

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **044787**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2023.09.29**

(51) Int. Cl. **H01J 31/50** (2006.01)

(21) Номер заявки  
**202292747**

(22) Дата подачи заявки  
**2022.10.26**

---

(54) **КАТОДНЫЙ УЗЕЛ ХРОНОГРАФИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

---

(31) **2021138190**

(56) **RU-C1-2374719**

(32) **2021.12.22**

**RU-C1-2378734**

(33) **RU**

**EP-A2-0551767**

(43) **2023.06.30**

**US-A-5278403**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ИМ.  
Н.Л. ДУХОВА" (RU)**

(72) Изобретатель:  
**Коновалов Павел Игоревич, Спахов  
Александр Вячеславович, Соколов  
Артем Юрьевич (RU)**

(74) Представитель:  
**Ульянин О.В. (RU)**

---

(57) Изобретение относится к области вакуумной электронной техники, в частности к элементам конструкции электронно-оптических преобразователей, используемых для регистрации сигналов быстропротекающих процессов. Техническим результатом является устранение ограничений для границ динамического диапазона хронографического ЭОП за счет формирования в катодной камере хронографического ЭОП плоского ленточного электронного пучка большой интенсивности без переворота изображения и без потерь фотоэлектронов на элементах катодного узла, сохраняя структуру электронного изображения на фотокатоде. Устранить недостатки существующих электронно-оптических решений и улучшить указанные параметры хронографических ЭОП возможно, применяя в катодной камере ЭОП совместно с фотокатодом ускоряющие и фокусирующие электроды от электронной пушки "Пирса", которые формируют из фотоэлектронов плоский ленточный электронный пучок без переворота изображения.

---

**044787**  
**B1**

**044787**  
**B1**

Катодный узел хронографического электронно-оптического преобразователя.

Изобретение относится к области вакуумной электронной техники, в частности к элементам конструкции электронно-оптических преобразователей, используемых для регистрации сигналов быстропротекающих процессов.

Хронографические электронно-оптические преобразователи (ЭОП) предназначены для регистрации быстропротекающих процессов путем преобразования распределенной во времени и пространстве интенсивности импульсного светового сигнала (изображения "штриха") в распределение интенсивности свечения люминофора, поэтому одним из основных требований, предъявляемым к хронографическим ЭОП, является обеспечение минимальных потерь информации и сохранение максимальной четкости изображения, что, в свою очередь, достигается только при больших значениях динамического диапазона и пространственного разрешения ЭОП. Расширение динамического диапазона по нижней границе достигается улучшением соотношения сигнал-шум; по верхней границе - снижением влияния пространственного объемного заряда на формирование электронного пучка. Причем, пространственный объемный заряд оказывает наибольший эффект на электронный пучок в точках пересечения его траекторий и на этапе ускорения фотоэлектронов, только что покинувших фотокатод.

На данный момент известны следующие решения, позволяющие с различной эффективностью ускорять фотоэлектроны, и формировать структуру электронного пучка, тем самым сохраняя исследуемую информацию о сигнале.

Известен хронографический ЭОП, в катодной камере которого расположен катодный и ускоряющий электроды. Ускоряющий электрод представляет собой пластину с прямоугольным отверстием, на которое смонтирована сетка. Между ускоряющим и катодным электродами создается импульсное поле, ускоряющее и формирующее электронный пучок. Патент США № 5221836, МПКНОи 31/50, 22.06.1993.

Недостатками такой катодной камеры являются потери части электронов при прохождении сетки, смонтированной на ускоряющем электроде, что снижает динамический диапазон на нижней границе за счет ухудшения отношения "сигнал-шум". Также малые габаритные размеры рабочей зоны и, соответственно, габаритные размеры апертуры диафрагмы ускоряющего электрода не позволяют обрабатывать большое количество информации. Кроме того, это решение требует использования сложной системы импульсного питания ЭОП с тщательной калибровкой и качественным экранированием, что приводит к увеличению габаритных размеров ЭОП.

В существующей линейке электронно-оптических преобразователей с двойной (биламеллярной) фокусировкой (серия P800 photonis) [Streak-Tubes:

Photonis Brochure 16 p.//<http://pdf.directindustry.com/pdf/photonis/streak-tube/82199-327237.html>] формируется плоский ленточный пучок с переворотом изображения. Проблема влияния пространственного объемного заряда на начальном этапе пролета электронов решается при помощи высокой разницы потенциалов (до 15кВ) на участке катод - первый ускоряющий электрод. Формирование структуры электронного пучка выполняется при помощи сложной фокусирующей системы, в которой фокусировка электронного пучка для улучшения пространственного разрешения осуществляется за счет квадрупольной линзы, а разброс электронов по времени пролета компенсируется кластером, состоящим из трех иммерсионных линз, выполненных в виде полых параллелепипедов.

Таким образом, данная ЭОС формирует плоский ленточный пучок, имеющий область с повышенной плотностью электронов, обусловленную пересечением траекторий электронов, что вместе с наличием в ней квадрупольной линзы ограничивает верхнюю границу динамического диапазона. В области пересечения траекторий и на участке пролета электронов внутри квадрупольной линзы происходит увеличение пространственного объемного заряда.

