

Гибридные автоэмиссионные фотокатоды (обзор)

И. С. Гибин, П. Е. Котляр

Приведен обзор развития фотоэлектронных эффектов и их применения в электронно-оптических преобразователях изображений. Выполнен анализ технических характеристик известных фотокатодов, таких как щелочно-земельные, мультищелочные, фотокатоды с отрицательным электронным средством и гибридные автоэмиссионные катоды. Показано, что современные автоэмиссионные катоды обладают уникальными эмиссионными характеристиками. Делается вывод о том, что гибридные автоэмиссионные фотокатоды, выполненные в виде матрицы пироэлектрических элементов, электрически связанных с системой автоэлектронных эмиттеров на основе наноструктурированных углеродных трубок, могут стать основой приборов ночного видения, обладающих высокой чувствительностью во всем ИК-диапазоне и создать серьезную конкуренцию традиционным тепловизионным системам.

Ключевые слова: фотокатод, электронно-оптический преобразователь, пироэлектрический элемент, нанотрубка, ИК-диапазон, фотоэффект, тепловидение, прибор ночного видения.

Введение

Фотоэлектронная эмиссия, на использовании которой основана работа электронно-оптических преобразователей (ЭОП), была открыта Г. Герцем в 1887 году. В своих опытах Герц обнаружил, что освещение ультрафиолетовым светом электродов искрового промежутка, находящегося под напряжением, облегчает проскакивание искры между ними. Систематические исследования фотоэлектронных явлений проводили В. Гальвакс, А. Риги, А. Г. Столетов (1885) и показали, что в опыте Герца наблюдается освобождение зарядов под действием света. То, что носителями этих зарядов являются именно электроны, показали Ф. Ленард и Дж. Томсон (1898).

В 1894 г. Ю. Эльстер и Г. Гейтель, исследуя фотоэффект с поверхности сплава калия и натрия, жидкого при комнатной температуре, обнаружили две новые особенности в этом явлении.

Во-первых, спектральная характеристика после подъема с уменьшением длины световой волны достигла максимума и затем падала. Наличие

наибольшей чувствительности фотокатода при некоторой длине волны получило название спектральной селективности.

Во-вторых, фототок оказался существенно зависящим от поляризации падающего света.

Существенными для понимания селективного фотоэффекта оказались работы Айвса и его сотрудников. В них было установлено то очевидное теперь положение, что фототок пропорционален не количеству световой энергии, падающей на фотокатод, и не количеству её, поглощенному во всей толще этого катода, а количеству, поглощенному в том слое его, из которого выходят фотоэлектроны.

В последующие годы было проведено очень много исследований, направленных на увеличения чувствительности фотоэлементов. Эти исследования дополнили и углубили изучение внешнего фотоэффекта. В этих работах принимали участие Бейнбридж, Зурман, Кэмпбелл, Олпин, Коллер, Де-Бур, Тевес, Клюге и другие. Результаты этих исследований изложены большей частью в патентных заявках. Заявки относительно особенно важных фотокатодов, в которых слой калия был нанесен на слой окиси металла, сделаны почти одновременно в конце 1927 г. и в начале 1928 г. Бейнбриджем, Зурманом и Кэмпбеллом [3, 11, 14, 15].

Первую концепцию электронно-оптического преобразователя (ЭОП) предложили в 1928 году Холст, Де Бур и их коллеги по компании Philips. Однако реализация идеи затянулась, и только в 1934 году удалось реализовать первый ЭОП, из-

Гибин Игорь Сергеевич, главный научный сотрудник, д.т.н.
Котляр Петр Ефимович, старший научный сотрудник, д.г.-м.н.
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика
Коптюга, 1.

Тел.: +7(913) 464-27-06, +7(903) 935-16-31.
E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2017 г.

© Гибин И. С., Котляр П. Е., 2017

вестный как «стакан Холста». В качестве фоточувствительного слоя в «стакане Холста» использовался серебряно-кислородно-цезиевый фотокатод, созданный Коллером (Англия) в 1929–1930 гг.

Однако менее известно, что 25 февраля 1934 года Манфредом фон Арденне, научным руководителем частного НИИ электронной физики в Берлине, был заявлен патент на ЭОП под названием «Способ изменения картин (изображений) из одной спектральной области в другую». М. Арденне получил этот патент (№ 902890) 28 января 1954 года. Только благодаря тому, что все права на его использование он передал по договору концерну Siemens, патент был все же выдан, несмотря на возражения ряда ведущих фирм.

Конструктивно ЭОП М. Арденне представлял собой электровакуумный стеклянный прибор в виде прямого цилиндра. На одно основание цилиндра наносился фотокатод из вещества, чувствительного к определенной области спектра (рентгеновской, инфракрасной, ультрафиолетовой или видимой). На другое основание, которое служило анодом, наносился люминофорный экран. Изображение проецировалось на фотокатод и наблюдалось на экране [26].

По современным представлениям [11], фотоэлектронная эмиссия возникает в результате поглощения фотона электроном (с передачей импульса иону), перемещения электрона с относительно высокой энергией к поверхности (при этом электрон может потерять часть энергии) и выхода электрона из тела. Фотоэмиссия может иметь место, если энергия фотона больше работы выхода, которая для чистых поверхностей металлов > 2 эВ, а для большинства металлов > 3 эВ. Поэтому фотоэмиссия наблюдается в видимой и ультрафиолетовой (для щелочных металлов и бария) или только в ультрафиолетовой (для прочих металлов) частях спектра. Вблизи граничной частоты

(т. н. «красная граница фотоэффекта») квантовый выход составляет порядка 10^{-4} электрон/фотон. Это является следствием сильного отражения излучения металлами и потерь энергии электронами при движении к поверхности (на возбуждение колебаний в электронном газе). В этом случае энергию сохраняют только те фотоэлектроны, которые образовались вблизи поверхности на глубине, не превышающей несколько нанометров. С увеличением энергии фотонов квантовый выход возрастает. Так, при энергии 12 эВ он составляет для металлов величину порядка 10^{-3} , при 15 эВ – 10^{-2} .

Эпоха щелочно-земельных фотокатодов

Эпоха щелочно-земельных фотокатодов имеет продолжительность около 35 лет, а именно, с 1930 г. (кислородно-серебряно-цезиевый фотокатод Коллера) до 1965 г., когда Шер и Ван Лаар, сотрудники исследовательского центра «Филипс», а также Вильямс и Сойман предложили теорию ОЭС (отрицательного электронного средства).

