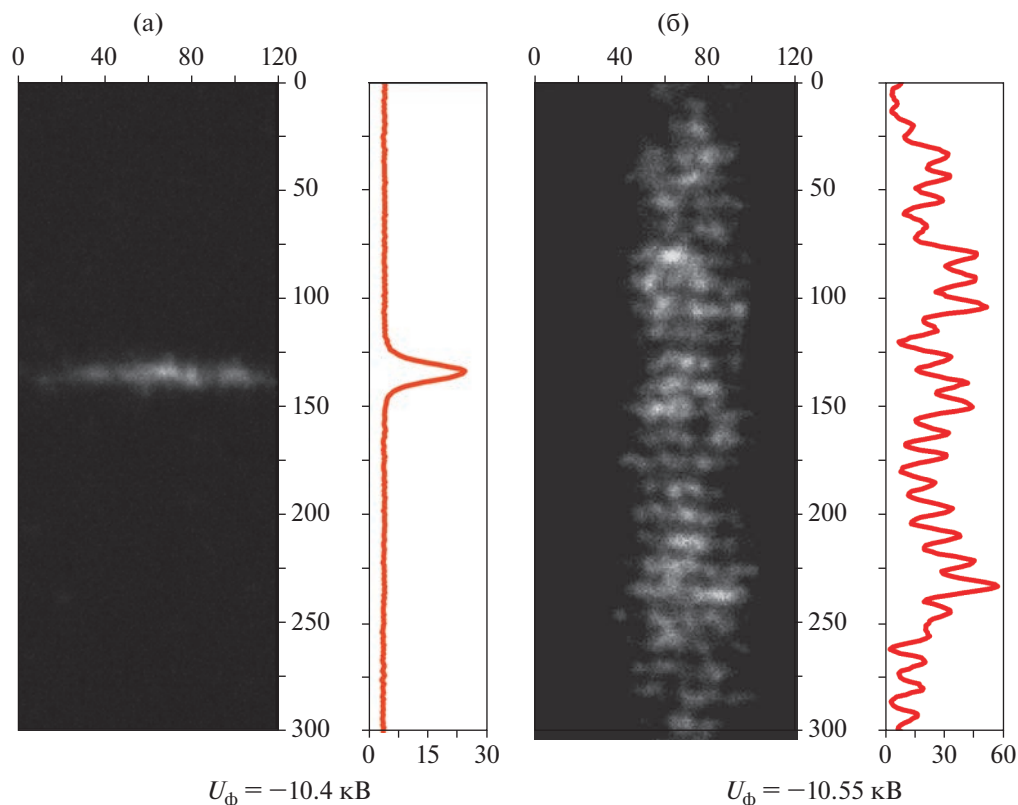


Рис. 2. Изображения входной щели размером 10 мкм (а) и штриховой миры с периодом 15 пар линий/мм (б); справа от изображений — их микрофотограммы на скорости развертки $1.56 \cdot 10^{10}$ см/с (160 пс/25-мм экран). Значения по осям даны в пикселях. Масштаб 8 мкм/пиксель.

шем напряжении оказалось в пределах 0.8–1.0 пс (масштаб на экране — 6.4 пс/мм). Следует отметить, что для полноты эксперимента по нахождению ВАФ было бы желательно, по аналогии с ПАФ, провести ее косвенные измерения с помощью синусоидально-модулированного лазерного излучения (временной миры). Однако, как показано в работе [14], в пикосекундном диапазоне нет существенных различий в результатах измерений ВАФ одиночным импульсом и синусоидально-модулированным излучением.

Различие в величине фокусирующего напряжения, необходимого для оптимальной фокусировки по пространственной и временной осям, объясняется нарушением электростатической сферической симметрии при работе в режиме разверток.

На рис. 3 представлен расчет траекторий электронов, проведенный на основании экспериментальных данных.

Изгиб траекторий электронов при прохождении пучка вдоль пластин осуществляется за счет изменения направления действия переменного электрического поля. В режиме парафазной развертки, реализованном в данной ЭОК, в первой половине области пластин силы поля действуют

вниз, во второй половине поле меняет направление и отклоняет пучок вверх. Сложный характер поверхностей острой фокусировки объясняется тем, что траектории, проходящие вблизи концов отклоняющих пластин при больших скоростях развертки, получают дополнительные искажения за счет краевых эффектов электрического поля.

Кроме того, в такой системе отклонения отсутствует согласование скорости распространения электромагнитной волны со скоростью движения электронного пучка вдоль пластин. При больших скоростях развертки скорость распространения электромагнитной волны в 3–6 раз выше скорости пучка. Из-за этого эффекта (так называемого пролетного эффекта) также происходит расфокусировка электронного пучка. Снизить возможность расфокусировки можно в отклоняющих системах другого типа, например, в отклоняюще-замедляющей системе типа бегущей волны [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что для достижения предельного временного разрешения пикосекундных ЭОК необходимо иметь возможность в достаточно широких пределах изменять

