УДК 621.383.8.004.14

Д.Н. Николаев

Электронно-оптические преобразователи. История развития и виды поколений

Рассмотрены электронно-оптические преобразователи (ЭОП), принцип работы, основные технические характеристики и виды поколений ЭОП I, II, III, IV и V (с некоторыми промежуточными ступенями I+,II+).

Области применения ЭОП достаточно широки, например, в медицине, астрономии и т.д. Они применяются в приборах ночного видения (ПНВ), который и является главным признаком, по которому различаются поколения ПНВ. По сути своей ЭОП — это вакуумный фотоэлектронный прибор, обеспечивающий преобразование невидимого глазом изображения объекта (в инфракрасных, ультрафиолетовых и рентгеновских лучах) в видимое либо для увеличения (усиления) яркости видимого изображения.

В основе действия ЭОП лежит преобразование оптического или рентгеновского изображения в электронное, осуществляемое с помощью фотокатода, а затем — электронного изображения в световое (видимое), получаемое на катодолюминесцентном экране. Изображение объекта проецируется на фотокатод с помощью объектива ЭОП.

Различают ЭОП одно- и многокамерные (каскадные); последние представляют собой такое последовательное соединение двух или более однокамерных ЭОП, при котором световой поток с экрана первого ЭОП (каскада) направляется на фотокатод второго и т.д.

По принятой в мире терминологии ЭОП классифицируются на пять поколений — I, II, III, IV и V (с некоторыми промежуточными ступенями I+,II+) [1, 2].

Поколение I

ЭОП этого поколения имеют спектральную чувствительность фотокатода 1,2–2,5 мА/Вт.

Отличительная особенность данных приборов в том, что изображение в центре более четкое и имеет меньшие искажения, чем по краям. Кроме этого, если в поле зрения попадают яркие источники света, например, фонари, светящиеся окна домов и др., то они могут засветить все изображение, препятствуя возможности наблюдения. При более низком освещении необходима дополнительная, чаще всего инфракрасная (ИК) подсветка [2].

Многокаскадные ЭОП поколения I

Для увеличения коэффициента усиления ЭОП иногда последовательно стыкуют два, три или более приборов, собирая конструктивно их в один корпус. Коэффициент усиления света трехкаскадного ЭОП составляет 20 000 – 50 000. Однако при стыковке приборов сильно растут искажения и падает разрешение по краям поля изображения. Устройства, построенные на многокаскадных ЭОП, получаются очень громоздкими и тяжелыми, поэтому в последнее время их практически вытеснили малогабаритные приборы I+ и II поколения, имеющие лучшие характеристики.

Поколение I+ (Super I+ в зарубежной литературе)

Это дальнейшее развитие ЭОП поколения I. На входе (иногда на выходе) устанавливают вместо плоского стекла волоконно-оптическую шайбу, что позволяет значительно увеличить разрешение ЭОП, уменьшить искажение формы предмета и, кроме того, защитить изображение от засветок боковыми точечными источниками света. Характеристика таких ЭОП — усиление света составляет 1000, чувствительность фотокатода минимум 2,8 мА/Вт, разрешение в центре минимум 35 лин/мм. Приборы, построенные на ЭОП поколения I+, отличаются от приборов поколения I, прежде всего, очень четкой картинкой, низким уровнем собственных шумов и, как правило, большей дальностью действия в пассивном и активном (при использовании ИК-подсветки) режимах работы. На открытой местности приборы эффективны до уровней освещенности, соответствующих 1/4 луны (0,01 люкс) на небе. При более низких освещенностях необходима ИК-подсветка [2].

Поколение II

Конструктивно ЭОП II поколения отличается от I+ наличием специального усилителя электронов — микроканальной пластины (МКП). Различают два типоразмера ЭОП — с МКП 25 и 18 мм. С точки зрения наблюдателя, больший типоразмер обеспечивает достаточно комфортное наблюдение, но и приводит к увеличению габаритов прибора. Все приборы II поколения имеют полезную для наблюдателя возможность — ручную регулировку яркости, позволяющую выбрать оптимальное соотношение усиления яркости и уровня собственных шумов прибора для каждой конкретной ситуации наблюдения и адаптации глаза. Приборы II поколения с большим коэффициентом усиления яркости лучше всего использовать для ночной видеосъемки или фото [2].

Поколение III

ЭОП III поколения, принципиально отличающиеся от своих предшественников высокоэффективным полупроводниковым фотокатодом на основе арсенида галлия, впервые были представлены на международных выставках вооружений в 1980–1982 гг. В дальнейшем американские фирмы Litton, ITT, Varian вели интенсивные работы, финансируемые Минобороны США, по совершенствованию этих ЭОП.

