



DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.160.165

## МКП-ФЭУ – счетчики фотонов для УФ- и видимой областей спектра

С. К. Кулов, Т. Д. Алкацева, Г. В. Федотова, Е. И. Сенцова  
ООО ВТЦ «Баспик», г. Владикавказ, Россия

Сообщается о разработке МКП-ФЭУ – счетчиков фотонов в ультрафиолетовой и видимой областях спектра для оптико-физических измерений. Рассматриваются особенности конструкции и технологии разработанных ФЭУ с МКП, позволяющие достичь высокого отношения пик/долина, низкого уровня скорости счета темновых импульсов, повышенного уровня долговечности. Приводятся различные варианты конструктивного исполнения ФЭУ (в виде вакуумных блоков и со встроенным в единый корпус с вакуумным блоком делителем напряжения).

**Ключевые слова:** счетчики фотонов, амплитудное распределение импульсов, скорость счета темновых импульсов, ионная обратная связь, отношение пик/долина, ФЭУ со встроенным делителем напряжения

Статья получена: 11.01.2024

Статья принята: 05.02.2024

При регистрации очень слабых световых сигналов для извлечения максимальной информации используется метод счета фотонов. Счетчики фотонов являются одним из основных типов детекторов в физике высоких энергий и ядерной физике. В качестве детекторов-счетчиков фотонов обычно используются ФЭУ с дискретными диодами, ФЭУ с МКП, лавинные диоды, гибридные ФЭУ. Среди этих видов детекторов ФЭУ с МКП выгодно отличаются высоким усилением и быстродействием, повышенной площадью рабочей поверхности, низким энергопотреблением, стабильной работой в условиях воздействия магнитных полей. Полупроводниковые детекторы оптического излучения уступают ФЭУ с МКП по шумовым характери-

## MCP-PMT – Photon Counting UV-VIS Detectors

S. K. Kulov, T. D. Alkatseva, G. V. Fedotova, E. I. Sentsova  
VTC “Baspik” LLC, Vladikavkaz

The development of MCP-PMT – photon counting UV-VIS detectors for optical-physical measurements is reported. MCP-PMTs design and technology features are described, which allow achieving high peak-to-valley ratio, low dark count rate and longer lifetime. We present different versions of PMT constructions (in the form of vacuum units and with a voltage divider integrated into a single housing with a vacuum unit).

**Keywords:** photon counting detectors, pulse height distribution, dark count rate, ion feedback, peak-to-valley ratio, PMT with integrated voltage divider

Article received: 11.01.2024

Article accepted: 05.02.2024

When detecting extremely weak photon signals, the photon counting method is used to extract the maximum information. Photon counting detectors are one of the main types of detectors for high-energy and nuclear physics. Discrete dynodes PMTs, MCP-PMTs, avalanche dynodes, and hybrid PMTs are usually used as photon counting detectors. Among these detector types, MCP-PMTs are favorably characterized with high amplification and fast response, increased surface area, low power consumption, and stable operation under the exposure to magnetic fields. Solid-state optical detectors concede to MCP-PMTs in terms of noise characteristics, time resolution, and active area.

Low noise characteristic is necessary for photon counting. Detection efficiency depends to a great extent on the threshold level set for the counting (discrimination) mode. The pulse height distribution is a critical feature for photon counting mode. Single-electron peak presence in the single photon counting mode (Fig. 1, 2) allows cutting off a large number of small amplitude noise pulses without significant losses of registration efficiency. Since, typically the lower threshold of the pulse amplitude is set (dis-

кам, временному разрешению, площади рабочей поверхности.

