

Раздел III. Нанотехнологии в экологии, чистая вода, ЧИСТЫЙ ВОЗДУХ

УДК 621.375; 551.51

О.В. Алымов, Г.В. Левко, Ю.Г. Чукавина, В.Л. Чулков

ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Рассмотрены фотоприемные устройства УФ, видимого и ИК-диапазонов спектра выпускаемые ОАО «ЦНИИ “Электрон”» для применения при создании телевизионной и оптико-электронной аппаратуры экологического мониторинга. Описаны основные параметры выпускаемых ФЭУ, ЭОП линейных, матричных и твердотельных приборов. Для новых телевизионных систем экологического мониторинга перспективным является электронно-оптический преобразователь 5-го поколения. Установка более тонкой ПЗС-матрицы внутри объема резко улучшает отношение сигнал-шум фотоэлектронного прибора. Для решения ряда задач экологического мониторинга системами космического базирования разрабатывается вариант кристалла, предназначенного для сборки в приемные массивы в фокальной плоскости.

Фотоэлектронный умножитель; электронно-оптический преобразователь; телевизионная система; электронно-оптическая система.

G.V. Levko, O.V. Alymov, V.L. Chulkov, U.G. Chukavina

PHOTODETECTORS FOR TV AND ELECTROOPTICAL SYSTEMS APPLIED IN ECOLOGICAL MONITORING

UV, visible and IR detectors produced by OJSC NRI “Electron” and applied for development of ecological monitoring TV and electrooptical systems are considered. Main specifications of produced PMTs, image intensifier tubes, linear and array devices are presented. For new television systems of ecological monitoring the electron-optical converter of 5th generation is perspective. Installation of more thin CCD matrixes in volume sharply improves the relation a signal-noise of the photoelectronic device. For the decision of some problems of ecological monitoring systems of space basing develop a variant of the crystal intended for assemblage in reception files in a focal plane.

Photomultiplier tube; image intensifier tube; TV system; electrooptical system.

Активные и пассивные телевизионные и оптико-электронные системы являются важной составной частью аэрокосмических методов экологического мониторинга. Технические параметры этих систем во многом определяются применяемыми в них фотоприемными устройствами [1]. Основные направления работ ОАО «ЦНИИ “Электрон”» по созданию этих устройств иллюстрирует рис. 1.

Фотоэлектронные умножители. Фотоприемные устройства на основе ФЭУ получили широкое распространение в лидарах применяемых в экологическом мониторинге. Это обусловлено большим коэффициентом усиления и малыми собственными шумами ФЭУ. ОАО «ЦНИИ “Электрон”» выпускает более десятка наименований ФЭУ для разнообразных применений (рис. 1). ФЭУ-202 имеет улучшенную линейность световой характеристики в импульсном режиме, многоще-

лочной фотокатод, электростатическую фокусировку электронов, 14-диодную систему умножения жалюзийного типа. Основные параметры ФЭУ-202 приведены в табл. 1.



Рис. 1. Фотоприемные устройства ОАО «ЦНИИ “Электрон”» для активных и пассивных систем экологического мониторинга

Таблица 1

Основные параметры ФЭУ-202

Диаметр фотокатода, мм	40
Диапазон спектральной чувствительности, нм	260 - 700
Световая анодная чувствительность, не менее, А/лм	300
Темновой ток, не более, А	5×10^{-7}
Коэффициент усиления в нормальных условиях	1×10^6
Нелинейность световой анодной характеристики в импульсном режиме при амплитуде анодного тока 0,6 А и длительности импульса в диапазоне (1–100) %, не более	15

Фотоэлектронный умножитель ФЭУ-143 имеет бищелочной фотокатод, плоскогнупое входное окно из боросиликатного стекла, электростатическую фокусировку электронов и линейную 12-диодную систему умножения. Прибор разработан для исследования быстропротекающих процессов. Обладает хорошим амплитудным разрешением и минимальным разбросом времени пролета в пределах рабочей площади фотокатода. Основные параметры ФЭУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры ФЭУ-143

Диаметр фотокатода, мм	40
Материал 1-го динода	GaAsP
Напряжение питания, для световой анодной чувствительности 100 А/лм, В, не более	2000
световой анодной чувствительности 1000 А/лм, В, не более	2450
Диапазон спектральной чувствительности, нм	360÷650
Световая чувствительность фотокатода, мкА/лм	60
Спектральная чувствительность фотокатода на $\lambda = 410$ нм, мА/Вт	65
Время нарастания импульсной характеристики, нс, не более	3,0

Для работы в аппаратуре радиационного мониторинга выпускаются радиационно-стойкие фотоэлектронные умножители типа ФЭУ-175, ФЭУ-187, ФЭУ-188, ФЭУ «Клон», ФЭУ «Капкан».

