

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ХРОНОГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЕЙ ПЕРЕНОСА

Соколов Артём Юрьевич (AYuSokolov@vniia.ru), Коновалов Павел Игоревич, Каменев Владимир Геннадьевич

ФГУП «ВНИИА», Москва

В работе представлен краткий обзор интерферометрических методов, которые построены по оптическим схемам Фабри – Перо и ORVIS и используют электронно-оптические регистраторы (ЭОР) в качестве приемного устройства. Описано, как качество изображения ЭОР влияет на ключевые параметры методов. Показано, что основными параметрами ЭОР, влияющими на эффективность методик диагностики, являются динамический диапазон и предельное пространственное разрешение. При этом данные параметры ограничиваются аналогичными характеристиками хронографического электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Раскрыты факторы, которые влияют на параметры ЭОП. Описаны конструкции хронографических ЭОП производства ФГУП «ВНИИА» и технологии их изготовления методом переноса. Показано, что данная технология улучшает практически все характеристики ЭОП. Показано, что применение таких ЭОП позволит повысить эффективность интерференционных методов за счет улучшения их временного разрешения и разрешения по скорости, а также увеличения эффективного времени регистрации.

Ключевые слова: ORVIS, метод Фабри – Перо, хронографический ЭОП, щелевой ЭОР.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF INTERFERENCE RECORDING METHODS BY USING STREAK TUBES MANUFACTURED BY TRANSFER TECHNOLOGY

Sokolov Artem Yurievich (AYuSokolov@vniia.ru), Konovalov Pavel Igorevich, Kamenev Vladimir Gennadievich

FSUE «VNIIA», Moscow

The paper presents a brief overview of interferometric methods, which are based on Fabry-Perot and ORVIS optical arrangements and use streak cameras as a receiving device. It also describes how the quality of the streak camera image affects the key parameters of the techniques mentioned. It is shown that the main parameters of cameras affecting the effectiveness of diagnostic techniques are the dynamic range and the limiting spatial resolution. At the same time, these parameters are limited to similar characteristics of the streak tube. The factors influencing parameters of the streak tube are discussed as well. This work provides the overview of designs of streak tubes manufactured by VNIIA and their manufacturing technology that uses the transfer method. And it is proved that this technology improves almost all characteristics of the streak tube. Application of such streak tubes, as underlined by the author, increases the efficiency of interference methods by improving their time and speed resolution, as well as increasing the effective registration time.

Keywords: ORVIS, Fabry-Perot method, streak tube, streak camera.

Введение

Поведение конструкционных материалов в условиях экстремальных динамических нагрузок на сегодняшний день остается недостаточно изучен-

ным. Исследование процессов разрушения материалов под действием ударных волн представляют большой интерес для прикладных задач. Эти исследования имеют значение для разработки и эксплуатации многих современных конструкций. Развитие новых

технологий с применением взрыва, импульсных лазеров, корпускулярных пучков и других импульсных источников энергии также тесно связано с результатами экспериментов с ударно-волновым нагружением материалов. Наконец, такие эксперименты значительно расширяют возможности фундаментальных исследований в области физики прочности.

Для изучения данных явлений необходимо повышение характеристик измерительной аппаратуры и разработка новых высокоточных методов регистрации газодинамических процессов. На сегодняшний день для диагностики данных явлений наиболее точными и информативными являются оптические методы. Одной из ключевых задач, решаемых ими, является исследование скорости движения поверхности, разрушающейся под действием ударной волны материала.

Одним из наиболее перспективных и активно применяемых ядерными центрами для решения такой задачи является метод, использующий многоканальные интерферометры Фабри – Перо. В данных системах различные точки поверхности подсвечиваются через волоконные коллиматоры узкополосным лазерным излучением, которое затем снова собирается коллиматорами и подается на интерферометр Фабри – Перо. Интерференционная картина через щель проецируется на входное окно стрик-камеры (электронно-оптического регистратора), смещение полос при доплеровском сдвиге регистрируется с помощью щелевой развертки. Таким образом, регистрируется временная динамика скорости свободной поверхности в заданной точке.

Повышения точности регистрации с помощью метода Фабри – Перо можно добиться путём увеличения характеристик применяемой в нем стрик-камеры, параметры которой в свою очередь зависят от хронографического электронно-оптического преобразователя, являющегося сердцем стрик-камеры.

