



ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ГИБРИДНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.Медведев, главный конструктор ОАО "РОМЗ", design@romz.ru; Д.С.Соколов, к.т.н., главный конструктор ООО "МЭЛЗ-ФЭУ"

Представлены результаты уникальных работ по созданию, производству и применению перспективного низкоуровневого гибридного преобразователя изображения. Преобразователь создан на базе комбинации электронно-оптического преобразователя и прибора с зарядовой связью. Рабочий спектральный диапазон устройства продлен до 1,3 мкм. Статья заинтересует инженеров-практиков и специалистов, занимающихся разработкой оптико-электронных приборов и приборов ночного видения.

Целя эпоха в разработке и изготовлении приборов ночного видения была тесно связана с совершенствованием технологии изготовления электронно-оптических преобразователей (ЭОП), а в частности – их фотокатодов.

Простейшие ЭОП с плоскопараллельными фотокатодами и экранами и переносом изображения однородным электростатическим полем обладали существенными недостатками – сравнительно небольшим коэффициентом преобразования, низкой разрешающей способностью, а также имели малый контраст изображения. Увеличение коэффициента преобразования и разрешающей способности посредством повышения ускоряющего (анодного) напряжения имеет ограничения, связанные с опасностью возникновения электрического пробоя и наличием автоэлектронной эмиссии с катода. Снижение контрастности объясняется оптической обратной связью: излучение экрана освещает фотокатод, испускаемые катодом электроны возбуждают рассеянное свечение экрана (фон), снижающее контраст.

Поэтому фотокатоды первых электронно-оптических преобразователей имели чувствительность от 100 до 150 мкА/лм. Однако со временем, за счет использования новых материалов и совершенствования технологий, появились преобразователи, чувствительность фотокатода которых достигла значений 2000–2500 мкА/лм,

а длинноволновая граница чувствительности сдвинулась до $\lambda \approx 1,8$ мкм.

Казалось бы, привычный ЭОП с многощелочным фотокатодом должен был затеряться в этой череде сверхновых, а соответственно и сверхдорогих, преобразователей изображения. Однако сбрасывать его со счетов пока преждевременно, например ЭОП фирмы Fotonis обладают чувствительностью не менее 800 мкА/лм. Проведенный анализ качества этих ЭОП показал, что они не уступают по пороговым характеристикам ЭОП поколения 3 (ЭОП, обладающим бипланарной конструкцией и фотокатодом из GaAs). Прибавьте к этому целый ряд эксплуатационных преимуществ, даже если не обращать внимания на их более низкую цену.

Поэтому ООО "МЭЛЗ-ЭВП" (Москва), совместно с ОАО "РОМЗ", (Ростов-Ярославский), поставили перед собой цель – создать на базе технологии многощелочного фотокатода недорогой, высокоэффективный преобразователь изображения, не уступающий по характеристикам и эксплуатационным возможностям лучшим современным ЭОП. В конструкции преобразователя применено сочетание двух технологий – планарных электронно-оптических преобразователей и телевизионных фотоприемников. За основу была взята конструкция ЭОП поколения 2+ (ЭОП с бипланарной конструкцией и многощелочным фотокатодом) без микрочанальной пластинки



(МКП). Соединение ЭОП с прибором с зарядовой связью (ПЗС) обеспечивает оптический контакт. ПЗС непосредственно пристыковывался к катодолуминоесцентному экрану, размещенному на выходной поверхности волоконно-оптического элемента (ВОЭ). ВОЭ был расположен на выходе ЭОП, поэтому оптическому элементу была придана специальная прямоугольная форма.

Предлагаемая технология по простоте изготовления сегодня не имеет себе равных. Это дает возможность наладить массовый выпуск приборов, и цена такого гибридного устройства, по прогнозам аналитиков, весьма невелика. В состав преобразователя входит блок вакуумный, высоковольтный преобразователь напряжения, ПЗС-матрица ICX419ALL производства фирмы SONY, микросхемы синхрогенератора и управления, усилителя и корректора, а также преобразователя напряжений для питания матрицы (рис.1). Блок вакуумный представляет собой стеклянную колбу, в которой размещены пластины фотокатода и экрана, покрытого люминофором. Люминофор нанесен на торец оптоволоконной пластины, который одновременно

является экраном, электрически соединенным с кольцевым выводным контактом.

