

О методике измерений основных характеристик электронно-оптических камер

Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, А.С.Комельков, В.И.Лозовой, А.В.Смирнов, Е.В.Шашков

Описана процедура определения основных параметров электронно-оптических камер с линейной разверткой. Рассмотрены методики измерений предельного временного разрешения и динамического диапазона камеры PS-1/S1, выполненных с помощью фемтосекундного лазера и с использованием синусоидально-модулированного лазерного излучения.

Ключевые слова: электронно-оптическая камера, пикосекундное – фемтосекундное лазерное излучение, временное разрешение, динамический диапазон.

1. Введение

Электронно-оптические камеры (ЭОК) с линейной разверткой (стрик-камеры) находят широкое применение в лазерной физике, при диагностике лазерной плазмы, в области физики полупроводников, в ускорительной технике и в других областях экспериментальной физики [1–4], поскольку позволяют реализовать прямые временные измерения изучаемых процессов. Точность таких количественных измерений обусловлена конкретными значениями технических характеристик ЭОК, определяемых при проведении динамических испытаний, целью которых является настройка камеры и подготовка ее к эксплуатации. К числу наиболее важных технических характеристик ЭОК относятся, в первую очередь, временное разрешение и динамический диапазон регистрации. Установление конкретных значений этих параметров должно сопровождаться указанием условий, при которых проводились измерения, а именно характеристик источника излучения, режима работы камеры, способа регистрации выходного изображения с экрана ЭОК и др.

Важный вопрос, связанный с применением ЭОК, заключается в возможности практической реализации тех основных параметров камеры, которые указаны в паспорте. Задача авторов настоящей работы состоит в том, чтобы вооружить пользователей практически удобной методикой, позволяющей самостоятельно измерять эти параметры, а также в максимальной степени использовать технические характеристики камеры при проведении экспериментов.

В работе приведено описание методики определения вышеупомянутых технических характеристик ЭОК на примере стрик-камеры PS-1/S1, снабженной электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) типа ПИФ-01. Камера PS-1/S1 была разработана и в настоящее время изготавливается в Отделе фотоэлектроники ИОФ РАН. При-

ведены результаты измерений предельного временного разрешения и динамического диапазона (ДД) регистрации этой камеры.

2. Временное разрешение и аппаратная функция

В общем случае временное разрешение характеризует способность прибора разделять события, следующие друг за другом через определенные промежутки времени. Для стрик-камеры под временным разрешением будем понимать ее способность различать два события, соответствующие двум близким последовательным моментам времени. На практике временное разрешение стрик-камеры определяется степенью аппаратных искажений, вносимых как самой камерой, так и устройством регистрации, а также способом последующей обработки зарегистрированных изображений. Для описания искажений, присущих ЭОК, вводится понятие временной аппаратной функции (ВАФ), которая определяется как реакция камеры на входной оптический импульс бесконечно малой длительности (δ -импульс) и является универсальной характеристикой прибора. Модуль преобразования Фурье ВАФ (частотно-контрастная характеристика), вычисленный при конкретном значении контраста, задает временное разрешение прибора.

Для практического измерения временного разрешения ЭОК в соответствии с указанным выше определением часто пользуются методом двух δ -импульсов. На входную щель камеры подаются два δ -импульса сравнимой интенсивности. Их можно получить, например, при отражении одиночного импульса от двух поверхностей стеклянной пластины. При уменьшении временной задержки между импульсами коэффициент модуляции, характеризующий глубину провала в зарегистрированном распределении интенсивности, будет также уменьшаться.

Описание временных характеристик ЭОПов и стрик-камер с помощью ВАФ было впервые предложено в 1969 г. [5]. Однако практические трудности прямого измерения аппаратной функции в то время и отсутствие общепринятого критерия для оценки связи ВАФ с временным разрешением, привели к тому, что при определении временного разрешения ЭОПа и электронно-оптической камеры

Н.С.Воробьев, П.Б.Горностаев, А.С.Комельков, В.И.Лозовой, А.В.Смирнов, Е.В.Шашков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vor@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 8 августа 2018 г.

