

ПРИМЕНЕНИЕ ФЭУ-12 В СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Ю. А. Немилев, В. М. Овчинников, А. Н. Исаревский, Е. Д. Тетерин

Исследованы спектральные свойства и некоторые другие характеристики ФЭУ-12—фотоумножителя с динодами жалюзного типа, разработанного Г. С. Вильдгрубе с сотрудниками.

1. Введение

За последние годы значительно повысились роль и значение сцинтилляционной методики в технике физического эксперимента. Особенно широкое применение сцинтилляционная методика получила в ядерной спектроскопии. Фотоумножители, используемые в сцинтилляционных спектрометрах, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Высокая разрешающая способность по амплитудам, которая в основном определяется:

а) высокой эффективной чувствительностью фотокатода*) и

б) соответствием спектральной чувствительности фотокатода и спектра люминесценции примененного фосфора.

2. Достаточная общая чувствительность.

3. Постоянство общей чувствительности фотоумножителя при непрерывной работе и при повторных включениях.

4. Быстрое установление стационарного режима работы умножителя после его включения.

5. Линейность световой характеристики в широком диапазоне амплитуд сцинтилляций.

6. Малые собственные шумы.

7. Пентодный вид характеристик входа и выхода.

8. Независимость общей чувствительности умножителя от загрузки в широких пределах.

9. Минимальное влияние сильных полей радиоактивного излучения на общую чувствительность фотоумножителя.

10. Минимальная чувствительность к внешним электромагнитным полям и максимальная виброустойчивость.

11. Высокая перегрузочная способность. Совокупность перечисленных требований является достаточно жесткой, и далеко не всякая фотоумножительная система может удовлетворить ее достаточно полно. Например, широко распространенный фотоумножитель ФЭУ-19, обладающий высокой общей чувствительностью, позволяет получить удовлетворительное разрешение лишь в ограниченном энергетическом интервале исследуемого излучения, даже при условии тщательного отбора образцов с высоким квантовым выходом фотокатода и применения специального режима делителя. Кроме того, он не удовлетворяет почти ни одному из остальных требований. Все это значительно сужает область его применения в сцинтилляционных спектрометрах. Недостатки ФЭУ-19 являются естественным следствием применения

*) Под эффективной чувствительностью фотокатода подразумевается интегральная чувствительность, приведенная к выходу первого динода.

сурьмяно-цезиевых эмиттеров в качестве основной части умножительной системы.

В настоящем сообщении в свете указанных требований рассматривается применение для сцинтилляционной γ -спектроскопии фотоумножителей ФЭУ-12, разработанных группой Г. С. Вильдгрубе.

2. Некоторые конструктивные особенности ФЭУ-12

ФЭУ-12 имеет полупрозрачный фотокатод торцового типа диаметром 50 мм. За фотокатодом следует фокусирующая система, один из электродов которой может быть использован для запираания или модуляции электронного потока. Далее следует умножительная система жалюзийного типа, состоящая из двенадцати динодов (по характеру движе-

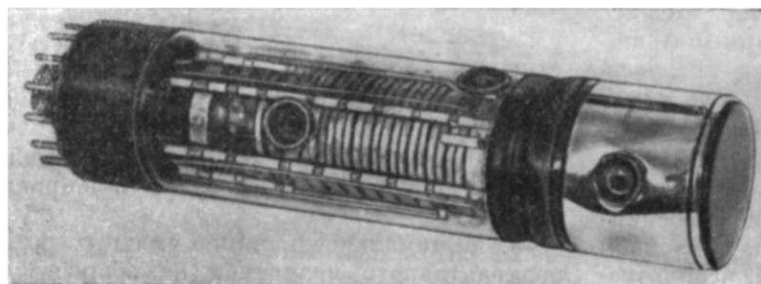


Рис. 1. Общий вид ФЭУ-12.