Кислородно-серебряно-цезиевый фотокатод Ag-O-Cs (*S-1*) имеет два максимума – при 800 нм и 350 нм (у некоторых образцов минимум между ними отсутствует). Квантовый выход мал – не более 7×10^{-3} , при этом из-за широкой спектральной характеристики чувствительность оказывается около 40 мкА/лм. Ток катоды велик – 10^{-10} – 10^{-13} А/см² (наилучшее значение – 10^{-14} А/см²), сопротивление – 3×10^7 Ом на квадрат. Технология: напыление тонкой пленки Ag (около 15 нм), затем окисление, второе напыление Ag, обработка в парах Cs при 150–200 °С. Состав сформированного катода – в основном Ag и Cs₂O.

В дальнейшем основные усилия разработчиков были направлены на повышение спектральной чувствительности этих и подобных фотокатодов [3, 4]. Достигнутые параметры отражены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры фотокатодов для видимой и ближней ИК-области спектра

Фотокатод	Красная граница λ_0 , нм	Квантов выход $Y(\lambda_1)$	λ_1 , нм	$S_{МК}$, А/лм	Темновой ток плотность J_t , А/см ² При $T = 300$ К
Кислородно-серебряно-цезиевый (1930), Коллер (Англия) <i>S-1</i> Ag-O-Cs	1200	0,005	800	20–70	10^{-12} – 10^{-11}
Na ₂ K ₂ Sb	600–650	0,25–0,3	400	30–60	10^{-17}
Многощелочной 1955, Соммер (США) <i>SuperS-25</i> (Na ₂ K) ₂ Sb-Cs	900	0,3–0,35	400	200–700	10^{-17} – 10^{-16}
K ₂ CsSb	650–700	0,3–0,35	400	100–200	10^{-17}
Висмут-серебряно-цезиевый Bi-Ag-O-Cs	750–800	0,1	450	30–80	10^{-14}

Окончание табл. 1

Фотокатод	Красная граница λ_0 , нм	Квантов выход $Y(\lambda_1)$	λ_1 , нм	$S_{МК}$, А/лм	Темновой ток плотность J_t , А/см ² При $T = 300$ К
ОЭС-фотоэмиттер 1965, Шеер и Ван Лаар «Филипс» (Голландия) GaAs+Cs/O	900	0,3	400	1000–2000	10^{-16} – 10^{-14}
Арсенид-галлий 1980, ф. Litton OMNIV GaAsP-Cs/O	680	0,5	400	200–300	10^{-16} – 10^{-14}
ОЭС-фотоэмиттер ф. Litton «ExtendedNearIR» ENIR InGaAsP+Cs/O	1100–1150	0,025–0,04	400	900–1025 2150 экспер	5×10^{-14} 10^{-16} экспер
Фотокатоды для ЭОП III–IV пок InGaAsP+InP+Ag-Cs/O	1700	0,1–0,02	1500	1800–2200	–

Фотокатоды на основе соединений сурьмы со щелочными металлами

В большинстве случаев для таких катодов используются соединения сурьмы с одним, двумя или тремя щелочными металлами. Первым был предложен катод Cs_3Sb . Технология – напыление пленки Sb (сурьмы) толщиной 4,5–6 нм и затем нагрев ее в парах Cs (200–250 °C), при этом толщина увеличивается до 26–35 нм. Иногда применяется последующее частичное окисление, уменьшающее работу выхода с ростом чувствительности и термоэлектронного тока. Максимальная чувствительность – около 120 мкА/лм, средняя – 40 мкА/лм. Термоэмиссия – около 10^{-16} А/см². Сопротивление – около 3×10^7 Ом/см² (все данные – для 20 °C). Термостойкость катода – 100 °C. Спектральная характеристика охватывает область от 350 до 550 нм (на уровне 0,5) или от 300 до 600 нм (на уровне 0,1). Квантовый выход в максимуме чувствительности (на 400 нм) – до 30 %. Чувствительность Cs_3Sb катода увеличивается при использовании в качестве подложки пленки MnO. Исследовались однощелочные антимоныды Li_3Sb , Na_3Sb , K_3Sb , Rb_3Sb , но они оказались имеющими худшие квантовый выход и красную границу фотоэффекта и заметного применения не нашли [3].

Мультищелочные фотокаатоды

Основную массу применяемых фотокаатодов составляют двухщелочные ($SbKNa$, $SbKCs$, $SbRbCs$) и многощелочные ($SbKNaCs$) катоды. Технология – напыление пленки Sb (350–400 нм) и ее последующий нагрев в парах щелочных металлов. У таких катодов чувствительность примерно в два раза выше, чем у однощелочных, квантовый выход достигает 50 %, длинноволновая граница – 740 нм. Чувствительность увеличивается, а длинноволновая граница сдвигается к 760 нм после сенсбилизации. Термоэмиссия мультищелочных

фотокаатодов – от 3×10^{-19} А/см² у $SbNa_2K$ до 10^{-16} А/см² у $SbRbCs$ и $SbKNaCs$, а сопротивление – от 3×10^6 Ом/см² у $SbNa_2K$ до 10^{10} Ом/см² у SbK_2Cs . Многощелочные ($SbKNaCs$) катоды, получившие шифр S-20, стали основными катодами ЭОП II-го поколения.

Мультищелочные фотокаатоды с чувствительностью в ближней инфракрасной области

Соммер (США) в 1955 г. показал, что за счет увеличения толщины мультищелочных катодов удается дотянуть их красную границу чувствительности λ_0 до 800–900 нм (на уровне 35–30 % от максимальной). Такие катоды в каталогах обозначаются как ERMA: *ExtendedRedMultiAlkali* (S-25). В отличие от Cs_3Sb , чувствительность $SbNa_2KCs$ -катода при окислении ухудшается. Рост чувствительности при использовании подложки MnO не отмечен.

Благодаря созданию многощелочного катода к 1965 году удалось повысить чувствительность фотокаатодов на порядок, а плотность темнового тока снизить на пять порядков [4].

Фотокаатоды с отрицательным электронным сродством

Эти катоды определили вторую эпоху работ по повышению чувствительности фотокаатода. В результате фундаментальных исследований, начатых еще в 70-х годах, было установлено, что оптимальным материалом для создания фотокаатода является арсенид галлия, способный эффективно эмитировать электроны при облучении с длиной волны 0,9 мкм и менее.

