

ХРОНОГРАФИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТЕЙ

© 2012 г. Е.А. ПОПОВ, М.А. КАРПОВ, П.А. ЛУЧНИКОВ,
А.В. ПАНКОВ, А.Ю. ЦУНИКОВ

Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики

Среди различных методов измерения скоростей движущихся поверхностей до сих пор наиболее распространенным является метод, построенный на эффекте доплеровского сдвига частоты отраженного излучения от движущейся поверхности, построенный на различных методиках (PDV, ORVIS, Фабри-Перо). Метод с использованием стрик-камер по-прежнему пользуется наибольшей популярностью, поскольку позволяет использовать несколько десятков независимых каналов на фотокатоде электронно-оптического преобразователя (ЭОП), и получать хронограммы процесса с высоким временным разрешением непосредственно на экране ЭОП в отличие от осциллографических методов, когда для каждого фотодиода или ФЭУ необходимо использовать отдельный осциллографический канал с широкой полосой пропускания. В ходе работы произведен расчет и математическое моделирование малогабаритного хронографического ЭОП с пикосекундным временным разрешением для лазерного доплеровского измерителя скоростей.

Характерной особенностью времяанализирующих ЭОП пикосекундного диапазона являются высокие скорости разверток фотоэлектронного изображения. При высокой энергии электронного пучка требуемая чувствительность отклоняющих систем обеспечивалась, помимо прочего, за счет достаточно большого расстояния между отклоняющей системой и экраном. Таким образом, противоречия, вытекающие из условий обеспечения малой дисперсии времен пролета фотоэлектронов и необходимой чувствительности отклоняющих систем, решались за счет известного компромисса, результатом которого были высокие питающие напряжения и большие габаритные размеры преобразователей.

При разработке времяанализирующего электронно-оптического преобразователя в качестве одного из главных критериев ставилась задача создания миниатюрного прибора, реализующего требуемые технические характеристики при напряжениях питания не более 5 кВ. Время пролета электрона от фотокатода до плоскости отклонения в общем случае описывается выражением:

$$T = \xi \int_0^{z_d} [\Phi(z) + u_0]^{-1/2} dz, \text{ где: } \xi = (2e/m)^{-1/2},$$

где e и m – заряд и масса электрона; z_d – координата плоскости отклонения; $\Phi(z)$ – распределение потенциала по траектории движения электрона; u_0 – удовлетворяет условию $e u_0 = 0,5 m V_{0z}^2$, где V_{0z} – нормальная составляющая начальной скорости фотоэлектрона.

Очевидно, что разности времен пролета электронов с нулевым и ненулевым начальными импульсами ($m V_{0z} = 0$ и $m V_{0z} \neq 0$) до плоскости отклонения в первом приближении и определяют временные aberrации ЭОП электронно-оптической системы (ЭОС).

Уменьшению временных aberrаций способствует уменьшение абсолютных величин времен пролета электронов, что может достигаться за счет: введения специального прикатодного ускоряющего электрода; повышения потенциала анода или сокращения длины пролетного пространства. При разработке ЭОП был выбран третий путь. Оценка по приведенной формуле показывает, что разброс времен пролета электронов порядка 10...20 пс для многощелочного фотокатода можно обеспечить при напряжении питания 5 кВ в ЭОС с расстоянием фотокатод-анод около 20 мм даже без специального ускоряющего электрода если плоскость отклонения будет находиться на расстоянии ~ 40 мм от фотокатода.

В качестве одной из задач предполагалось обеспечить в ЭОП большое рабочее поле фотокатода 25 мм при электронно-оптическом увеличении изображения $\Gamma_{eo} \approx 1,0$, поэтому, принимая во внимание небольшое расстояние между фотокатодом и анодом, для уменьшения сферических aberrаций был выбран фотокатод имеющий форму сферического сегмента.

Определение конфигурации электродов ЭОП системы при заданном электронно-оптическом увеличении, а также расчет разности времен пролета фотоэлектронов осуществлялись путем математического моделирования с помощью специализированного программного пакета (софта), предназначенного для прецизионных расчетов траекторий заряженных частиц в электростатических полях. Софт позволяет, используя результаты траекторного анализа, рассчитывать не только электронно-оптическое увеличение и дисторсию, но и получать семейства частотно-контрастных характеристик, и на их основе корректно определять форму поверхности изображения и распределение пространственного разрешения фотоэлектронного изображения по экрану. Несмотря на то, что при решении полевой задачи используется кусочно-постоянная аппроксимация распределения плотности зарядов, реализованные в программном пакете алгоритм оптимизирующей динамической реконфигурации разбиения поверхностей электродов на микроэлементы и оригинальный рекуррентный алгоритм по координатного разложения траектории в ряд по параметру процесса обеспечивают расчеты траекторий с относительной погрешностью $10^{-6} \dots 10^{-7}$ и выше.