ния электронного потока ФЭУ-12 принадлежит к линейным системам). Умножительная система завершается коллектором рефлекторного типа. Колба умножителя заделана в стандартный цоколь от электронно-лучевой трубки. Максимальный диаметр умножителя определяется диаметром цоколя. Выводы фотокатода, модулятора и коллектора сделаны непосредственно в колбе и не увеличивают габаритов прибора благодаря их «пуговичной» конструкции. Вся изоляция и крепление динодов внутри колбы выполнены на керамике. Исключительная жесткость всей системы выгодно отличает ФЭУ-12 от умножителей других типов.

ФЭУ-12 изготавливаются с сурьмяно-цезиевым или с висмута-серебряно-цезиевым фотокатодом. Динодная система штампуется из специального сплава, который активи-

руется в процессе производства фотоумножителя.

Общий вид фотоумножителя представлен на рис. 1.

3. Некоторые статические характеристики

Наиболее существенными статическими характеристиками фотоумножителя являются:

- 1) световая характеристика;
- 2) вольт-амперные характеристики входа и выхода;
- 3) спектральная характеристика фотокатода;
- 4) зональная характеристика фотокатода, приведенная к выходу;
- 5) интегральная чувствительность фотокатода.

При прочих равных условиях статическая световая характеристика дает представление о динамическом диапазоне, который может быть перекрыт при измерениях без изменения режима питания фотоумножителя. Статическая световая характеристика ФЭУ-12 показана на рис. 2. Она является линейной до средних выходных токов, превышающих 50 ма. Такой ток может сниматься длительное время.

На рис. 3а и 3б представлены вольт-амперные характеристики входа и выхода. Они имеют хорошо выраженный пентодный характер. Первая характеристика достигает насыщения при 25 в, а вторая — при 40 в для всех исследованных образцов. Пентодный характер этих характеристик исключает нежелательные явления, которые обычно возникают в умножителях, имеющих характеристики с явно выраженным максимумом. Пентодный характер входной характеристики обеспечивается фокусирующей системой собирания фотоэлектронов, а для выходной характеристики — рефлекторным коллектором. В системах, использующих коллектор с прямым собиранием (например, ФЭУ-19), неизбежно получается вольт-амперная характеристика выхода, имеющая явно выраженный максимум из-за пролета электронов мимо последнего динода непосредственно на коллектор.

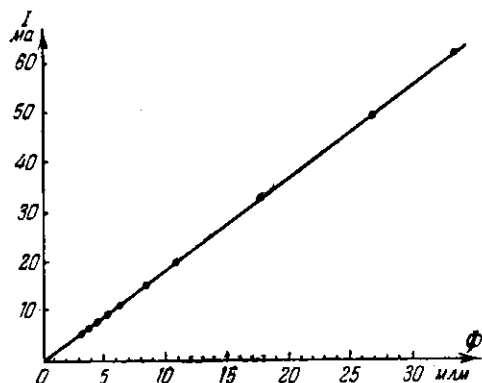


Рис. 2. Статическая световая характеристика одного из образцов ФЭУ-12.

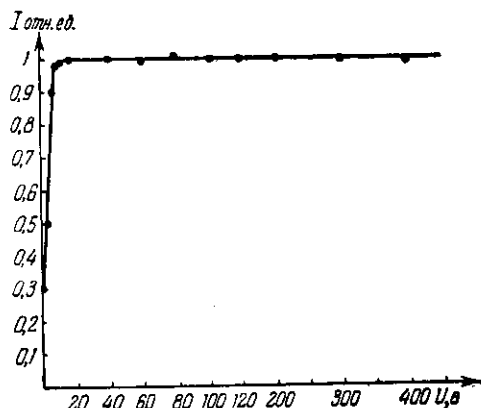


Рис. 3а. Вольт-амперная характеристика входа ФЭУ-12 (умножитель № 99).

