

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

В 123

P13-88-278

**Я.Ваврышук, А.И.Иванов*, Г.А.Исаакьян*,
М.Левандовский, И.Ф.Учеваткин*, И.А.Ютландов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН**

*** Всесоюзный научно-исследовательский институт
метрологии им. Д.И.Менделеева, Ленинград**

1988

1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс в улучшении временных характеристик субнаносекундной ядерной электроники, а также появление быстрых сцинтилляторов, выдвигает повышенные требования к параметрам фотоумножителей, являющихся одним из основных источников временного разброса сигналов в сцинтилляционных спектрометрах.

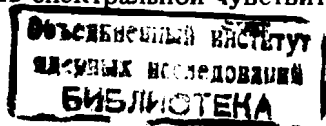
Новым направлением улучшения быстродействия ФЭУ являются разработки¹¹⁻⁴¹, основанные на применении микроканальных пластин (МКП) — ФЭУ на МКП, обеспечивающие время нарастания импульса менее 0,5 нс при разбросе времени пролета электронов около 0,1 нс. Кроме того, ФЭУ этого типа отличаются малой длиной (расстояние фотокатод — анод < 10 мм) и тем самым пониженной чувствительностью к магнитным полям. Все это обеспечивает широкую перспективу их применения в различных областях экспериментальной физики.

Первые работы¹⁵⁻⁷¹ по применению ФЭУ на МКП в спектрометрии γ -излучения выявили в использованных экземплярах некоторые недостатки, в том числе низкую квантовую эффективность фотокатодов, по сравнению с традиционными ФЭУ, и худшие условия сбора фотоэлектронов.

В настоящей работе представлены результаты исследований временных и амплитудных характеристик четырех образцов отечественных ФЭУ на МКП с повышенной чувствительностью фотокатодов и коэффициентом сбора фотоэлектронов, превышающим 70%.

2. КОНСТРУКЦИЯ И СОБСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Исследованные экземпляры ФЭУ на МКП содержат по две микроканальные пластины¹¹¹ размером $\varnothing 32 \times 0,95$ мм с каналами диаметром 12 мкм, плоский анод и полупрозрачный Sb-K-Na-Cs-фотокатод с рабочим диаметром 25 мм (рис.1). Межэлектродные расстояния не превышают 1 мм. Пролетная длина электронов составляет примерно 4,5 мм. Диаметр внешнего корпуса 52-55 мм, длина — 16 мм. Квантовая эффективность фотокатодов исследованных экземпляров составила при $\lambda = 380$ нм 8, 13, 17 и 18%. Характерная для этих фотокатодов зависимость спектральной чувствительности $S_k(\lambda)$ и квантовой



