

## Рентгеновский времяанализирующий электронно-оптический преобразователь с улучшенными конструктивными и эксплуатационными параметрами

Г. Г. ФЕЛЬДМАН

*Описан новый рентгеновский электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с фотокатодом из Au или CsJ. Прибор имеет улучшенные временное разрешение и яркость изображения. Ширина щели в ускоряющем электроде может быть выбрана в пределах 50—100 мкм. Приведена диаграмма работы ЭОП.*

*The new X-ray streak tube with Au or CsJ photocathode is described. The device has the improved temporal resolution and image luminance. The range of the slit width in accelerating electrode is equal to 50—100  $\mu\text{m}$ . The working diagram of streak tube is presented.*

Все более широкое распространение при проведении фундаментальных научных исследований получает облучение твердотельных мишеней сверхкороткими импульсами лазерного излучения с практически предельными плотностями пиковой мощности. Особый интерес вызывает сопровождающий взаимодействие лазерного излучения с мишенью процесс лавинного образования горячих электронов, ответственных за генерирование коротких импульсов интенсивного рентгеновского излучения.

Рентгеновское излучение плазмы может быть использовано в рентгеновской микроскопии и литографии, при сверхбыстрой диагностике поверхностей тел, при изучении различных биологических и химических процессов и т. д. В связи с этим разработку электронно-оптических преобразователей (ЭОП) рентгеновского излучения, а также оптимизация их конструкций и упрощение технологии изготовления являются актуальными задачами современного оптико-электронного приборостроения.

Ниже дано описание рентгеновского электронно-оптического преобразователя (РЭОП) с расширенными эксплуатационными возможностями, улучшенным временным разрешением и повышенной яркостью изображения [1]. На

рис. 1 изображена схема РЭОП, а на рис. 2 — диаграмма его работы.

Устройство работает следующим образом. В статическом режиме рентгеновские лучи (показанные на рис. 1 пунктирными линиями) от источника 9, находящегося в вакуумной камере 8, вызывают эмиссию электронов из фотокатода 1, выполненного из Au, CsJ или любого другого материала, чувствительного к рентгеновскому излучению. Между фотокатодом 1 и ускоряющим электродом 2, расположенными под углом  $\gamma$ , приложено ускоряющее напряжение, обеспечивающее напряженность ускоряющего поля в районе щели порядка нескольких киловольт на миллиметр. Из рис. 1 видно, что при самой грубой установке рентгеновского источника его лучи попадают на всю поверхность фотокатода, однако сквозь щелевую ускоряющую диафрагму пройдет только пучок шириной  $h$ . В отличие от аналогичных конструкций [2, 3] не будет увеличения поперечного размера этого пучка из-за дифракции и переноса изображения в другую плоскость, т. е. техническое временное разрешение улучшится по сравнению с аналогами. Яркость изображения возрастет, так как ширина щели в ускоряющем электроде 2, которую можно выбрать равной 50—100 мкм в зависимости от требуемого