На длине волны $\lambda = 830$ нм спектральная чувствительность этого катода (рис. 1) [2] составляла 190 мА/Вт, что соответствует квантовому выходу 30 % (0,3 электрона/квант), а на длине волны $\lambda = 600$ нм квантовый выход был равен 40 %. По сравнению с более ранними модификациями, за счет оптимального подбора входного полупроводникового слоя фотокатод имеет хорошую чувствительность и в «синей» части спектра (400–450 нм). Очевидно, что внесение таких значений чувствительности в документацию предполагает наличие определенного технологического запаса и возможности получения интегральной чувствительности, превышающей 2000 мкА/Лм [3].

ЭОП III поколения с расширенным диапазоном чувствительности в ИК-области

Единственным фотокатодом, чувствительным в области $\lambda > 0{,}9$ мкм, до последнего времени являлся кислородно-серебряно-цезиевый (КСЦ) фотокатод (S-1 по американской классификации), имеющий «красную» границу 1,2–1,4 мкм.

Рис. 1. Типичные спектральные характеристики современных фотокатодов:
1 — многощелочной (S-25) фотокатод; 2 — улучшенный многощелочной (Super S-25) фотокатод; 3 — фотокатод III поколения (GaAs);
4 — расширенный в ближнюю ИК-область (ENIR) фотокатод на основе InGaAs

Недостатками этого катода являются низкая интегральная чувствительность (30–50 мкА/Лм) и высокий темновой ток (10^{-13}–10^{-11} А/см^2). В силу этого ЭОП с такими фотокатодами могут использоваться практически только в ПНВ с подсветкой наблюдаемых объектов ИК-прожектором (по существующей терминологии — активных ПНВ). Такие приборы исторически были первым поколением ПНВ и могли использоваться, естественно, только против противника, не обладающего аналогичной техникой.

Несмотря на создание ЭОП с более эффективными многощелочными фотокатодами, имеющими «красную» границу 0,9 мкм, интерес к более длинноволновым фотокатодам не ослабевал как из-за более высокой интенсивности излучения ночного неба, так и из-за большей разницы в коэффициентах отражения естественных и искусственных объектов в области 0,9 мкм. Другими причинами интереса к длинноволновым фотокатодам явились создание

эффективных лазерных излучателей на основе Nd:YAG с длиной волны излучения 1,06 мкм и возможности визуализации их излучения. Последнее может быть собственной подсветкой или целеуказанием, а также излучением аналогичных средств и дальномеров противника [3].

Более успешными оказались работы по увеличению ИК-чувствительности фотокатодов III поколения путем введения в активный слой GaAs 10–15%-ной добавки индия и создания таким образом тройного соединения InGaAs, состав которого тщательно контролировался методами фотолюминесцентными и рамановской спектроскопии. В результате фирмой Litton на базе стандартной конструкции III поколения были созданы ЭОП с таким фотокатодом, названным «Extended Near IR» (расширенный в ИК-область) — сокращенно ENIR.

Такой ЭОП имеет спектральную чувствительность, представленную на рис. 1 (кривая 4), при интегральной чувствительности 300–1000 мкА/лм. На «лазерной» длине волны 1,06 мкм спектральная чувствительность составляет 0,025–0,35 мА/Вт (квантовый выход 0,003–0,04 % соответственно), что несколько меньше чувствительности КСЦ-фотокатода на этой длине волны (порядка 0,7 мА/Вт). Однако более низкий темновой ток (около $5 \cdot 10^{-14}$ А/см^2) и значительно более высокая интегральная чувствительность делают новый катод перспективным как для пассивных, так и активных ПНВ [3].

Поколение II+

В связи с высокой стоимостью первых ЭОП III поколения разработчиками ЭОП и ПНВ было принято логичное решение: параллельно с усовершенствованием и удешевлением ЭОП III поколения разработать ЭОП полностью аналогичной конструкции (включая оптические и электрические параметры) с хорошо освоенным и более дешевым многощелочным фотокатодом. Таким ЭОП предполагалось комплектовать ПНВ до начала массового производства ЭОП III поколения и затем произвести технически несложную замену «временных» ЭОП на ЭОП III поколения.

Эти «временные» ЭОП с бипланарной электростатической фокусировкой и микроканальным усилением получили название II+ поколения в отличие от II поколения с оборачивающей электростатической фокусировкой и микроканальным усилением. Предполагалось, что параметры II+ поколения будут близки к II поколению. В ходе разработок этих ЭОП наибольшего успеха добилась фирма Philips, создавшая ЭОП XX1610, намного превосходящие по параметрам II поколение и приближающиеся к ЭОП III поколения. Данные ЭОП получили зарегистрированное фирменное название SuperGen. Разрешающая способность — 36–40 лин/мм при частотно-контрастной характеристике, не уступающей ЭОП III поколения OMNI III [4].