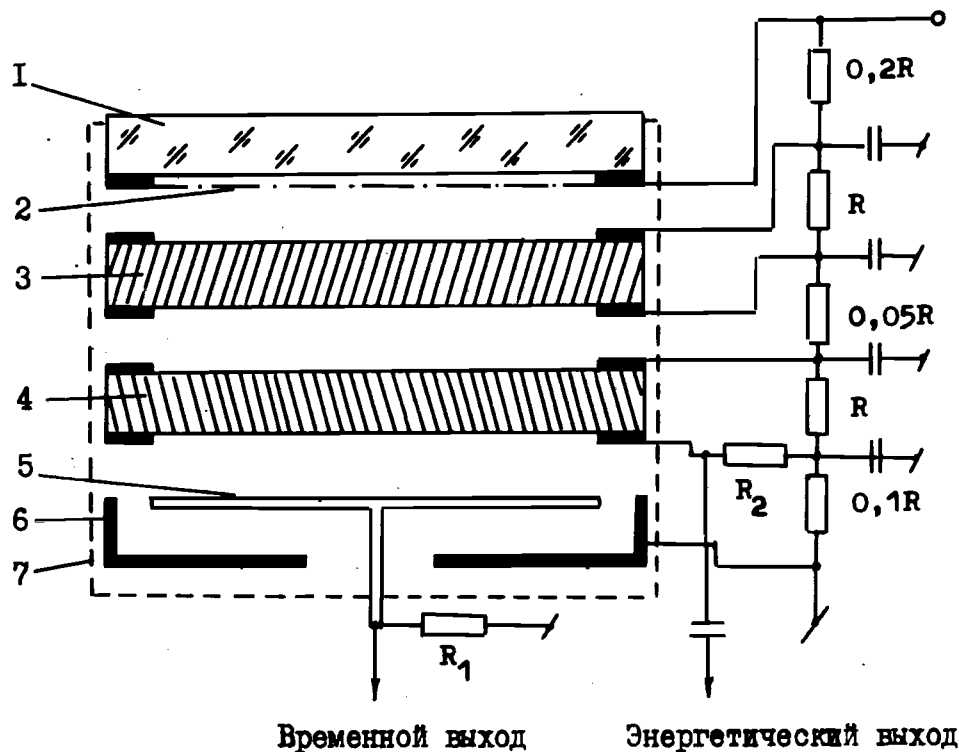


Рис.1. Схема конструкции ФЭУ на МКП: 1 – входное окно из увиолевого стекла толщиной 4 мм, 2 – фотокатод, 3, 4 – последовательно расположенные МКП (каналы пластин наклонены друг к другу под углом 155-160°), 5 – анод, 6 – охранное кольцо, 7 – корпус.

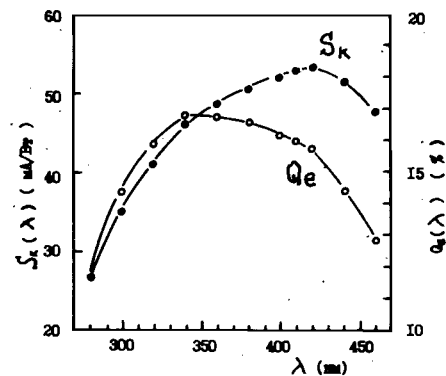


Рис.2. Зависимость спектральной чувствительности $S_k(\lambda)$ и квантовой эффективности $Q_e(\lambda)$ фотокатода ФЭУ на МКП №3 от длины световой волны λ в диапазоне $\lambda = 280 \div 460$ нм.

эффективности $Q_e(\lambda)$ от длины световой волны λ , в диапазоне $\lambda = 280 \div 460$ нм, представлена на рис.2. Коэффициент усиления ФЭУ составлял $10^6 \div 10^7$ при анодной чувствительности 100 А/лм, что соответствовало напряжению питания 1700 ÷ 1800 В. Темновой ток при этом не превышал 3 нА. Этот режим сохранялся в течение всех экспериментов. Применявшийся делитель высокого напряжения показан на рис.1.

В работе¹⁸ отмечалось, что ФЭУ на МКП сходного с нашими конструктивного исполнения обладают очень хорошими собственными временными характеристиками. В нашем эксперименте эти оценки подтвердились. При исследовании временного разброса и формы анодных импульсов, получаемых при засветке фотокатода короткой лазерной вспышкой, было найдено время нарастания сигнала в одноэлектронном режиме $t \leq 0,4$ нс. Разброс времени пролета электронов, оцененный по полуширине кривой разбросов в том же режиме, изменялся от экземпляра к экземпляру в пределах 100 ÷ 130 пс.

3. ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СБОРКИ ФЭУ НА МКП + NE111

Исследования проводились на традиционном спектрометре задержанных (γ - γ)-совпадений, собранном из блоков POLON и ORTEC. В качестве образцового детектора использовалась сборка из кристалла BaF_2 размером $\varnothing 38 \times 25$ мм и ФЭУ с дискретными диодами XR2020Q. Временное разрешение этого тракта при регистрации γ -квантов ^{60}Co составляло 128 пс, а энергетическое – 7%.