О возможности работы ФЭУ в радиационных полях обычно судят по необратимым изменениям параметров. Эти изменения параметров ФЭУ главным образом связаны с процессами, происходящими в стекле входного окна. Наиболее сильно проявляющийся при этом эффект – изменение светопропускания стекла из-за его окрашивания – приводит к сдвигу спектральной характеристики в длинноволновую область и, как следствие, к уменьшению анодной чувствительности.

Заметных устойчивых эффектов прямого влияния ионизирующего излучения на фотокатод и диодную систему не обнаружено. ФЭУ-175, ФЭУ 187, ФЭУ 188, ФЭУ «Капкан» и ФЭУ «Клон» имеют накопленную дозу до $D_{\gamma} = 2 \times 10^6$ рад. Данные приборы также обладают высокой стойкостью к действию быстрых ($E \geq 0,1 \text{ МэВ}$) нейтронов ($\Phi_n \approx 1 \times 10^{14}$ нейтр./см²). Указанные ФЭУ обладают также повышенной магнитоустойчивостью. Так ФЭУ-188 может работать в магнитных полях до 4Тл. Основные параметры радиационно-стойких ФЭУ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры радиационно-стойких ФЭУ

Тип		ФЭУ-175	ФЭУ-187	ФЭУ «Капкан»
Диаметр фотокатода, мм		15	20	18
Число диодов		14	15	15
Диапазон максимальной спектральной чувствительности, нм		380-420		
Чувствительность фотокатода	Световая, мкА/лм	≥ 50	60	60
	Спектральная (λ), мА/Вт	50(420)	60(400)	60(400)
Анодная световая чувствительность, А/лм		10	30	30
Темновой анодный ток (тип), А		5×10^{-9}	1×10^{-8}	1×10^{-8}
Коэффициент усиления	В нормальных условиях	10-30	5×10^5	5×10^5
	В магнитном поле	—	2×10^5	2×10^5
Время нарастания импульса, нс		1,2	1,4	1,4

Гибридные модульные фотоприемные устройства. Одним из важнейших параметров телевизионных систем, в том числе и используемых для экологического мониторинга в различных диапазонах спектра, является их чувствительность. Она практически полностью определяется применяемым оптико-электронным преобразователем (датчиком). Для повышения чувствительности часто используются фоточувствительные модули на основе усилителя/усилителей яркости и ПЗС матрицы. Табл. 4 иллюстрирует основные характеристики выпускаемых высокочувствительных широкоформатных модульных фотоприемных устройств.

Таблица 4

Основные параметры гибридных фотоприемных устройств

Наименование параметра	Фотоприемное устройство		
	«ФМТП-1»	«ФМТП-3»	«Сириус-Ф»
Усилитель яркости, поколение	2 ⁺ / 3	1 + 2 ⁺	2 ⁺
Рабочее поле изображения, мм	9,8 x 13,1	24 x 32	24 x 32
Тип фотокатода	Многощелочной / A ₁₁₁ B _v	Многощелочной	Многощелочной
Диапазоны спектральной чувствительности, мкм	0,38–0,85 / 0,5–0,9	0,40–0,85	0,40–0,85

Окончание табл. 4

Наименование параметра	Фотоприемное устройство		
	«ФМТП-1»	«ФМТП-3»	«Сириус-Ф»
Интегральная чувствительность фотокатода, мкА/лм	500–600/1500	180-300	400-500
Максимум спектральной чувствительности, нм	600/800	500	600
ФППЗ-матрица с кадровым переносом: – число элементов – размер элемента, мкм	760x580 17x34		
Габаритные размеры, мм	Ø50x65	Ø89x173	Ø63x86
Рабочая освещенность (РО), лк	$2 \cdot 10^{-4} / 1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Разрешающая способность при РО, твл	500	450-500	500
Пороговая чувствительность, лк	$2 \cdot 10^{-6}$ (200твл)	$5 \cdot 10^{-7}$ (200твл)	$5 \cdot 10^{-7}$ (150твл)
Стробирование, нс	≥ 10	≥ 10	≥ 10