Специалисты считают перспективными фотокатоды на основе соединений $A_{IV}D_V$ с приложением электрического поля, облегчающего выход электронов в вакуум. Такая конструкция дает возможность получать фотоэмиссию в диапазоне до $\lambda=1,8$ мкм. То есть увеличение напряженности электрического поля напрямую связано с повышением эффективности работы фотокатода. Хотя образцы ЭОП с такими фотокатодами и были получены [1], однако создать серийную технологию для их производства до сих пор не удалось. Основная причина – в том, что наличие в фотокатоде сильного электрического поля (до 50 000 В/см) неизбежно приводит к большому браку по качеству изображения (наличие однородностей, дефектов, автоэмиссия) и снижению параметров надежности (электрическая прочность, время непрерывной работы и др.).

То, что именно этот факт вызывает брак по качеству изображения, подтвердили изыскания, в ходе которых была предпринята попытка поднять

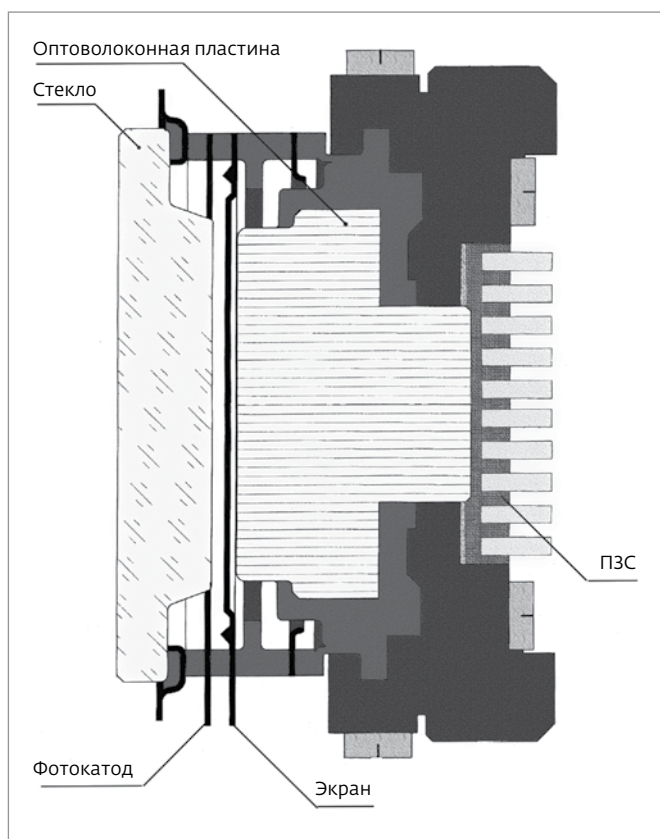


Рис.1. Конструкция высокоэффективного гибридного преобразователя изображения

напряженность поля до 80 000–100 000 В/см, исключив из конструкции ЭОП поколения 2+ устройство МКП. По описанной выше причине этот этап работ окончился неудачей. При увеличении напряженности выше 30 000 В/см появилось большое количество автоэмиссионных точек, возникли пробой, свечения и т.п. Следует отметить, что фотокатод в экспериментальном ЭОП изготавливался по классической технологии многощелочного фотокатода.

Поэтому для того, чтобы получить низкие пороговые характеристики преобразователя ЭОП+ПЗС было принято решение доработать технологию изготовления многощелочного фотокатода и поднять напряженность поля до 80 000–100 000 В/см. При этом решение было принято с учетом того, что именно повышение напряженности (напряжения) позволит достичь высокого коэффициента усиления планарного ЭОП. Новые разработки подтвердили, что при новой технологии чувствительность фотокатода при рабочем напряжении возросла в 1,4–2,0 раза по сравнению с базовой чувствительностью (за базовую принята чувствительность при

напряженности поля 2000 В/см), и граница чувствительности сдвинулась в длинноволновую область до $\lambda = 1,3$ мкм.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Основным энергетическим параметром ЭОП является коэффициент преобразования η_B , определяющийся отношением яркости выходного экрана к облученности входного фотокатода [2].