Сцинтиллятор NE111, в сборке с ФЭУ на МКП, имел форму усеченного конуса высотой 18 мм, нижним диаметром 25 мм, верхним – 10 мм, и для улучшения светосбора был покрыт краской NE 560.

Измерения временных спектров (γ - γ)-совпадений проводились с источником ^{60}Co . В стоповом канале с образцовым детектором выделялись импульсы, соответствующие фотопику от γ -квантов с энергией 1332 кэВ, а в стартовом – с ФЭУ на МКП + NE111 – импульсы, превышающие 50%-ный уровень комптоновского спектра. В обоих каналах для формирования сигналов временной привязки (анодные сигналы) использовались формирователи ORTEC 473 А, работающие в стандартном режиме ($f = 30\%$, $\Delta t = 1,2$ нс). При этом максимальная амплитуда анодных импульсов с ФЭУ на МКП на нагрузке 50 Ом составляла около 0,4 В, а время нарастания не превышало 1,4 нс.

На рис.3 приведен спектр мгновенных совпадений, полученный с использованием ФЭУ на МКП № 3 ($Q_e = 17\%$). Его полная ширина на полувысоте равна $2\tau_0 = 170$ пс, что с учетом разрешения образцового детектора $2\tau_0 = 128$ пс соответствует собственному разрешению

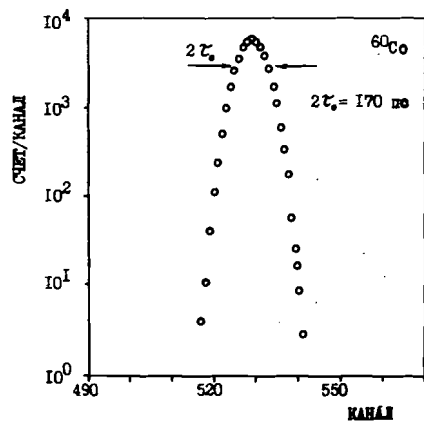


Рис.3. Временной спектр мгновенных совпадений γ -лучей ^{60}Co , полученный с ФЭУ на МКП № 3 в стартовом канале (см. текст).

Таблица
Временное разрешение ФЭУ на МКП с пластическими сцинтилляторами NE111 и энергетическое — с кристаллом NaI(Tl). Сравнение с временным ФЭУ XR2020

ФЭУ	Характеристики фото-катада			Временное разрешение, нс		Энергетическое разрешение, %
	Φ , мм	S_k , мА/Вт	Q_e , %	^{60}Co	^{22}Na	^{60}Co
№1 ^{а)}	25	25	9	143 ± 4		7,8
№2 ^{а)}	25	38	13	116 ± 4		7,4
№3 ^{а)}	25	50	17	112 ± 4		7,3
№4 ^{а)}	25	53	18			6,9
1294 ^{б)}	18	40	13	$105^{\text{г)}$	$180^{\text{г)}$	
1294 ^{в)}	20	40	13	$(95)^{\text{ж)}$	$163^{\text{г)}$	
XR2020	85	85	26	$78^{\text{д)}$	$137^{\text{д)}$	$5,6^{\text{а)}$
				$94^{\text{е)}$		

а) настоящая работа (см. текст);

б) ФЭУ на двух МКП^{15/1};

в) ФЭУ на трех МКП^{16/1};

г) сцинтиллятор NE111 $\varnothing 15 \times 10$ мм, энергетический диапазон $\Delta E/E = 20\%$ ($E = 930$ кэВ для ^{60}Co и 300 кэВ для ^{22}Na);

д) сцинтиллятор NE111 $\varnothing 25 \times 10$ мм, энергетический диапазон $\Delta E/E = 20\%$, диодный выход с ФЭУ^{11/1};

е) сцинтиллятор NE111 $\varnothing 25 \times 10$ мм, $\Delta E/E = 15\%$, ФЭУ XR1021^{11/1};

ж) оценено по $2\tau_0 = 163$ нс, измеренном для ^{22}Na .