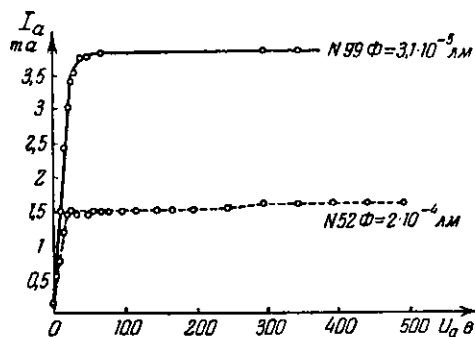
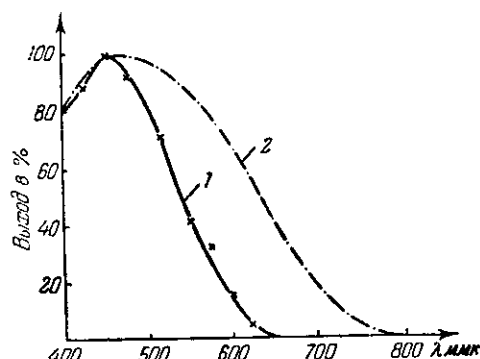


Рис. 3б. Вольт-амперные характеристики выхода (анодные характеристики) ФЭУ-12.

На рис. 4 приведены усредненные спектральные характеристики фотокатодов Sb—Cs и Bi—Ag—Cs исследованных фотоумножителей. Характеристика фотокатода Bi—Ag—Cs простирается в область спектра с более


 Рис. 4. Усредненные спектральные характеристики фотокатодов Bi—Ag—Cs и Sb—Cs.
1—фотокатод Sb—Cs; 2—фотокатод Bi—Ag—Cs.

длинной волной по сравнению с фотокатодом Sb—Cs, и этот фотокатод является более «широкополосным».

Зональная характеристика фотокатода снималась для трех образцов умножителей по положению максимума α -спектра. Для этого применялся малый кристалл CsJ(Tl) (диаметр 2,5 мм, высота 1,5 мм), на который помещался практически точечный α -излучатель. Для худшего из трех образцов разброс чувствительности по площади фотокатода не превышал 10%, если рассматривать всю площадь фотокатода, и 5%, если рассматривать $2/3$ площади фотокатода (от оси прибора).

Интегральная чувствительность фотокатода для исследованных образцов колебалась от 30 до 80 мкА/лм. Из 25 исследованных образцов 80% умножителей имели чувствительность, превосходящую 45 мкА/лм (при испытании источником типа А с цветовой температурой 2848°).

Коэффициент усиления проверенных образцов лежит в пределах от 10^5 до $4 \cdot 10^6$ при общем напряжении 1600 в, равномерно распределенном между электродами умножителя. При необходимости коэффициент усиления может быть увеличен до 10^6 — 10^7 за счет повышения рабочего напряжения: ФЭУ-12 безболезненно выдерживает повышение общего напряжения питания до 2000—2500 в.

Заканчивая рассмотрение статических характеристик, отметим, что параметры, определяемые геометрией системы умножителя, практически одинаковы у всех исследованных образцов.

4. Применение ФЭУ-12 в сцинтилляционном спектрометре. Выбор режима питания

Умножители использовались в нескольких вариантах сцинтилляционных γ -спектрометров (одиночный, парный и др.). Наиболее наглядно работа умножителя в спектрометрическом режиме характеризуется использованием его в одиночном спектрометре. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться только этот вариант.

В спектрометре умножители использовались в сочетании с кристаллами NaJ(Tl) и CsJ(Tl). В таблице даны соотношения сигналов для кристаллов и фотокатодов обоих типов.

Относительные величины сигналов, снимаемых с фотоумножителя с различными фотокатадами и кристаллами

Фотока- тод	Кристаллы	
	CsJ(Tl)	NaJ(Tl)
Sb—Cs	1	3
Bi—Ag—Cs	1	1,5

Приведенные в таблице величины являются усредненными результатами для кристаллов среднего качества и различных умножителей. В некоторых случаях имелись отклонения от этих величин, достигавшие 50%. Фотоумножители с фотокатодом Bi—Ag—Cs можно использовать в сочетании с фосфорами, у которых спектр люминесценции сдвинут в зеленую область спектра.