Лазерно-интерферометрические методы исследования скорости движения поверхности

На сегодняшний момент существует пять основных бесконтактных интерферометрических методов исследования скорости движения поверхности: VISAR (velocity interferometer for surface of any reflection), ORVIS (optically recording velocity interferometer system), PDV (Photonic Doppler Velocimetry), интерферометрический метод на основе многолучевого интерферометра Фабри – Перо, голографический метод.

Независимо от индивидуальных особенностей каждого метода, все они имеют общую структуру, представленную на рис. 1.

Поверхность освещается излучением зондирующего лазера. Отраженное излучение собирается оптической системой узла объекта и попадает на оптико-регистрающую систему, где происходит регистрация доплеровского сдвига излучения лазера в ходе исследуемого процесса. Система управления

и регистрации управляет режимом работы лазера, осуществляет его пуск (в случае использования импульсного лазера), выполняет синхронизацию момента регистрации с началом исследуемого процесса, отвечает за получение и сохранение зарегистрированной информации для дальнейшей обработки.

Остановимся на двух методах, в которых скорость определяется на основе анализа интерферограмм, зарегистрированных на щелевой ЭОП (Фабри – Перо и ORVIS).

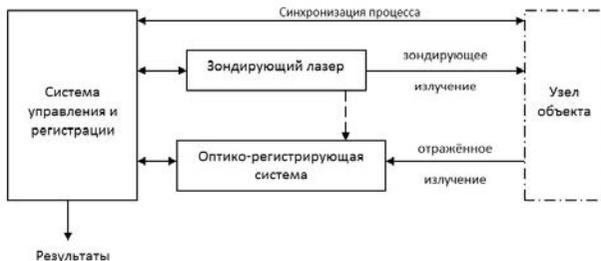


Рис. 1. Общая структура лазерно-интерферометрических методов

В методе на основе многолучевого интерферометра Фабри – Перо доплеровский сдвиг длины волны определяется по величине смещения интерференционных колец равного наклона в фокальной плоскости линзы, расположенной после интерферометра. Схема интерферометра этого типа приведена на рис. 2. Отраженное излучение лазера падает на эталон Фабри – Перо. В излучении неизбежно присутствует некоторая угловая расходимость, т. е. некоторые лучи образуют с осью некоторый малый угол φ в диапазоне от нуля до угла расходимости. В результате многократных отражений от полупрозрачных поверхностей образуется совокупность параллельных световых пучков. Разность хода между соседними пучками может быть вычислена из геометрических соображений. Для эталона с воздушным промежуток она равна

$$\Delta \sim 2 \cdot t \cdot n \cdot \cos\varphi, \quad (1)$$

где t – расстояние между зеркалами, n – показатель преломления материала эталона.

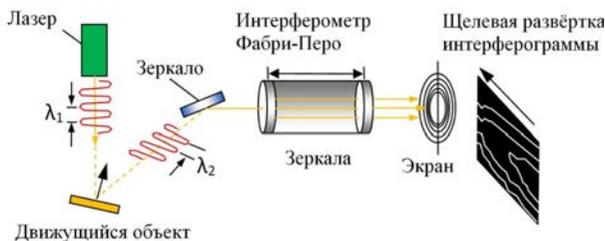


Рис. 2. Принцип метода Фабри – Перо

Условие образования интерференционного максимума имеет вид:

$$2 \cdot t \cdot n \cdot \cos\varphi = k \cdot \lambda, \quad (2)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ – номер порядка интерференции, λ – длина волны излучения.

За счет того, что в эталоне коэффициент отражения делается близким к единице, интенсивность каждого последующего пучка мало отличается от интенсивности предыдущего. В результате этого эффективное число интерферирующих пучков оказывается большим. После эталона установлена собирающая линза, которая образует в своей фокальной плоскости систему интерференционных колец. Угловые размеры колец зависят от расстояния между зеркалами интерферометра, которое называется базой.

При движении отражающей поверхности происходит доплеровский сдвиг длины волны отраженного света, что приводит в движение систему полос. При этом смещению интерференционной картины на одну полосу соответствует значение изменения скорости на величину V_f

$$V_f = \frac{c\lambda}{4h}, \quad (3)$$

где c – скорость света, h – база интерферометра.

Регистрация изменения положения интерференционных колец осуществляется с помощью ЭОР. Щелью ЭОР вырезается сечение интерференционных колец и регистрируется его изменение во времени. В результате получается динамическая интерферограмма.