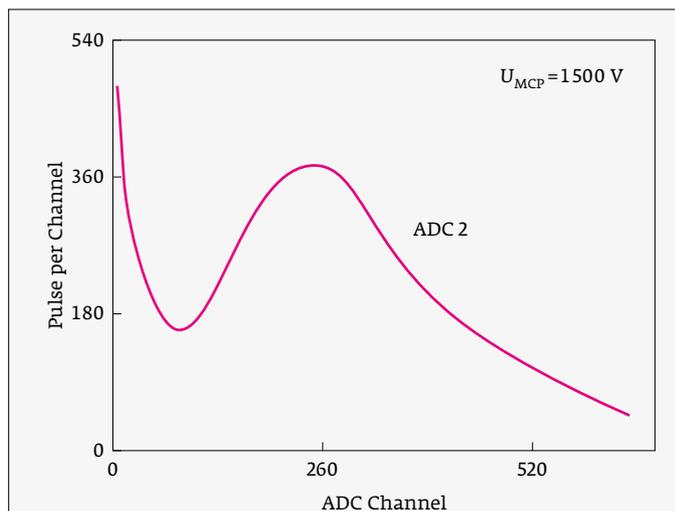
Низкий уровень шума является необходимым условием при фотонном счете. Эффективность детектирования в значительной степени зависит от порогового уровня, устанавливаемого для режима счета (дискриминации). Распределение амплитуд импульсов является критической характеристикой для работы в режиме счета фотонов. Наличие одноэлектронного пика в режиме счета отдельных квантов (рис. 1, 2) позволяет отсеять большое число шумовых импульсов малой амплитуды без существенной потери эффективности регистрации. Так как обычно нижний порог амплитуды импульса устанавливается (дискриминируется) на позиции долины, высокое соотношение пик/долина в распределении импульсов по амплитудам создает условия для более эффективной регистрации сверхслабых объектов свечения, позволяя повесить отношение сигнал/шум.

С другой стороны, ФЭУ с традиционными МКП (в отличие от МКП с ALD-покрытием) свойственен такой недостаток, как непродолжительный срок службы. По данным источников литературы [1-3], существенное ухудшение характеристик ФЭУ наблюдается, когда общий заряд, проходящий через МКП, превышает десятые, а иногда даже и сотые доли Кл/см<sup>2</sup>. Низкий срок службы связывают с ионной бомбардировкой фотокатода ФЭУ. Ионы возникают в каналах МКП в результате раз-

criminated) at the valley position; the high peak-to-valley ratio in the pulse height distribution creates conditions for more efficient registration of very weak luminescence objects, allowing increasing the signal-to-noise ratio.

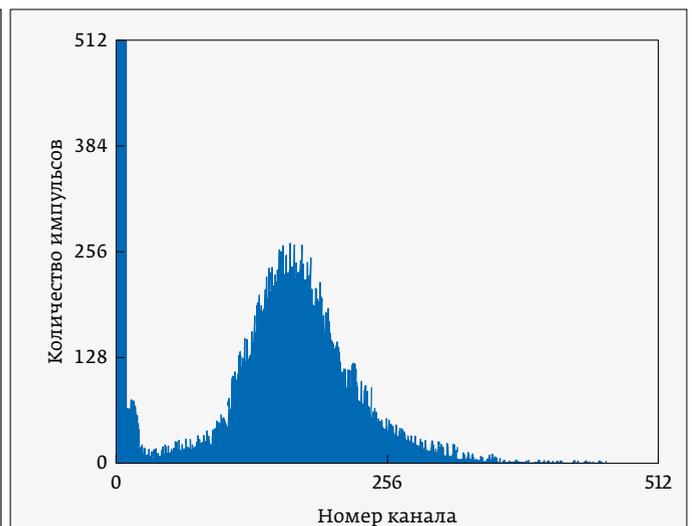
On the other hand, PMTs with conventional MCPs (unlike ALD-coated ones) are characterized by such disadvantage as short lifetime. According to historical data [1-3] it is indicated that a significant degradation of the PMT performance is observed when the total charge passing through the MCP exceeds tenths and sometimes even hundredths of Cl/cm<sup>2</sup>. Short lifetime is determined by ion bombardment of the PMT photocathode. Ions are generated in MCP channels as a result of decomposition and desorption of foreign particles on the channel walls when bombarded by electrons and as a result of ionization of desorbed compounds and residual gases by electron fluxes. The generated ions are accelerated by the electric field towards the photocathode, where they are either absorbed or destroy the molecular structure. As a consequence, the quantum efficiency of the photocathode is reduced. Ion feedback also negatively affects amplitude resolution, peak-to-valley ratio, and dark count rate.