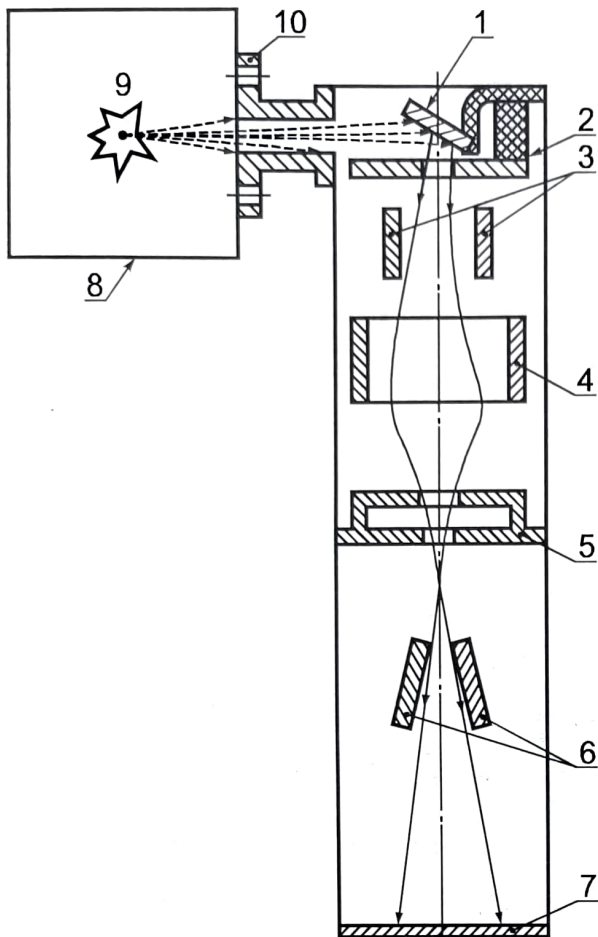


Рис. 1. Схема рентгенового ЗОП:

1 — фотокатод; 2 — щелевой ускоряющий электрод со щелью  $h$ ; 3 — дополнительная пара отклоняющих пластин; 4 — фокусирующий электрод; 5 — анод; 6 — система развертки изображения; 7 — люминесцентный экран; 8 — вакуумная камера; 9 — присоединительный вакуумный фланец; 10 — источник рентгеновского излучения

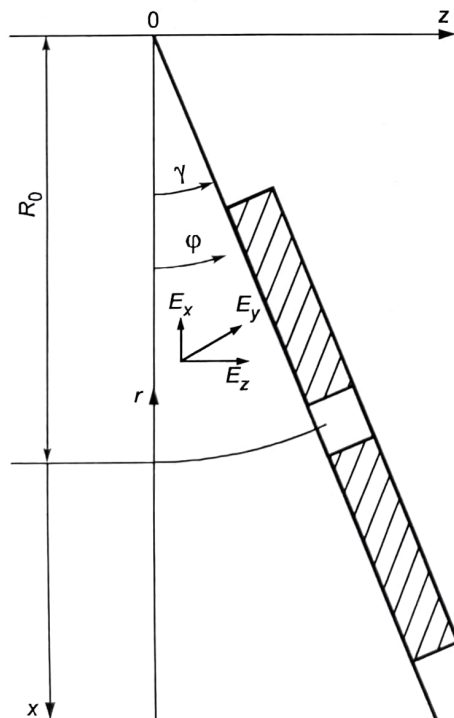


Рис. 2. Диаграмма работы рентгенового ЗОП

временного разрешения, больше ширины щели в камере-обскуре.

Покажем, что после прохождения промежутка между электродами 1, 2 электронный пучок, прошедший в щель ускоряющего электрода 2, окажется повернутым как целое относительно оси РЗОП.

Рассмотрим движение электронов в ускоряющем промежутке между фотокатодом 1 и электродом 2, расположенными под углом  $\gamma$  друг к другу. Поскольку ширина щели (50—100 мкм) мала по сравнению с ее расстоянием до фотокатода (1—2 мм), можно рассмотреть движение электронов в конденсаторе, обкладки которого расположены под углом друг к другу; угол  $\gamma$  выберем порядка  $10^\circ$ . В таком конденсаторе силовые линии являются дугами окружностей, так что проекции электрического поля равны  $E_R = 0$ ,  $E_\varphi = U_d / (\gamma R)$ , где  $R$ ,  $\varphi$  — полярные координаты с началом в точке «0» пересечения плоскостей фотокатода и ускоряющей диафрагмы (рис. 2);  $U_d$  — потенциал ускоряющей диафрагмы.

Перейдя к декартовым координатам  $x$ ,  $z$  с началом в той же точке «0», запишем проекции поля в виде

$$E_z = E_\varphi \cos \varphi = \frac{U_d x}{\gamma R^2}; \quad E_x = -E_\varphi \sin \varphi = -\frac{U_d z}{\gamma R^2}.$$

Отсюда получим следующие уравнения движения электрона в рассматриваемом конденсаторе:

$$m \ddot{z} = e \frac{U_d x}{\gamma R^2}; \quad m \ddot{x} = -e \frac{U_d z}{\gamma R^2}, \quad (1)$$

( $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона). Для решения этих уравнений перейдем от координаты  $x$  к координате  $r = R_0 - x$  (см. рис. 2), отсчитываемой от силовой линии, проходящей через середину щели ускоряющего электрода 2, и используем малые параметры

$$r/R_0 \ll 1; \quad z/R_0 \ll 1. \quad (2)$$

Первое неравенство выполняется в силу малой ширины щели (рассматриваем лишь электроны, которые пройдут через щель), а второе — из-за малости угла  $\gamma \approx 10^\circ \approx 1/6$ .