Известен компактный хронографический ЭОП в составе регистратора с МКП, расположенной непосредственно перед фотокатодом, и работающей в режиме линзы, вытягивающей, усиливающей и "выпрямляющей" электронный пучок с катода. Патент США №4310857, МПК Н04N5/30, 12.01.1982.

Катодная камера данного ЭОП позволяет сформировать плоский нерасходящийся поток электронов, однако его интенсивность ограничена узким динамическим диапазоном МКП из-за существования эффекта насыщения. Применение даже самых высокотехнологичных МКП в составе катодной камеры такого ЭОП позволяет достигать динамического диапазона не более  $10^3$ .

Известен хронографический ЭОП с повышенным временным разрешением и осесимметричным электронным пучком, имеющий фокусировку дополнительными электродами. Конструкция катодной камеры данного ЭОП представляет собой плоский фотокатод и систему из цилиндрического ускоряющего электрода с сеткой на апертуре диафрагмы и двух цилиндрических фокусирующих электродов. Патент Японии № 5824328, МПК Н01J 31/42, 25.11.2015.

Недостатками данного изобретения являются наличие сетки, снижающей количество электронов, долетающих до экрана, что ограничивает динамический диапазон по нижней границе, наличие области пересечения траекторий электронов в аксиально-симметричной оптике, где происходит накопление пространственного объемного заряда, что ограничивает верхнюю границу динамического диапазона ЭОП.

Таким образом, основная проблема современных ЭОП заключается в невозможности сформировать интенсивный поток электронов в катодной камере и транслировать его в следующие системы фокуси-

ровки без потери структуры пучка (соответственно, пространственного и временного разрешения) и накопления пространственного объемного заряда. Однако, такое решение существует в другой области техники: электронные пушки системы "Пирса" и их модификации ("Мюллера" и т.д.), описанные в [Пирс Дж.Р., Теория и расчет электронных пучков, М. Советское радио", 1956, 217с], могут формировать нерасходящиеся плоские ленточные электронные пучки высокой интенсивности без пересечения траекторий электронов. Для формирования таких пучков применяются электронные пушки, состоящие из сферического или плоского термоэмиссионного катода, прикатодного фокусирующего электрода с тем же потенциалом, что и на катоде, боковых фокусирующих электродов и анода, форма которого рассчитывается по форме, соответствующей эквипотенциальной линии напряженности электрического поля, расположенной на расстоянии, на которое удален анод от поверхности термоэмиссионного катода.

Данное решение невозможно использовать в хронографических ЭОП, так как термоэмиссионный катод, применяемый в электронных пушках не может выполнять функцию фотокатода - преобразовывать попадающее на его поверхность изображение светового "штриха" за счет фотоэлектронной эмиссии в электронное изображение, заряд которого пропорционален интенсивности света.

Известен катодный узел времяанализирующего электронно-оптического преобразователя, содержащий плоский фотокатод с длиной  $l$  и шириной  $h$ , расположенный на металлической подложке, ускоряющий электрод, мелкоструктурную сетку, отличающийся тем, что мелкоструктурная сетка выполнена плоской и введена электрически связанная с фотокатодом и окружающая его металлическая катодная насадка в виде полого тела вращения, образующая которого составляет с катодной плоскостью угол  $\theta \in [90^\circ, 150^\circ]$ , радиус составляет  $R \in [0.81, 2.1]$ , высота катодной насадки  $H \in [L/3, L]$ , где  $L$  - расстояние между сеткой и катодом.

Патент РФ №2374719, МПК H01J 31/50, 27.11.2009. Данное техническое решение принято в качестве прототипа.

Недостатками данного катодного узла являются ограничение динамического диапазона хронографического ЭОП и низкое значение отношения сигнал-шум (ОСШ).

Предел динамического диапазона на верхней границе обусловлен наличием пространственного объемного заряда большой плотности (по закону Чайлда-Ленгмюра) в области пересечения траекторий в аксиально-симметричной оптике ЭОП, а предел нижней границы динамического диапазона ограничен на величину, пропорциональную коэффициенту прозрачности сетки на ускоряющем электроде, которая снижает их количество в пространстве после катодной камеры, а, следовательно, и снижается значение сигнала по отношению к уровню фоновых шумов (отношение сигнал-шум). Данное техническое решение принято в качестве прототипа.

Техническим результатом изобретения является расширение динамического диапазона хронографического ЭОП не менее чем на порядок и увеличение ОСШ на величину, пропорциональную прозрачности сетки, используемой в прототипе.

Это происходит за счет формирования в катодной камере хронографического ЭОП плоского ленточного электронного пучка большой интенсивности без переверота изображения и без потерь фотоэлектронов на элементах катодного узла, сохраняя структуру электронного изображения на фотокатоде.