Поскольку проектирование ЭОС представляет задачу, обратную траекторному анализу, использовался подход, именуемый «псевдосинтезом». Проводился ряд математических экспериментов при варьировании геометрии и потенциалов электродов начальной модели, из которых определялись значения электронно-оптических параметров анализируемых систем и аппроксимационные коэффициенты вариационных функций этих параметров. Отбирался вариант системы с параметрами, наиболее близкими к требуемым. Этот вариант становился исходной моделью для последующего цикла.

В окончательно выбранной конфигурации электродов ЭОС расчет параметров в параксиальной области показал, что при фокусировке на расстоянии 63 мм от фотокатода на оси реализуются масштаб переноса изображения $\mu = 0,96$ и дисторсия $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$. Здесь под масштабом переноса изображения и дисторсией подразумеваются коэффициенты при первых членах разложения в степенной ряд радиальной координаты электрона $R(z)$ как функции радиальной координаты точки его вылета из фотокатода $R(0)$:

$$R(z) = \mu(z) R(0) + \delta(z) R(0)^3 + \dots + \alpha_n(z) R(0)^n \dots$$

Электронно-оптическое увеличение системы, и дисторсия вне параксиальной области определяются на основе этих коэффициентов соответственно как:

$$\Gamma_{eo} = R(z)/R(0) = \mu(z) + \delta(z) R(0)^2; \quad \chi = 0,5\delta(z)R(0)^2/[\mu(z) + \delta(z) R(0)^2].$$

Подстановка полученных значений μ , δ и $R(0) = 12,5$ мм (край рабочего поля фотокатода) в приведенные выше выражения дает значения $\Gamma_{eo} = 1,04$ и $\chi = 0,038$.

При расчете траекторий задавались наиболее вероятная начальная энергия электронов 0,6 эВ и углы вылета относительно нормали к фотокатоду $\pm 60^\circ$. Начальные условия определялись заведомо более жестко, чем в реальном приборе. На са-

мом деле наиболее вероятная начальная энергия фотоэлектронов многощелочного фотокатода составляет величину 0,3 эВ, а векторы начальных скоростей более 90% эмиттированных фотоэлектронов лежат в пределах $\pm 30^\circ$ относительно нормали к поверхности фотокатода. Выбранные начальные условия специально использовались для определения огибающей электронного потока с некоторым припуском, который бы надежно гарантировал хорошее токопрохождение в ЭОС.

При финишном анализе окончательного варианта электронно-оптической системы в качестве точек вылета электронов с фотокатода выбирались радиальные координаты:

$$\begin{aligned} R(0)_1 &= 12,5 \text{ мм} - \text{край рабочего поля фотокатода;} \\ R(0)_2 &= R(0)_1 / 2^{1/2} = 8,8 \text{ мм} - \text{периферийная зона;} \\ R(0)_3 &= R(0)_1 / 2 = 6,25 \text{ мм} - \text{средняя зона;} \\ R(0)_4 &= 0 \text{ мм} - \text{центр фотокатода.} \end{aligned}$$

По огибающей электронного потока, включающей пучки из всех четырех точек, определялся минимальный диаметр анодного отверстия, обеспечивающий 100% токопрохождение, а по огибающей пучка без траекторий с края рабочего поля – минимальные расстояния и угол раствора между отклоняющими пластинами.

По рассчитанным траекториям определялись электронно-оптическое увеличение и искажения изображения в пределах рабочего поля. Было получено значение $\Gamma_{eo}^* = 1,06$ практически совпадающее со значением Γ_{eo} , рассчитанным через коэффициенты степенного ряда. Искажения изображения составили $\chi^* = 5,5\%$. Здесь χ^* — геометрические искажения прямой линии при свойственной аксиально-симметричным электростатическим ЭОС подушкообразной дисторсии, определяемые как отношение длины стрелы прогиба дуги, в которую превращается на экране (входной поверхности микроканальной пластины) сторона квадрата, спроектированного на фотокатод, к половине длины хорды, соединяющей концы этой дуги, выраженное в процентах: $\chi^* = [1 - 2^{1/2}R(z_s)_2/R(z_s)_1]100\%$, где $R(z_s)_2$ – радиальная координата в плоскости изображения траектории электрона, вылетевшего из точки фотокатода $R(0)_2 = R(0)_1/2^{1/2} = 8,8$ мм, а $R(z_s)_1$ – радиальная координата в плоскости изображения траектории электрона, вылетевшего из точки фотокатода $R(0)_1 = 12,5$ мм.