После регистрации происходит градуировка изображения: определяется величина изменения скорости $V_{гр}$, соответствующей одному пикселю интерферограммы, равная

$$V_{гр} = \frac{V_f}{M}, \quad (4)$$

где M – расстояние между линиями в пикселях.

Последующая обработка интерферограммы заключается в измерении значения смещения интерференционной линии в пикселях $N(t)$ для каждого момента времени, что позволяет получить зависимость скорости движения поверхности от времени процесса $V(t)$

$$V(t) = N(t) V_{гр}. \quad (5)$$

Следует отметить, что выражение 5 является приближенным и для первых порядков интерференции отражает лишь характер зависимости.

Метод ORVIS [1] использует двухлучевую интерференцию. Исследуемое излучение собирается линзой в квазипараллельный пучок и направляется в интерферометр, где расщепляется полупрозрачным зеркалом на два луча равной интенсивности, которые направляются в плечи интерферометра с разными оптическими длинами. После отражения от зеркал оба луча возвращаются на светоделитель, на котором складываются и интерферируют. Разность оптических путей света создает между ними временную задержку Δt . Если длина волны исследуемого излучения изменяется, то интерференция происходит между различными длинами волн, что приводит к изменению интерференционной картины. Смещение полос пропорционально изменению скорости и

временному сдвигу лучей в линии задержки. Этот процесс регистрируется ЭОР. Характерная интерферограмма указана на рис. 3.

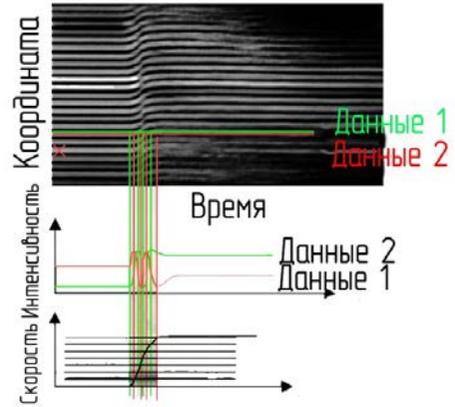


Рис. 3. Интерферограмма, получаемая методом ORVIS [2]

Влияние качества изображения ЭОР на эффективность лазерно-интерферометрических методов

ЭОР, являясь одним из основных элементов оптической схемы лазерно-интерферометрических методов, влияет на их основные характеристики, такие как: длительность исследуемого процесса, диапазон измеряемых скоростей, разрешение по времени и скорости, погрешность метода. Зачастую улучшение данных характеристик за счет других элементов схемы либо невозможно, либо слишком затратно.

По сути, качество интерферограммы определяется качеством изображения на экране усилителя яркости ЭОР, которое в первом приближении характеризуется такими параметрами прибора как количество разрешаемых элементов (вдоль развертки и вдоль щели) и динамический диапазон регистрации. Рассмотрим подробнее влияние каждого из этих параметров на характеристики интерферометрических методов.

Временное разрешение метода Δt связано с количеством разрешаемых элементов на экране в направлении развертки N_t и длительностью исследуемого процесса T следующим выражением:

$$\Delta t = \frac{T}{N_t}. \quad (6)$$

Количество разрешаемых элементов по пространственной оси ЭОР N_{sp} (вдоль длины щели) связывает диапазон измеряемых скоростей Δv_{max} и значение скорости $V_{гр}$, соответствующей одному пикселю, следующим образом:

$$V_{гр} = \frac{\Delta v_{max}}{N_{sp}}. \quad (7)$$

Строго говоря, разрешение метода по скорости определяется как среднее значение наименьшей по-

грешности градуировки поля по скорости по всем интерферограммам $V_{гр}$ (см. формулу 6), которое лишь в идеальном случае стремится к $V_{гр}$ – в случае линейности развертки ЭОР и отсутствии дисторсий его изображения, а также при отсутствии каких либо искажений оптической схемы в целом.