исследуемой сборки $2\tau_0 = 112$ пс. Этот результат, так же как значение $2\tau_0 = 116$ пс, полученное для экземпляра № 2 ($Q_e = 13\%$, ФЭУ № 4 в этом аспекте не исследовался), сравним с рекордными результатами работ^{15,6/} (см. таблицу), в которых детально исследовались аналогичные приборы фирмы HAMAMATSU.

В работе^{15/} для сборки ФЭУ на МКП ($Q_e = 13\%$ для $\lambda = 400$ нм) и NE111 ($\varnothing 15 \times 10$ мм) в случае ^{60}Co при 20%-ном окне ($E \cong 930$ кэВ) разрешающее время составило $2\tau_0 = 105$ пс. Результаты работы^{16/}, полученные для ФЭУ с тремя МКП, примерно на 10% лучше. Это, как видно из таблицы, хуже, чем для традиционного ФЭУ XR2020 с тем же сцинтиллятором. Авторы объясняют это в первую очередь малым выходом фотоэлектронов с фотокатада ФЭУ на МКП. В работе^{17/} также утверждается, что даже очень быстрая импульсная реакция анода МКП на быструю компоненту сцинтилляционного излучения кристалла BaF_2 в сочетании с малым разбросом времени пролета электронов не могут компенсировать низкую квантовую эффективность ($Q_e = 6\%$ для $\lambda = 220$ нм) исследованного образца ФЭУ. Для сборки ФЭУ на МКП + BaF_2 в этой работе получено разрешающее время $2\tau_0 = 235$ пс.

Зависимость временного разрешения от квантовой эффективности фотокатада в случае исследованных нами ФЭУ на МКП представляется на первый взгляд слабо выраженной. Так, для образцов № 2 и № 3 ($Q_e = 13$ и 17%) оно, в пределах экспериментальных погрешностей, не зависит от Q_e . Теоретическая зависимость временного разрешения сцинтилляционного детектора от среднего числа электронов $N(E)$, испускаемых фотокатадом при потере энергии E в сцинтилляторе, определяется выражением^{19-11/}:

$$2\tau_0(E) = \frac{2,36 \cdot \tau \cdot \gamma}{\sqrt{N(E)}} \cdot H,$$

где τ — время высвечивания сцинтиллятора (в случае NE111 $\tau = 1,7$ нс); H — функция Гимана, учитывающая собственные временные характеристики ФЭУ, сцинтиллятора и формирователя сигналов временной привязки; γ — величина, описывающая дисперсию усиления ФЭУ.

С помощью этой формулы были вычислены отношения временных разрешений исследованных нами ФЭУ на МКП в предположении, что функции H для них близки и что $N(E)$ пропорционально Q_e ($\lambda = 280$ нм):

$$2\tau_0^{(1)} : 2\tau_0^{(2)} : 2\tau_0^{(3)} = 1,24 : 1,00 : 0,87.$$

Экспериментальное значение этих отношений $1,23(6) : 1,00 : 0,97(5)$. Если учесть погрешности в определении $2\tau_0$, согласие теории и эксперимента можно считать хорошим.

Заметим, что квантовая эффективность фотокатодов временных ФЭУ типа ХР2020 составляет всего 26%, и хотя разброс времени пролета электронов до анода достигает 300 пс^{1,2}, с их помощью были получены рекордные временные разрешения^{1,1,13}.