В общем виде коэффициент преобразования яркости может быть описан зависимостью:

$$\eta_B = S_k U_a \gamma (1/\Gamma)^2,$$

где S_k – чувствительность фотокатода к падающему на него излучению (А/Вт); U_a – анодное напряжение ЭОП (В); γ – светоотдача экрана ЭОП (кд/Вт); Γ – электронно-оптическое увеличение ЭОП.

При оценке следует учитывать и параметры высокочувствительного ПЗС-фотоприемника, который работает в совокупности с ЭОП. Параметры его должны быть достаточно высоки. Как правило, в паспорте на ПЗС-приемник указана пороговая освещенность, равная $E_{ПЗСпор} = 0,005$ лк при отношении "сигнал-шум" $S_{сш} = 10$, которая измерена по мере 100% контраста с объективом, имеющим светосилу 1:1,2.

При этом коэффициент преобразования определен по яркости, в связи с чем необходимо учесть связь между освещенностью и яркостью, описываемую соотношением [3]:

$$E = \rho B / \rho,$$

где ρ – коэффициент отражения.

Если принять коэффициент отражения ρ равным 1, можно вычислить коэффициент усиления исследуемого преобразователя по формуле, связывающей коэффициент преобразования η_B и коэффициент усиления η_L :

$$\eta_L = \eta_B / \rho.$$

Пороговая чувствительность рассматриваемого преобразователя может быть описана выражением:

$$E_{пор} = (E_{ПЗСпор} / \eta_L) \cdot (1/S_{сш}) \cdot (1/\tau_{воп}),$$

где $\tau_{воп}$ – коэффициент пропускания волоконно-оптической пластины.

При расчетах коэффициент $\tau_{\text{воп}}$ целесообразно принять равным 0,5, так как значение 50% – типовое значение светопропускания для волоконно-оптической пластины с диаметром волокна, определяющим разрешающую способность, равным 7,2 мкм.

Проведенные расчетные оценки исследуемого преобразователя показали, что его пороговая чувствительность имеет значение $E_{\text{пор}} \approx 2 \cdot 10^{-6}$ лк. Это вполне рекордный показатель пороговой характеристики для отношения "сигнал-шум", равного единице.

Реальная освещенность, при которой, как правило, обеспечивается наблюдение на местности, будет зависеть как от задаваемого отношения "сигнал/шум", так и от реального контраста цели, т.е. при $S_{\text{сш}} = 10$ величина $E_{\text{пор}}$ составит $\sim 8 \cdot 10^{-5}$ лк, а при контрасте цели, равном 0,5 (по результатам эмпирических вычислений и экспериментальных исследований), видимость будет обеспечиваться на уровне освещенности $E_{\text{пор}} \sim 1 \cdot 10^{-4}$ лк.

На базе ЭОП+ПЗС были изготовлены низкоуровневые преобразователи изображения с передачей сигналов изображения в аналоговой и цифровой форме (рис.2). В окончательном



Рис.2. Вакуумный блок в сборе и вакуумный блок в металлокерамическом корпусе

варианте низкоуровневый преобразователь изображения представляет собой ЭОП, состыкованный с ПЗС. В вакуумном объеме металлокерамического корпуса ЭОП установлен фотокатод, нанесенный на внутреннюю поверхность входного окна, и ВОЭ с катодолюминесцентным



Рис.3. Зависимость чувствительности преобразователя от длины волны: а) – нагретый паяльника при освещенности $5 \cdot 10^{-4}$ лк; б) – е) нагретый паяльник при отсутствии освещенности (фото расположены в порядке, соответствующем остыванию жала паяльника)