To increase the lifetime of MCP-PMTs, some engineers deposit a protective aluminum film on the first and sometimes on the second MCP (in order not to reduce the physical transparency of the MCP chevron stack input). The film allows electrons to pass through,



**Рис. 1.** Типичное распределение одноэлектронных импульсов по амплитудам для ФЭУ с МКП [1]

**Fig. 1.** MCP-PMT typical single electron pulse height distribution [1]



**Рис. 2.** Распределение одноэлектронных импульсов по амплитудам в ФЭУ «Сапфир-2А»

**Fig. 2.** PMT "Sapphire-2A" single electron pulse height distribution [1]

ложения и десорбции посторонних веществ на стенках каналов при бомбардировке их электронами и в результате ионизации десорбированных соединений и остаточных газов потоками электронов. Образующиеся ионы ускоряются электрическим полем по направлению к фотокатоду, где они либо поглощаются, либо разрушают молекулярную структуру. Следствием является снижение квантового выхода фотокатода. Ионная обратная связь также негативно влияет на амплитудное разрешение, отношение пик/долина, уровень темнового счета.

Для повышения срока службы ФЭУ с МКП некоторые разработчики наносят защитную алюминиевую пленку на первую, а иногда на вторую МКП (чтобы не снижать физическую прозрачность входа шевронной сборки МКП). Пленка пропускает электроны, но непрозрачна для ионов. Такой прием использует фирма Hamamatsu в серии счетчиков фотонов R 3809U.

Однако алюминиевая пленка, нанесенная на поверхность МКП, поглощает 30–50% бомбардирующих ее электронов, т.е. снижает полезный сигнал, ухудшая отношение сигнал/шум.

Конструкция ФЭУ и способ электронного обезгаживания МКП, примененный в этой конструкции, разработанные в ООО ВТЦ «Баспик», позволяют практически исключить ионную обратную связь. За счет этого удается минимизировать плотность скорости счета темновых импульсов, улучшить одноэлектронное амплитудное распределение импульсов, повысить отношение пик/долина до

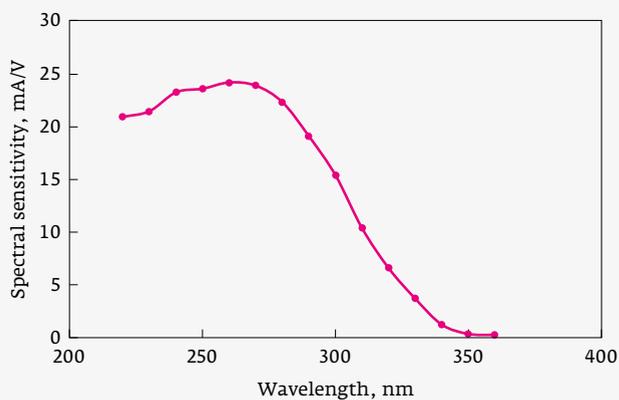
but is opaque to ions. This technique is used by Hamamatsu in the R 3809U series of photon counters.

However, the aluminum film deposited on the MCP surface absorbs 30–50% of the bombarding electrons, i.e. it reduces the effective signal, worsening the signal-to-noise ratio.

The PMT design and the method of MCP electron degassing developed in VTC “Baspik” LLC allow to practically eliminating the ion feedback. This makes possible minimizing dark count rate density, improve the single-electron pulse height distribution and peak-to-valley ratio to uniquely high values, increase the permissible input load and expand PMTs dynamic range, significantly enlarge lifetime up to  $Cl/cm^2$ .