разные авторы вкладывали в это понятие собственный смысл. Поэтому при сопоставлении приборов, имеющих сравнимое временное разрешение, необходимо было учитывать то, как это временное разрешение определялось и, в частности то, какое минимальное значение коэффициента модуляции можно считать правомерным для его оценки.

По мере быстрого развития лазерной техники, а также с появлением фемтосекундных лазеров и методов компрессии лазерных импульсов прямое измерение временного разрешения и ВАФ современных стрик-камер, имеющих, как правило, предельное разрешение порядка 1 пс, оказалось несложным. Однако проблема однозначного определения временного разрешения осталась, т.к. не был установлен единый критерий оценки временной разрешающей способности ЭОК. В наших работах [6,7] было предложено в качестве такого критерия использовать полуширину (FWHM) ВАФ, что представляется удобным при сравнении временных параметров различных камер и преобразователей.

В качестве примера, показывающего количественную связь между ВАФ и временным разрешением (два δ -импульса), приведем следующие численные оценки. Для этого представим коэффициент модуляции, определяющий глубину провала между импульсами, в виде

$$M = [(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})] \times 100\%,$$

где I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная интенсивности в результирующем распределении. Для дальнейших оценок, основанных на проведенных экспериментах, за минимальную временную задержку между импульсами примем задержку Δt , при которой $M = 20\%$. В качестве ВАФ рассмотрим несколько временных функций $A(t)$ с одной и той же полушириной τ , но имеющих различную форму.

Так, в случае гауссовой формы ВАФ

$$A(t) = \exp[-4 \ln 2 (t^2 / \tau^2)], \Delta t = 1.25\tau.$$

Для треугольной формы ВАФ

$$A(t) = \begin{cases} 1 - |t|/\tau & \text{при } |t| \leq \tau, \\ 0 & \text{при } |t| > \tau, \end{cases} \Delta t = 1.33\tau.$$

В случае дисперсионной формы ВАФ

$$A(t) = 1/(t^2 + \tau^2/4), \Delta t = 1.28\tau.$$

При $M = 15\%$ для гауссовой формы аппаратной функции Δt равно 1.19τ , для треугольной – 1.26τ и для дисперсионной – 1.16τ , а при $M = 10\%$ величина $\Delta t = 1.11\tau$, 1.18τ и 1.02τ соответственно.

Видно, что временное разрешение Δt изменяется в зависимости от принятого значения коэффициента модуляции M и формы ВАФ, что приводит к некоторой неопределенности в оценке истинного временного разрешения прибора. Что же касается ВАФ, то ее полуширина τ определяется точно и близка к величине Δt , измеренной классическим методом двух δ -импульсов при коэффициенте $M = 10\% - 20\%$.

Еще один способ определения ВАФ ЭОК основан на использовании синусоидально-модулированного лазерного излучения (СМЛИ), временной профиль модуляции которого заранее известен. Замечательное свойство такого излучения состоит в следующем: если временное рас-

пределение интенсивности входного сигнала, анализируемого линейным временным детектором, имеет синусоидальный профиль с заданной частотой, то на выходе записанное распределение будет иметь профиль той же формы с той же частотой, но, вообще говоря, другие амплитуду и фазу.

Следует упомянуть, что при использовании тестирующего излучения, интенсивность которого описывается функцией $I(t)$ с известной формой и длительностью (или модуляцией), сравнимой с полушириной ВАФ ЭОК, истинный вид ВАФ может быть определен из соотношения свертки

$$B(x) = \int I(t)A(t, x) dt, \quad (1)$$

где $B(x)$ – интенсивность свечения экрана ЭОК; x – координата вдоль направления развертки; $A(t, x)$ – ВАФ камеры в режиме линейной развертки. Однако, как правило, решение такого уравнения является достаточно сложной задачей, которая может существенно упроститься, если заранее известны временные формы входного импульса и аппаратной функции.

