

УДК 520.343.621.383

**П. В. Неводовский**Главная астрономическая обсерватория НАН Украины  
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного, 27**Квантаконы и оптимизация их параметров  
для проведения астрономических наблюдений**

*Дан краткий обзор характеристик различных электронных фотоумножителей, используемых для астрономических наблюдений в спектральном диапазоне  $\lambda\lambda = 130...1100$  нм. Показано, что фотоумножители класса квантакон являются перспективными приемниками света для широкого спектрального диапазона  $\lambda\lambda = 320...1070$  нм. Описаны исследования, позволяющие оптимизировать режим работы квантакона, и даны рекомендации по его применению.*

*КВАНТАКОНИ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЇХНІХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ АСТРОНОМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ, Неводовський П. В. — Подається короткий огляд характеристик різних електронних фотопомножувачів, що використовуються для астрономічних спостережень в спектральному діапазоні  $\lambda\lambda = 130...1100$  нм. Показано, що фотопомножувачі класу квантакон є перспективними приймачами світла для широкого спектрального діапазону  $\lambda\lambda = 320...1070$  нм. Описано дослідження, що дозволяють оптимізувати режим роботи квантакона, і даються рекомендації щодо його застосування.*

*KVANTAKONS AND OPTIMIZATION OF THEIR PARAMETERS FOR ASTRONOMICAL OBSERVATIONS, by Nevodovskij P. V. — We briefly review the characteristics of various photomultipliers used in astronomical observations in the wide spectral range from 130 to 1100 nm. Modern electronic photomultipliers of the kvantakon class are shown to be promising light detectors for the wavelength range 320...1070 nm. We describe some investigations which allow the kvantakon operation mode to be optimized and give recommendations for the application of these photomultipliers.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Прием и преобразование информации, содержащейся в световом излучении от разных источников, составляет основу современных методик астрономических наблюдений. Приемниками-преобразователями излучений в электрический сигнал служат фотоэлектронные приборы двух типов — вакуумные и полупроводниковые. Общеизвестны впечатляющие успехи твердо-

тельных приборов (ПЗС). Однако есть некоторые задачи, которые пока не удастся решить без применения вакуумных фотоэлектрических приборов. При исследовании слабых астрономических точечных объектов, выделении малых зон из протяженных слабых объектов, исследовании быстро изменяющихся микромасштабных процессов фотоэлектронные умножители остаются пока еще единственными приборами, способными обеспечить эффективную работу.

В последнее время у исследователей возрос интерес к существенному расширению исследуемого спектрального диапазона. Решение таких задач ранее ограничивалось недостаточным выпуском соответствующей аппаратуры, что было связано с рядом технических проблем. Поэтому создание некоторыми фирмами США, Японии, России фотоэлектронного умножителя, способного работать в широком диапазоне длин волн ( $\lambda = 350 \dots 1060$  нм), явилось определяющим фактором для конструирования новой астрономической аппаратуры.

Большое многообразие конструкций фотоумножителей свидетельствует о сложности и неуниверсальности этих приборов. Нет единого приемника света для решения любых астрономических и спектрофотометрических задач. Поскольку приемник излучения является центральным элементом системы регистрации, то его параметры в основном определяют возможности всего прибора. К основным классификационным признакам, определяющим специализацию прибора, относятся: геометрия приемника (точечный, линейный, панорамный), скоростные характеристики, спектральный диапазон. Классификацию приемных устройств можно продолжить в различных направлениях — по принципу работы, по конструкции, по геометрии и размерам фотокатода, по габаритам, весу и т. д. Все эти характеристики взаимосвязаны, и улучшение одних влечет за собой ухудшение других. Поэтому для решения конкретной исследовательской задачи следует выбирать конкретный прибор, исходя из возможностей и оптимальных параметров, которые последний может реализовать.

Так, для работы со слабыми световыми потоками, с которыми в подавляющем большинстве случаев встречаются астрономы, требуются приемники, обладающие высокой чувствительностью. К таким приемникам относятся фотоэлектронные умножители, входящие в огромный класс электровакуумных приборов.