В нулевом приближении по малым параметрам (2) уравнения движения принимают вид

$$\ddot{z} = V_d^2 / 2l_0; \quad \ddot{r} = V_d^2 z / 2l_0 R_0; \quad V_d = \sqrt{2eU_d/m}, \quad (3)$$

где  $l_0 = \gamma R_0$  — длина дуги окружности, проходящей через середину щели;  $V_d$  — скорость электрона при входе в щель.

Поскольку нас интересует движение пучка как целого, при решении уравнений движения (3) не будем учитывать начальных скоростей электронов. Дважды интегрируя по времени первое уравнение, получаем

$$\varepsilon = V_d^2 t^2 / 4l_0. \quad (4)$$

Отсюда время пролета электрона до ускоряющей диафрагмы  $t_d = 2l_0 / V_d$ . Подставив (4) во второе из уравнений (3) и проинтегрировав его по времени, получим  $r = V_d^4 t^3 / 24l_0^2 R_0$ .

Подставив сюда время пролета  $t_d$ , найдем поперечную (параллельную плоскости фотокатода) скорость электрона при входе в щель:  $r_d = V_d l_0 / 3R_0$ . Поскольку  $l_0 = \gamma R_0$ , то  $l_d = \gamma V_d / 3$ . Полная скорость электрона при этом равна  $V_d$ , так что век-

тор его скорости повернут на угол  $\gamma/3$  по отношению к нормали и катоду, т. е. на угол  $2/3 \gamma$  к оси РЭОП.

Все сказанное относится к каждому электрону пучка, так что на угол  $2/3 \gamma$  к оси РЭОП повернется весь пучок после прохождения ускоряющей щелевой диафрагмы 2. Чтобы направить пучок по оси РЭОП, необходима дополнительная отклоняющая система 3.

Из-за конечной толщины  $d$  ускоряющей диафрагмы 2 внутри щели электроны сместятся на расстояние  $2/3 \gamma d$ : чтобы электроны не сели на стенки щели, ее ширина должна быть увеличена на это расстояние по сравнению с «эффективной» шириной, выбранной с целью получения максимальной светосилы и технического временного разрешения. Это только упростит технологию изготовления ускоряющей диафрагмы.

Например, при угле  $\gamma = 10^\circ$  поворот луча относительно оси РЭОП составит примерно  $6,7^\circ$ . Если толщина диафрагмы 2 равна  $300 \text{ мкм}$ , то ширина щели должна примерно на  $35 \text{ мкм}$  превышать ее эффективное значение. Если последнее выбрано равным  $50\text{—}100 \text{ мкм}$ , то ширина щели должна составлять  $85\text{—}135 \text{ мкм}$ .

Можно проверить, не вносит ли поворот фотокатода относительно ускоряющей диафрагмы дополнительного разброса времени пролета электронов. Для этого надо решить уравнения движения (1) в следующем (линейном) прибли-

жении по малым параметрам (2) и учесть при этом продольную и поперечную начальные скорости электрона. Вычисления, которые мы для краткости опускаем, показывают, что поворот фотокатода не вносит дополнительных временных aberrаций, т. е. не ухудшает физическое временное разрешение РЭОП.

Таким образом, данная конструкция позволяет устранить существенные неудобства, возникающие при эксплуатации РЭОП с массивным фотокатодом, улучшить его техническое временное разрешение и сохранить физическое, т. е. в целом улучшить временное разрешение РЭОП, а также увеличить его светосилу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **А. с. 1829062 СССР** / Г.Г. Фельдман, И.М. Корженевич. // Бюл. изобрет. — 1993. — № 27.
2. **Бутслов М.М. и др.** Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. — М.: Наука, 1978.
3. **Brandl D.J. et al.** // Opt. Commun. — 1975. — V. 15. — № 2. — P. 231.

*Дата одобрения 18.12.2001 г.*