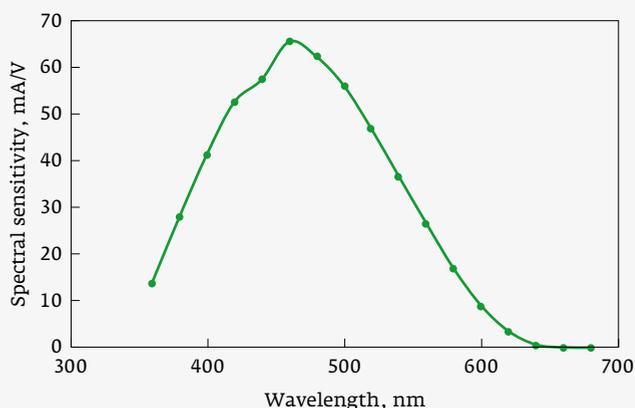
We developed 2 modifications of PMTs characterized by the type of photocathode: “Sapphire-2A” with a tellurium-cesium photocathode (for the UV region of the spectrum) and “Topaz” with a bi-alkali photocathode (for the visible range of the spectrum). Typical spectral characteristics of photocathodes are shown in Fig. 3–4.

The developed PMTs constructively consist of metal-glass vacuum units with end optical input (bi-alkali antimony-potassium-sodium photocathode on glass substrate or tellurium-cesium photocathode on magnesium fluoride substrate), assembled in chevron stack MCPs with active area diameter of 18 mm and channel diameter of 8  $\mu m$  and metal collector. PMT “Sapphire-2A” photocathode active area diameter is 15 mm, which of the PMT “Topaz” is 17 mm. The PMTs have an electron immersion lens at the input – a system of electrodes that collect electrons from the pho-



**Рис.3.** Спектральная характеристика фотокатода ФЭУ «Сапфир-2А»

*Fig. 3.* PMT “Sapphire-2A” photocathode spectral characteristic



**Рис. 4.** Спектральная характеристика фотокатода ФЭУ «Топаз-М»

*Fig. 4.* PMT “Topaz-M” photocathode typical spectral characteristic

уникально высоких значений, повысить допустимую загрузку на входе и расширить динамический диапазон ФЭУ, значительно повысить долговечность ФЭУ до уровня единиц Кл/см<sup>2</sup>.

Разработаны две модификации ФЭУ, отличающиеся типом фотокатода: «Сапфир-2А» с теллур-цезиевым фотокатодом (для УФ-области спектра) и «Топаз» с бищелочным фотокатодом (для видимого диапазона спектра). Типовые спектральные характеристики фотокатодов показаны на рис. 3 и рис. 4.

Разработанные ФЭУ конструктивно представляют собой металlostеклянные вакуумные блоки с торцевым оптическим входом (бищелочной сурьмяно-калиево-натриевый фотокатод на стеклянной подложке или теллур-цезиевый фотокатод на подложке из фтористого магния), собранными в шеврон двумя МКП с рабочим диаметром 18 мм и диаметром канала 8 мкм и металлическим коллектором. Рабочий диаметр фотокатода ФЭУ «Сапфир-2А» составляет 15 мм, ФЭУ «Топаз» – 17 мм. ФЭУ имеют электронную иммерсионную линзу на входе – систему электродов, обеспечивающих сбор электронов с фотокатода на вход первой МКП. Конструкция содержит подогревный газопоглотитель ПЦ-1М, расположенный в конусной части анода катодной камеры. Внешний вид ФЭУ представлен на рис. 5.

Применение в ФЭУ с МКП иммерсионной линзы на входе способствует повышению скорости допустимой загрузки (из-за большего расстояния между электродами, снижающего вероятность пробоя при резком увеличении входного сигнала). Большой, чем в бипланарных конструкциях, объем изделия приводит к тому, что одинаковое количество выделяющихся при электронной бомбардировке газов в процессе эксплуатации ФЭУ вызывает меньшее изменение остаточного давления, что снижает количество образующихся ионов.