Разработчиками SuperGen были получены хорошие шумовые характеристики ЭОП, определяемые следующими факторами. Многощелочной фотокатод является более стойким соединением по сравнению с фотокатодами III поколения и практически не деградирует под действием положительных ионов, возникающих в каналах МКП и бомбардирующих фотокатод. Поэтому в ЭОП II+ поколения нет ионно-барьерной пленки на входе МКП, применяемой в ЭОП III поколения. Эта пленка, защищая фотокатод от положительных ионов, в то же время препятствует попаданию в МКП до 30–50 % эмитируемых фотокатодом электронов. Последнее приводит к снижению эффективности детектирования фотонов и увеличению шумов ЭОП.

Помимо отсутствия ионно-барьерной пленки, снижению шумов способствовало улучшение двух важных характеристик МКП. В ЭОП SuperGen фирма Philips применила МКП, изготовленные из собственной пары стекол и по собственной технологии. Эти МКП имели повышенную прозрачность (т.е. отношение суммарной площади каналов на входной плоскости МКП к общей рабочей площади МКП) и повышенный коэффициент вторичной эмиссии при соударении электронов со стенками каналов. В итоге в этих ЭОП значение фактора шума было снижено до 1,5, в то время как для ЭОП III поколения эта величина равна 3,0–3,5 [3].

Поколение IV

В усилителях IV поколения использованы новые технологические достижения и конструкции, обеспечивающие более высокую квантовую эффективность в большей части видимого участка и ближнего ИК-участка электромагнитных волн. Благодаря новому усилителю без противоионной пленки в очках ночного видения удалось значительно повысить

дальность обнаружения объектов и разрешающую способность, особенно при очень низких уровнях освещенности.

Дисплей в таких приборах может быть либо разнесен с сенсорным блоком (объектив+ЭОП+ПЗС) на расстоянии до 100 м и более, либо в миниатюрном исполнении может быть размещен перед глазом (или глазами) наблюдателя. Связь дисплея с сенсорным блоком может быть проводной или осуществляется с помощью миниатюрных телевизионных передатчиков. В последнем случае изображение может приниматься по одному из каналов обычного телевизионного приемника. Принципиально новая компоновка таких ПНВ с «развязанным» индикатором позволяет выделить их в новое, IV поколение ПНВ.

Основные технические характеристики ЭОП различных поколений представлены в таблице.

Создание таких ПНВ с параметрами, представляющими практический интерес для ночного видения, впервые стало возможным после создания ЭОП с высоким усилением света.

Основные технические характеристики ЭОП различных поколений

Поколение ЭОП Отечественное/зарубежное	1	2	3	4	5
Чувствительность фотокатода: Спектральная на длине волны 850нм, мА/Вт Интегральная, мкА/лм	–/(1,2–2,5) –/–	(2–5)/ (2,4–3,5) (200–500)/ –	(10–12)/ (10–13) 500/ (300–1000)	(15,5–18)/ (15–18) –/1800	>20/–
Предел разрешения, лин/мм	–/(25–35)	(30–36)/ (32–35)	(30–31)/ (36–45)	–/(65–70)	> 80/–
Отношение сигнал/шум	–/–	(40–50)/ (25–35)	(45–50)/ (40–55)	–/(150)	>200/–
Яркость темнового фона, кд/м^2	–/–	$(1,5–6)\cdot10^{-3}$/ $(1,5–6)\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{-3}$/ $(1,5–6)\cdot10^{-3}$	$–/(3–5)\cdot10^{-4}$	$(1–3)\cdot10^{-4}$
Тип фотокатода	–/S20	S25/ S25	GaAs/GaAs	GaAs/GaAs	–/–
Коэффициент усиления светового потока, усл. ед.	$(0,12–1)\cdot10^4$	$(2,5–5)\cdot10^4$	$(3,0–3,5)\cdot10^4$	–/–	–/–
Рабочий диаметр фотокатода, мм	–/–	18/18	17,5/17,5	–/–	–/–

*Параметры отечественных ЭОП взяты из ОАО «Катод» [5].