Динамический диапазон (ДД) ЭОР определяется как отношение максимальной и минимально различимой амплитуд лазерных импульсов вдоль развертки, размноженных из одиночного лазерного импульса в интерферометре Фабри – Перо при условии, что их длительности в середине диапазона и по краям различаются не более чем на 20 %. При этом амплитуда импульса, принимаемого за нижнюю границу диапазона, должна превышать уровень флуктуации собственного шума не менее чем в 5 раз [3]. Применительно к интерферометрическим методам, ДД ЭОР D ограничивает способность оптической схемы регистрировать $V(t)$ поверхности при изменении ее коэффициента отражения зондирующего лазерного излучения η . В случае взрывных экспериментов часто возможна ситуация, когда в начальный момент времени коэффициент отражения практически равен единице $\eta_{max}(t_0) \rightarrow 1$, а затем начинает резко уменьшаться. Тогда в определенный момент времени t_1 интенсивности отраженного света станет недостаточно для того, чтобы различить интерференционные линии на изображении ЭОР (например, см. правую часть интерферограммы на рис. 3). При этом ДД ЭОР будет пропорционален отношению:

$$D \sim \frac{\eta_{max}(t_0)}{\eta_{min}(t_1)}, \quad (8)$$

и, следовательно, ДД будет определять эффективное время регистрации

$$t_{эф} = t_1 - t_0. \quad (9)$$

Таким образом, увеличение таких параметров ЭОР как количество разрешаемых элементов и динамический диапазон регистрации, приведет к повышению эффективности интерференционных методов регистрации, построенных по схемам Фабри – Перо и ORVIS.

Метод ORVIS имеет преимущество во временном разрешении по сравнению с методом Фабри – Перо, поскольку в нём используется интерференция на короткой базе (время прохода порядка 0,1 нс), в то время как во втором методе время многократного прохода резонатора определяет временное разрешение и составляет около 10 нс.

Принцип работы ЭОР и факторы, ограничивающие его характеристики

На рис. 4 показан принцип работы ЭОР и хронографического ЭОП в его составе. Исследуемое световое излучение проходит сквозь входное щелевое отверстие ЭОР и с помощью оптической системы преобразуется в световой «штрих» на фотокатод хронографического ЭОП. На рис. 4 показано как четыре световых импульса, отличающиеся по своему расположению в пространстве, проходят щель регистратора в различное время и фокусируются на фотокатод. При этом они имеют различную световую интенсивность.

Падающий свет за счет фотоэлектронной эмиссии преобразовывается в электроны, число которых пропорционально его интенсивности, поэтому четыре световых импульса последовательно преобразуются в соответствующее электронное изображение. Эмитируемые фотокатодом электроны проходят электронно-оптическую систему ЭОП, где ускоряются, фокусируются и, пролетев отклоняющую систему, облучают катодoluminesцентный экран.

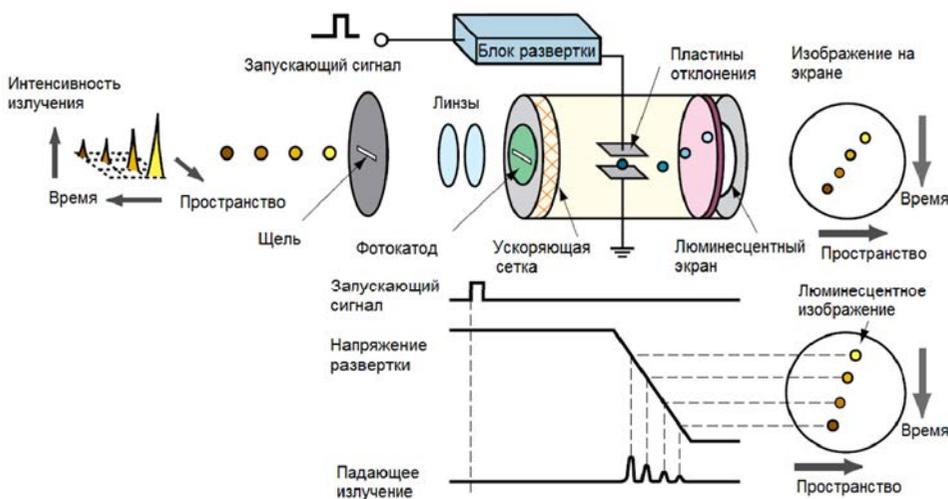


Рис. 4. Принцип работы хронографических ЭОП в составе регистраторов [4]

Когда электроны проходят между парой отклоняющих пластин развертки, на эти пластины подается пилообразное высокое напряжение, синхронизированное по времени с поступающим излучением. За счет этого происходит высокоскоростная развертка электронного изображения (на рис. 4 электроны разворачиваются сверху вниз). В ходе развертки электроны, которые поступают в зону развертки в разное время, отклоняются под разным углом в вертикальном направлении и попадают в катодлюминесцентный экран, где снова преобразуются в световое излучение.