#### **ФОТОУМНОЖИТЕЛИ КЛАССА КВАНТАКОН СРЕДИ БОЛЬШОГО СЕМЕЙСТВА ФОТОПРИЕМНИКОВ СВЕТА**

За последние 40 лет фотоэлектронные умножители нашли широкое применение и получили бурное развитие в различных областях науки и техники. Было разработано и внедрено большое количество различных по конструкции и применению вариантов фотоумножителей.

Диапазон спектральной чувствительности приемника определяется в основном материалом фотокатода. Исходя из этого, обычно и выбирается необходимый тип фотоумножителя. Даже для видимой области фотоумножители можно условно разделить на три группы: те, которые работают в области ближнего ультрафиолета, в видимой области, в области близкой к инфракрасной.

В области ближнего ультрафиолета работают фотоумножители, у которых определяющими материалами фотокатода являются теллур, таллий, йод, бром, фтор. Так, фотокатоды из TeCs и RbTe имеют квантовую эффективность около 10 % в области максимальных значений спектральных характеристик  $\lambda \approx 235$  нм. У фотокатодов, изготовленных из соедине-

ний KBr и CsI, максимальное значение спектральной характеристики находится близ  $\lambda = 130$  и  $150$  нм при квантовой эффективности 10 и 20 % соответственно [12, 13]. Граница ультрафиолетовой области спектральной чувствительности приемника определяется в основном характеристикой пропускания входного окна и приходится на длины волн от 105 нм до 250 нм для различных стекол.

В видимой области определяющим материалом фотокатода фотоумножителей служат соединения сурьмы со щелочными металлами. В астрономии нашли широкое применение фотоумножители ФЭУ-79, ФЭУ-106 и ФЭУ-136, у которых фотокатодом является многощелочной материал типа Sb-K-Na-Cs.

В области, близкой к инфракрасной, чувствительны фотоумножители с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом (ФЭУ-83, ФЭУ-112 и др.), максимум спектральной характеристики которых находится на длине волны  $\lambda = 800$  нм, где их квантовая эффективность близка к 0.3 %.

Стремление получить универсальный фотоумножитель в отечественной астрономии выдвинуло на передний план фотоприемник ФЭУ-79, которым успешно пользуются астрономы несколько десятков лет. Этот фотоумножитель сравнительно дешевый, что позволяет производить отбор нужного экземпляра из партии. В таблице приведены его технические характеристики. Но даже для лучших, специально отобранных экземпляров ФЭУ-79 и его модификаций ФЭУ-106, ФЭУ-136 разработчики не могут гарантировать спектральную чувствительность для длин волн  $\lambda > 860$  нм. Некоторые экземпляры с протяженной спектральной характеристикой, специально отобранные из сотен других, являются скорее исключением, чем нормой. Получение сигнала на длинах волн  $\lambda > 900$  нм для такого прибора практически невозможно.

#### Основные параметры фотоумножителей

Наименование параметра	ФЭУ-79	ФЭУ-83	ФЭУ-138	ФЭУ-157	Комета
Рабочий спектральный диапазон, нм	300...830	400...1200	250...900	350...900	350...1060
Область максимальной спектральной чувствительности, нм	400...440	650...850	—	—	—
Диаметр рабочей поверхности фотокатода, мм	6	25	4	2	2
Чувствительность фотокатода, А/лм	$120 \cdot 10^{-6}$	$\geq 25 \cdot 10^{-6}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	—
Световая анодная чувствительность, А/лм	1000 ( $U = 2.4$ кВ)	10 ( $U = 1.6$ кВ)	100	—	—
Спектральная анодная чувствительность, А/Вт	—	—	—	$8 \cdot 10^3$ ( $\lambda 690$ нм)	$1 \cdot 10^{-3}$ ( $\lambda 1060$ нм)
Темновой ток, А	$4 \cdot 10^{-8}$ ( $S_a = 1000$ А/лм)	$1 \cdot 10^{-6}$ (10 А/лм)	$\leq 3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Квантовая эффективность, %					
на $\lambda = 450$ нм	(14...20)	—	—	30	10
на $\lambda = 840$ нм	$\leq 0.1$	$\leq 0.3$	2.2	15	3
на $\lambda = 1010$ нм	—	$< 0.03$	—	—	0.1
на $\lambda = 1060$ нм	—	—	—	—	0.2...1.0
Количество динодов (шт.)	11	12	14	7	7
Время нарастания импульсной характеристики, нс	5.6	—	10	2.3	2.0
Предельный ток анода в течение 5 мин, А	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Предельное напряжение питания в течение 5 мин, В	2500	1700	1900	3000	2800
Габаритные размеры					
наибольший диаметр, мм	48.5	36	27	32	32
наибольшая длина, мм	175	113	67	128	94
масса, г, не более	150	80	20	56	50