Технический результат достигается тем, что катодный узел хронографического электронно-оптического преобразователя,

содержащий плоский фотокатод с прямоугольным рабочим полем размерами  $a$  и  $b$ , расположенным параллельно соответствующим осям  $Ox$  и  $Oy$  в плоскости  $OXY$ , перпендикулярно оптической оси электронно-оптического преобразователя  $OZ$ , центр рабочего поля совпадает с началом декартовой системы координат  $OXYZ$ ,

металлическую катодную насадку, электрически связанную с фотокатодом, металлический ускоряющий электрод, который удален на расстояние  $L$  от фотокатода и электрически развязан от него,

при этом фотокатод, насадка и ускоряющий электрода расположены соосно по оптической оси  $OZ$ ,

металлическая катодная насадка представляет собой пластину, одной из своих поверхностей прилегающую к плоскости фотокатода, толщиной  $h$  между указанной поверхностью и параллельной ей, со сквозным вырезом по направлению оси  $OZ$ , проекция которого в плоскости  $OYZ$  представляет собой трапецию, меньшее основание которой находится в плоскости фотокатода и имеет длину не менее  $b$ , боковые стороны трапеции расположены симметрично плоскости  $Oxz$ , при этом угол между осью  $OZ$  и боковыми сторонами находится в диапазоне  $\theta_0 \in (0, \frac{\pi}{2})$ , проекция выреза на плоскость  $Oxz$  представляет собой фигуру, симметричную относительно плоскости  $OYZ$ , имеющую длину по оси  $Ox$  не менее  $a$ ,

металлический ускоряющий электрод изогнутой формы, проекция ближайшей к фотокатоду поверхности которого на плоскость  $OYZ$  имеет профиль, описываемый уравнением кривой:

$$(L)^{4/3} = (z^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \arctg \frac{y}{z}\right),$$

ускоряющий электрод имеет сквозной вырез в форме параллелепипеда, проекции которого в плоскостях, параллельных поверхности фотокатода, представляют собой прямоугольник, длины сторон которого совпадают по размерам и расположению с проекцией выреза катодной насадки в плоскости фотокатода.

тогда, а центр прямоугольника совпадает с осью  $OZ$ , при этом длина проекции выреза на ось  $OZ$  не менее  $H$ , на которую, как и на толщину  $h$  катодной насадки по оси  $OZ$ , накладываются следующие условия:

$$H < L, h < L,$$

где  $L$  зависит от напряженности  $E$  на участке катод-ускоряющий электрод, по формуле:

$$L \ll \frac{e \cdot W_e}{E},$$

где  $E$  - напряженность электрического поля на участке катод-ускоряющий электрод, причем  $E \gg 50$ , [В/мм],  $W_e$  - максимальная начальная энергия электронов, покидающих фотокатод, которая определяется свойствами его материала и находится в диапазоне  $W_e \in [0..5]$  электрон-вольт, [эВ],

$e$  - элементарный электрический заряд, кулон, [Кл].

Сущность предлагаемого изобретения поясняется чертежами.

На фиг. 1-3 схематично изображена конструкция катодного узла, формирующего плоский ленточный пучок электронов, в различных сечениях, где 1 - плоский фотокатод прямоугольным рабочим полем размерами  $a$  и  $b$ , 2 - металлическая катодная насадка, 3 - металлический ускоряющий электрод, оси симметрии которых совпадают с осью катодного узла и хронографического ЭОП, в состав которого входит данный узел.

На фиг. 4 приведено распределение потенциала вблизи ленточного электронного пучка в виде семейства эквипотенциальных линий в безразмерных координатах для электронной пушки с плоской системой формирования электронного пучка [Жигарев А.А., Электронная оптика и электронно-лучевые приборы, М., "Высшая школа", 1972, 539с].

На фиг. 5 приведены нормированные графики зависимости плотности пространственного объемного заряда в катодной камере от координаты по оптической оси для ЭОС с аксиально-симметричным пучком (катодная камера хронографического ЭОП ТПО30-01 производства ФГУП "ВНИИА им. Н. Л. Духова") и для ЭОС с плоским ленточным пучком без переверота изображения (патентуемый катодный узел).

Катодный узел хронографического ЭОП, расположенный перпендикулярно оптической оси электронно-оптического преобразователя -  $OZ$ , и пересекающий ее в начале декартовой системы координат  $OXYZ$ , приведен в трех основных видах на фиг. 1-3, где сечение плоскостью  $OYZ$  соответствует виду на фиг. 1, плоскостью  $OZX$  виду на фиг. 2, а проекция по оси  $OZ$  на плоскость  $OXY$  приведена на фиг. 3. Катодный узел содержит фотокатод 1, насадку 2, электрод 3, расположенные соосно на оси  $OZ$ .

Плоский фотокатод 1 с прямоугольным рабочим полем размерами  $a$  и  $b$ , расположенным параллельно соответствующим осям  $OX$  и  $OY$  в плоскости  $OXY$ , перпендикулярно оси  $OZ$ , центр рабочего поля совпадает с началом декартовой системы координат  $OXYZ$  (фиг. 1). Подложка фотокатода 1 может быть выполнена из любого материала, применимого для изготовления ЭОП, и иметь произвольные значения вылета и габаритных размеров, ограниченных габаритными размерами ЭОП. Причем, наличие подложки не является необходимым условием для функционирования катодного узла, и, для простоты, на фиг. 1-3 она не отображена. На материал и форму фотокатода 1 также не накладывается никаких ограничений.