На экране люминесцентное изображение, соответствующее первому поступившему световому импульсу, располагается в верхней позиции, а другие изображения образуются последовательно в направлении сверху вниз. Иными словами, вертикальная ось экрана служит осью времени. К тому же, яркость разных люминесцентных изображений пропорциональна интенсивности соответствующих поступающих оптических импульсов. Положение люминесцентного изображения на горизонтальной оси соответствует местоположению падающего светового импульса в пространстве (вдоль щели ЭОР).

Таким образом, изображение на экране хронографического ЭОП содержит в себе информацию об изменении со временем интенсивности исследуемого излучения с учетом одной пространственной координаты. Яркость свечения экрана в каждой его точке характеризует интенсивность света, а координата этой точки соответствует определенному времени процесса и положению света вдоль щелевого отверстия ЭОР.

Информационная емкость хронограммы, полученной с помощью ЭОР, определяется ее динамическим диапазоном и пространственным разрешением, которые ограничены аналогичными параметрами хронографического ЭОП.

Верхняя граница динамического диапазона хронографического ЭОП определяется максимальным фототоком, который может сниматься с фотокатода без искажения изображения на экране [5]. Теоретически, максимальный ток, протекающий в фотоэлектронном приборе (ФЭП), ограничен создаваемым им же пространственным зарядом и описывается законом Чайлда–Ленгмюра. Поэтому применительно к хронографическим ЭОП максимальное значение фототока прямо пропорционально напряженности электрического поля, которое создается ЭОС прибора. На практике ЭОП с полупрозрачным фотокатодом редко работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом, так как намного раньше проявляется искажение изображения на экране ЭОП, обусловленное нарушением траекторий электронов вследствие их расталкивания пространственным зарядом в кроссовере или вследствие нарушения эквипотенциальности электрического поля на поверхности фотокатода. Чем выше сопротивление фотокатода, тем меньше максимальный фототок, который можно снять с него без нарушения эквипотенциальности.

Нижняя граница динамического диапазона хронографического ЭОП зависит от соотношения сиг-

нал/шум хронографического ЭОП. Отношение сигнал/шум определяется коэффициентом преобразования ЭОП и его темновым фоном. Коэффициент преобразования зависит от чувствительности фотокатода ЭОП, проходимости его ЭОС и светоотдачи экрана. Уровень темного фона, в свою очередь, зависит от количества паразитных источников электронов в вакуумном объеме ЭОП: свободного цезия, паразитных фотокатодов на электродах катодной камеры, автоэмиссионных точек и т. п. [6].

Хронографические ЭОП нового поколения и регистратор на их основе

Традиционная штенгельная технология изготовления ФЭП включает в себя откачку и активировку фотокатода через штенгель на откачном посту. При формировании в объем прибора вводят пары щелочных металлов (цезия, калия, натрия), которые оказывают необратимое воздействие на характеристики приборов в результате адсорбции на изоляторах и электродах, а также взаимодействия с активными элементами: микроканальной пластиной и люминесцентным экраном ЭОП, полупроводниковым элементом гибридного фотоэлектронного умножителя.

НПЦ ИТ ФГУП «ВНИИА» завершил формирование новой технологической платформы производства электровакуумных приборов, которая позволила изготовить ЭОП с улучшенными ключевыми параметрами. В основе платформы лежит технология финишной обработки прибора методом переноса, которая пришла на смену устаревшей штенгельной технологии. Данная технология заключается в создании в отдельном вакуумном объеме фотокатода с последующим его переносом на корпус прибора и его герметизацией. Использование способа переноса позволило существенно повысить чувствительность фотокатода, а также снизить темновой фон приборов за счет отсутствия паразитных фотокатодов на электродах катодной камеры ЭОП и снижения уровня остаточных паров щелочных металлов в объеме прибора.

Исключение прямого контакта щелочных металлов с внутренними деталями ЭОП в процессе формирования фотокатода вместе с внедрением металлокерамического корпуса позволило резко повысить электрическую прочность изоляторов. Как следствие, ЭОП нового поколения работают при режимах с повышенной напряженностью электрического поля и позволяют получать значения предельного временного разрешения до 0,7 пс. При переходе на металлокерамическое исполнение корпуса повысились точность и повторяемость его размеров; при использовании специальной оснастки стала возможной прецизионная сборка ЭОП.