Поэтому при проведении исследований в ближней инфракрасной области обычно используют фотоприемники с Ag-O-Cs-фотокатодом. В астрономии наиболее распространенными фотоумножителями с Ag-O-Cs-фотокатодом считаются ФЭУ-83 (таблица). Другим представителем этого класса приемников является ФЭУ-112 с Ag-O-Cs-фотокатодом диаметром 15 мм, который имеет катодную камеру со специальным перехватывающим электродом, определяющим площадь, с которой фотоэлектроны из катода фокусируются на первый диод 14-диодной усилительной системы. Такая конструкция позволяет получить большое усиление ФЭУ при относительно малом темновом токе [9].

При проведении уникальных и дорогостоящих экспериментов в этой спектральной области есть возможность использовать приборы 14ЭЛУ-ФК, разработанные ВНИИОФИ (Россия) [5]. Но из-за высокой стоимости эти приемники используются крайне редко.

Однако развитие новых технологий и получение новых материалов позволило создать на основе соединений 3 и 5 группы периодической системы элементов новые материалы для фотокатодов с высоким квантовым выходом (до 40 %). На основе этих материалов был создан новый класс фотоумножителей, получивших название квантаконы. Это фотоумножители, у которых базовым материалом фотокатода является арсенид галлия (Ga-As) и его производные (Ga-As-P; In-Ga-As; In-Ga-As-P). Такие материалы позволяют получать значительно более высокую чувствительность фотокатодов, с существенно большим квантовым выходом, особенно в красной части спектральной характеристики. Так, фотокатод с отрицательным электронным сродством в виде четвертного соединения  $\text{In}_{0.88}\text{Ga}_{0.12}\text{As}_{0.26}\text{P}_{0.74}$  показал на длине волны  $\lambda = 1.06$  мкм квантовый выход 9 % и световую чувствительность 1640 мкА/лм [2]. Но производить приемники такого класса оказалось под силу лишь четырем фирмам в мире: японской фирме «Hamamatsu», фирмам RCA и «Variant LSE» (США), п/о «Электрон» г. Санкт-Петербург (Россия).

Фирма RCA (BURLE) США для фотоприемников C31034A и C3134 (-02,-04) с Ga-As-фотокатодом на длине волны  $\lambda = 850$  нм получила световую чувствительность фотокатода 1025 мкА/лм и квантовый выход 12.6 %, а для приемника C3134D с In-Ga-As-фотокатодом — на  $\lambda = 1100$  нм 150 мкА/лм и 0.2 % соответственно [16].

Фирма «Variant LSE» (США) выпустила фотоприемники VPM-152, VPM-159 и VPM-164 с InGaAsP-фотокатодом. Для лучших экземпляров этих приборов квантовый выход изменялся от 30 % на длине волны  $\lambda = 530$  нм до 1 % на длине волны  $\lambda = 1060$  нм.

На сегодняшний день фирма «Hamamatsu» (Япония) поставляет на мировой рынок широкий ассортимент фотоприемников различных типов, в том числе квантаконов. Фотоумножители, произведенные этой фирмой, с фотокатодом из Ga-As (типы R636, R943-02 и R666), в диапазоне длин волн  $\lambda \approx 860$  нм обладают световой чувствительностью до 600 мкА/лм и квантовым выходом до 9 %. Фотоумножители с In-Ga-As-фотокатодом (типа R2658 с боковым оптическим входом и рабочим диапазоном длин волн 185—1010 нм и типа R3310-02 с торцевым оптическим входом и рабочим спектральным диапазоном длин волн 300—1040 нм) имеют световую чувствительность около 100 мкА/лм и квантовый выход 0.2 % [13, 14, 15]. За последнее время фирма разработала новые фотоприемники R5509-42/-72 с удлиненным рабочим спектральным диапазоном до 1.4...1.7 мкм и квантовой эффективностью 1 % [17].