Однако реализации AsGa-фотокаатода длительное время препятствовало наличие энергетического барьера, не позволявшего электронам оторваться от поверхности полупроводникового слоя

(потенциального барьера электронного средства). Эту проблему успешно решили Шер и Ван Лаар, сотрудники исследовательского центра «Филиппс», а также Вильямс и Сойман, предложив теорию ОЭС (отрицательного электронного средства).

Особое место занимают ОЭС-эмиттеры на основе полупроводниковых соединений $A^{III}-B^V$, активированных цезием и кислородом. Это единственные (из приведенного списка) фотокатоды, созданные не путем эмпирического подбора, а в результате целенаправленного поиска на основе теоретического представления об общих закономерностях фотоэмиссионных процессов в полупроводниках [2, 24].

Основой этих катодов является либо кремний, либо полупроводники – соединения элементов III и V групп (соединения $A^{III}-B^V$). Большинство таких фотокатодов – сильнолегированные полупроводники p -типа, обработанные так, что уровень вакуума оказывается ниже дна зоны проводимости, т. е. электронное средство оказывается отрицательным. При этом в вакуум могут выйти электроны, находящиеся в зоне проводимости (в объеме) без получения дополнительной энергии. Обработка поверхности осуществляется сорбцией на ней цезия и кислорода. На таких катодах на основе GaAs получена рекордная чувствительность – более 2000 мкА/лм при термоэмиссии – 10^{-16} А/см² и квантовом выходе до 30 % [6, 19, 28]. Соединение состава Ga_{0,47}In_{0,53}As имеет границу поглощения в инфракрасном диапазоне (ИК) 1,68 мкм. Увеличение концентрации индия в соединении сдвигает эту границу до 2,6 мкм.

Первоначально, промышленная технология AsGa-фотокатода была разработана американской фирмой Varian, у которой ее приобрели для серийного производства компании ИТТ NightVision и Litton. Однако получение AsGa-фотокатода возможно только в условиях сверхвысокого вакуума порядка 10^{-10} – 10^{-11} мм рт. ст., а весь процесс должен производиться под контролем сложной диагностической аппаратуры. Из-за быстрого окисления поверхности фотокатода на воздухе сборку ЭОП III-поколения требуется производить также в вакуумной камере с помощью манипуляторов. В итоге, для производства ЭОП третьего поколения требуется более 400 технологических операций. Все это определило чрезвычайно высокую стоимость этих преобразователей [10, 21].

В табл. 2, заимствованной из прекрасного обзора А. Н. Андропова [2], представлены численные значения основных физических параметров, характеризующих фотокатоды по [12, 17]. Соответственно на рис. 1 показаны спектральные характеристики основных фотокатодов.

В последнем столбце табл. 2 представлены характерные значения темнового тока, ограничивающего порог обнаружения. В некоторых случаях, когда надо добиться возможно меньшего термотока от определенного типа фотокатода, его охлаждают. Понижение температуры от, например, +20 °С до –20 °С уменьшает термоток на 1–2 порядка. Характерные величины термотоков фотокатодов при комнатной температуре – от 3×10^{-19} А/см² (2 электрона в секунду) до 10^{-12} А/см².

Таблица 2

Параметры основных фотокатодов

Фотокатод	E_{g_0} , эВ	$e\phi$, эВ	x , эВ	$h\nu_0$, эВ	Y_{max}	$h\nu$, эВ	S , мкА/лм	j_T , А/см ²
1. Сурьмяно-цезиевый (Cs ₃ Sb) 1936, Герлих (Германия)	1,6	1,3	0,2–0,4	1,8–2,0	0,25	3–3,5	100	10^{-15}
2. Многощелочной (Na ₂ K)Sb-Cs 1955, Соммер (США)	1,0	1,4	0,3–0,4	1,3–1,4	0,35–0,40	2,8–2,9	400	10^{-17}
3. Висмута-цезиевый (Cs ₃ Bi) Висмута-серебряно-цезиевый	0,7 –	– 1,2	1,3 0,3–0,4	2 1,55–1,6	0,01 0,1	4 2,5	5–20 60–110	10^{-15} 10^{-14}
4. S1-Кислородно-серебряно-цезиевый (Ag-O-Cs) 1930, Коллер (Англия)	–	0,8–0,9	–	0,8–0,9	0,01 0,015	1,55 3,5	40–70	10^{-12}
5. GaAs+Cs/O (ОЭС-фотоэмиттер) 1965, Шеер и Ван Лаар (Голландия)	1,45	1,0	ОЭС	1,45	0,5–0,6	2	3000	10^{-13}
6. GaInAs+Cs/O	1,17	0,95	ОЭС	1,17	0,5	2	1100	10^{-13}

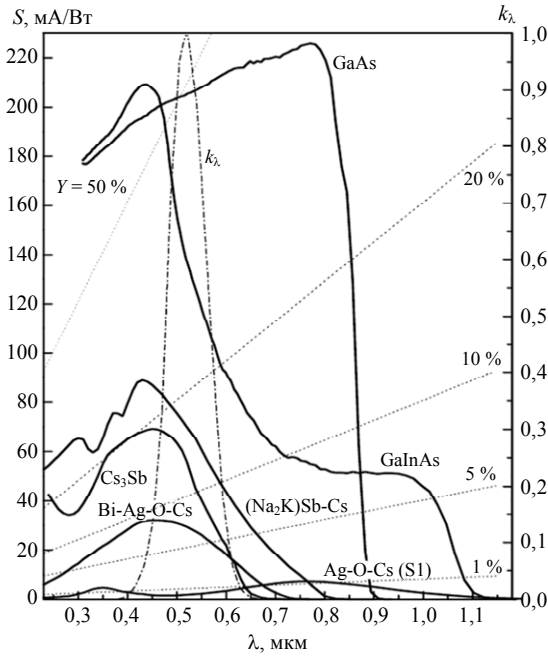


Рис. 1. Спектральные характеристики основных типов фотокатодов по А. Н. Андронову [2].

Спектральные характеристики фотокатодов зависят от толщины фоточувствительного слоя и оптических свойств прозрачных подложек. Рис. 2 и 3 иллюстрируют изменения спектральных характеристик стандартных фотокатодов в зависимости от материала подложки и толщины фоточувствительного слоя.