Благодаря введению ряда специальных технологических подготовок подложки под фотокатод было снижено его эффективное сопротивление и в разы увеличена чувствительность.

Внедрение комплекса перечисленных выше технологических улучшений позволило на основе предыдущих разработок [7, 8] создать новое поколение ЭОП (см. рис. 5), отличающееся улучшенными параметрами.



Рис. 5. Хронографические ЭОП: а – ТПО29, б – ТПО30-01, [6]

Прецизионная сборка и повышение напряженности поля позволили увеличить разрешение ЭОП с 15 до 30 штр/мм. Увеличение напряженности поля, снижение темнового фона, уменьшение сопротивления фотокатода [9] и повышение его чувствительности привели к увеличению динамического диапазона ЭОП более чем на порядок: с 1300 до 10000 (методика измерения изложена в [3]). ЭОП нового поколения

имеют меньшие массогабаритные характеристики и превосходят своих предшественников практически по всем параметрам, в том числе по временному разрешению и долговечности. На основе одного из таких ЭОП (ТПО30-01) ФГУП ВНИИА производит щелевой ЭОР ТХОР1.

В табл. 1 представлено сравнение основных параметров ЭОП ТПО30-01 с его аналогами.

В табл. 2 представлено сравнение основных параметров ЭОР ТХОР1, построенного на основе ЭОП ТПО30-01 с существующими на рынке регистраторами.

Временное разрешение ТХОР1 измерено на развертке 500 пс при подаче на вход излучения фемтосекундного лазера с длиной волны 820 нм.

Значение пространственного разрешения Ortronis SC-10 рассчитывалось для 5 % контраста, исходя из того, что полная ширина на полувысоте размытия точки на экране ЭОР равняется 100 мкм [11]. Такой расчет может давать завышенные результаты.

Таблица 1

Сравнение основных параметров ТПО30-01 с аналогами

Наименование параметра	Ед. изм.	Значения параметров			
		ТПО30-01 ФГУП «ВНИИА» Россия	N5716-02 Namamtsu, Япония	P 920 PMI Philips Photonics, Франция	ТПО27 ФГУП «ВНИИА» Россия
Диапазон спектральной чувствительности	нм	от 400 до 900	от 360 до 1600	от 360 до 1100	от 400 до 900
Пространственное разрешение, приведенное к фотокатоду	штр/мм	35	25	25	15
Электронно-оптическое увеличение	отн. ед.	1,6	–	1,5	1 ^{+0,3}
Высота фотокатода	мм	10	10	15	12
Размер экрана	мм	18×18	диаметр 18	диаметр 18	15×18
ДД при регистрации длительности процесса 500 пс и более, не менее	отн. ед.	8000	–	–	200
Расчетное предельное временное разрешения	пс	0,7	2	2	20
Материал корпуса	–	металло-керамика	металло-стекло	металло-стекло	металло-стекло

Таблица 2

Сравнение основных параметров ТХОР1 с аналогами

Модель ЭОР (ЭОП в его составе), производитель, страна	Временное разрешение, пс	Динамический диапазон регистрации, отн. ед.	Пространственное разрешение, п.л./мм	Электронно-оптическое увеличение, отн. ед.	Размер рабочего поля, мм
ТХОР1 (ТПО30-01), ВНИИА, Россия	1,25	1500	35	1,6	16×18
ТЭОР1 (ТПО27), ВНИИА, Россия	20	200	15	1,3	15×18
Ortronis SC-10, Германия [11]	2	н/д	35	2	15×20
К008, БИФО, Россия [10]	50	200	10	1	20×17

Выводы

Как было сказано выше, увеличение таких параметров ЭОР как: количество разрешаемых элементов вдоль пространственной N_{sp} , и временной N_t оси; динамический диапазон регистрации, приведет к повышению эффективности интерференционных методов регистрации, построенных по схемам Фабри – Перо и ORVIS. При этом данные параметры ограничиваются аналогичными параметрами хронографического ЭОП.

Параметр N_t ЭОР оценим по формуле:

$$N_t = \frac{N_{фк}L}{G}, \quad (10)$$

где $N_{фк}$ – пространственное разрешение хронографического ЭОП, приведенное к фотокатоду; L – длина развертки времяанализирующей щели ЭОП по люминесцентному экрану; G – электронно-оптическое увеличение ЭОП.