П/о «Электрон» (Россия), начиная с 1978 г., выпустило целый ряд различных фотоприемников на основе полупроводниковых соединений

групп  $A_3B_5$  (с Ga-As-фотокатодом), относящихся к классу эффективных электронных эмиттеров с отрицательным электронным средством (ОЭС). Это фотоумножители ФЭУ-138-1, ФЭУ-155, ФЭУ-156, ФЭУ-157. Световая чувствительность фотоэмиттеров таких приемников достигает величин 1000 мкА/лм и более. Для сравнения, тот же параметр для наиболее чувствительных многощелочных фотокатодов, относящихся к классу соединений групп  $A_1B_5$ , имеет значение 250 мкА/лм.

В фотоприемнике ФЭУ-138-1 в качестве торцевого фотокатода используется поликристаллический арсенид галлия на молибденовой подложке. Умножительная система прибора состоит из 13 штук сплавных (CuAlMg) динодов. Из них три первые — коробчатого, а остальные — жалюзийного типа.

В фотоприемниках ФЭУ-155, ФЭУ-156, ФЭУ-157 в качестве фотокатода с боковым оптическим входом используется монокристаллический арсенид галлия, обладающий наилучшей спектральной и световой чувствительностью. Система умножения этих приборов состоит из семи динодов коробчатого типа, что определяет их быстродействие (время нарастания импульсов 2.3 нс).

У фотоприемника ФЭУ-156 первые два динода умножителя покрыты материалом полупроводниковых соединений группы  $A_3B_5$ , коэффициент вторичной электронной эмиссии традиционных эмиттеров ФЭУ не превышает 5—10, аналогичный параметр для эмиттеров с ОЭС составляет 20—40. Фотоумножитель ФЭУ-155 отличается от ФЭУ-157 наличием коаксиального анодного выхода и гибкими выводами для остальных электродов [1].

В дальнейшем п/о «Электрон» на основе двух своих основных базовых моделей ФЭУ-138 и ФЭУ-157 разработало ряд новых модификаций фотоумножителей с Ga-As-фотокатодом ФЭУ-177, ФЭУ-180 и др., но рекордная световая чувствительность 1050 мкА/лм и квантовый выход 14 % на длине волны  $\lambda = 840$  нм были получены лишь для фотоумножителя ФЭУ-157. Следует отметить, что в классе квантаконов этот приемник имеет минимальный ( $\approx 5$  %) линейный наклон спектральной характеристики в диапазоне длин волн 350 ... 800 нм (рис. 1).

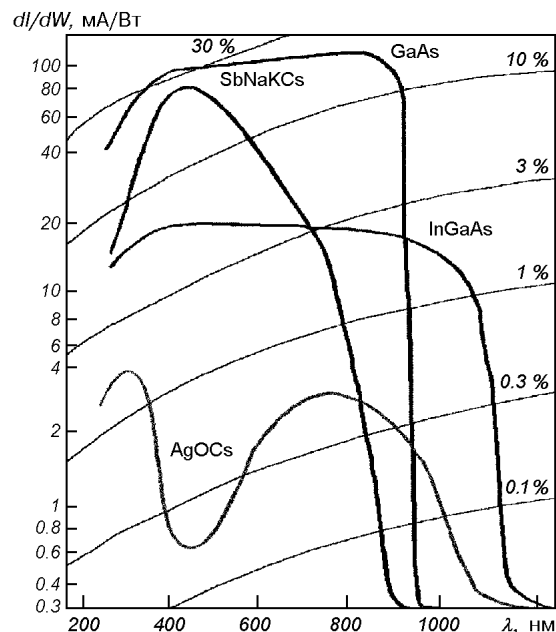


Рис. 1. Кривые спектральной чувствительности  $dI/dW$  ФЭУ разных типов

Последующие разработки привели п/о «Электрон» к созданию фотоумножителя с In-Ga-As-фотокатодом типа «Комета». Этот приемник с боковым оптическим входом имеет рабочий спектральный диапазон от 350 до 1060 нм и квантовую эффективность на  $\lambda = 1060$  нм до 1.0 %. Остальные технические характеристики приведены в таблице.

Как видно, этот приемник перекрывает весь видимый спектральный диапазон (350—1060 нм), а в ближней ИК-области (750—1060 нм) по чувствительности превосходит фотоумножители с AgOCs-фотокатодом — единственные (кроме квантаконов) способные работать в этом диапазоне длин волн) — более чем на порядок.