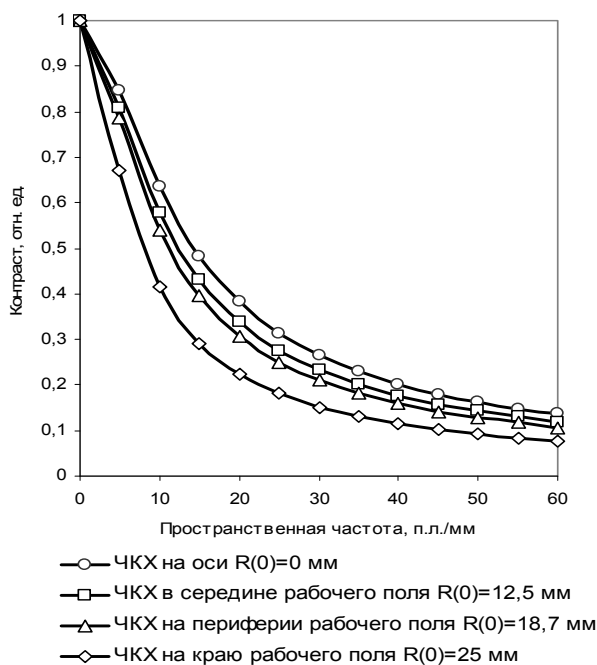


Рис. 1. Расчетные частотно-контрастные характеристики.

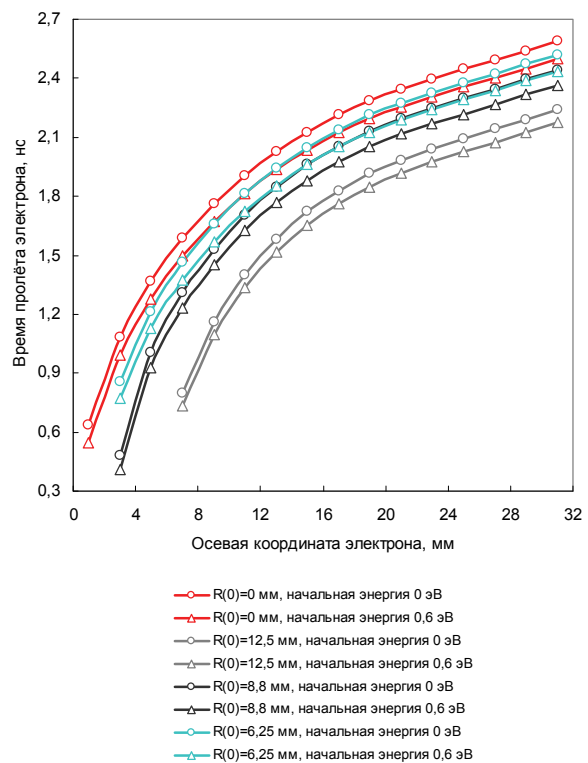


Рис. 2. Расчетные времена пролета фотоэлектронов.

Для окончательного варианта произведен также подробный анализ с расчетом частотно-контрастных характеристик. При этом в качестве начальных условий движения фотоэлектронов в математической модели используется распределение по энергиям/углам в виде

$$\Psi(\varepsilon, \theta) = \left[\sum \eta_k M_k(\varepsilon / \varepsilon_{0k}) \right] \cdot \cos \theta, \text{ где: } \sum_{k=1}^n \eta_k M_k(\varepsilon / \varepsilon_{0k})$$

как линейная комбинация нормированных функций распределения Максвелла, которой аппроксимируется распределение фотоэлектронов по начальным энергиям; η_k – весовой коэффициент k-той функции; ε_{0k} – наиболее вероятная энергия k-той функции распределения.

Использованные при расчетах значений весовых коэффициентов и наиболее вероятных энергий обеспечили хорошее соответствие аппроксимации экспериментально полученному распределению для многощелочного фотокатода. Частотно-контрастные характеристики фотоэлектронного изображения, формируемого ЭОП в плоскости входной поверхности микроканальной пластины, показаны на Рис. 1, а времена пролета фотоэлектронов – на Рис. 2.