Сопоставляя наши результаты и данные^{15,6}, можно предполагать, что полученные нами временные разрешения для исследуемых ФЭУ на МКП + NE111, у которых разброс времени пролета электронов не превышает 130 пс и Q_e больше, чем в^{15,6}, не являются предельными. В нашем случае временное разрешение лимитировалось, по всей вероятности, формирователями временных сигналов. Исходя лишь из зависимости функции Гимана от фракции формирователя временных сигналов, можно ожидать, что только переход от значения фракции 0,3 (в настоящей работе) к значению $\cong 0,1$ может улучшить временное разрешение исследуемых сборок на 15-20%.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И ДРУГИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для изучения спектрометрических (амплитудных) характеристик ФЭУ на МКП использовались сцинтилляторы NaJ(Tl) размером $\varnothing 30 \times 1$ мм и $\varnothing 25 \times 25$ мм. С помощью тонкого кристалла и калибровочных источников низкоэнергетических γ -квантов (⁵⁵Fe, ⁵⁶Co, ¹¹³Sn) измерялся энергетический эквивалент шумов. При этом для каждого ФЭУ высокое напряжение подбиралось так, чтобы анодная чувствительность составляла 100 А/лм. Полученные значения эквивалента шумов для всех четырех образцов ФЭУ на МКП находились в пределах $1 \div 2$ кэВ.

Для изучения энергетического разрешения ФЭУ на МКП использовался кристалл NaJ(Tl) размером $\varnothing 25 \times 25$ мм. Предварительно измеренное энергетическое разрешение, на γ -линии 1332 кэВ ⁶⁰Co, этого кристалла в паре с ФЭУ ХР2020Q составляло 5,6%. Результаты аналогичных измерений с ФЭУ на МКП приведены в таблице, а непосредственное сравнение γ -спектров ⁶⁰Co, полученных с ХР2020Q и ФЭУ на МКП (№ 4) представлено на рис.4. Видно, что энергетическое разрешение ФЭУ на МКП несколько уступает традиционным ФЭУ.

Согласно теории Гимана^{9,10} энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора описывается выражением

$$\frac{\Delta E}{E} = 2,36 \frac{r}{\sqrt{N(E)}}$$

Проще всего было бы связать худшее разрешение ФЭУ на МКП с более низкой эффективностью их фотокатодов. Однако образцы ФЭУ на МКП

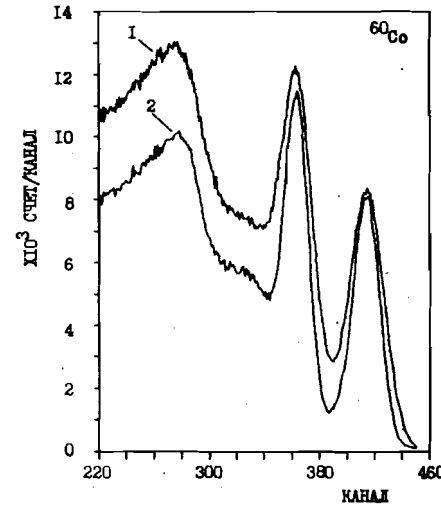


Рис.4. Фрагменты спектров γ -излучения ⁶⁰Co, измеренные с помощью кристалла NaJ(Tl) ($\varnothing 25 \times 25$ мм) с ФЭУ на МКП №4 (1) и ФЭУ ХР2020Q (2).

№ 1 и № 4, различающиеся более чем вдвое по величине Q_e , имеют тем не менее близкие значения энергетического разрешения. Этот факт заставляет предположить, что энергетическое разрешение ФЭУ на МКП связано не только с эффективностью фотокатода, но и с особенностями механизмов усиления и собирания зарядов¹¹. Дополнительным указанием на это может служить увеличенная, по сравнению с обычными ФЭУ, чувствительность усиления к нагрузкам, наблюдавшаяся для всех четырех экземпляров ФЭУ на МКП. При нагрузках выше $3 \cdot 10^3$ имп./с оно начинает заметно уменьшаться и при $5 \cdot 10^3$ имп./с в зависимости от экземпляра падает до 70-85%. Энергетическое разрешение ухудшается при этом на 10-15%.