экраном на входной поверхности. При этом светопропускание ЭОП с учетом алюминиевого и светопоглощающего покрытия с коэффициентом поглощения не менее 0,97 составляет не более 0,01%. ПЗС совмещается с площадкой, сформированной на выходной поверхности ВОЭ ЭОП, через слой иммерсионной жидкости. При этом расстояние между ними не превышает 1 мкм при показателе преломления иммерсионной среды около 1,5. Наружная поверхность ВОЭ за пределами вакуумного блока, за исключением стыковочной площадки, покрыта поглощающим покрытием с коэффициентом поглощения не менее 0,97. Металлокерамический корпус ЭОП жестко механически связан с корпусом ПЗС и дополнительно соединен с ним с помощью компаунда. Свободное пространство между наружной поверхностью ВОЭ, стенками корпуса ПЗС и крепежными элементами заполнено компаундом со светопропусканием не более 0,03 в направлении выходной поверхности ВОЭ. Следует отметить, что размер сформированной на выходной поверхности ВОЭ площадки строго соответствует размеру площадки чувствительного элемента ПЗС, а напряжение питания устройства не

превышает 10 В. Изложенное конструктивное решение низкоуровневого преобразователя изображения защищено патентом РФ в виде фотоэлектронного устройства. Решение о выдаче патента принято в августе 2012 года (заявка № 2011132928/07(048544)).

Результаты работ над высокоэффективным преобразователем ЭОП+ПЗС представлены на рис.3. Фотографии жала паяльника с начальной температурой 150°C выполнены с экрана монитора и иллюстрируют сдвиг чувствительности в более длинноволновую часть спектра. На рис.4 показана зависимость разрешающей способности преобразователя изображения (ЭОП+ПЗС+схема обработки+монитор) от освещенности миры, приведенной к фотокатоду (частота кадров изображения 50 Гц). Для определения возможности использования в преобразователе ЭОП различных поколений были проведены сравнительные испытания ЭОП+ПЗС, где в качестве ЭОП используется ЭОП поколения 3 и поколения 2+. Испытания показали, что ЭОП+ПЗС на ЭОП поколения 2+ имеет преимущества при освещенностях $2 \cdot 10^{-5}$ лк и выше, а разрешающая способность ЭОП+ПЗС на ЭОП 3-го поколения выше на 20% при

освещенности 10^{-5} лк. В результате анализа было выяснено, что причиной этого стало увеличение количества сцинтилляций (шумов), вызванных сдвигом чувствительности фотокатода в длинноволновую область спектра.

Для компенсации этого эффекта была разработана схема обработки сигнала при низких уровнях освещенности (ниже 10^{-4} лк на фотокатоде), предусматривающая накопление и передачу информации по четырем смежным кадрам изображения. Разработана оригинальная схема обработки сигнала с ПЗС, предусматривающая компенсацию темновой неоднородности и фоновой составляющей с последующим повышением коэффициента контраста до 30 раз.

Исследования показали, что ЭОП+ПЗС в этом варианте исполнения при освещенностях на фотокатоде 10^{-5} лк и выше превосходит все известные варианты прибора ЭОП+ПЗС, существующие в мире. А по диапазону чувствительности и ценовым показателям аналогов в мире данному преобразователю на данный момент просто не существует.

Уже создано производство преобразователей изображения с использованием матричных сенсоров компании SONY Image Sensors модели

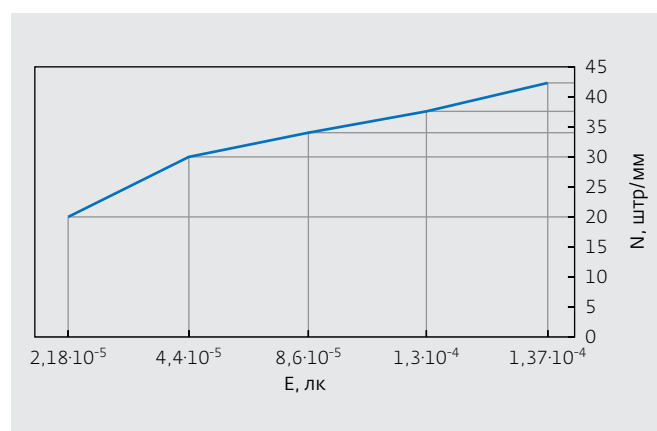


Рис.4. Зависимость разрешающей способности преобразователя от освещенности на мише