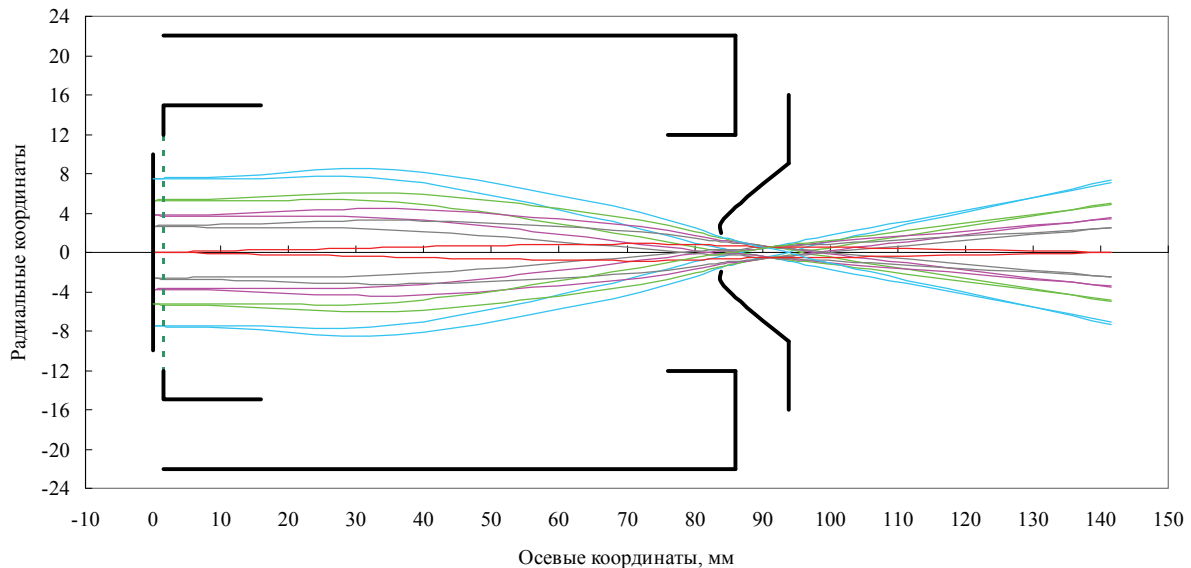


Рис. 3. Траектории фотоэлектронов в разрабатываемой ЭОС.

При разности начальных энергий 0,6 эВ минимальную разность времен пролета 66 пс имеют электроны, эмитированные с края рабочего поля фотокатода, а максимальную 91 пс – осевые электроны. При разности начальных энергий 0,3 эВ соответствующие разности пролета составляют 19 пс и 26 пс, что несколько больше требуемой величины. Однако, реально ширина полосы энергетического спектра, в которой содержится более 80% фотоэлектронов, у многощелочного фотокатода даже вблизи длины волны максимума спектральной характеристики чувствительности (480-520 нм) составляет величину не более 0,2 эВ при наиболее вероятной энергии 0,3 эВ, а в красной области спектра существенно меньше. Это означает, что ЭОС времяанализирующего ЭОП способна обеспечить предельное временное разрешение на уровне $2 \cdot 10^{-11}$ с. Расчет отклоняющей системы сводился к выбору длины отклоняющих пластин в пределах дрейфового пространства ЭОС, которая могла бы обеспечить необходимую чувствительность отклонения при заданном огибающей электронного пучка и размерами рабочего поля экрана угловом растворе отклоняющих пластин. Чувствительность отклонения прямых симметричных пластин с углом раскрытия $\xi = \arctg[(D-b_1)/L]$, где: D – размер рабочего поля экрана в направлении развертки, b_1 – расстояние между пласти-

нами на входе и L – осевое расстояние от входных торцов пластин до экрана, определяется как:

$$\varepsilon = 0,5hUa^{-1}(b_2-b_1)^{-1}\{[b_2h(b_2-b_1)^{-1}+(L-h)]\cdot\ln(b_2/b_1)-h\},$$

где: h – длина проекции пластины на ось системы отклонения; Ua – разность потенциалов между фотокатодом и анодом; b_2 – расстояние между пластинами на выходе.

Подставляя в это выражение заданные ε и D , а также значения b_1 , b_2 и L , полученные из результатов расчета ЭОС, и разрешая его относительно h , была получена длина осевой проекции отклоняющих пластин, откуда по формуле: $L^* = h/\cos \xi$ была определена длина пластин 26,6 мм. Расчетные траектории фотоэлектронов в ЭОС представлены на Рис. 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев В.Б., Фельдман Г.Г., Карпов М.А. и др. Использование электронно-оптических камер в диагностике взрывных процессов. Сб. статей. Опτικο-электронные измерения. Университетская книга, 2005, с. 570-576.
2. Сигов А.С., Попов Е.А., Нефедов В.И. и др. Методы исследования изображений в нестационарной спектроскопии. Научные технологии, 2011, № 7, т. 12, с. 54-59.
3. Карпов М.А., Лебедев В.Б., Фельдман Г.Г. и др. Применение камеры К008 в диагностике ударных и детонационных волн. Измерительная техника, № 5, 2007, с. 46-49.
4. Нефедов В.И., Карпов М.А., Лучников П.А. и др. Применение электронно-оптического преобразователя изображений в системе «ЛИДАР» для лазерного зондирования объектов в жидких и газовых средах. Материалы МНТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», 7 – 11 декабря 2009 г., Москва. – М.: Энергоатомиздат, 2009, часть 4, с. 282-287.