К недостаткам ФЭУ на МКП следует отнести также более сильную, чем у традиционных ФЭУ, зависимость коэффициента усиления от напряжения питания. Требуется применение высокостабилизированных источников питания (стабильность выходного напряжения 0,1% и лучше).

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Изученные образцы ФЭУ на МКП с $Q_e \geq 17\%$ по временным характеристикам могут конкурировать с самыми быстрыми ФЭУ традиционного типа и успешно применяться во временных спектрометрах ядерного излучения.

2. Временное разрешение $2\tau_0 = 112$ пс, полученное со сцинтиллятором NE111 (для 50%-ного энергетического диапазона комптоновского спектра γ -лучей ⁶⁰Co), сравнимо с рекордными достижениями^{15,6} и, по всей видимости, не является предельным.

3. Амплитудное разрешение 7%, полученное на γ -линии 1332 кэВ ^{60}Co с кристаллом NaI(Tl) и ФЭУ на МКП с $Q_e = 18\%$, хуже, чем на ФЭУ XR2020Q. Можно думать, что это связано как с квантовой эффективностью фотокатода, так и с механизмом усиления ФЭУ на МКП.

4. К недостаткам исследованных нами ФЭУ на МКП следует отнести повышенную чувствительность коэффициента усиления к загрузкам.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность М.Р.Айнбунду за предоставление образцов ФЭУ на МКП и полезное обсуждение результатов, профессору Ц.Вылову за постоянный интерес и стимулирование представленных исследований.

Авторы также благодарят руководителей темы СРВР 01.09 ПНР за аппаратное обеспечение и содействие в выполнении этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айнбунд М.Р., Поленов Б.В. Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение. М.: Энергоиздат, 1981, с.140.
2. Lo C., Lecomte P., Leskovar B. – *IEEE*, 1977, NS-24, p.302.
3. Leskovar B. – *Laser Fokus/Electro Optics*, 1984, v.20, p.73.
4. Айнбунд М.Р. и др. – *Квантовая электроника*, 1986, т.13, с.645.
5. Moszynski M., Vacher J., Odru R. – *Nucl. Inst. Meth.*, 1983, v.204, p.471.
6. Moszynski M., Vacher J., Odru R. – *Nucl. Inst. Meth.*, 1983, v.217, p.453.
7. De Vrie J., Van Eijk C.W.E. – *Nucl. Inst. Meth.*, 1985, v.239, p.243.
8. Айнбунд М.Р. и др. *Материалы 37-го Всесоюзного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л.: Наука, 1987, с.506.*
9. Hyman L.G., Schwartz R.M., Schalter R.A. – *Rev. Sci. Instr.*, 1964, v.35, p.393.
10. Hyman L.G. – *Rev. Sci. Instr.*, 1965, v.36, p.193.
11. Bengston B., Moszynski M. – *Nucl. Instr. Meth.*, 1970, v.81, p.109.
12. Moszynski M., Bengston B. – *Nucl. Instr. Meth.*, 1979, v.158, p.1.
13. Moszynski M., Bengston B. – *Nucl. Instr. Meth.*, 1982, v.204, p.129.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 апреля 1988 года.

Ваврышук Я. и др.

P13-88-278

Исследование спектрометрических характеристик
фотоумножителей на основе микроканальных пластин

Исследовано несколько экземпляров фотоумножителей на основе микроканальных пластин (ФЭУ на МКП). Подтверждены их высокие временные характеристики. Показано, что ФЭУ этого типа обладают удовлетворительным энергетическим разрешением.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод М.И.Потапова

Wawryszczuk J. et al.

P13-88-278

Search the Spectrometric Characteristic
of Microchannel Plate Photomultipliers

Several photomultipliers based on microchannel plates have been investigated. Their high time characteristics are proved. The photomultipliers of this type are shown to have a satisfactory energy resolution.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988