Наиболее перспективным для новых разрабатываемых телевизионных систем экологического мониторинга среди гибридных приборов является так называемый электронно-оптический преобразователь (ЭОП) 5-го поколения. Установка утонченной ПЗС матрицы внутри объема ЭОПа резко улучшает отношение сигнал/шум фотоэлектронного прибора. В ОАО «ЦНИИ “Электрон”» проведены работы по созданию такого ЭОПа на основе электронно-чувствительной ПЗС матрицы с числом элементов 768×580 для видимого диапазона. В настоящий момент получено усиление электронов в матрице 800 раз при ускоряющем напряжении 6 кВ. Ожидается достижение пороговой освещенности $\leq 5 \cdot 10^{-5}$ лк и рабочей освещенности на фотокатоде $\leq 5 \cdot 10^{-4}$ лк с отношением сигнал/шум не менее 30.

Прибор представляет собой проксимити электронно-чувствительный прибор с многослощным фотокатодом типа S20 и анодом в виде электронно-чувствительной ПЗС-матрицы (табл. 5).

Таблица 5

Основные параметры гибридного прибора (ЭОП 5-го поколения)

Фокусировка	Проксимити
Наличие МКП	Нет
Чувствительность, В/лк	300 ÷ 400
Сигнал/шум при рабочей освещенности	30
Рабочая освещенность, лк	$5 \cdot 10^{-4}$
Пороговая освещенность, лк	$5 \cdot 10^{-5}$
Размер чувствительной области, мм	13,1 × 9,8
Размер элемента ПЗС, мкм	17 × 34
Разрешающая способность при рабочей освещенности, твл	400 ÷ 450
Диапазон спектральной чувствительности, мкм	0,4 ÷ 0,8
Число элементов	768 × 580

В настоящее время институт ведет исследовательские работы по созданию фотокатодов для УФ части спектра на современных материалах, таких как GaN и AlGaIn. На их базе будут созданы солнечно-слепые фотокатоды. Опыт института по ИК-фотокатодам позволит создать параметрический ряд ЭОПов с характери-

стиками представленными в табл. 6. Это существенно облегчит создание много-спектральных телевизионных систем для экологического мониторинга, так как все спектральные каналы будут иметь одинаковую электронику и конструктив. Отличие будет только в параметрах объективов.

Таблица 6

Параметры ЭОП 5-го поколения для различных областей спектра

Диапазон спектра	УФ	Видимый	ИК
Область спектральной чувствительности, мкм	0,2÷0,32	0,4 ÷ 0,8	1,0 ÷ 1,7
Квантовый выход фотокаатода, %	8 ÷ 10	10 ÷ 20*	5 ÷ 10
Спектральная чувствительность фотокаатода, мА/Вт	15 ÷ 20	40 ÷ 80*	40 ÷ 100
Усиление ЭЧ-ПЗС	400		
Чувствительность прибора, А/Вт	5 ÷ 10	15 ÷ 30	15 ÷ 40

* – В максимуме чувствительности фотокаатода.

Внешний вид гибридных модульных фотоприемных устройств приведен на рис. 1.

Твердотельные фотоприемные устройства. Широкое применение при создании телевизионных систем для экологического мониторинга имеют линейные и матричные ПЗС. ОАО «ЦНИИ “Электрон”» выпускает ПЗС для различных диапазонов длин волн от 0,2 мкм до 1,1 мкм, а также ИК-матрицы на диапазон 3÷5 мкм. Рис. 1 демонстрирует разнообразие типов, форматов и конструктивных вариантов выпускаемых линейных и матричных ПЗС. Особенно интересны для создания телевизионных систем для экологического мониторинга новейшие разработки института – линейный ПЗС с числом элементов 12 000 и матричный ПЗС «Квадро» с числом элементов 4096х4096.

Линейный фоточувствительный прибор с переносом заряда ЛФППЗ-12000 имеет 12000 фоточувствительных элементов размером 6,5×6,5 мкм. Прибор имеет билинейную организацию и содержит индивидуальные секции для детектирования и накопления зарядовых пакетов. Имеется встроенный антиблуминг с кратностью пересветки не менее 100 раз. Предусмотрен режим электронного экспонирования от 10 мкс и более.