Разработанные ФЭУ могут длительное время (на практике сотни часов) работать при скоростях счета порядка 1–3 МГц. Типовое отношение пик/долина в одноэлектронном амплитудном распределении импульсов разработанных ФЭУ составляет около 20 (рис. 2), тогда как в диодных ФЭУ для аналогичных применений, а также в ФЭУ с МКП других производителей (рис. 1) типовое значение близко к 2. Такое высокое отношение пик/долина по данным литературы [5] не зафиксировано ни в одном ФЭУ с МКП. Авторы [5] сообщают, что в их экспериментах с ФЭУ с 2 МКП наилучшее значение пик/долина составило 6, при этом амплитуд-

тодотודה to the input of the first MCP. The design contains a heated gas absorber PC-1M located in the anode cone part of the cathode chamber. The external view of the PMT is presented in Fig. 5.

Use of immersion lens at the MCP-PMT input contributes to the increase in the rate of permissible load (due to the longer distance between the electrodes, reducing the probability of breakdown at a sharp increase in the input signal). The larger volume of the product than in proximity-focused designs results in the fact that the same amount of gas emitted by electron bombardment during of the PMT operation causes a smaller change in the residual pressure, reducing the number of ions produced.

The developed PMTs can operate for a long time (hundreds of hours in practice) at count rates of 1–3 MHz. The peak-to-valley ratio in the single-electron pulse height distribution of the developed PMTs can reach 20 and more (Fig. 2), whereas in dynode PMTs for similar applications, as well as in MCP-PMTs by other manufacturers (Fig. 1), the typical value is close to 2. Such a high peak-to-valley ratio according to the available information [5] has not been recorded in any MCP-PMT. The authors [5] report that their experiments with PMTs with a stack of 2 MCPs showed the best peak-to-value ratio – 6, amplitude resolution – 86% and they note that, according to their data, these values are the best known



Рис. 5. МКП-ФЭУ производства «Баспик»  
Fig.5. MCP-PMT developed by "Baspik"

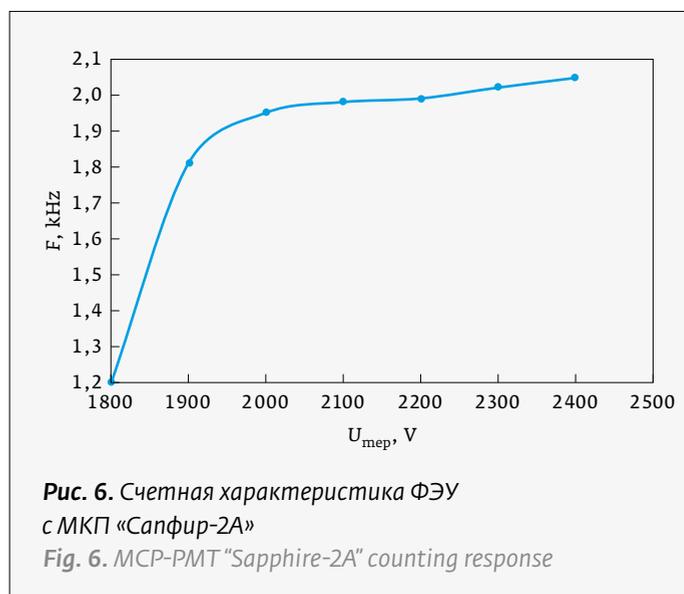
**Таблица 1.** Основные технические характеристики ФЭУ «Сапфир-2АМ»