ICX419ALL формата 1/2". Однако работы над совершенствованием конструкции пока еще не прекращены. Уже проработан вариант преобразователя изображения, в котором при снижении освещенности на фотокатоде с величин $5 \cdot 10^{-5}$ лк автоматически включается режим увеличения времени экспозиции в 2 раза, а при дальнейшем понижении освещенности (ориентировочно до 10^{-5} лк) – еще в 2 раза. В этом

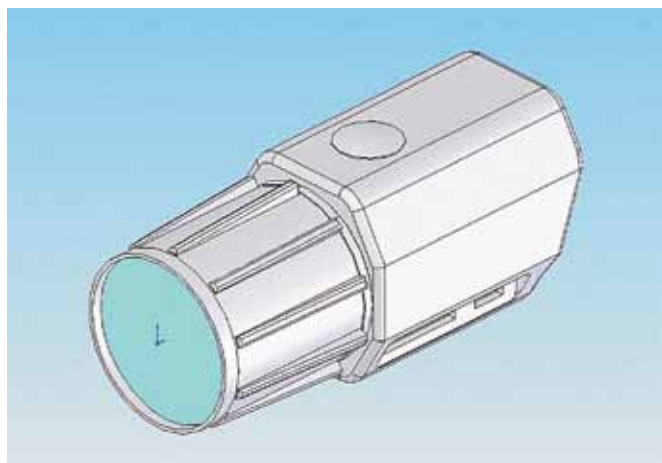


Рис.5. Ночная камера

варианте исполнения достигаемое рабочее разрешение составляет не менее 25 штр/мм при величине освещенности на фотокатоде 10^{-5} лк. Для увеличения используемой площади фотокатода и дальнейшего увеличения чувствительности, ориентировочно на 25%, планируется уже в ближайшее время использовать в преобразователе изображения ПЗС-матрицу модели ICX 423AL формата 2/3".

На базе высокоэффективного преобразователя изображения разработаны, изготовлены или находятся в стадии изготовления образцы целого ряда изделий.

Ночная камера (рис.5) – многофункциональный наблюдательный оптико-электронный прибор, предназначенный для наблюдения и регистрации объектов в условиях освещенностей на местности от 10^{-4} до 100 лк и преобразования излучения в видеосигнал стандарта CCIR. Ночная камера имеет угловое поле зрения $4^\circ \times 6^\circ$, разрешающую способность 80 штр/мм и дальность видения порядка 1000 м при освещенности на местности $E=10^{-3}$ лк. Камеру можно стационарно устанавливать на неподвижных основаниях и штативах. Она также оснащена специальными переходными элементами для крепления на различных типах оружия.

Для регистрации информации о наблюдаемых объектах в конструкции предусмотрены специальные гнезда для подключения различных формирователей служебной информации, USB-выход и встроенный FLASH-регистратор с объемом памяти 16 Гб.

Для визуального наблюдения объектов к камере может быть подключено видеопросмотровое устройство, выполненное в виде блока

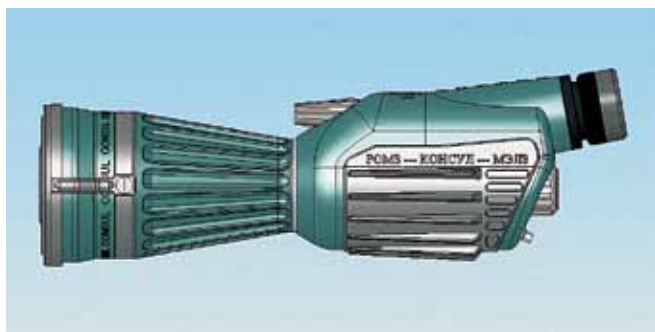


Рис.6. Ночной монокуляр "КОНСУЛ"

компактного монитора или в виде блока микродисплея с окулярным выходом. Видеопросмотровое устройство может быть пристыковано непосредственно к камере, а также использовано в разнесенном виде с радиусом размещения порядка 1 м. При этом связь с камерой может быть как проводной, так и осуществляться по ИК- или радиоканалу.