#### **ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ КЛАССА КВАНТАКОН**

Как показано в работах [10, 11], при комнатной температуре все квантаконы обладают высоким темновым шумом в основном за счет термоэмиссии. Поэтому работать с таким прибором при исследовании слабых источников света можно только предварительно охладив их и стабилизировав выбранную рабочую температуру. При использовании квантаконов возникает ряд специфических проблем, связанных с его охлаждением, выбором высоковольтного питания, оптимальным распределением этого питания по каскадам, созданием высокочастотного регистрирующего тракта с низким уровнем собственных шумов. Без их решения невозможно добиться положительного результата при астрономических исследованиях.

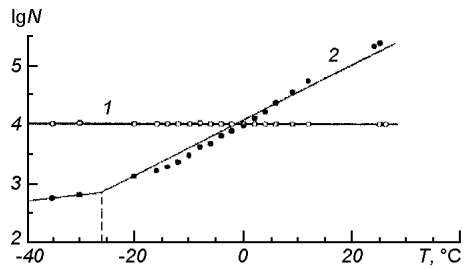
Поскольку чувствительность фотокатода определяется энергией выхода электрона с его поверхности, то изменение температуры, естественно, влияет на чувствительность фотоприемника. Влияние температуры на работу ФЭУ довольно подробно описано, в частности в работах [3, 4]. Однако данные зачастую противоречивы [4], к тому же квантаконы сравнительно новые и малоисследованные приборы. Поэтому при постановке точных экспериментов необходимо проводить температурные исследования квантаконов для уменьшения ошибок и правильного выбора рабочих режимов.

Предварительные исследования фотоумножителей ФЭУ-157 показали, что при комнатной температуре они обладают шумами порядка нескольких десятков — сотен тысяч импульсов в секунду, и поэтому измерение потока от слабых источников света в таких условиях производить невозможно. Охлаждение фотоприемника до  $+15$  °С (температура проточной воды) уменьшило величину шумов лишь вдвое. Сухой лед ( $T = -78$  °С) позволил уменьшить шумовой сигнал до десятков импульсов в секунду. Поэтому необходимо было провести цикл более детальных исследований с целью определения и оптимизации рабочих параметров: температуры, напряжения питания, порога дискриминации.

Нами были достаточно детально изучены температурные и счетные характеристики ФЭУ класса квантакон. Специально для этого было разработано и изготовлено ряд установок и стендов. Исследования, проведенные на этой аппаратуре, позволили получить температурную зависимость для световых и темновых импульсов квантакона (рис. 2). Экспоненциальный характер кривых свидетельствует, что в суммарном темновом сигнале преобладают шумы термоэмиссии, которые в основном и подаются «вымораживанию». Небольшой излом температурной кривой в районе температур  $-20...-30$  °С позволяет считать эту температуру оптимальной.

Счетные характеристики фотоумножителей позволяют не только правильно выбрать рабочее напряжение питания, но и качественно оценить

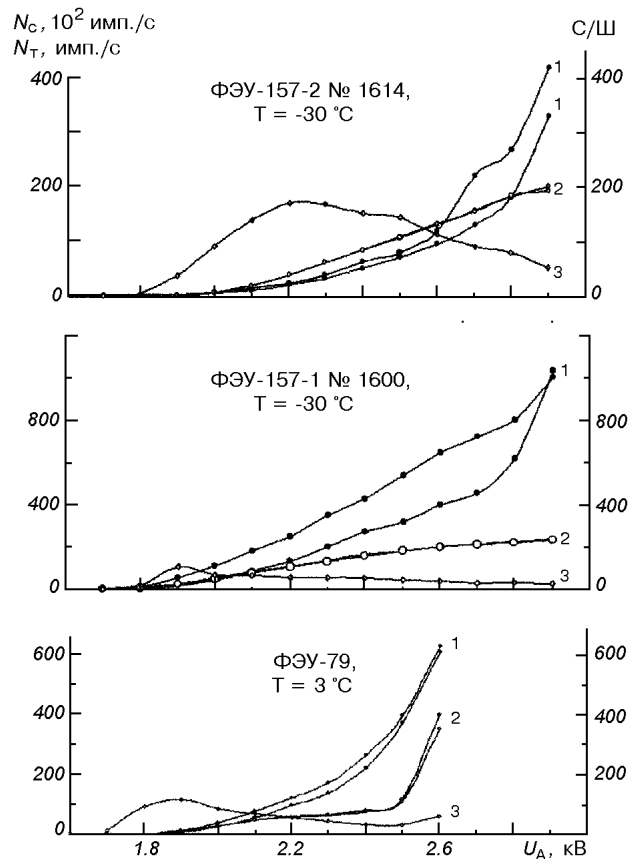
Рис. 2. Зависимость скорости счета световых (1) и темновых (2) импульсов от температуры