Металлическая катодная насадка 2 электрически связанная с фотокатодом 1, которая представляет собой пластину, одной из своих поверхностей прилегающей к плоскости фотокатода 1 (совпадающей с плоскостью  $OXY$ ), толщиной  $h$  между указанной поверхностью и параллельной ей, со сквозным вырезом по направлению оси  $OZ$ , проекция которого в плоскости  $OYZ$  представляет собой трапецию, меньшее основание которой находится в плоскости фотокатода 1 ( $OXY$ ) и имеет длину не менее  $b$ , боковые стороны трапеции расположены симметрично плоскости  $OZX$ , при этом угол между осью  $OZ$  и боковыми сторонами (фиг. 1) может находиться в диапазоне  $\theta_0 \in (0.. \frac{\pi}{2})$ , а проекция выреза на плоскость  $OZX$  представляет собой фигуру, симметричную относительно плоскости  $OYZ$ , имеющую длину по оси  $OZ$  не менее  $a$  (фиг. 2). Ограничения на размер выреза в плоскости фотокатода 1  $a$  и  $b$ , соответственно, обусловлены тем, что в случае размеров данной апертуры меньших, чем рабочее поле фотокатода 1, не все фотоэлектроны смогут покинуть его поверхность, что приведет к снижению ОСШ и ограничению нижней границы динамического диапазона, а, следовательно, технический результат не будет достигнут. На материал и форму насадки 2, не накладывается ограничений, за исключением тех, что указаны выше.

Соединение насадки 2 с фотокатодом 1 может производиться любым допустимым образом, например, через металлический уплотнитель, при помощи сварки элементов насадки 2 с фланцем фотокатода 1 или через припой между фотокатодом 1 и ближайшей к нему поверхностью насадки 2.

Металлический ускоряющий электрод 3, удаленный на расстояние  $L$  от фотокатода 1 и электрически развязанный от него, имеет изогнутую форму, со сквозным вырезом в форме параллелепипеда, проекции которого в плоскостях, параллельных поверхности фотокатода, представляют собой прямоугольник (фиг. 3), длины сторон которого совпадают по размерам и расположению с проекцией выреза катодной насадки в плоскости фотокатода ( $OXY$ ), а центр прямоугольника совпадает с осью  $OZ$  (фиг. 3). При этом длина проекции выреза на ось  $OZ$  не менее  $H$ . Форма ускоряющего электрода и его габаритные размеры в пространстве катодного узла не влияют на формирование электрического поля, определяющего структуру пучка за исключением ближайшей к фотокатоду 2 поверхности электрода 3, поэтому опреде-

ляется вид только этой поверхности: ее проекция на плоскость  $OYZ$  (в том числе и на любую плоскость, параллельную плоскости  $OYZ$ ) имеет профиль, описываемый уравнением кривой:

$$(L)^{4/3} = (z^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \arctg \frac{y}{z}\right). \quad (1)$$

На форму остальных поверхностей, находящихся вне области формирования электронного пучка, не накладываемся ограничений.

В ЭОП металлический ускоряющий электрод 3, электрически развязан с фотокатодом 1 и катодной насадкой 2, например, через диэлектрическую проставку. При этом диэлектрическая проставка должна обладать сопротивлением достаточным для подачи напряжения необходимого для рабочего режима питания ЭОП. Форма и размеры диэлектрической проставки могут быть любыми, позволяющими реализовать конструкцию ЭОП и обеспечить его функционирование. В качестве диэлектрической проставки, например, может использоваться металлокерамический корпус ЭОП внутри которого расположены все элементы катодного узла. В данном случае элементы корпуса и катодного узла соединяются между собой, например, при помощи пайки или компрессионной вакуумной сварки, или любым другим способом. При этом на материал диэлектрической проставки, применяемой в изготовлении ЭОП, нет никаких иных ограничений. Диэлектрическая проставка для простоты не показана на фиг. 1-3.

Для достижения технического результата на толщину  $h$  катодной насадки 1 и длину  $H$  проекции выреза ускоряющего электрода 3 на ось  $OZ$ , соответственно, наложены следующие условия:

$$H < L, h < L, \quad (2)$$

где  $L$  зависит от напряженности  $E$  на участке катод 1 - ускоряющий электрод 3, по формуле:

$$L \ll \frac{e \cdot W_e}{E}, \quad (3)$$

где  $E$  - напряженность электрического поля на участке катод 1 - ускоряющий электрод 3, причем  $E \gg 50$ , [В/мм],  $W_e$  - максимальная начальная энергия электронов, покидающих фотокатод, которая определяется свойствами его материала и находится в диапазоне  $W_e \in [0..5]$  электрон-вольт, [эВ],

$e$  - элементарный электрический заряд, кулон, [Кл]. Несоблюдение данного условия приведет к тому, что поле  $E$  на участке катод 1 - ускоряющий электрод 3 будет недостаточным для формирования электронного пучка и улучшения таким параметров ЭОП как динамический диапазон и ОСШ.

Для обоснования выбранной конструкции катодного узла рассмотрим процесс формирования плоского ленточного пучка без переверота изображения в данной области хронографического ЭОП.

Ламинарный электронный поток  $j$  в катодном узле зависит от напряжения  $U(z)$  в области фотокатод 1 - ускоряющий электрод 3:

$$j = a \cdot \frac{U(z)^{3/2}}{z^2}, \quad (4)$$

где  $a = 2,33 \cdot 10^{-6}$ , Ампер/Вольт<sup>3/2</sup>, [А/В<sup>3/2</sup>],  $U(z)$  - потенциал в плоскости параллельной электродам, Вольт [В], расположенной на расстоянии  $z$  [мм] от фотокатода 1.