Ночной монокуляр "КОНСУЛ" (рис.6) – это принципиально новый оптико-электронный наблюдательный прибор, являющийся результатом сочетания современных оптических и цифровых технологий. В дополнение к высокоэффективному преобразователю изображения он оснащен 116-миллиметровым объективом с улучшенными частотно-контрастными характеристиками и окуляром, обеспечивающим четкость и контрастность изображения по всему полю зрения, в том числе и в периферийной зоне. Прибор оснащен видеовыходом для трансляции изображения на экран монитора и видеозаписи, штативным гнездом 1/4"

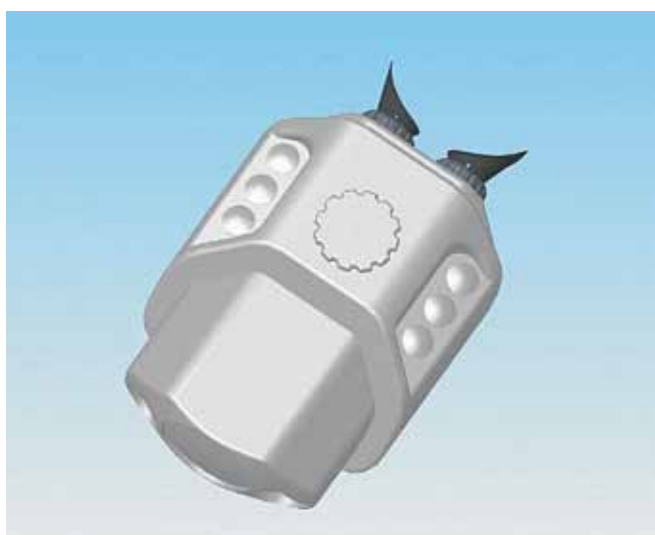


Рис.7. Дневно-ночной бинокулярный прибор



для удобства работы при длительном наблюдении, наблюдении на экране и ведении видеозаписи.

Дневно-ночной биноклярный прибор (рис.7) – универсальный носимый оптико-электронный прибор наблюдения является прибором с автоматическим переключением режимов работы, предназначенным для наблюдения объектов в условиях освещенностей на местности от 10^{-4} до 10^5 лк. Применение высокоэффективного преобразователя ЭОП+ПЗС обеспечивает работу изделия в ночном режиме. При переходе на дневной режим в качестве приемника используется КМОП-матрица.

В приборе предусмотрен автоматический переход с дневного режима работы на ночной путем переключения подвижного наклонного зеркала, установленного внутри объектива с переменным фокусным расстоянием. При работе в ночном режиме с преобразователем ЭОП+ПЗС бинокль обеспечивает поле зрения $8^\circ \times 12^\circ$ при фокусе 32 мм и $2,3^\circ \times 3,4^\circ$ при фокусе 105 мм. Дальность видения изделия – от 300 до 1000 м при различных фокусах объектива. При работе днем с КМОП-приемником бинокль обеспечивает поле зрения $8^\circ \times 12^\circ$ при фокусе 32 мм и $2,3^\circ \times 3,4^\circ$ при фокусе 105 мм. Дальность видения изделия – от 300 до 1000 м при различных фокусах объектива.

Специалисты предприятия активно работают над проектированием дневно-ночного прицела для стрелкового оружия на базе нового преобразователя. В планах оснастить существующие прицельно-наблюдательные приборы двух-спектральными однообъективными каналами, использующими в качестве приемников излучения преобразователь изображения ЭОП+ПЗС на спектральный диапазон 0,8–1,3 мкм и ИК-болومتر на спектральный диапазон 8–14 мкм. Такая конструкция обеспечит выдачу телевизионного, тепловизионного и комплексированного изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мускатов Л.А.** Фотоэмиттеры с отрицательным электронным средством, итоги науки и техники, серийная электроника и ее применение. – М.: Издательство Т-П, 1979.
2. **Куклев С.В., Соколов Д.С., Зайдель И.Н.** Электронно-оптические преобразователи. – М.: Машиностроение, 2004.
3. **Панов В.А., Кругер М.Я. и др.** Справочник конструктора оптико-механических приборов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1980.