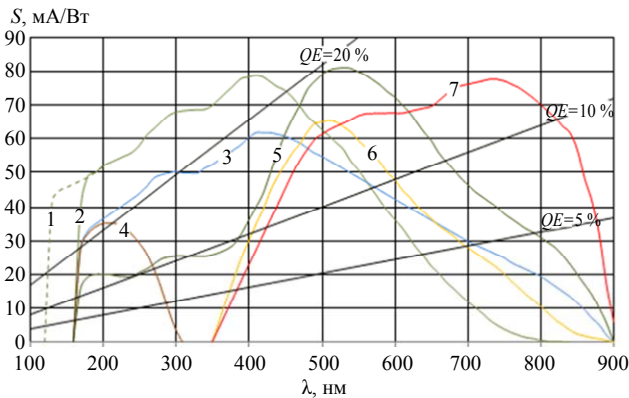


Рис. 2. Спектральные характеристики некоторых типов медленных фотокатодов. 1 – S20(UV) на MgF_2 ; 2 – S20(UV) на кварце; 3 – широкополосный на кварце; 4 – солнечной-слепой на кварце; 5 – HOT S20 на кварце; 6 – S20 на ВОП; 7 – Super S25 на стекле по <http://www.silar.ru/spectrals> [29].

Понятие «медленных» и «быстрых» фотока-тодов – важный параметр, характеризующий время отклика и описывающий временную разрешающую способность. Временная разрешающая способность зависит от типа фотокаатода и характеризуется глубиной проникновения импульса света в материал фотокаатода.

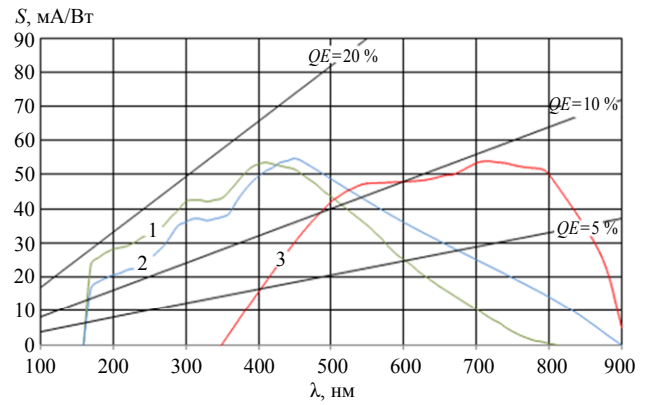


Рис. 3. Спектральные характеристики некоторых типов быстрых фотокатодов. 1 – S20(UV) на кварце; 2 – широкополосный на кварце; 3 – Super S25 на стекле по <http://www.silar.ru/spectrals> [29].

В общем плане временная разрешающая способность (время отклика τ) для некоторых типов фотокаатоов приведена на рис. 4 по данным работы [9].

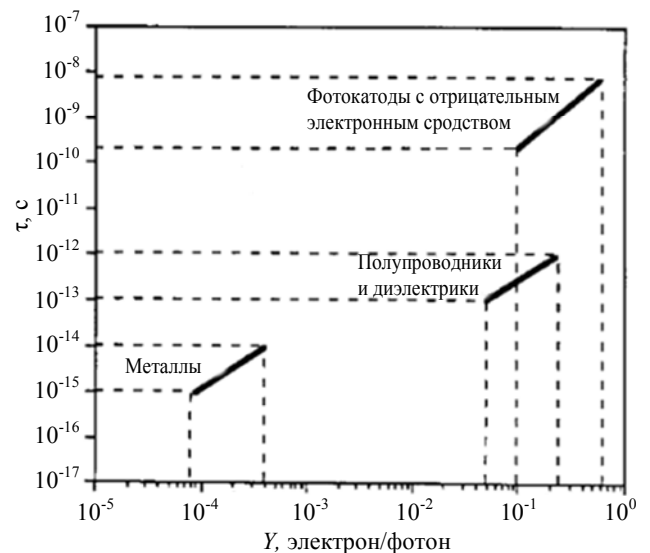


Рис. 4. Временная разрешающая способность τ для некоторых типов фотокаатоов в зависимости от квантовой эффективности Y .

Понятие «временная разрешающая способность» приобретает особую значимость при наблюдении и регистрации импульсного излучения лазерных источников связи, целеуказания, наведения.

В настоящее время традиционные фотокаатоы на основе GaAs, применяемые в ЭОП III поколения, работают в области спектра 0,4–0,9 мкм. За последние годы созданы фотокаатоы с отрицательным электронным сродством на основе структуры InGaAs–InGaAsP, работающие в области спектра 0,4–1,1 мкм. По мнению ведущих специалистов [5, 17, 19], достигнутые значения чувствительности многощелочного и арсенидгаллиевого

фотокатодов близки к теоретически возможным, и дальнейшие улучшения параметров ЭОП и приборов ночного видения (ПНВ) за счет повышения чувствительности фотокатода практически невозможно. Улучшение параметров ПНВ возможно за счет расширения диапазона чувствительности в ближнюю ИК-область спектра [5].

Актуальной проблемой является создание фотокатодов с рабочей областью спектра, смещенной в диапазон 1,4–1,8 мкм. Это связано с тем, что даже самые высокочувствительные ЭОП не позволяют избежать зависимости основных параметров ПНВ от характеристик внешних условий. К характеристикам внешних условий работы ПНВ относятся спектральный состав и уровень естественной ночной освещенности (ЕНО), параметры атмосферы, атмосферной дымки, а также коэффициенты яркости природных образований и объектов наблюдения. На рис. 5 приведен спектр естественной ночной освещенности E при разных условиях.

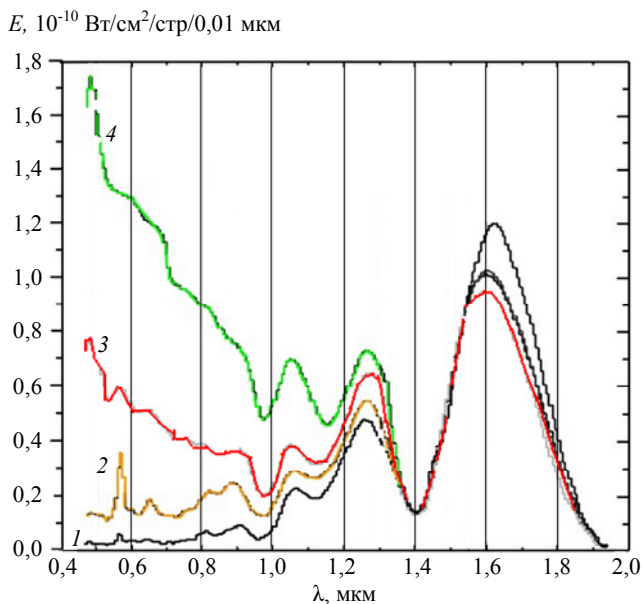


Рис. 5. Спектр естественной ночной освещенности E по Vatsia, Mirshri, L. [30]. 1 – излучение ночной атмосферы; 2 – излучение ночной атмосферы +0,25 площади Луны; 3 – излучение ночной атмосферы +0,50 площади Луны; 4 – излучение ночной атмосферы +0,89 площади Луны.