Для полного определения ВАФ в случае ее измерения с помощью входного тестирующего импульса с известной длительностью t_0 необходимо также знать и длительность зарегистрированного изображения этого импульса $t_{\text{рег}}$. Так, для гауссовой формы и входного импульса, и ВАФ полуширина аппаратной функции τ может быть вычислена с помощью полученного из (1) соотношения $t_{\text{рег}}^2 = t_0^2 + \tau^2$.

При определении ВАФ с помощью СМЛИ для гауссовой формы аппаратной функции ЭОК в результате решения уравнения (1) получаем простую формулу для вычисления полуширины τ :

$$M = M_{\text{in}} \exp[-\pi^2 \tau^2 / (4 \ln 2 \cdot T_{\text{mod}}^2)], \quad (2)$$

где M_{in} – коэффициент модуляции излучения на входе камеры; T_{mod} – период модуляции.

Результаты экспериментов [6, 7] по определению временного разрешения ЭОК двумя способами практически совпадают, поэтому выбор метода зависит только от конкретных условий эксперимента.

Необходимо отметить, что определенные выше аппаратная функция и временное разрешение зависят от интенсивности входного сигнала. Однако в предположении, что измерения проводятся в условиях работы ЭОК на линейном участке ДД регистрации, когда выходной сигнал еще пропорционален входному, значения этих параметров не зависят от входной интенсивности.

Способность ЭОК регистрировать временные процессы с предельным временным разрешением в значительной степени определяется ее аппаратной функцией. Поэтому в качестве критерия, характеризующего способность камеры различать близкие по времени события, предлагается использовать полуширину ВАФ τ и считать ее предельным временным разрешением соответствующей ЭОК.

3. Динамический диапазон регистрации

Другой важнейшей характеристикой ЭОК является передаточная характеристика, линейный участок которой определяет ДД регистрации камеры. Помимо зависи-

мости от ВАФ, отличие измеренной длительности входного импульса от выходного обусловлено также разбросом начальных скоростей фотоэлектронов и влиянием кулоновского взаимодействия, возникающего в ЭОПе на пути следования пучка электронов от фотокатода до люминесцентного экрана. Численные расчеты показывают [8], что в ЭОПе с осевой симметрией, которым является преобразователь ПИФ-01, кроме кулоновского расплывания, испытываемого электронным пучком вблизи фотокатода, происходит дополнительное расплывание из-за наличия точки кроссовера, где сечение пучка минимально. В зависимости от степени кулоновского взаимодействия длительность импульса может измеряться на линейном или на нелинейном участке передаточной характеристики. На нелинейном участке происходит заметное временное уширение измеряемого импульса при увеличении интенсивности входного излучения.

Исходя из этого в [9] было дано ставшее общепринятым определение ДД регистрации для стрик-камер при его измерении с помощью импульса известной длительности. Согласно этому определению ДД есть отношение I'_{\max}/I'_{\min} , где I'_{\min} – минимальная интенсивность импульса входного излучения, при которой на фоне шумов может быть достоверно измерена его длительность; I'_{\max} – интенсивность импульса входного излучения, при которой измеренная длительность становится на 20% больше исходной. Очевидно, что система регистрации изображений с экрана ЭОК должна иметь ДД больше, чем у исследуемой камеры.

Определение ДД стрик-камер проводится на каждой развертке с использованием либо лазерного δ -импульса, либо импульса большей, но известной длительности, соответствующей временному масштабу данной развертки. В первом случае измеряется ВАФ камеры, изображение которой на экране ЭОК имеет длительность и размер (в направлении, перпендикулярном развертке) единичного разрешаемого элемента, объединяющего в себе и временное, и динамическое пространственное разрешение стрик-камеры. Например, для ЭОК PS-1/S1, работающей в режиме самой быстрой развертки и на линейном участке ДД, типичные значения временного и пространственного параметров разрешаемого элемента составляют ~ 1 пс и ~ 100 мкм соответственно. В этих условиях верхняя граница линейного участка ДД будет определяться временным (пространственным) уширением на 20% единичного разрешаемого элемента.