Таблица 7

Основные параметры ЛФППЗ-12000

Количество фоточувствительных элементов	12000
Размер фоточувствительного элемента, мкм ²	6,5 × 6,5
Диапазон спектральной чувствительности, нм	200 ÷ 1100
Число выходных узлов	4
Динамический диапазон	5000
Чувствительность В/Лк·с	2,5
Относительная световая неравномерность, %	±10
Относительная темновая неравномерность, %	1,0
Максимальная частота работы, МГц	2,5

Учитывая большой линейный размер фоточувствительной области и большое количество элементов, на ЛФППЗ-12000 могут быть созданы телевизионные системы для экологического мониторинга имеющие сверхвысокое пространственное разрешение. Также эта линейка может быть основой для уникальных спектрофотометров.

ФППЗ «Квадро» имеет четыре независимых секции накопления, которые могут работать в режиме импульсного и непрерывного освещения. Матрица имеет центральную симметрию, два выходных регистра и четыре выходных узла. Прибор может работать в телевизионной аппаратуре с непрерывным и импульсным освещением, в системах преобразования и обработки изображения, а также в измерительных телевизионных системах. Выходная частота регистра от 1 до 40 МГц.

Таблица 8

Основные параметры ФППЗ «Квадро»

Число фоточувствительных элементов	4096×4096
Размер фоточувствительной области, мм	45,056 × 45,056
Диапазон спектральной чувствительности, нм	350 ÷ 1000
Размер фоточувствительного элемента, (Г×В), мкм	11×11
Напряжение насыщения, В	1,1
Монохроматическая чувствительность на $\lambda = 670$ нм, В/мк Дж/см ²	5
Среднее значение темного сигнала, мВ/с	30
Среднеквадратичная неравномерность выходного сигнала, %	2
Шум, не более, $\bar{\epsilon}$	22
Динамический диапазон	8000

В развитие работ по ФППЗ «Квадро» ОАО «ЦНИИ “Электрон”» проводит исследования по созданию матрицы, освещаемой с обратной стороны подложки. Целью работы является создание прибора с числом элементов 4Кх4К и размером пикселя 11х11 мкм, имеющего спектральный диапазон 200–1000 нм и квантовую эффективность в максимуме не менее 90 %. Для максимальной реализации преимуществ, заложенных в технологии ПЗС с обратной засветкой, разрабатывается вариант исполнения прибора в прецизионном вакуум-плотном газонаполненном корпусе с охлаждением кристалла с помощью микрохолодильника на эффекте Пельтье.

Для решения ряда задач экологического мониторинга, решаемых системами космического базирования, часто недостаточен даже такой сверхкрупный формат прибора, как 4Кх4К [2]. Для обеспечения решения таких задач разрабатывается вариант кристалла, предназначенного для сборки в фотоприемные массивы (“мозаики”) в фокальной плоскости. Конструкция кристаллов обеспечивает их сборку в фоточувствительный массив с минимальными зазорами между кристаллами.

Центром экологической безопасности РАН под руководством Б.В. Шилина был проведен ряд работ с авианосителей и в полевых условиях с помощью высокочувствительной ультрафиолетовой (0,2–0,4 мкм) камеры разработанной в ОАО ЦНИИ «Электрон» на основе усилителей яркости с микроканальной пластиной и фотоприёмником с переносом заряда. Получены аэроснимки различных фоноцелевых обстановок в УФ-диапазоне хорошего качества (один из примеров рис. 2). Подтверждена общая зависимость сходства спектральных характеристик компонентов ландшафта в видимом диапазоне и ультрафиолете за исключением ряда специфических объектов, например, содержащих большое количество нефтепродуктов (асфальтированные дороги, некоторые покрытия, разливы на акваториях), оценена перспективность применения ультрафиолетовой съёмки в общем комплексе аэрокосмических методов.