Это связано с тем, что в первых гибридных преобразователях оптическая «стыковка» изображения с выходного экрана ЭОП I, II или III поколения и приемной матрицы ПЗС осуществлялась с помощью оптики переноса либо фоконов с большими потерями по энергетике. При пороговой чувствительности ПЗС матриц порядка 0,1 лк требовалось усиление ЭОП не менее 10 000, чтобы реализовать разрешение ПЗС при ночных освещенностях и высокие разрешение и качество изображения ЭОП, в первую очередь, отсутствие пространственных (структурных) шумов.

Исследования сенсорных блоков ЭОП+ПЗС с различными типами ЭОП, стыкованными через фокон с ПЗС, показали, что разрешающая способность в 100 телевизионных линий (ТВЛ) достигается при использовании ЭОП II поколения при освещенности 0,001 лк, для ЭОП 2+ SuperGen при освещенности 0,00001 лк достигается 180 ТВЛ. При освещенностях порядка 0,001 лк такие сенсоры обеспечивают 400 ТВЛ, что делает их весьма перспективными для систем ночного видения. В настоящее время развитие таких систем идет по нескольким направлениям.

Наиболее перспективными являются ЭОПы, в которых матрица ПЗС помещается внутри вакуумного объема ЭОП и возбуждается с тыльной стороны непосредственно электронным пучком, несущим информацию об изображении. При этом исключаются потери на преобразование энергии электронов в световую энергию (свыше 80%) и ее переноса через оптику или фокон на ПЗС. В результате такой прибор существенно превосходит все остальные типы ЭОП с ПЗС по информационной емкости и пороговой освещенности, достигающей в ЭОП с электронно-возбуждаемой ПЗС (ЭВПЗС) 0,000001 лк.

ЭОП с высокочувствительным фотокатодом II или III поколения с ЭВПЗС и выходом в виде контактов матрицы ПЗС или сразу видеосигнала принято называть в последнее время ЭОП IV поколения.

Несмотря на явные преимущества таких ЭОП, они являются весьма сложными в плане технологического совмещения фотокатодов и ПЗС в одном вакуумном объеме. Кроме того, получение тонкой ПЗС для возбуждения электронами с тыльной стороны представляет самостоятельную проблему. В связи с этим ЭОП IV поколения пока выпускаются очень немногими фирмами, в том числе российской — ЦНИИ «Электрон», и имеют стоимость выше стоимости ЭОП III поколения.

Поэтому в настоящее время более распространены приборы IV поколения, в которых ЭОП стыкуются с ПЗС через оптику переноса или фокон. Некоторыми фирмами к стандартным ПНВ в качестве выбираемой комплектации прилагается переходное устройство с «С»-резьбой, позволяющее присоединять ПНВ к стандартным ПЗС-видеокамерам вместо их объектива [3].

Поколение V

ЭОП V поколения кроме выполнения функции основного усилительного модуля будет включать в себя встроенный процессор обработки изображений, микродисплей, управляемый источник питания и приемопередатчик. Используется фотокатод на основе AsGa.

Основные качественные показатели ЭОП V поколения:

• повышение отношение сигнал/шум и контраста изображения в 2–3 раза за счет применения усовершенствованных фотокатодов, МКП и процессоров обработки сигналов;

• возможность комплексирования с каналами, построенными на других принципах действия (лазерными, радиолокационными и др.);

• роботизация военно-вычислительной техники.

Основные характеристики ЭОП представлены в таблице.

Эти ЭОПы уже существуют в виде образцов различной степени обработанности и по прогнозам ЦНИИ Минобороны России их массовое производство будет в 2010 г. [6].

Литература

1. Саликов В.Л. Приборы ночного видения: история поколений / В.Л. Саликов // Специальная техника. – 2000 – № 2. – С. 40–48.

2. Электронно-оптический преобразователь нового поколения (ЭОП) // 4-я Международная выставка «Наука. Научные приборы-2000», 16–20 октября 2000 г. Российская академия наук. Разработки Сибирского отделения.

3. Специальная техника [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.vimi.ru

4. Федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.st.ess.ru/index.htm

5. Тарасов В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – М. : Логос, 2004. – 444 с.

6. 12-я науч.-техн. конф. по телевизионным фотоэлектрическим приборам и устройствам на их основе. – Санкт-Петербург, 2001.

Николаев Дмитрий Николаевич
Аспирант кафедры телевизионных устройств ТУСУРа
Телефон: (3822) 41 34 30, 8 913 108 49 19
Эл. почта: nikolaev83@mail.ru

D.N. Nikolaev

Electron-optical converters. History of development and kinds of generations

Electron-optical converters, principle of work, the basic characteristics and some kinds of generation EOC are considered. I, II, III, IV and V (with some intermediate steps I +, II +). Their applications in devices of night vision (DNV).