пригодность данного экземпляра ФЭУ. Счетные характеристики темнового и светового сигнала, полученные при температуре  $-30\text{ }^\circ\text{C}$  при последовательном изменении анодного напряжения в прямом и обратном направлениях для разных ФЭУ, представлены на рис. 3. Явно выраженного плато квантаконы не имеют. Однако графики зависимостей отношения числа сигнальных импульсов к числу импульсов шума от напряжения питания позволяют определить рабочую точку в районе максимума этих зависимостей. Разность чувствительности ФЭУ при изменении напряжения в прямом и обратном направлениях (гистерезис) также является его качественной характеристикой. Сравнения счетных характеристик как по чувствительности, так и по гистерезису позволяют выбирать лучший экземпляр из нескольких.

Далее при полученном напряжении питания и выбранной рабочей температуре определялся порог дискриминации. Важность этих исследований заключается в том, что нижний порог дискриминации определяет порог чувствительности всего регистрирующего тракта. Правильно выбранный

Рис. 3. Счетные характеристики темновых (1), световых (2) импульсов и их отношений (3) ФЭУ-157 и ФЭУ-79



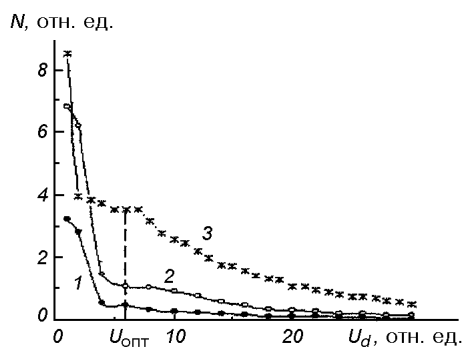


Рис. 4. Зависимость скорости счета темновых (1) и световых (2, 3) импульсов от порога дискриминации  $U_d$

порог дискриминации должен пропускать все полезные сигналы (т. е. быть минимальным) и не пропускать часть шумовых импульсов (т. е. ту часть, которую можно распознать и отделить от полезного сигнала).

На рис. 4 приведены зависимости скоростей счета темновых и световых импульсов разной интенсивности от величины порога дискриминации, полученные при температуре  $-30^\circ\text{C}$ . Несмотря на то, что величины интенсивностей световых импульсов отличаются друг от друга примерно на три порядка, характер этих кривых одинаков. Это позволяет довольно корректно установить оптимальный порог дискриминации в районе изгиба графиков световых и темновых характеристик. Затем при заданном пороге дискриминации и разных температурах снимались счетные характеристики ФЭУ (рис. 5, б) и окончательно определялись рабочее напряжение питания высоковольтного диодного делителя для каждого ФЭУ.

Из графиков счетных характеристик, полученных при разных температурах (рис. 5), видно, что положение порога дискриминации не влияет на форму кривых, а только на их расположение на координатной плоскости. При оптимальном пороге дискриминации графики зависимостей скоростей счета темновых и световых импульсов «сжимаются» в узкие пучки, а при увеличенном пороге — «расползаются».