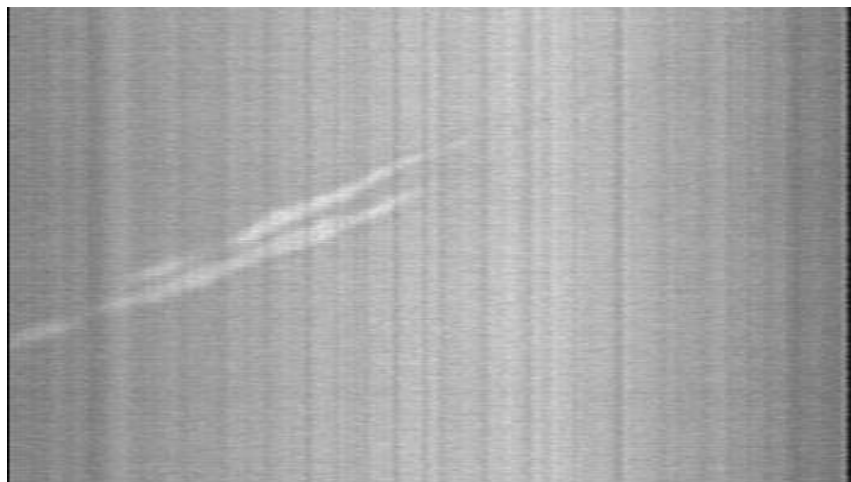


Рис. 2. Нефтяная пленка на водной поверхности Финского залива в районе о. Котлин (2006 г.)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксиненко М.Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. – М.: Энергоиздат, 1984. – 208 с.
2. Маламед Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования. – СПб.: ГИТМО (ТУ), 2002. – 292 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.В. Левун.

Левко Геннадий Владимирович

ОАО «ЦНИИ “Электрон”».

E-mail: g.levko@electron.spb.ru, levgen@mail.ru.

194223, Санкт-Петербург, пр. Тореза, 68.

Тел.: 88125522809.

Заместитель генерального директора по научной работе – технический директор; к.т.н.

Алымов Олег Витальевич

E-mail: electron@nevsky.net.

Тел.: 88125523600.

Генеральный директор ОАО «ЦНИИ “Электрон”».

Чукавина Юлия Геннадьевна

E-mail: chukavina@inbox.ru.

Тел.: 88125522809.

Начальник отдела договоров и маркетинга ОАО «ЦНИИ “Электрон”».

Чулков Владимир Леонидович

Секции прикладных проблем при Президиуме РАН.

E-mail: avt393095@yandex.ru.

117333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3.

Тел.: 84991350252.

Профессор секции прикладных проблем при Президиуме РАН; д.т.н.; профессор.

Levko Gennady Vladimirovich

Open – Joint Stock Company National Research Institute “Electron”.

E-mail: levgen@mail.ru.

68, Toreza Ave., St. Petersburg, 194223, Russia.

Phone: +78125522809.

Deputy General Director for Science; Technical Director; Cand. of Eng. Sc.

Alymov Oleg VitalievichE-mail: electron.direct@mail.ru.

68, Toreza Ave., St. Petersburg, 194223, Russia.

Phone: +78125523600.

General Director.

Chukavina Yulia GennadyevnaE-mail: chukavina@inbox.ru.

Phone: +78125522809.

Director of Contract and Marketing Departments.

Vladimir Leonidovich Chulkov

Section applied problem of Presidium RAS.

E-mail: avt393095@yandex.ru.

3, Gubkina Street, Moscow, 117333, Russia.

Phone: +74991350252.

Section Applied Problem of Presidium RAS; Dr. of Eng. Sc., Professor.

УДК 502:681.88

В.Н. Воробьев, В.Б. Митько**ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОНЦЕПЦИЮ РАЗВИТИЯ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОФИЗИКИ В РОССИЙСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

Обсуждаются внешние и внутренние факторы, определяющие концепцию развития научной школы прикладной гидрофизики в современных условиях интенсивно развивающегося направления освоения Мирового океана. К основным внешним факторам относятся новые требования и организационные формы кооперации научных, производственных и образовательных структур, к внутренним – накопленный опыт подготовки специалистов в Университете и участие в новом современном типе кооперации – технологической платформе «Освоение океана».

Гидрофизика; подготовка специалистов; технологическая платформа.

V.N. Vorobyov, V.B. Mit'ko**FACTORS, DETERMINING THE DEVELOPMENT OF SCIENCE SCHOOL OF APPLIED HYDROPHYSICS CONCEPTION IN RUSSIAN STATE GIDROMETEOROLOGICAL UNIVERSITY**

There are discussing external and internal factors, determining the conception of applied hydrophysics school development in modern conditions of World ocean assimilation. For main external factors are depending new requests and organization forms of science, industrial and educational structures, to internal – accumulated experience of specialists preparation in University and participation in new modern tipe of cooperation – Technological platform "Assimilation of Ocean".

Hydrophysics; preparation of specialists; technological platform.

XXI в. является столетием освоения Мирового океана Человечеством. Практически все проблемы Планеты решаются в океанах и морях: от разработки ресурсов и обеспечения экологической безопасности до транспортно-коммуникационных, военных и научных. Особое значение в этом контексте приобретает Арктический регион, который многие исследователи считают точкой бифуркации