Вопрос о правильном выборе режима питания фотоумножителя достаточно важен для того, чтобы остановиться на нем особо. Например, для ФЭУ-19 этот вопрос—один из решающих. Важным достоинством ФЭУ-12 является то, что он не требует специального подбора режима питания, и с ним можно работать при равномерном напряжении между всеми электродами. Была исследована зависимость разрешения от режима питания для нескольких фотоумножителей. Результаты показывают, что наилучшее разрешение

получается при соотношении напряжений между электродами 2—3 : 1 : 1 : ... 1 (рис. 5). Этот режим оказался оптимальным с точки зрения разрешения и отношения сигнал/шум

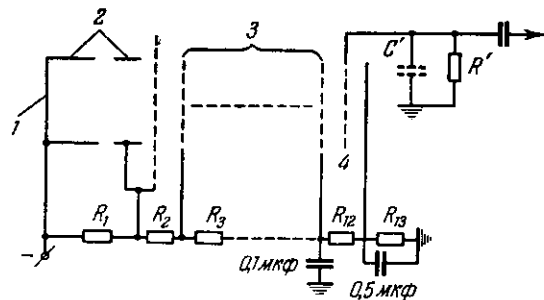


Рис. 5. Схема расположения электродов ФЭУ-12 и режим распределения напряжения между электродами: $R_1 = 2 \div 3$; $R_2 = R_3 = \dots = R_{13} = 1$.

1—фотокатод; 2—фокусирующие электроды; 3—диноды; 4—коллектор.

для всех исследованных образцов. Никакой индивидуальной подгонки режима не требовалось.

На рис. 6 приведены результаты проверки линейности работы умножителя в сочетании

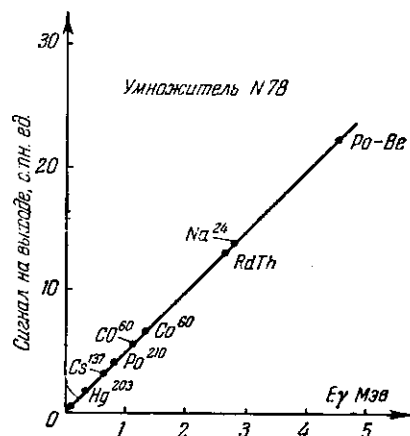


Рис. 6. Проверка линейности работы ФЭУ-12 (в сочетании с кристаллом CsJ(Tl)).

с кристаллом CsJ(Tl). Аналогичный результат получен и с кристаллом NaJ(Tl). Ни на одном из проверенных образцов отступлений от линейности не наблюдалось.

Величина сигнала, снимаемого с умножителя, достигала $40 \div 50$ в, а для отдельных образцов удавалось снимать сигналы до 100 в при повышении общего напряжения питания до $2000 \div 2400$ в.

Разрешение умножителей проверялось в сочетании с кристаллом NaJ(Tl). Для всех умножителей с интегральной чувствительностью фотокатода выше 45 мка/мм разре-

ками фотокатодов. Выполнение последнего соотношения свидетельствует о хорошей идентичности «геометрии» системы различных образцов.

5. Собственные шумы. Стабильность.

Сохраняемость параметров.

Чувствительность к электромагнитным полям

При указанном в разделе 4 оптимальном режиме порог практически полного записывания шумов не превосходил 15 кэв (в шкале кристалла NaJ(Tl)) ни для одного из проверенных образцов. Для большинства образцов этот порог лежал ниже 10 кэв, а для отдельных образцов он составлял 4÷5 кэв (все измерения проводились в металлическом кожухе при заземленном «плюсе» источника высокого напряжения).