**Table 1.** Basic technical characteristics of the PMT "Sapphire-2AM"

Параметр Parameter	Значение Value
Диапазон спектральной чувствительности, нм Spectral response range, nm	115–360
Спектральная чувствительность на длине волны $\lambda = 250$ нм, мА/Вт, не менее Spectral response at $\lambda = 250$ nm, mA/W, min	20
Диаметр рабочего поля фотокатода, мм Photocathode active area diameter, mm	15
Коэффициент усиления при напряжении на МКП не более 3 300 В, не менее Gain at MCP voltage of 3 300 V max, min	$10^6$
Одноэлектронное амплитудное разрешение, %, не более Single electron pulse height resolution, %, max	100
Отношение пик/долина, не менее Peak-to-valley ratio, min	10
Плотность скорости счета темновых импульсов, $\text{сек}^{-1}\text{см}^{-2}$ , не более Dark count rate density, count/sec·cm <sup>2</sup> , ma	10
Длительность импульса анодного тока (ПШПВ), нс, не более Anode current pulse duration (FWHM), ns, max	1,2
Время нарастания импульса анодного тока, нс, не более Anode current pulse rise time, ns, max	0,8
Масса, г, не более Mass, g, max	50

ное разрешение было равно 86% и отмечают, что, по их данным, эти значения являются наилучшими из известных для ФЭУ с двумя МКП. Фирма Hamamatsu [6] оценивает как большой успех получение в ЭОП – счетчике фотонов с 3 МКП отношение пик/долина 5,6 и амплитудного разрешения 104%, в то время как в ФЭУ «Сапфир-2А» и «Топаз» с двумя МКП типичное значение этих параметров составляет 20 и 90% соответственно. Счетная характеристика ФЭУ имеет участок плато продолжительностью почти 300 В (рис. 6). Основные технические характеристики ФЭУ «Сапфир-2АМ» и ФЭУ «Топаз-М» приведены в табл. 1 и табл. 2.

Разработанные ФЭУ уже находят применение в ядерной физике в качестве детекторов черенковского излучения.


**Рис. 6.** Счетная характеристика ФЭУ с МКП «Сапфир-2А»

**Fig. 6.** MCP-PMT "Sapphire-2A" counting response

for PMTs with two MCPs. Hamamatsu [6] estimates as a great success the peak-to valley ratio of 5.6 and amplitude resolution of 104% in the IIT photon counting tube with a stack of 3 MCPs, while in the "Sapphire-2A" and "Topaz" PMTs with two MCPs the typical value of these parameters is 10 and 90%, respectively. The counting characteristic of the PMT has a plateau region with duration of almost 300 V (Fig. 6).

Developed PMTs have already been applied in nuclear physics as detectors of Cherenkov radiation.

We can supply PMTs both as vacuum units and with a voltage divider integrated into a single housing with a vacuum unit. In this case, a resistive voltage divider is mounted on the vacuum unit, which provides the necessary potentials of the PMT electrodes. The external view of the MCP-PMT with integrated voltage divider is shown in Fig.7. The entire device is housed and sealed with a compound, attached to the output end of the envelope is a 50-Ohm SMA output connector for output signal acquisition and a high-voltage SHV connector for the power supply.

## AUTHORS

Kulov Soslan Kubadievich, Dr. of Sc. (Engin), CEO, LLC VTC "Baspik", Vladikavkaz, Russia.

Alkatseva Tatyana Danilovna, Cand. of Sc. (Engin), dir. for quality, LLC VTC "Baspik", Vladikavkaz, Russia.

Fedotova Galina Vasilievna, head lab. MCP detectors, VTC "Baspik", Vladikavkaz, Russia.

Sentsova Elena Igorevna, senior engineer, lab. MCP detectors, VTC "Baspik", Vladikavkaz, Russia.

## CONFLICT OF INTERESTS

The article has been prepared based on the work of all composite authors.

All authors took part in preparation of the article and supplemented the manuscript in terms of their scope of work. The authors declare that they have no conflict of interests.