Во введенной декартовой системе координат, только составляющая напряженности поля  $E_z$  не равна нулю, а составляющие по направлению декартовых координат  $E_x$  и  $E_y$  равны нулю. В этом случае все электроны потока имеют только одну компоненту скорости  $E_z$ , отличную от нуля. При этом  $E_z$  (далее  $E$ ) выбирается таким образом, чтобы обеспечить достаточное для ускорения фотоэлектронов значение разницы потенциалов ( $\Delta U$ ) между катодом 1 и ускоряющим электродом 3:

$$e \cdot W_e \ll \Delta U < U_{np}, \quad (5)$$

где  $U_{np}$  - напряжение пробоя, вольт, [В], которое зависит от величины диэлектрической проницаемости выбранного материала для изолятора между фотокатодом 1 и ускоряющим электродом 3. Для обеспечения лучших параметров ЭОП, в состав которого будет входить катодный узел, рекомендуется выбирать максимально высокое значение диэлектрической проницаемости, однако строгих ограничений данный фактор на функционирование катодного узла не накладывает.

Максимальное значение  $W_e$  определяется работой выхода материала фотокатода и длиной волны, падающего на его поверхность света, и находится в диапазоне  $W_e \in [0..5]$  эВ [Spicer W. E., Herrera-Gomez A., Modern Theory and Applications of Photocathodes // SLAC-PUB-6306 SLAC/SSRL-0042 August 1993 (A/SSRL-M) Presented at SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation, San Diego, CA, July 11-16, 1993.]. В катодном узле плоским ламинарный поток электронов будет сформирован при значении напряженности  $E$  много большей собственных энергий фотоэлектронов  $W_e$ . Таким образом, при условии  $E \gg 50$ , [В/мм] для потока электронов, вылетевших поверхности фотокатода 1, получится сформировать структуру, необходимую для пролета через катодный узел ЭОП без потерь на поверхностях его элементов, тем самым, снимая ограничения с предела нижней границы динамического диапазона и увеличивая значение ОСШ. Также, при значениях напряженности поля  $E$  меньше обозначенного невозможно обеспечить рассасывание пространственного объемного заряда, что приводит к невозможности снятия ограничения с верхнего предела динамического диапазона.

Для формирования такого, нерасходящегося потока электронов в поле  $E$ , также необходимо, чтобы поле на границе пучка, создаваемое электродами, удовлетворяло следующим условиям: распределение потенциала вдоль границы пучка должно описываться непрерывной функцией, определяемой законом Чайлда-Ленгмюра; нормальная к поверхности пучка составляющая напряженности поля должна равняться нулю во всех точках поверхности пучка.

Из выражения (4) можно получить функцию распределения потенциала вдоль границы пучка:

$$U(z) = \frac{1}{a^{2/3}} \cdot j^{2/3} \cdot z^{4/3} = A \cdot z^{4/3}, \quad (6)$$

где  $A = \frac{1}{a^{2/3}} \cdot j^{2/3} = 5,69 \cdot 10^3 \cdot j^{2/3}$ , Вольт/мм<sup>4/3</sup> [В/мм<sup>4/3</sup>]

Совместим начало координат с границей пучка в исходной плоскости ( $z = 0$ ) и направим ось  $OY$  перпендикулярно к широкой стороне пучка. Для нахождения распределения потенциала вне электронного пучка необходимо решить двумерное уравнение Лапласа с граничными условиями  $U(z)_{y=0} = A \cdot z^{4/3}$ , и  $\frac{\partial U}{\partial y}_{y=0} = 0$ .

В силу того, что  $\frac{\partial U}{\partial y}_{y=0} = 0$  (напряжение на границе пучка является константой) известно, то для определения  $U(y,z)$  можно воспользоваться тем, что любая функция комплексного переменного, а также ее действительная и мнимая части удовлетворяют уравнению Лапласа, без решения данного уравнения. Представив  $U(y,z)$  в виде действительной части функции комплексного переменного ( $z+iy$ ) получим:

$$U(y, z) = \text{Re}[f(z + iy)] = \frac{1}{2} \cdot [f(z + iy) + f(z - iy)]. \quad (7)$$

Введенная таким образом функция (7) удовлетворяет уравнению Лапласа и указанным граничным условиям. Согласно первому граничному условию для области вне пучка ( $y > a/2$ ):

$$\begin{aligned} U(y, z) &= \text{Re} \left[ A \cdot (z + iy)^{4/3} \right] = \text{Re} \left[ A \cdot (z^2 + y^2)^{2/3} \cdot e^{i\frac{4}{3}\theta} \right] = \\ &= A \cdot (z^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3}\theta\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\theta = \text{arctg} \frac{y}{z}$  (фиг. 1).

Уравнение (8) описывает распределение потенциала вне пучка ( $y > a/2$ ), обеспечивающее существование ленточного пучка. Обозначим потенциал ускоряющего электрода 3 (анода)  $U_a$ , длину пучка  $L$  между катодом 1 и анодом 3 и введем безразмерные координаты  $\frac{y}{L}$  и  $\frac{z}{L}$ . Тогда, используя уравнение (7), можно получить распределение потенциала вне пучка в виде семейства эквипотенциальных линий  $\frac{U}{U_a} = \text{const}$  в плоскости  $YOZ$  (фиг. 4), определяющее вид поверхности проекции изогнутого электрода 3 в этой плоскости (фиг. 1).