Если на переднюю часть колбы умножителя надеть металлический экран, находящийся под потенциалом фотокатода, то порог записывания шумов уменьшится примерно в 1,5 раза. Особенно сильно влияние экрана сказывается при повышенных напряжениях питания. При напряжении питания выше 2000 в порог записывания шумов возрастает и отношение сигнал/шум ухудшается.

Чрезвычайно существенным параметром прибора является стабильность работы и сохраняемость параметров от одного цикла измерений до другого. Многие фотоумножительные системы не выдерживают этих, пожалуй, самых серьезных испытаний.

На рис. 9 приведена кривая стабильности ФЭУ-12 (по положению фотопика Cs¹³⁷) в течение 8 часов непрерывной работы (перед каждым измерением регистрирующая система калибровалась контрольными импульсами стандартной амплитуды). Отклонения от первоначального положения фотопика не превышают 1÷1,5%, причем тенденции к отклонению в какую-нибудь определенную сторону не наблюдается. Такая стабильность работы характерна для всех исследованных образцов.

ФЭУ-12 обладает хорошей сохраняемостью параметров. Результаты тщательных наблюдений над одним из образцов (взятым совершенно произвольно) на протяжении пяти месяцев приведены на рис. 10. В течение длительной работы с другими образцами также не наблюдалось отклонений общей чувствительности, превышающих 5÷10%. Следует учесть, что многие образцы длительное

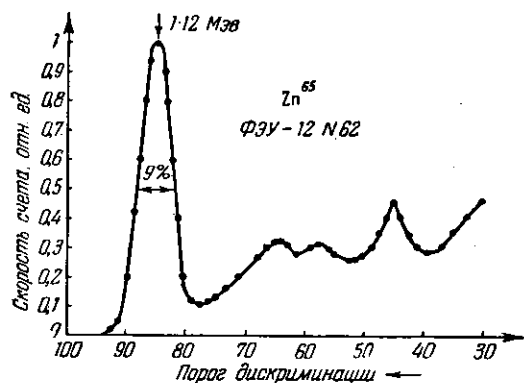


Рис. 7. γ -спектр Zn^{65} . Кристалл CsJ(Tl) диаметром 30 мм, высотой 20 мм.

шение, измеренное по ширине фотопика Cs¹³⁷ на его полувысоте, было не хуже 13%. Для кристалла NaJ(Tl) хорошего качества и умножителя с фотокатодом Sb—Cs

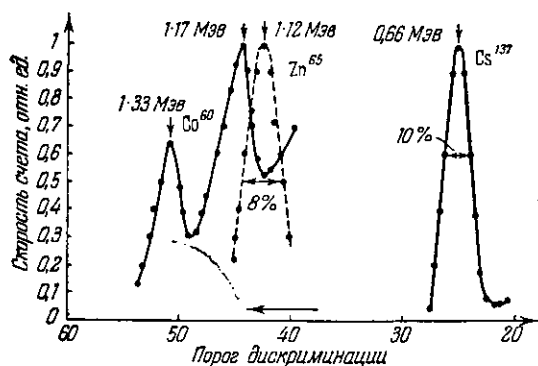


Рис. 8. Фотопики γ -спектров Co^{60} , Zn^{65} , Cs^{137} . Кристалл NaJ(Tl) диаметром 30 мм, высотой 12 мм.

($\epsilon = 54$ мка/мм) для линии Cs¹³⁷ получено разрешение 8%. На рис. 7 и 8 приводятся γ -спектры некоторых изотопов, снятые при среднем качестве кристаллов и средней чувствительности фотокатодов. Закон $\Delta \sim \sqrt{E}$ (Δ —разрешение, E —энергия γ -лучей) хорошо выполняется для энергетического диапазона, в котором размеры кристалла не слишком сильно сказываются на разрешении. Закон $\Delta \sim \sqrt{\epsilon}$ (ϵ —интегральная чувствительность фотокатода) хорошо выполняется для умножителей с близкими спектральными характери-

время находились под воздействием сильных источников радиоактивных излучений.