Преимущества для ПНВ, которые открывает область спектра 1,4–1,8 мкм [23], перечислены ниже.

- Средняя величина естественной ночной освещенности в безлунную ночь для области спектра 0,4–0,9 мкм (фотокатод ЭОП II, II⁺, III поколений) достигает $(1,5–3) \times 10^{-9}$ Вт/(см² мкм), а в области спектра 1,4–1,8 мкм – $(1,5–2) \times 10^{-7}$ Вт/(см² мкм), т. е. на два порядка выше.

- Улучшается прозрачность атмосферы: при метеорологической дальности видимости 10 км

пропускание толщи атмосферы 1 км на длине волны 600 нм составляет 0,72, а в центре области спектра 1,4–1,8 мкм – 0,93.

- Яркость атмосферной дымки снижается больше чем на порядок в области спектра 1,4–1,8 мкм по сравнению с видимой областью спектра.

- Величина контраста объекта наблюдения с фоном в этой области спектра более стабильна и выше в 1,4–1,5 раза, чем в области спектра 0,4–0,9 мкм.

- В этой области спектра освещенность ночью меняется от 10^{-5} до $2,5 \times 10^{-9}$ Вт/см², а в области 1,4–1,8 мкм – от $1,6 \times 10^{-4}$ до $(3–4) \times 10^{-7}$ Вт/см² при тех же условиях освещенности, т. е. почти на два порядка.

- Процент обеспеченности освещенностью в течение всего года для естественной ночной освещенности в пределах $5 \times 10^{-3}–5 \times 10^{-4}$ лк для области спектра 1,4–1,8 мкм также почти в 2 раза выше, чем для области 0,4–0,9.

В области спектра 1,4–1,8 мкм можно работать до определенной степени в некоторых дымах и в пыли, а также визуализировать излучение современных лазерных целеуказателей-дальномеров, работающих на длине волны 1,55 мкм и 1,7 мкм (см. рис. 6) [25, 27].

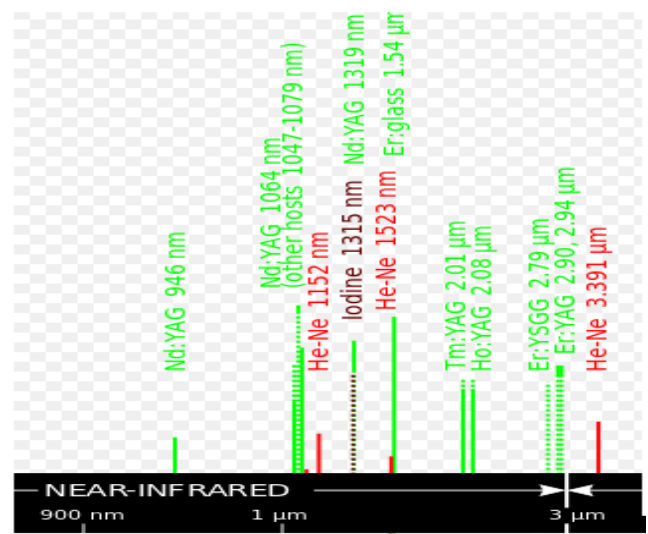


Рис. 6. Длины волн лазерных источников связи, целеуказания и наведения по Handbook of Laser Wavelengths [23].

Весьма результативно использование ПНВ, работающих в области спектра 1,4–2,0 мкм для демаскировки объектов. В области спектра 1,4–2,0 мкм разница в отражательной способности обмундирования позволяет не только обнаружить солдата на фоне зелени, но и отличить своего от чужого. Известно, что камуфляж позволяет замаскировать различные объекты на фоне окружающего пространства. Однако камуфляж, разработанный для видимой области спектра, может быть

неэффективен для области спектра 1,4–1,8 мкм. Для нее узор камуфляжа исчезает, и обнаруживается силуэт замаскированного объекта.

Таким образом, переход в область спектра 1,4–1,8 мкм обеспечивает:

- повышение основных технических параметров в 1,5–2 раза по дальности действия и по полям зрения;
- работу в течение всего темного времени суток практически в любых естественных условиях благодаря более высокой (на два порядка) естественной ночной освещенности, чем в освоенном диапазоне спектра.

Гибридные автоэмиссионные фотокатоды

Дальнейшее расширение длинноволновой границы спектральной чувствительности электронно-оптических преобразователей изображения в область среднего и дальнего инфракрасного

диапазонов (до 40 мкм) с одновременным повышением их чувствительности фактически переводит ЭОП из класса приборов ночного видения в класс тепловизионных приборов (пирометры, тепловизоры). Предполагается, что этого можно достичь на основе использования т. н. гибридных автоэмиссионных фотокатодов, принцип действия которых описывается далее.

В гибридных фотокатодах рационально использовать сочетание теплового фоточувствительного слоя и высокоэффективных **автоэмиссионных** эмиттеров, управляемых фоточувствительным слоем. В качестве фоточувствительных элементов таких приборов могут использоваться пироэлектрики, у которых при изменении температуры возникает электрическое поле. Эти элементы имеют практически постоянную и высокую чувствительность как в ближнем, так и в дальнем ИК-диапазонах [16], что продемонстрировано на рис. 7.