Причем все эквипотенциальные линии  $\frac{U}{U_a} > 0$  подходят к границе пучка под прямым углом. Только эквипотенциальная линия, соответствующая катоду 1 ( $U = 0$ ), является плоскостью, образующей с поверхностью фотокатода 1 угол  $\theta_0$ :

$$A \cdot y^{4/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3}\theta_0\right) = 0, \quad (9)$$

откуда следует, что  $\theta_0 = \frac{3\pi}{8} = 67,5^\circ$ . Полученное в расчете значение  $\theta_0 = \frac{3\pi}{8}$  позволяет достигнуть максимально возможные характеристики ЭОП. При иной геометрии катодной насадки 2, например, в случае, если стороны выреза ортогональны поверхности фотокатода ( $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ ) в электрическом поле на участке катод 1 - электрод 3 образуется потенциальная яма, величина которой пропорциональна  $h$ , в которой происходит скопление электронов и увеличение пространственного объемного заряда. Тем не менее, в такой геометрии можно компенсировать пространственный объемный заряд за счет увеличения разницы потенциалов  $\Delta U$ , что наложит соответствующие электротехнические ограничения на режим функционирования ЭОП, но позволит добиться расширения границ динамического диапазона. В случае стороны выреза насадки 2 имеют угол наклона стремящийся к  $0^\circ$  конструкция катодного узла по существу приближается к конструкции плоского конденсатора, в котором, как показано в [Streak-Tubes: Photonis Brochure 16 p. // <http://pdf.directindustry.com/pdf/photonis/streak-tube/82199-327237.html>] также можно добиться расширения динамического диапазона, за счет дополнительных фокусирующих систем и увеличения  $\Delta U$ . При этом так как на апертуре электрода 3 отсутствует сетка, улучшение ОСШ и нижней границы динамического диапазона достигается в приведенной конструкции катодного узла в любом случае.

Таким образом, катодный узел позволяет расширять динамический диапазон ЭОП и увеличивать ОСШ при углах наклона  $\theta_0$  сторон выреза насадки 2 для ширины изображения  $b$  (в плоскости  $OYZ$ ) в диапазоне  $\theta_0 \in (0, \frac{\pi}{2})$ , имея при этом максимальный эффект для углов наклона близких к значению

$\theta_0 = \frac{3\pi}{8}$ . Для высоты изображения  $a$  (в плоскости  $OYZ$ ) ограничений на углы наклона и форму сторон выреза нет.

Вместе с указанной формой выреза в насадке 2 для формирования плоского нерасходящегося электронного пучка без переверота изображения в поле  $E$  также необходимо, чтобы профиль проекции ближайшей к фотокатоду 1 поверхности ускоряющего электрода 3 на плоскость  $OYZ$  (фиг. 1) повторял форму эквипотенциальной поверхности  $U = U_a$ . При этом уравнение (1), описывающее форму данной проекции, при фиксированном расстоянии  $L$  между фотокатодом 1 и ускоряющим электродом 3, может быть получено из уравнений (6) и (8), путем замены координаты  $z$  на оптической оси прибора на  $L$  [Жигарев А.А., Электронная оптика и электронно-лучевые приборы, М., "Высшая школа", 1972, 539с]:

$$(L)^{4/3} = (z^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \arctg \frac{y}{z}\right). \quad (10)$$

Такая форма электрода 3 является идеализированной, и катодный узел может функционировать с учетом допусков и посадок при изготовлении. Однако, величина отклонения  $\Delta L$  от указанной в формулах величины  $L$  приведет к пропорциональному снижению параметров прибора.

При этом расстояние пролета электронов в пространстве ускоряющего электрода 3 определяется длиной выреза  $H$  и влияет на дальнейшую фокусировку электронного пучка. При этом чем дальше электронный пучок находится в потенциальной яме, образованной внутри электрода 3, тем сложнее сохранить его структуру, так как наличие пространственно объемного заряда неизбежно приводит к разлету электронов друг от друга. Следовательно, для обеспечения наилучших параметров ЭОП значение  $H$  следует выбирать минимально возможным для каждой ЭОС ЭОП. При  $H$  сравнимой с  $L$ , величина потенциальной ямы внутри электрода 3 будет достигать значений, не позволяющих сформировать электронный пучок, следовательно, улучшения ОСШ и расширения границ динамического диапазона достигнуть не удастся. Таким образом, для достижения технического результата необходимо обеспечить значение  $H$  не больше  $L$ . Аналогичное ограничение вводится и для толщины  $h$  насадки 2, она должна быть не больше  $L$ . При нарушении введенного ограничения, величина потенциальной ямы будет достаточной, для того, чтобы увеличение верхней границы динамического диапазона было невозможно.