Количество разрешаемых элементов N_{sp} ЭОР оценим по формуле:

$$N_{sp} = \frac{N_{фк}H}{G}, \quad (11)$$

где H – высота фотокатода хронографического ЭОП.

В табл. 3 приведены результаты оценки данных параметров.

Таблица 3

Результаты оценки параметров ЭОР

Модель ЭОР (ЭОП в его составе) производитель, страна	ТХОР1 (ТПО30-01), ВНИИА, Россия	ТЭОР1 (ТПО27), ВНИИА, Россия	Optronis SC-10, Германия	К008, БИФО, Россия
N_t , шт.	390	210	350	170
N_{sp} , шт.	350	170	260	200

Основываясь на рассуждениях в разделе 1, а также согласно формулам 6 и 7 можно сказать, что значение предельного разрешения интерференционных методов регистрации по времени и по скорости обратно пропорционально увеличению N_t и N_{sp} ЭОР соответственно.

Поэтому, согласно нашим оценкам, по сравнению с отечественными ЭОР, использующими металлокерамические ЭОП, в случае применения ТХОР1 на базе ЭОП, изготовленного методом переноса можно достигнуть следующих улучшений методов:

- 1) временное разрешение не менее чем в 1,9 раза;
- 2) разрешение по скорости не менее чем в 1,3 раза.

В связи с тем, что ДД ТХОР1 увеличен более чем в 7 раз по сравнению с предыдущим поколением регистраторов, стало возможно измерять скорость

движения поверхности при большем ухудшении ее коэффициента отражения, и, таким образом, расширить эффективное время регистрации интерференционных методов.

Более того, применение хронографического ЭОП ТПО30-01 позволило создать щелевой ЭОР, превосходящий по своим параметрам иностранные аналоги.

Список литературы

1. Bloomquist D. D. and Sheffield S. A. Optically recording interferometer for velocity measurements with sub nanosecond resolution // J. Appl. Phys. 1983. N 54 P. 1717.
2. Line Imaging VISAR / ORVIS from the Sandia DMP perspective [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. – США, 2014 – Электрон. дан. URL: <https://www.osti.gov/biblio/1706550-line-imaging-visar-orvis-from-sandia-dmp-perspective/> (дата обращения 27.09.2021).
3. Корниенко Д. С., Кравченко А. Г., Литвин Д. Н. и др. Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза // ПТЭ. 2014. № 2. С. 78–89.
4. Guide to streak cameras: systems division Cat. No. SHSS0006E01 APR/2008 (2008.2) IP/ Hamamatsu Photonics K. K. // printed in Japan. P.12.
5. Lerche R. A., et al; Comparison of Streak Tube Performance // Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory November 17. 2004. P.15.
6. Sokolov A. Yu., Kononov P. I., Nurtdinov R. I., Vikulin M. P., Pryanishnikov I. G., Dolotov A. S., Krapiva P. S., Streak Tubes for Diagnostics of Lasers and Plasmas // Journal of Physics: Conference Series 747 (2016) 012067 doi:10.1088/1742-6596/747/1/012067
7. Пат. 2374719, РФ, МПК-8 H01 J31/50/ Катодный узел времяанализирующего электронно-оптического преобразователя изображения / Бадьин Л. В. и др. Бюллетень изобретений. 2009. № 33.
8. Пат. 2378734, РФ, МПК-8 H01 J31/50/ Времяанализирующий электронно-оптический преобразователь изображения / Бадьин Л. В. и др.; заявитель и патентообладатель Москва ФГУП «НИИТ» – № 2008135532/28; заявл.01.09.08; опубл. 10.01.09 // Бюллетень изобретений. 2009. № 1.
9. Пат. 185547, РФ, МПК H01J 40/0/ Фотокатод для импульсных фотоэлектронных приборов / Соколов А. Ю., Долотов А. С., Коновалов П. И., Прянисников И. Г., Рогатовская А. М. // Бюллетень изобретений. 2018. № 35.
10. Электронно-оптическая камера К008 [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. Электрон. дан. URL: <https://bifocompany.com/rus/p-cam-k008.php.htm> (дата обращения 27.09.2021).
11. OptoScope SC-10 Systems [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. Электрон.дан. URL: <https://optronis.com/en/products/optoscope-sc-10-systeme/> (дата обращения 27.09.2021).