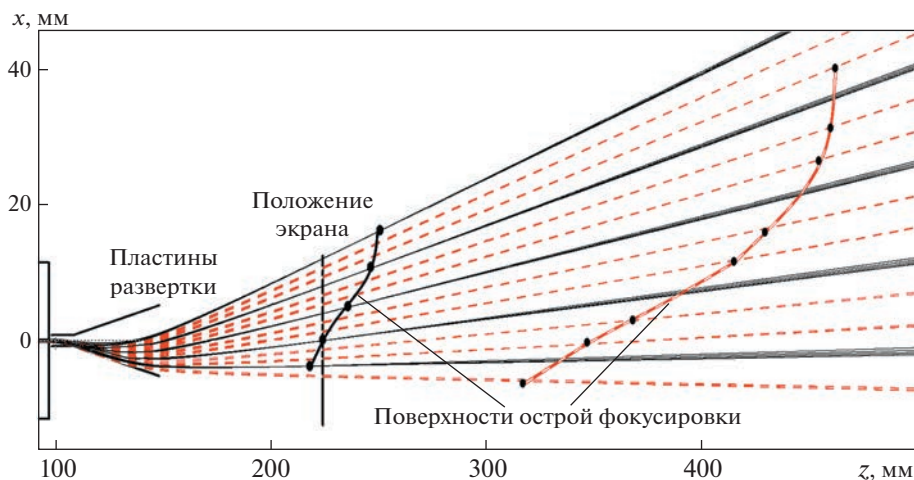


Рис. 3. Траектории электронов и поверхности острой фокусировки для скорости развертки $1.56 \cdot 10^{10}$ см/с (160 пс/25-мм экран) в режиме без подфокусировки (красные штриховые линии, $U_{\text{ф}} = -10.6$ кВ) и в режиме с подфокусировкой (серые сплошные линии, $U_{\text{ф}} = -11.1$ кВ). Временной интервал между импульсами (траекториями) 10 пс. Схематически показана часть ЭОП, расстояние между началом пластин и экраном ~ 120 мм, длина отклоняющих пластин — 50 мм.

величину напряжения на фокусирующем электроде ЭОП. Проведенный расчет показал, что при скоростях развертки порядка скорости света для отклоняющих пластин конденсаторного типа запас подфокусирующего напряжения примерно равен 1.5 кВ. Это нужно иметь в виду при разработке таких камер, с тем чтобы обеспечить доступный и надежный способ регулировки фокусирующего напряжения, оптимального для данной скорости развертки. Кроме того, различие оптимальных напряжений фокусировки по пространству и времени при работе на больших скоростях разверток должно быть учтено при регистрации двумерных изображений, с тем чтобы правильно расставить приоритеты в выборе необходимой информации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность К.А. Алабину и А.В. Смирнову за обсуждения и оказание помощи при подготовке статьи к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hamamatsu News. 2017. V. 02. P. 32.
2. Прохоров А.М., Воробьев Н.С., Лозовой В.И., Смирнов А.В., Щелев М.Я. // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 4. С. 283. <https://doi.org/10.1070/QE2002v032n04ABEN002183>
3. Лебедев В.Б., Машковцев А.Н., Фельдман Г.Г. // Электронно-оптическое приборостроение ВНИИОФИ за 40 лет. Сб. статей Оптико-электронные измерения. М.: Университетская книга, 2005. С. 430.
4. 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>
5. www.bifocompany.com.
6. Kinoshita K., Kato T., Suzuki Y. // Труды 14-го Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. М.: Изд-во АПН, 1980. С. 228.
7. Niu H., Sibbett W., Baggs M.R. // Rev. Sci. Instrum. 1982. V. 53. Iss. 5. P. 563.
8. Агеева Н.Н., Броневова И.Л., Забегаев Д.Н., Кривоносов А.Н. // ЖЭТФ. 2013. Т. 143. № 4. С. 634. <https://doi.org/10.7868/S0044451013040034>
9. Понарина М.В., Охримчук А.Г., Рыбин М.Г., Смаев М.П., Образцова Е.Д., Смирнов А.В., Жлуктова И.В., Камынин В.А., Долматов Т.В., Букин В.В., Образцов П.А. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 4. С. 365. <https://doi.org/10.1070/QEL16983>
10. Гаранин С.Г., Бельков С.А., Рогожников Г.С., Рукавишников Н.Н., Романов В.В., Воронич И.Н., Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Щелев М.Я. // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 8. С. 798. <https://doi.org/10.1070/QE2014v044n08ABEN015501>
11. Greenfield D.E., Monastyrskiy M.A., Tarasov V.A. // CPO-7 International Conference. UK, Cambridge, 2006. P. 23.
12. Воробьев Н.С. Дис. ...канд. физ.-мат. наук. М.: ФИАН, 1980. С. 20.
13. Шульман М.Я. Измерение передаточных характеристик оптических систем. Л.: Машиностроение, 1980. С. 64.
14. Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Комельков А.С., Лозовой В.И., Смирнов А.В., Шашков Е.В. // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 11. С. 1067. <https://doi.org/10.1070/QEL16800>
15. Зюзин Л.Н., Прянишников И.Г., Шувалов В.М. Патент RU 2228562 C2 МПК H01J31/50, 31/60 // Оpubл. 10.05.2004. Бюл. № 13.