Однако если длительность входного лазерного импульса превышает величину ВАФ, то развернутое изображение можно рассматривать как состоящее из нескольких разрешаемых элементов. Увеличение входной интенсивности приводит к росту числа фотоэлектронов внутри каждого разрешаемого элемента. Когда интенсивность импульса входного излучения достигнет максимального значения I'_{\max} для единичного разрешаемого элемента (в режиме δ -импульса), каждый разрешаемый элемент испытает 20%-ное уширение, но только пара внешних элементов даст вклад в общее уширение записанного импульса. Для реальной длительности входного импульса это уширение составит менее 20%, что позволяет дальше увеличивать интенсивность входного излучения до ее верхней границы I'_{\max} , при которой осуществится 20%-ное увеличение измеряемой длительности входного импульса [10].

Один из экспериментальных способов определения ДД состоит в том, что на входную щель ЭОК подается

последовательность импульсов, полученная при многократном отражении исходного лазерного импульса внутри, например, эталона Фабри–Перо. При известном коэффициенте отражения зеркал эталона образуется последовательность уменьшающихся по интенсивности импульсов излучения с заданным и фиксированным коэффициентом затухания. Подсчитав число зарегистрированных на экране камеры импульсов с интенсивностями от максимальной до минимальной, найденными по приведенному выше критерию 20%-ного уширения, можно определить ДД по формуле $I'_{\max}/I'_{\min} = 1/(R_1 R_2)^{n-1}$, где R_1 и R_2 – коэффициенты отражения зеркал эталона; n – число импульсов. При правильном выборе интенсивности входного излучения можно зарегистрировать последовательность импульсов за одну лазерную вспышку, что является очевидным преимуществом данного способа.

Другой способ определения ДД – использование калиброванных нейтральных фильтров, установленных перед входной щелью ЭОК. В этом случае время измерений увеличивается, т. к. для регистрации n импульсов излучения с интенсивностями в диапазоне $I'_{\min} - I'_{\max}$ требуется как минимум n лазерных вспышек. Их число возрастет, если для повышения точности измерений соответствующих интенсивностей понадобится проводить их усреднение по числу лазерных вспышек.

Отметим, что ДД может быть измерен с помощью СМЛИ. На линейном участке диапазона увеличение интенсивности излучения с заранее известным периодом модуляции не должно приводить к изменению глубины модуляции. При переходе на нелинейный участок глубина модуляции уменьшается с ростом интенсивности. И в этом случае можно ввести количественный критерий (I'_{\max}/I'_{\min}) для определения ДД с использованием СМЛИ, если принять за I'_{\min} минимальную интенсивность входного излучения со 100%-ной глубиной модуляции и известным периодом, когда на фоне шумов эти параметры могут быть достоверно измерены. Что же касается I'_{\max} , то для этой интенсивности требуется установить минимальную глубину модуляции, которую будем считать предельной. Очевидно, что, как и в случае измерения ДД с помощью импульса, величина ДД при использовании СМЛИ будет зависеть от периода модуляции.

4. Процедура измерения

Экспериментальные измерения основных характеристик ЭОК PS-1/S1 (рис.1) с преобразователем ПИФ-01 проводились с использованием коммерческого Ti-сапфирового лазера (Tsunami, Spectra-Physics, США), который излучал на длине волны $\lambda = 800$ нм последовательность импульсов длительностью ~ 30 фс с частотой следования ~ 75 МГц [11]. В камере размещались входная оптическая система, состоящая из двух объективов «Гелиос-44» и отображающая входную щель на фотокатод, и считывающее устройство C8484-05G (Hamamatsu, Япония) или ANIMAPX-25 (Optronis, Германия). В первом случае выходной экран камеры с помощью объектива проецируется на ПЗС-матрицу с выбранным для конкретных условий эксперимента коэффициентом увеличения изображения. Во втором случае считывающее устройство находится в оптическом контакте с выходным экраном камеры (рис.1). С использованием электрооптической ячейки Поккельса при необходимости можно было выделить одиночный импульс с энергией в несколько наноджоу-



Рис.1. Общий вид камеры PS-1/S1.