Ввиду отсутствия острой фокусировки пучка электронов ФЭУ-12 менее подвержен

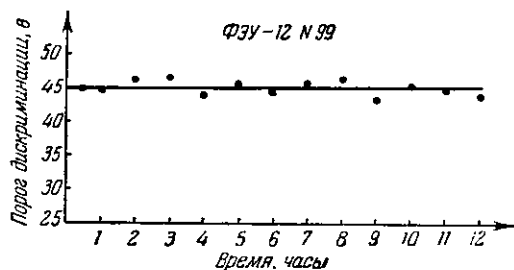


Рис. 9. Стабильность ФЭУ-12 при непрерывной работе.

влиянию внешних электромагнитных полей, чем системы с корытообразными эмиттерами. Умножители безболезненно работают в непосредственной близости от циклотронного магнита в кожухе из двух слоев трансформаторной стали толщиной 0,5 мм и пермалоя толщиной 0,5 мм.

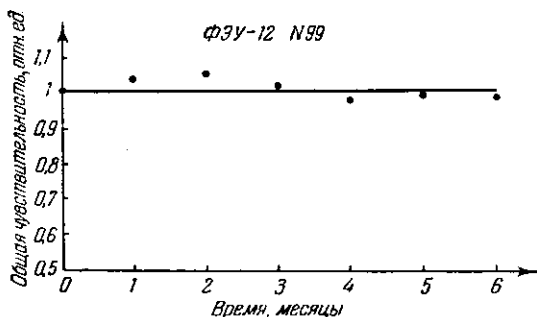


Рис. 10. Постоянство общей чувствительности ФЭУ-12.

ФЭУ-12 мало чувствителен к воздействию радиоактивных излучений. Это утверждение следует из того, что в пределах допустимой величины тока, протекающего через делитель, не отмечалось влияния γ -лучей и нейтронов побочного энергетического диапазона на положение измеряемых линий в энергетической шкале.

Специального изучения переходного режима после включения высокого напряжения не производилось. Однако никаких практически существенных изменений в скорости счета в каком-либо дифференциальном канале энергетической шкалы через 2÷3 мин. после включения напряжения питания не наблюдалось.

6. Дополнительные замечания.

Резервные возможности приборов

Совместно с сотрудником лаборатории Н. А. Власова Б. В. Рыбаковым авторами было измерено время нарастания импульса на выходе ФЭУ-12 (по методу задержанных самосовпадений). Оно оказалось равным $1,5 \div 2 \cdot 10^{-8}$ сек.

Из резервных возможностей прибора, которые, как нам кажется, должны привести к еще большему повышению разрешающей способности, можно указать:

сдвиг максимумов спектральных характеристик фотокатодов в более коротковолновую часть спектра и

повышение сбора на первый каскад за счет некоторой его модернизации для уменьшения вероятности пролета электронов.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать выводы:

1. По всем своим параметрам ФЭУ-12 вполне пригоден для применения в сцинтилляционной спектроскопии.

2. ФЭУ-12 особенно перспективен при работе с большими или сильно меняющимися во времени активностями и при работе на фоне сильной активности в побочной энергетической области.

3. Особого внимания заслуживает высокая стабильность прибора и хорошая сохраняемость параметров.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Г. С. Вильдгрубе за предоставление фотоумножителей и некоторых материалов по их техническим испытаниям.

Поступила в редакцию 14 III 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. О. Чесчик, С. М. Файнштейн, Т. М. Лифшиц, *Электронные умножители*. Гостехиздат, Москва, 1954.
2. Дж. Биркс, *Сцинтилляционные счетчики*. ИЛ, Москва, 1955.
3. *Nucleonics* 12, № 3 (1954).