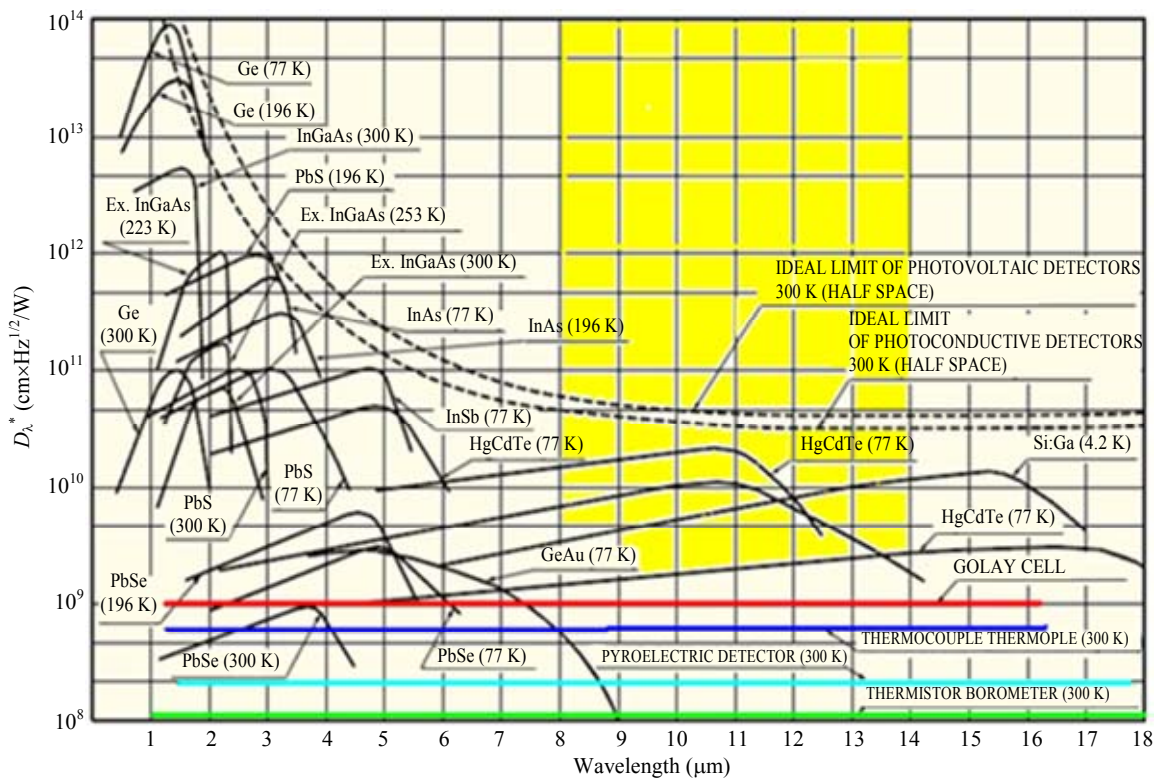


Рис. 7. Обнаружительная способность фотоприемников по Кисс Р. Дж. и др. [16].

Заметим, что во всех существующих конструкциях электронно-оптических преобразователей изображения для генерации первичного электронного потока в катодах используется явление **фотоэлектронной** эмиссии. Какая-либо информация об использовании в ЭОП **автоэлектронной** эмиссии авторам не известна. Однако в настоящее время возникли реальные предпосылки для технической реализации таких устройств. Такими пред-

посылками являются многочисленные работы по исследованию эмиссионных свойств углеродных нанотрубок и разработка высокоэффективных концентраторов электрического поля [1, 7, 8, 18, 22].

Итак, гибридный автоэмиссионный фотокатод представляет собой гибридную фоточувствительную схему (ГФС), в которой собственно фотоприемная матрица пироэлектрических элементов

электрически связана с системой автоэлектронных эмиттеров, выполненных на основе наноструктурированных углеродных трубок.

В 1991 г. японский специалист в области электронной микроскопии С. Инджима, изучая материал, высаживающийся на катоде при получении фуллеренов методом электродугового разряда, обнаружил там многослойные нанотрубки. Это навело Ю. В. Гуляева на мысль об использовании таких пленок в качестве эмиттеров электронов в вакуум [13]. Идея была высказана и реализо-

вана в 1993 г. Как видно из рис. 8, углеродные нанотрубки (тубелены) как однослойные (А-типа), так и многослойные (В-типа) имеют характерную длину порядка десятых долей микрона (разница составляет ~ 10 нм и более). Поверхность тубеленовой пленки представляет собой плоскость, усеянную остриями нанометрового диаметра, причем плотность упаковки острий может достигать 10^{12} – 10^{14} штук на один см^2 . При приложении электрического поля эти острия становятся источниками автоэлектронной эмиссии [13].

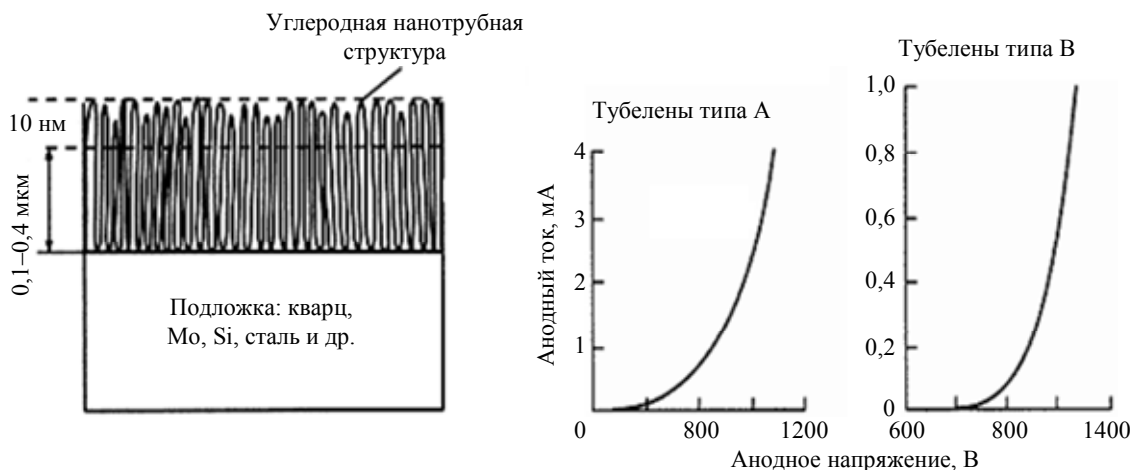


Рис. 8. Полевая эмиссия электронов из углеродных нанотрубок (тубеленов) по [13].

Подчеркнем, что современные автоэмиссионные катоды обладают уникальными эмиссионными характеристиками. Эта уникальность обусловлена следующими обстоятельствами.

- Во-первых, среди эмиссионных явлений **автоэмиссия** занимает особое место, так как это чисто квантовый туннельный эффект, при котором для высвобождения электронов из катода не требуется затрат энергии на сам эмиссионный акт в отличие от термо-, фото- и вторичной эмиссии [11, 13].

- Во-вторых, используемые в катодах углеродные нанотрубки (УНТ) имеют идеальную геометрию для создания эффективных эмиттеров электронов, а именно, высокое аспектное отношение α (отношение длины трубки к диаметру). Благодаря этой особенности нанотрубки способны резко усиливать электрическое поле, так что величина напряженности электрического поля E вблизи края УНТ примерно в α раз превышает среднюю величину этого параметра E_0 , определяемую как отношение приложенного напряжения к размеру межэлектродного промежутка. Характерное

значение коэффициента усиления поля для углеродных нанотрубок достигает значений 10^3 .