лей. Часть лазерного излучения отводилась на делитель частоты, состоящий из фотодиода и электронного блока, формирующего импульс синхронизации. Этот импульс подавался на генератор задержек, который управлял запуском ЭОК, считывающей системы и ячейки Поккельса.

Для определения ВАФ ЭОК необходимо, как было сказано выше, чтобы длительность тестирующего лазерного импульса была много меньше предполагаемого предельного временного разрешения камеры. В нашем случае это условие выполняется: длительность импульса 30 фс и разрешение 1 пс. Однако при распространении лазерного импульса через отображающую входную оптику происходит его временное уширение, приводящее к возрастанию длительности импульса до величины, сравнимой с ВАФ или даже превышающей ее.

Как известно, длительность спектрально ограниченного лазерного импульса, прошедшего через оптическую среду, может быть вычислена по формуле

$$t_{\text{out}} = t_{\text{in}} [1 + 7.68(D_{\omega} L / t_{\text{in}}^2)^2]^{1/2}, \quad (3)$$

где t_{in} и t_{out} – длительности входного и выходного лазерных импульсов; D_{ω} (в фс²/см) – материальная дисперсия элементов среды для данной длины волны лазерного излучения; L (в см) – длина соответствующего оптического элемента.

Экспериментальное измерение длительности импульса лазерного излучения с $t_{\text{in}} = 30$ фс на $\lambda = 800$ нм, выполненное с помощью автокоррелятора, дало длительность выходного импульса, прошедшего через два объектива «Гелиос-44», примерно 800 фс, что совпадает с рассчитанной по формуле (3). С учетом других стеклянных оптических элементов (светоделительные зеркала, нейтральные фильтры и т. п.), находящихся на пути прохождения излучения от лазера до катода ЭОК, можно ожидать уширения импульса до величины, превышающей 1 пс. В связи с этим для измерения ВАФ ЭОК была использована входная оптическая система, включающая в себя всего одну тонкую цилиндрическую линзу, формирующую щелевое изображение лазерного пучка на фотокатоде камеры. Все описанные особенности должны быть учтены и при определении ДД.

Следует подчеркнуть, что при измерениях предельного временного разрешения и динамического диапазона ЭОК PS-1/S1 использовалась центральная часть (10–

15 мм) выходного экрана камеры диаметром 25 мм, на которой еще нет сильных искажений изображения из-за имеющихся аберраций электронно-оптической системы ЭОПа.

Перед измерениями ВАФ необходимо провести калибровку скорости развертки камеры. В нашем случае она осуществляется измерением временного сдвига между двумя импульсами, образующимися либо при отражении лазерного импульса от двух поверхностей стеклянной подложки, либо при пространственном делении лазерного пучка, одна часть которого проходит через стеклянную пластинку, а другая распространяется по воздуху. В обоих случаях временная задержка между двумя импульсами определяется толщиной стекла и его сортом. В результате на считывающем устройстве отображается пространственно-временной масштаб в пс/пиксель (размер элемента ПЗС-матрицы).

Начиная с 2009 г. на лазерной установке Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН было протестировано более двадцати ЭОК PS-1/S1, отличающихся друг от друга незначительными изменениями как в конструкции ЭОПов ПИФ-01, так и в электрических схемах управления. По