Устройство работает следующим образом: фотокатод 1, преобразует оптическое излучение в поток фотоэлектронов, выход которых с поверхности фотокатода 1 происходит в пределах рабочей области размерами не менее  $a \times b$ . Полученный поток фотоэлектронов формируется в ленточный пучок под воздействием электрического поля  $E$ , образованным в соответствии с указанной геометрией катодной насадки 2 и ускоряющего электрода 3 на расстоянии  $L$  от поверхности фотокатода 1, при разнице потенциалов на данном участке соответственно равной,  $\Delta U$ . Причем, если  $\Delta U$  находится в таком диапазоне, при котором для напряженности поля на участке фотокатод 1 - ускоряющий электрод 3 выполняется условие  $E \geq 6$  кВ/мм, то ускорение фотоэлектронов будет достигать оптимальных значений, тем самым, наилучшим образом устраняя проблему накопления пространственного заряда в этой области ЭОС по времени и снимая ограничение по верхней границе динамического диапазона ЭОП. Также, указанная геометрия накладки 2 и ускоряющего электрода 3 приводит к равномерному распределению траекторий электронов в плоском ленточном электронном пучке. Такой ленточный пучок гарантирует равномерное распределение объемного заряда электронов в пространстве и минимальные временные aberrации, возникающие в пролетном пространстве катодной камеры за счет изохронности траекторий электронов. Наибольшая плотность пространственного заряда, очевидно, находится в области пересечения траекторий и в зоне, ближайшей к поверхности фотокатода 1, так как электроны не имеют вначале пролета большого ускорения и сосредоточены в одной точке пространства ЭОС в короткий промежуток времени. Моделирование работы хронографического ЭОП, использующего разработанный катодный узел, в программе расчета методом конечных элементов Comsol Multiphysics [<http://www.comsol.ru>] в сравнении с работой известного серийного ЭОП ТПО30-01 [<http://www.vniia.ru/production/electrovacuumnietrigorv/rkrktrovakuumnye-pribory.php>] показало, что плотность объемного заряда на начальном этапе пролета электронов в катодной камере с плоским ленточным электронным пучком минимум на порядок меньше, чем в приборе с аксиально-симметричной оптикой, при одинаковом режиме работы приборов. Зависимость нормированного значения интегральной плотности пространственного объемного заряда от координаты по оптической оси для ЭОП с ленточным пучком, сформированным в катодном узле и ЭОП ТПО30-01 в стандартном режиме питания приведены на фиг. 5. Как следует из графиков на фиг. 5 интегральная плотность объемного пространственного заряда электронов в катодном узле с плоским ленточным пучком меньше данного значения в электронно-оптической системе (ЭОС) с аксиально-симметричной оптикой (ТПО30-01) не менее чем на порядок. Таким образом, решена проблема с ограничением верхней границы динамического диапазона хронографического ЭОП с катодной камерой, в которой сформирован плоский ленточный пучок без переверота изображения, позволяя увеличить данный параметр не менее чем на порядок, в зависимости от режимов питания ЭОП.

Отсутствие сетки на ускоряющем электроде 3, и электрическое поле, приведенное на фиг. 4, позволяют получить количество потерь фотоэлектронов в такой катодной камере близкое к нулю. Очевидно, что при отсутствии сетки на ускоряющем электроде 3 оптическая проходимость ЭОС (отношение коли-

чества электронов, долетевших до конца катодной камеры, по отношению к количеству вылетевших с фотокатода 1) будет составлять 100%, в то время как наличие сетки с любым уровнем прозрачности будет приводить к пропорциональному коэффициенту прозрачности снижению данного параметра. Таким образом, сигнал в системе с ленточным пучком без переверота изображения будет сохранять значение, равное значению на фотокатоде, и при равном значении фонового шума параметр отношение сигнал-шум у такого прибора лучше, чем у прототипа и у аналогичных ЭОП с сеткой в их ЭОС. Следовательно, ЭОП с катодным узлом, формирующим плоский ленточный пучок без переверота изображения, не имеет ограничений, связанных с потерями амплитуды сигнала, для нижней границы динамического диапазона.

Отсутствие пересечения траекторий в ленточном пучке, сформированном в такой катодной камере, гарантирует минимальные дисторсии изображения на выходе из катодной камеры, устраняя, таким образом, ограничения на предельные значения временного и пространственного разрешения ЭОП. Ленточный пучок, сформированный в катодной камере такого типа, не расходится по высоте изображения (b) и многократно сжимается по направлению развертки (a), в результате чего оптическое увеличение электронно-оптической системы прибора с такой катодной камерой не может быть больше единицы для всех направлений электронного пучка.

Таким образом, достигается заявленный технический результат, а именно расширение динамического диапазона хронографического ЭОП не менее чем на порядок по сравнению с прототипом и увеличение ОСШ на величину, пропорциональную прозрачности сетки, используемой в прототипе.

#### Литература

1. Пат. США US5221836, H01J 31/50, 1993.06.22.
2. Streak-Tubes: Photonis Brochure 16 p. // <http://www.photonis.com>.
3. Пат. США US4310857, H04N 5/30, 1982.01.12.
4. Пат. Япония JP5824328B2, H01J 31/42, 2015.11.25.
5. Пирс Дж.Р., Теория и расчет электронных пучков, М.»Советское радио», 1956, 217с.
6. Пат. РФ № RU 2374719 C1, H01J 31/50, 2009.11.27 (прототип).
7. Жигарев А.А., Электронная оптика и электронно-лучевые приборы, М., «Высшая школа», 1972, 539с.
8. Spicer W. E., Herrera-Gomez A., Modern Theory and Applications of Photocathodes // SLAC-PUB-6306 SLAC/SSRL-0042 August 1993 (A/SSRL-M) Presented at SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation, San Diego, CA, July 11-16, 1993.
9. Comsol Multyphysics.// <http://www.comsol.ru>.
10. <http://www.vniia.ru/production/electrovacuumnie-pribory/rlrktrovakuumnnye-pribory.php>