**Рис. 7.** МКП-ФЭУ со встроенным делителем напряжения  
**Fig. 7.** MCP-PMT with integrated voltage divider

Конструкция ФЭУ предполагает их поставку как в виде вакуумных блоков, так и со встроенным в единый корпус с вакуумным блоком делителем напряжения. В этом случае на вакуумный блок монтируется резистивный делитель напряжения, который обеспечивает необходимые потенциалы электродов ФЭУ. На рис. 7 представлен МКП-ФЭУ со встроенным делителем напряжения. Все устройство помещается в корпус и герметизируется компаундом, на торцевом выходе корпуса располагается 50-омный разъем для снятия выходного сигнала SMA и высоковольтный разъем SHV для подачи напряжения питания.

## REFERENCES

1. **Anashin V. V., Beschastnov P. M., Golubev V. B.** Photomultipliers with microchannel plates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 1995;357:103–109.
2. **Lehmann A. et al.** Recent Developments with Microchannel-Plate PMTs *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2017; 976:42–47
3. **Thomas M. Connelly, James S. Milnes, Joh Howorth.** *Extended lifetime MCP-PMTs*. URL: <https://archive.org/details/arxiv-1010.1057>.
4. **Bultner A.** *Single-Photon Counting Detectors for the Visible Range between 300 and 1,000 nm*. Springer International Publishing. Switzerland. 2014.
5. **Orlov D. A., DeFazio J., Pinto S. D., Glazenberg R., Kernen E.** High quantum efficiency S-20 photocathodes in photon counting detectors. *JINST*. 2016; 11: C04015. URL: <http://iopscience.iop.org/1748-0221/11/04/C04015>.
6. **Mizuno I., Nihashi T. et al.** Development of UV image intensifier tube with GaN photocathode. *Proc. Of SPIE*. 2008;6945. DOI:10.1117/12.778539.

## АВТОРЫ

Кулов Сослан Кубадиевич, д. т. н., ген. дир., ООО ВТЦ «Баспик», г. Владикавказ, Россия.  
Алкацева татьяна Даниловна, е. т. н., дир. по качеству, ООО ВТЦ «Баспик», г. Владикавказ, Россия.  
Федотова Галина Васильевна, нач. лаб. МКП-детекторов, ВТЦ «Баспик», г. Владикавказ, Россия.  
Сенцова Елена Игоревна, ст. инж., лаб. МКП-детекторов, ВТЦ «Баспик», г. Владикавказ, Россия.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы. Авторы декларируют отсутствие между ними конфликта.

**Таблица 2.** Основные технические характеристики ФЭУ «Топаз-М»

**Table 2.** Basic technical characteristics of PMT "Topaz-M"

Параметр Parameter	Значение Value
Диапазон спектральной чувствительности, нм Spectral response range, nm	300–650
Интегральная чувствительность, мкА/ лм, не менее Integral sensitivity, $\mu\text{A}/\text{lm}$ , min	35
Спектральная чувствительность на длине волны $\lambda = 420$ нм, мА/Вт, не менее Spectral response at $\lambda = 420$ nm, $\text{mA}/\text{W}$ , min	45
Диаметр рабочего поля фотокатода, мм Photocathode active area diameter, mm	17
Коэффициент усиления при напряжении на МКП не более 3300 В, не менее Gain at MCP voltage of 3300 V max10, min	$10^6$
Одноэлектронное амплитудное разрешение, %, не более Single electron pulse height resolution, %, max	100
Отношение пик/долина, не менее Peak-to-valley ratio, min	10
Плотность скорости счета темновых импульсов (при температуре 25 °С), сек <sup>-1</sup> см <sup>-2</sup> , не более Dark count rate density, (at 25 °C) count/sec $\times$ cm <sup>2</sup> , max	40
Длительность импульса анодного тока (ПШПВ), нс, не более Anode current pulse duration (FWHM), ns, max	1,2
Время нарастания импульса анодного тока, нс, не более Anode current pulse rise time, ns, max	0,8
Масса, г, не более Mass, g, max	50

## CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared based on the work of all members of the team of authors. All authors participated in the writing of the article and contributed to the manuscript in part of their work. The authors declare that there is no conflict between them.