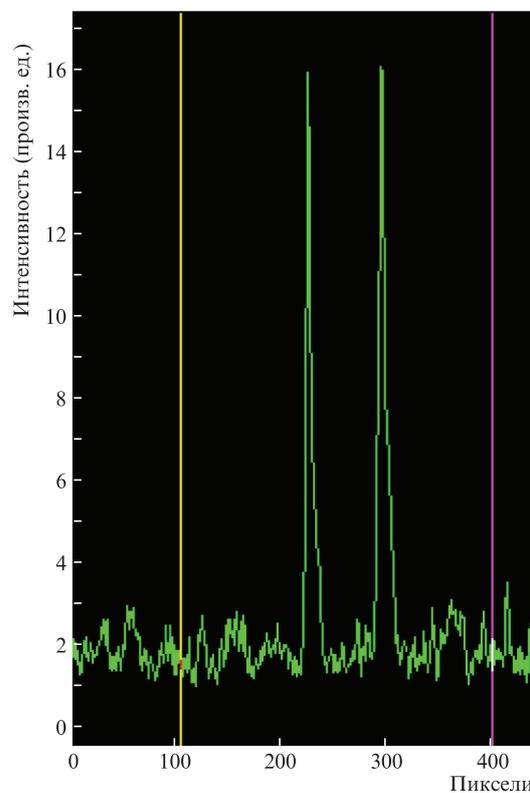
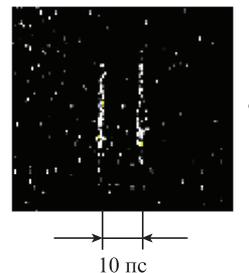


Рис.2. Фотография (а) двух лазерных импульсов, полученных путем отражения одиночного импульса от стеклянной подложки толщиной 1 мм, и их микрофотограмма (б). Скорость развертки 1.5×10^{10} см/с, масштаб 0.13 пс/пиксель.

итогах этих динамических испытаний можно определить усредненный временной диапазон ВАФ, составивший 1–2 пс. Наилучшее временное разрешение, полученное для нескольких камер, оказалось равным 0.8 ± 0.1 пс. На рис.2 представлена фотография двух импульсов с полуширинами менее 0.8 пс, записанных на экране камеры, и их микрофотограмма. Импульсы получены путем отражения одиночного импульса от стеклянной подложки толщиной 1 мм. В этом эксперименте скорость развертки была равна $\sim 1.5 \times 10^{10}$ см/с (170 пс на диаметре экрана 25 мм) при ДД около 8.

Использование СМЛИ для динамических испытаний ЭОК обусловлено не только возможностью реализации еще одного способа определения ВАФ, но и возможностью сравнить реакции камеры на одиночный δ -импульс и на достаточно длительное излучение, но с тонкой временной структурой. В работе [6] впервые были осуществлены количественные измерения временных характеристик ЭОК двумя этими способами (с помощью СМЛИ и одиночного импульса) в пикосекундном диапазоне. Для дальнейшего продолжения такого рода экспериментов необходимо было в первую очередь создать достаточно стабильные источники СМЛИ.

Одним из возможных способов получения СМЛИ в оптическом диапазоне является использование двухчастотного лазера, генерирующего две аксиальные моды (режим биений мод) [12]. При плавном изменении спектрального интервала между этими модами появляется возможность получать выходное излучение с различными временными профилями модуляции, т.е. с различными периодами биений. При этом период биений будет обратно пропорционален частотному промежутку между модами. Если лазер работает в импульсном режиме, то обе моды излучаются одновременно.

Другой подход к решению задачи генерации СМЛИ основан на использовании частотной модуляции несущей частоты лазерного импульса [13]. Исходное излучение Ti-сапфирового лазера, представляющее собой регулярную непрерывную последовательность фемтосекундных импульсов, пропускается через волоконный или решетчатый расширитель (стретчер). По мере прохождения через стретчер импульсы испытывают временное уширение, величина которого зависит от свойств волоконного световода или от дисперсии дифракционной решетки, и приобретают близкую к линейной частотную модуляцию (чирпированные импульсы). Преобразованное таким образом излучение направляется в интерферометр Майкельсона, где разделяется на два пучка равной интенсивности. Заранее установленная разность длин плеч интерферометра определяет время задержки между пучками на выходе и таким образом задает период модуляции. Изменяя эту разность, можно получать СМЛИ с различными периодами модуляции.

Оба способа генерации СМЛИ были использованы для измерения ВАФ стрик-камеры «Imacon-500» [12, 13]. В этих работах было показано, что в пикосекундном диапазоне нет существенных различий в результатах тестирования ЭОК одиночным импульсом или СМЛИ.