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Катодный узел хронографического электронно-оптического преобразователя, содержащий плоский фотокатод с прямоугольным рабочим полем размерами a и b, расположенным параллельно соответствующим осям OX и OY в плоскости OXY, перпендикулярно оптической оси электронно-оптического преобразователя OZ, центр рабочего поля совпадает с началом декартовой системы координат OXYZ,

металлическую катодную насадку, электрически связанную с фотокатодом, металлический ускоряющий электрод, который удален на расстояние L от фотокатода и электрически развязан от него, при этом фотокатод, насадка и ускоряющий электрода расположены соосно по оптической оси OZ, отличающийся тем, что

металлическая катодная насадка представляет собой пластину, одной из своих поверхностей прилегающую к плоскости фотокатода, толщиной h между указанной поверхностью и параллельной ей, со сквозным вырезом по направлению оси OZ, проекция которого в плоскости OYZ представляет собой трапецию, меньшее основание которой находится в плоскости фотокатода и имеет длину не менее b, боковые стороны трапеции расположены симметрично плоскости OXZ, при этом угол между осью OZ и боковыми сторонами находится в диапазоне  $\theta_0 \in (0.. \frac{\pi}{2})$ , проекция выреза на плоскость OXZ представляет собой фигуру, симметричную относительно плоскости OYZ, имеющую длину по оси OX не менее a,

металлический ускоряющий электрод изогнутой формы, проекция ближайшей к фотокатоду поверхности которого на плоскость OYZ имеет профиль, описываемый уравнением кривой:



$$(L)^{4/3} = (z^2 + y^2)^{2/3} \cdot \cos\left(\frac{4}{3} \arctg \frac{y}{z}\right),$$

ускоряющий электрод имеет сквозной вырез в форме параллелепипеда, проекции которого в плоскостях, параллельных поверхности фотокатода, представляют собой прямоугольник, длины сторон которого совпадают по размерам и расположению с проекцией выреза катодной насадки в плоскости фотокатода, а центр прямоугольника совпадает с осью  $OZ$ , при этом длина проекции выреза на ось  $OZ$  не менее  $H$ , на которую, как и на толщину  $h$  катодной насадки по оси  $OZ$ , накладываются следующие условия:

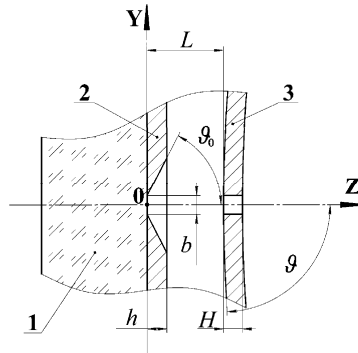
$$H < L, h < L,$$

где  $L$  зависит от напряженности  $E$  на участке катод-ускоряющий электрод, по формуле:

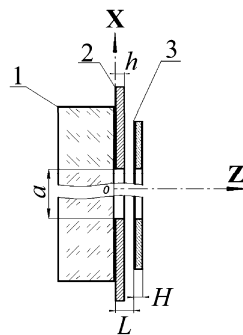
$$L \ll \frac{e \cdot W_e}{E},$$

где  $E$  - напряженность электрического поля на участке катод-ускоряющий электрод, причем  $E \gg 50$ , [В/мм],  $W_e$  - максимальная начальная энергия электронов, покидающих фотокатод, которая определяется свойствами его материала и находится в диапазоне  $W_e \in [0..5]$  электрон-вольт, [эВ],

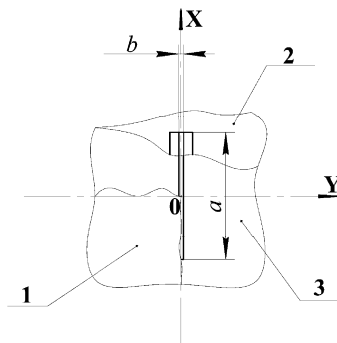
$e$  - элементарный электрический заряд, кулон, [Кл].



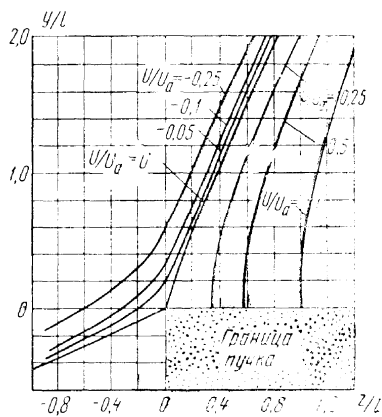
Фиг. 1



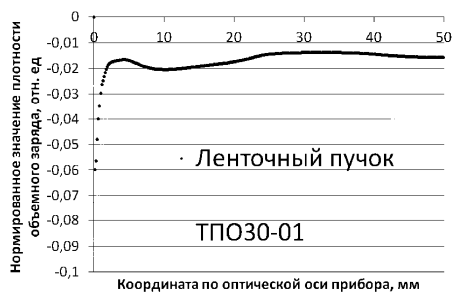
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