Оптимизация рабочих параметров ФЭУ завершалась исследованием и корректировкой напряжения на двух первых и последнем каскадах высоковольтного делителя. Исследования показали, что изменение напряжения на

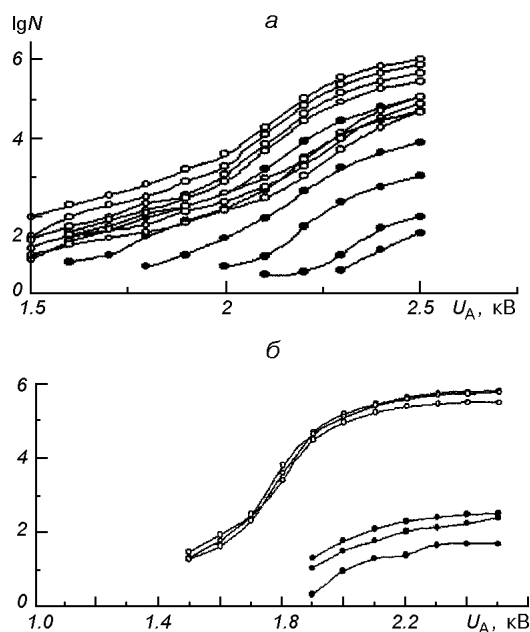
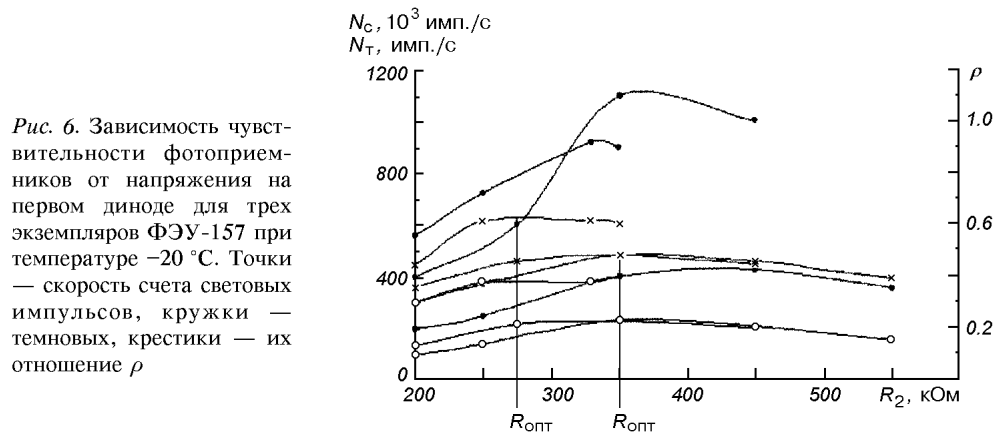


Рис. 5. Счетные характеристики темновых (точки) и световых (кружки) импульсов при разных температурах: а — при большом пороге дискриминации; б — для ФЭУ-157 ( $T = -30, -40, -50^\circ\text{C}$ ) при оптимальном значении порога дискриминации





фокусирующем электроде не приводит к изменению спектральной характеристики. Изменение напряжения на первом диноде позволяет достаточно эффективно скорректировать чувствительность ФЭУ и повысить отношение сигнал/шум (рис. 6). Причем для каждого ФЭУ это напряжение подбирается индивидуально. В нашем случае это напряжение необходимо понизить на 10—35 %. Аналогичные исследования, проведенные для определения оптимального напряжения на последнем каскаде, показали, что для данного ФЭУ напряжение последнего каскада должно быть уменьшено втрое.

#### ВЫВОДЫ

Итак, для астрономических исследований в широком спектральном диапазоне ( $\lambda = 320\text{...}1070\text{ нм}$ ) следует выбирать фотоумножитель, у которого фотокатод изготовлен из материала InGaAs. Для более узкого спектрального диапазона  $\lambda = 350\text{...}900\text{ нм}$  рациональным будет использование фотоумножителя ФЭУ-157 с AsGa-фотокатодом, который имеет максимальную чувствительность среди квантакон. Для дешевых экспрессных исследований возможно применение мультищелочного фотоумножителя ФЭУ-79 и его модификаций.

Исследования режимов работы фотоумножителей класса квантакон показали, что они могут нормально работать в спектрополяриметрической аппаратуре в спектральном диапазоне 320—1070 нм в режиме счета фотонов. Однако при комнатной температуре при работе со слабыми источниками света их шумы превосходят полезный сигнал. Проведенные температурные исследования показали, что рабочей температурой фотоумножителей класса квантакон является температура  $-20\text{...}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Дальнейшую работу по поиску оптимальных режимов питания высоковольтного динодного делителя напряжений, в отношении его неравномерности, оптимального режима дискриминации следует вести при этой температуре для каждого фотоприемника индивидуально. Методики по отбору фотоумножителей класса квантакон и выбору их оптимальных параметров хорошо согласуются с методиками и рекомендациями сделанными для других фотоумножителей [4—8 и др.].