В последующих экспериментах тестирование камеры PS-1/S1 проходило на лазерной установке, состоящей из осциллятора Tsunami и регенеративного усилителя TSA, которая работает на основе метода усиления чирпированных импульсов. После усиления одиночный импульс с практически линейной частотной модуляцией поступал в

интерферометр Майкельсона, на выходе которого была установлена стрик-камера, регистрировавшая суммарное излучение. На рис.3 представлены фотографии профилей интенсивности СМЛИ с различными периодами модуляции. Полуширина ВАФ для этой ЭОК, измеренная прямым методом, а также рассчитанная по формуле (2), оказалась равной 1.3 пс при скорости развертки 1.25×10^{10} см/с.

Измерения ДД регистрации камер PS-1/S1 с помощью δ -импульса при максимальных скоростях развертки показали, что его величина не превышает 10. Как было отмечено выше, величина диапазона зависит от длительности тестирующего импульса. В нашей работе [10] при длительности лазерного импульса 22 пс величина ДД составила ~ 22 , что вдвое больше диапазона, полученного при тестировании лазерным импульсом длительностью 30 фс. Таким образом, ДД, измеренный с помощью импульса, длительность которого превышает величину ВАФ тестируемой камеры, оказывается больше полученного с помощью δ -импульса. Это обстоятельство необходимо учитывать при паспортизации ЭОК, указывая в специфика-

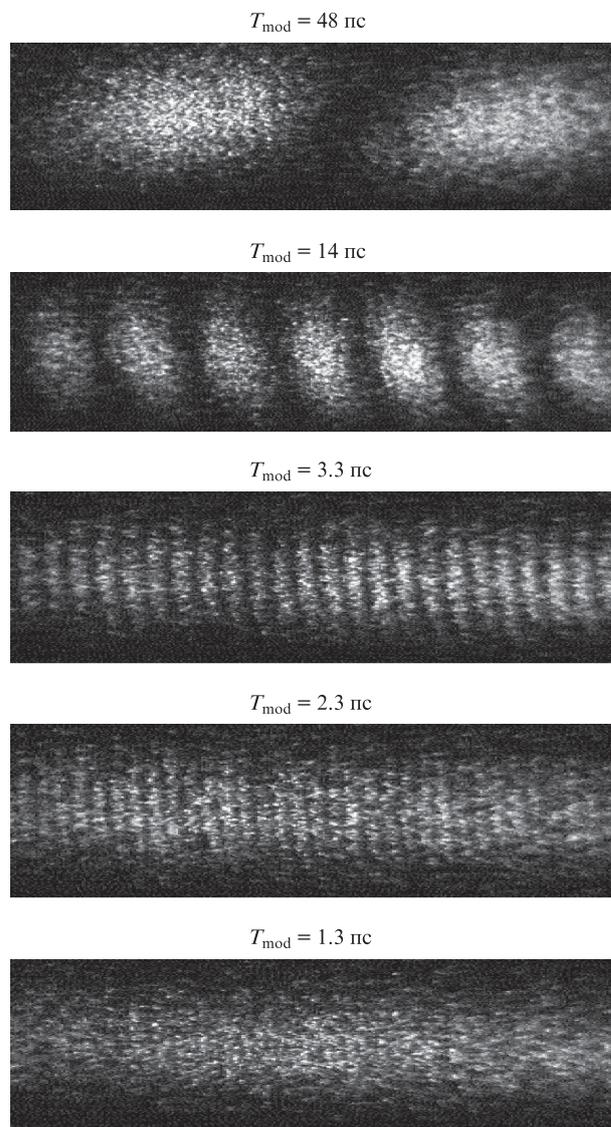


Рис.3. Фотографии профилей интенсивности СМЛИ с различными периодами модуляции T_{mod} . Скорость развертки 1.25×10^{10} см/с. Отобрана центральная часть (~ 10 мм) выходного экрана ЭОК.

ции длительность импульса, при которой были проведены измерения ДД.