- В-третьих, пороговая напряженность поля начала автоэмиссии нанотрубных катодов крайне низка и составляет 0,5–1 В/мкм, причем плотность тока в постоянном режиме достигает 0,5 А/см², [13, 18].

Гибридный автоэмиссионный фотокатод может быть выполнен в планарной технологии в виде матричного пироэлектрического слоя из отдельных дискретных элементов, на которые нанесены автоэмиссионные излучатели, образованные на основе углеродных наноструктурированных материалов. При этом управление потоком электронов эмиссии катода осуществляется пироэлектрическим слоем за счёт дополнительного поля, создаваемого пространственным распределением потенциалов на этом слое, обусловленным изменением температуры пироэлектрического материала в результате поглощения им входного инфракрасного излучения.

Возможная структура гибридного автоэмиссионного фотокатода схематически представлена на рис. 9.

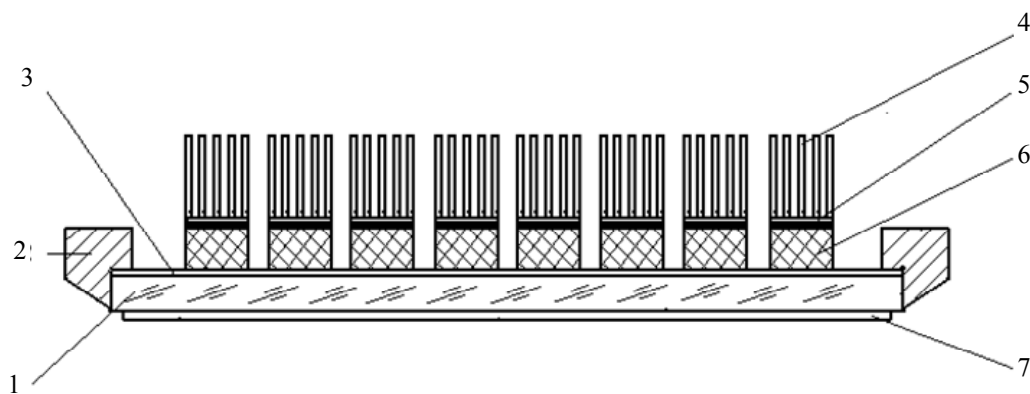


Рис. 9. Схематическая структура гибридного автоэмиссионного фотокатода: 1 – входное окно; 2 – металлическое кольцо; 3 – прозрачный проводящий слой; 4 – автоэмиттирующие электроны острия, выполненные на основе углеродных наноструктурированных материалов с высоким аспектным отношением (например, углеродных нанотрубок); 5 – сплошной металлический электрод пироэлемента; 6 – слой пироэлектрического материала (например сегнетоэлектрика ДТГС), разделенный на отдельные мозаичные элементы субмикронного размера; 7 – просветляющее покрытие.

Технология изготовления пироэлектрических матриц, предназначенных для преобразования проецированного на неё оптического излучения инфракрасного диапазона в потенциальный рельеф, возникающий на поверхности пироэлектрического элемента, в настоящее время хорошо отработана и широко применяется в пировидиконах. В частности, в работе [20] сообщается о создании пировидикона для спектрального диапазона 8–14 мкм на основе мозаичных пироэлементов с размерами $20 \times 18 \times 18$ мкм из дейтерированного триглицинсульфата. Добавим, что сегодня известно значительное количество работ, посвященных разработке технологии изготовления автоэмиссионных катодов на основе УНТ, а пировидиконы выпускаются серийно.

Таким образом, реализация описанных гибридных фотокатодов может стать основой для появления приборов ночного видения, обладающих высокой чувствительностью во всем ИК-диапазоне, и тем самым создать серьезную конкуренцию традиционным тепловизионным системам.

Заключение

В работе приведен обзор развития фотоэлектронных эффектов и их применения в электронно-оптических преобразователях изображений. Выполнен анализ технических характеристик известных фотокатодов, таких как щелочно-земельные, мультищелочные, фотокатоды с отрицательным электронным сродством и прогнозируемые гибридные автоэмиссионные катоды.

Появление приборов ночного видения с гибридными автоэмиссионными фотокатодами, об-

ладающих достаточной чувствительностью во всем ИК-диапазоне и работающих без охлаждения, может стать важным этапом в развитии инфракрасной техники и серьезной альтернативой традиционным тепловизионным системам и приборам ночного видения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голишиников А. А., Жигалов В. А., Крупкина Т. Ю. и др. Патент РФ № 0002590897 от 18.07.2016.
2. Андронов А. Н. Исследование спектральных характеристик современных фотоэммиттеров с отрицательным электронным сродством (ОЭС). – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2003.
3. Ашкинази Л. А. Эмиссия. Это просто. <http://www.Lib.ru/> Современная литература.
4. Бегучев В. П., Бурлаков И. Д. // Приборы ночного видения. – М.: МИРЭА, 2015.
5. Бегучев В. П., Чапкевич А. Л., Филачев А. М. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 132.
6. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. // Вакуумные фотоэлектронные приборы. – М.: Радио и связь, 1988.
7. Бузлуцков А. Ф. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2008. Т. 39. № 3. С. 812.
8. Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г. Современные проблемы инфракрасной техники. – М.: Изд. МИИГА и К. 2011.
9. Брендель В. М. Создание и исследование высокоэффективных фотокатодов и сверхсветовых генераторов электромагнитных импульсов на их основе. Дис. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. – М., 2014.
10. Волков В. Г. // Специальная Техника. 2001. № 5. С. 16.
11. Войцеховский А. В., Ижнин И. И., Савчин В. П., Вакив Н. М. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета. 2013.
12. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. – М.: Физматлит. 2014.
13. Гуляев Ю. В. // ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. 2003. Т. 73. № 5. С. 389.

14. Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Ненакаливаемые катоды. – М.: Наука. 1974.
15. Зурман Р. // Успехи физических наук. 1936. Т. XVI. Вып. 2. С. 199.
16. Кисс Р. Дж. и др. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. – М.: Радио и связь. 1985.
17. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
18. Косаковский Г. Г., Латышев Ю. И., Благов Е. В., Косаковская З. Я., Орлов А. П., Смолович А. М. // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2013. Т. 5. № 1. С. 45.
19. Коцавцев Н. Ф., Коцавцев А. Н., Федотова С. Ф. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 66.
20. Березкин Н. А., Меркин С. Ю., Москвина Н. Н., Степанов Р. М. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 101.
21. Айнбунд М. Р., Васильев И. С., Вилькин Е. Г., Забелина Л. Г., Левина Е. Е., Пашук А. В., Петров А. С., Русанова Т. А., Степанов Р. М., Суриков И. Н. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 97.
22. Петрухин Г. Н. Разработка конструктивно-технологических методов роста углеродных наноструктур для автоэмиссионных применений. АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – Московский государственный институт электронной техники (ТУ). 2010.
23. Пономаренко В. П., Филачев А. М. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946–2011). – М.: Изд. Физматкнига, 2013.
24. Соболева Н. А. // Успехи физических наук. 1973. Т. 111. Вып. 2. С. 331.
25. Искандаров М. О. и др. // Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 4. С. 67.
26. Урвалов В. А. Манфред фон Арденне; 1907-1997: Путь ученого энциклопедиста. От Веймарской республики до объединенной Германии. – С.-Пб.: КД Либроком, 2014.
27. Handbook of Laser Wavelengths. Edited by M. J. Weber. – CRC Press, 1998.
28. <http://katodnv.com/ru/catalog/electronno-optical-converters-3-pokoleniya/>
29. <http://www.silar.ru/spectrals> (по данным Photonis-DEP)
30. Vatsia Mirshri L. "Atmospheric Optical Environment". Research and Development Technical Report. ECOM-7023, "Night-Sky Radiant Sterance from 450 to 2000 Nanometers," Army Electronics Command, Fort Belvoir, Virginia, September (1972).

PACS: 73.63.Eg; 73.61.-r; 79.20.La; 79.60.-i.

Hybrid autoemission photocathodes (a review)

I. S. Gibin and P. E. Kotlyar

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
1 Akademika Koptuga av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

Received September 7, 2017

The review of development for photoelectron effects and its using in electro-optical converters has been made. Consideration is given to technical characteristics of all well-known photocathodes. It is shown that prospective hybrid autoemission cathodes possess the unique emissive characteristics. They can be the foundation of new IR nigh vision devices electro-optical converters which will compete with thermal imaging systems.

Keywords: photocathode, electron-optical converter, piroelectric element, nanotube, IR range, photoeffect, thermovision, nigh vision device.

REFERENCES

1. A. A. Golishnicov, V. A. Jigalov, T. U. Grupkina, et al., Patent RF. No. 0002590897, July 18, 2016.
2. A. N. Andronov, *Studying the spectral features modern photoemitters with negative electron affinities*. (St. Petersburg, 2003) [in Russian].
3. L. A. Ashkinazy. *Emission. It is jast* (<http://www.Lib.ru>) [in Russian].
4. V. P. Begucheve and I. D. Burlakov, *Night Vision Devices* (MIREA, Moscow, 2015) [in Russian].
5. V. P. Begucheve, A. L. Chapkevich, and A. M. Filachev, Prikl. Fiz., No. 2, 132 (1999).
6. A. G. Berkovsky, V. A. Gavanin, and I. N. Zaidel, *Vacuum Photoelectron Devices* (Radio Svyaz, Moscow, 1988) [in Russian].
7. A. F. Buzlutskov, Physics of Elementary Particles and Atom Nuclear **39**, 812 (2008).
8. V. V. Tarasov and U. G. Yakushenkov, Modern Problems of IR technics. (MIIGA, Moscow, 2011) [in Russian].
9. V. M. Brendel, Ph. D. Dissertation (Moscow, 2014).
10. V. G. Volkov, Special Technics, No. 5, 16 (2001).

11. A. V. Voitsehovsky, I. I. Jgnin, V. P. Savchin, and N. M. Vakiv. *Physical basics of semiconductor photo-electronics* (Tomsk: Tomsk State University, 2013) [in Russian].
12. U. K. Gruzevich, *Optoelectronic night vision devices* (Moscow, Physmatgis, 2014) [in Russian].
13. U. V. Gulyaev, Vestnik of Russian Academy of Sciences. **73**, 389 (2003).
14. M. I. Elinson and G. F. Vasiliev, *Nonheating Cathodes* (Moscow, Nauka, 1974) [in Russian].
15. R. O. Zurman, Sov. Phys. Usp. **XVI** (2), 199 (1936).
16. R. D. Kies et al., *Photoreceivers of visible and infrared ranges* (Radio Svyaz, Moscow, 1985) [in Russian].
17. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, Prikl. Fiz., No. 2, 47 (2011).
18. G. G. Kosakovsky, U. I. Latishev, E. V. Blagov, Z. Y. Kosakovskaya, A. P. Orlov, and A. M. Smolovich, Nanotechnologies: development, applications – XXI century. **5** (1) (2013).
19. N. F. Koschavtsev, A. N. Koschavtsev, and S. F. Fedotova, Prikl. Fiz., No. 3, 66 (1999).
20. N. A. Berezkin, S. U. Merkin, N. N. Moskvina, and R. M. Stepanov, Prikl. Fiz., No. 4, 101 (2006).
21. M. R. Ainbund, I. S. Vasiliev, E. G. Vilkin, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 97 (2006).
22. G. N. Petruhin, Ph. D. Dissertation (Moscow state institute of electron technics, 2010).
23. V. P. Ponomarenko and A. M. Filachov, *Infrared technics and Electron Optics. Formation of Sciences directions (1946–2011)*. (Moscow, Physmatkniga, 2013) [in Russian].
24. N. A. Soboleva, Sov. Phys. Usp. **III**, 331 (1973).
25. M. O. Iskandrov, Nauch. Priborostroenie **25** (4), 67 (2013).
26. V. A. Urvalov, *Manfred vinArdenne; 1907-1997. The way of a scientists–encyopedist. From the Veimar Republic to United Germany* (KD Librocom. St. Pb., 2014) [in Russian].
27. *Handbook of Laser Wavelengths*. Edited by M. J. Weber (CRC. Press, 1998).
28. <http://katodnv.com/ru/catalog/electronno-optical-converters-3-pokolenya/>
29. <http://www.Silar.ru/spectrals>
30. Valsia Mirshri L. "Atmospheric Optical Environment". Research and Development Technical Report. ECOM-7023, "Night-Sky Radiant Sterance from 450 to 2000 Nanometers," Army Electronics Command, Fort Belvoir, Virginia, September (1972).