Полученный нами опыт исследования фотоумножителя класса квантакон позволяет сформулировать следующие рекомендации, которые могут быть полезными при проектировании и создании фотометрических головок на его базе:

1. Фотоумножители класса квантакон необходимо охлаждать до температуры  $-20\text{...}-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , которую следует считать оптимальной и задавать при

расчете и создании холодильных агрегатов. Дальнейшее снижение температуры для этих фотоумножителей малоэффективно.

2. Рабочее напряжение питания фотоумножителей класса квантакон лежит в диапазоне 1900 ... 2300 В. В этом интервале следует искать оптимальное напряжение для каждого фотоприемника индивидуально.

3. Повысить чувствительность фотоумножителей класса квантакон можно используя неравномерный динодный делитель с пониженными напряжениями на двух первых и последнем динодах.

4. Порог дискриминации должен подбираться для каждого фотоумножителя в районе максимума отношения сигнал/шум.

5. Процесс вышумления фотоумножителей класса квантакон должен длиться не менее трех часов.

1. Александров И. Р., Вильдгрубе Г. С., Дунаевская Н. В., Пальтс Т. Н. Фотоумножители с фото- и вторичными эмиттерами из материалов группы АЗВ5 // Электронная промышленность.—1985.—Вып. 9.—С. 31—33.
2. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. — М.: Радио и связь, 1988.—272 с.
3. Бобрович В. П., Буцкий В. В., Ветохин С. С. Отбор экземпляров ФЭУ-84-3 по одноэлектронным характеристикам фотометров // Приборы и техн. эксперимента.—1996.—№ 4.—С. 132—134.
4. Ветохин С. С., Гулаков И. Р., Перцев А. Н., Резников И. В. Одноэлектронные фотоприемники. — М. Энергоатомиздат, 1986.—161 с.
5. Ветохин С. С., Ермалицкий Ф. А., Мельников С. М. и др. Современные фотоумножители для кинетической и одноквантовой спектрометрии // Приборы и техн. эксперимента.—1998.—№ 2.—С. 5—12.
6. Глуховской Б. М., Ярошенко И. Ф. Одноэлектронные характеристики ФЭУ-147 // Приборы и техн. эксперимента.—1990.—№ 3.—С. 156—157.
7. Калилис Р., Ралене Ф., Стульпинене Н. Исследование фотоумножителей ФЭУ-79 и ФЭУ-106 и оценка их качества // Бюл. Вильнюс. Астрон. обсерватории.—1985.—№ 71.—С. 19—44.
8. Калилис Р., Ралис Д.-А., Ралене Ф. Влияние основных параметров счетчика фотонов на качество регистрации // Бюл. Вильнюс. Астрон. обсерватории.—1985.—№ 71.—С. 3—19.
9. Лебедев Е. А., Марков В. И. Характеристики фотоумножителя ФЭУ-112 с кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодом в режиме счета фотонов // Приборы и техн. эксперимента.—1984.—№ 5.—С. 151—152.
10. Неводовский П. В., Дементьев М. С. Температурные характеристики фотоумножителя с InGaAs-фотокатодом // Приборы и техн. эксперимента.—1997.—№ 2.—С. 105—106.
11. Неводовский П. В., Сосонкин М. Г., Фоменко А. А. Исследование зависимостей шумовых характеристик ФЭУ-157 от температуры в одноэлектронном режиме // Кинематика и физика небес. тел.—1993.—9, № 2.—С. 89—93.
12. Accessories for Photomultiplier Tubes // Hamamatsu Catalog. — 1998 Feb.—44 p.
13. Head-on PMT with extended spectral response to 1.4 or 1.7  $\mu\text{m}$  // Hamamatsu Euro News.—1999.—1.—P. 4.
14. Photomultipliers // Burle Electron Tubes Catalog. — 1997.
15. Photomultipliers // Thorn EMI Electron Tubes Ltd Catalog. — 1986.—52 p.
16. Photomultiplier Tubes // Hamamatsu Catalog. — 1997 Dec.
17. Photonic Devices for Scientific Instruments // Hamamatsu Catalog. — 1998.

Поступила в редакцию 12.06.01