Для увеличения ДД ЭОК необходимо минимизировать величину расплывания электронного пучка внутри ЭОПа, возникающего из-за кулоновского взаимодействия электронов вблизи фотокатода и в точке кроссовера. Это можно сделать, уменьшая интенсивность входного излучения, но интенсивность изображения на считывающем устройстве должна остаться прежней, удовлетворяющей условиям достоверного измерения полуширины зарегистрированного импульса. Для этого нужно уменьшить потери полезного сигнала, возникающие на пути от выходного экрана камеры до ПЗС-матрицы.

На нашей установке для динамических испытаний ЭОК (см. рис.1) перенос изображения с экрана камеры на ПЗС-матрицу осуществляется объективом, что приводит к световым потерям. Мы провели эксперименты в двух конфигурациях: ЭОК PS-1/S1 и система С8484-05G с объективом, передающим изображение с экрана с уменьшением, равным 2, и ЭОК со считывающей ПЗС-системой ANIMARX-25, которая находилась в оптическом контакте с выходным экраном камеры через волоконно-оптический фокон с коэффициентом отображения 25 мм/12.5 мм. Размер пикселя обеих матриц составляет 6.45 мкм. Полученные результаты показали, что в первом случае ДД, измеренный с помощью лазерного импульса длительностью 30 фс, оказался равным ~10, а во втором случае при тех же условиях – 25.

5. Заключение

В настоящей работе описана методика измерений основных характеристик ЭОК PS-1/S1, а именно предельного временного разрешения и ДД регистрации. С по-

мощью изложенной выше процедуры пользователь может самостоятельно провести измерения этих параметров при наличии соответствующего лазерного оборудования. Выбор данной стрик-камеры вполне обоснован, т.к. ею оснащены лаборатории многих научных центров России, таких как ФИАН, ИРЭ РАН, ИЯФ СО РАН и др.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН В.С.Батеневу и М.А.Монастырскому за помощь при подготовке данной статьи к публикации.

1. Schelev M.Ya., Monastyrskiy M.A., Vorobiev N.S., Garnov S.V., Greenfield D.E. *Aspects of Streak Image Tube Photography* (Amsterdam: Elsevier Publ., 2013, Vol. 180).
2. Воробьев Н.С., Горностаев П.Б., Лозовой В.И., Смирнов А.В., Щелев М.Я., Шашков Е.В. *ИТЭ*, №4, 72 (2016).
3. *Электронно-оптические камеры*; <http://bifocompany.com/rus>.
4. Баграмов В.Г., Даниелян Г.Л., Насибов А.С., Подвизников В.А., Тасмагулов И.Д., Чевочкин В.К. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, №4, 19 (2018).
5. Korobkin V.V., Malyutin A.A., Schelev M.Ya. *J. Photogr. Sci.*, **17**, 179 (1969).
6. Воробьев Н.С., Дегтярёва В.П., Коробкин В.В., Щелев М.Я. *Препринт ФИАН №145* (М., 1980).
7. Щелев М.Я. *Труды ФИАН*, **155**, 3 (1985).
8. Щелев М.Я., Андреев С.В., Гринфельд Д.Э., Дегтярева В.П., Копаев И.А., Монастырский М.А. *Квантовая электроника*, **45** (5), 455 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (5), 455 (2015)].
9. Thomas S.W. *Proc. 13th ICHSIP* (Tokyo, 1980, Vol. 189, p. 838).
10. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N., Vorob'ev N.S., Gornostaev P.B., Lozovoi V.I., Schelev M.Ya. *Proc. ICHSIP-29* (Pretoria, 2010, A02-1-8).
11. <http://www.spectra-physics.com/products/ultrafast-lasers/tsunami?subcat=oscillators>.
12. Воробьев Н.С., Коноплев О. А. *Квантовая электроника*, **18** (5), 576 (1991) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **21** (5), 522 (1991)].
13. Vorobiev N.S., Serafimovitch O.A., Smirnov A.V. *Opt. Commun.*, **96**, 235 (1993).