

P13-2001-130

М.Р.Айнбунд*, А.А.Богдзель, Н.А.Гундорин,
Д.В.Матвеев, Д.Г.Серов

**ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ
И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЦИНТИБЛОКА ВГО-ФЭУ-165
ДЛЯ ИНТЕРВАЛА ТЕМПЕРАТУР ОТ +25 ДО -140 °С**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

*ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург

Введение

Фотоумножители на основе микроканальных пластин (МКП) используются в быстрых системах формирования временных отметок физических установок, а также в специальных областях техники, нередко заменяя традиционные фотоумножители с диодной системой. Фотоумножители с МКП отличаются от обычных фотоумножителей с дискретной диодной системой значительно лучшими временными параметрами, слабой чувствительностью к большим магнитным полям, малыми габаритами, небольшим количеством элементов делителя напряжения, очень низким темновым током и высокой чувствительностью к слабым излучениям. Типовые параметры одного из таких приборов, ФЭУ-165 [1], имеющего металлокерамическую оболочку и входное окно из увиолевого стекла, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Типовые параметры ФЭУ-165

Диаметр макс., мм	55
Диаметр рабочей площади фотокатода, мм	25
Длина макс., мм	16
Число МКП	2
Диапазон спектральной чувствительности, нм	220-800
Область максимальной спектральной чувствительности, нм	400-500
Световая чувствительность фотокатода, мкА/лм	80
Световая анодная чувствительность, А/лм	300
Напряжение питания, В	2000
Темновой ток, нА	3
Время нарастания импульсной характеристики, нс	0,3
Джиттер (разброс времени пролета), пс	50

Хорошие параметры и миниатюрность ФЭУ-165 определяют перспективность его использования при осуществлении проекта суперкомпактного антикомптоновского гамма-спектрометра для ядерно-физических исследований [2]. Основой этого спектрометра является полупроводниковый детектор из сверхчистого германия (HPGe), окружённый оболочкой из сцинтиллятора $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO). Непосредственный контакт германиевого кристалла со сцинтиллятором и совместное охлаждение их до температуры около -170°C приводит к увеличению коэффициента подавления комптоновской подложки в измеряемых гамма-спектрах за счет увеличения эффективности регистрации рассеянных гамма-квантов сцинтилляционными кристаллами и значительно улучшает параметры BGO, так как при охлаждении

кристалла возрастает его световыход. В первом спектрометре, использующем такую структурную схему, для соби́рания фотонов с кристалла ВГО [3] применялся обычный ФЭУ с дискретной диодной системой умножения, что примерно вдвое увеличивает габаритную длину детектора. При гамма-спектроскопии нейтронно-ядерных взаимодействий на пучках реакторов в напряжённых фоновых условиях требуется использование комбинированной пассивной защиты от нейтронного и гамма-излучений, при этом особую значимость приобретает компактность детектирующих устройств. В проекте суперкомпактного гамма-спектрометра [2] основную часть ВГО-детектора предполагается выполнить в виде отдельного сцинтиблока с МКП и нанесением фотокатода непосредственно на поверхность сцинтиллятора. Разработка и изготовление такого сцинтиблока представляет собой непростую задачу. В качестве альтернативного рассматривается упрощённый вариант соби́рания света из основного ВГО-кристалла с помощью ФЭУ-165, габаритная длина которого вместе с конструктивными элементами не превышает 20 мм.

Поскольку производитель ФЭУ-165 гарантирует работоспособность прибора при охлаждении до температуры -70°C , возможность его использования в составе суперкомпактного антикомптоновского гамма-спектрометра проблематична. Этим обстоятельством определяется необходимость экспериментальных исследований спектрометрических и эксплуатационных характеристик сцинтиблока ВГО-ФЭУ-165 при глубоком охлаждении, проведённых в настоящей работе.

Описание экспериментальной установки

В ходе экспериментальных исследований предстояло выяснить возможность совместной работы ФЭУ-165 с кристаллом ВГО при охлаждении до температуры, необходимой для работы полупроводникового Ge-детектора. Для этого предполагалось определить предельную температуру, при которой сохраняется работоспособность фотоумножителя, и изучить температурные изменения спектроскопических характеристик такой системы: энергетическое разрешение и отношение сигнал/шум. С этой целью была собрана экспериментальная установка, представленная на рис. 1. Её основой служил вакуумированный криостат, аналогичный тем, в которые упаковываются полупроводниковые Ge-детекторы.

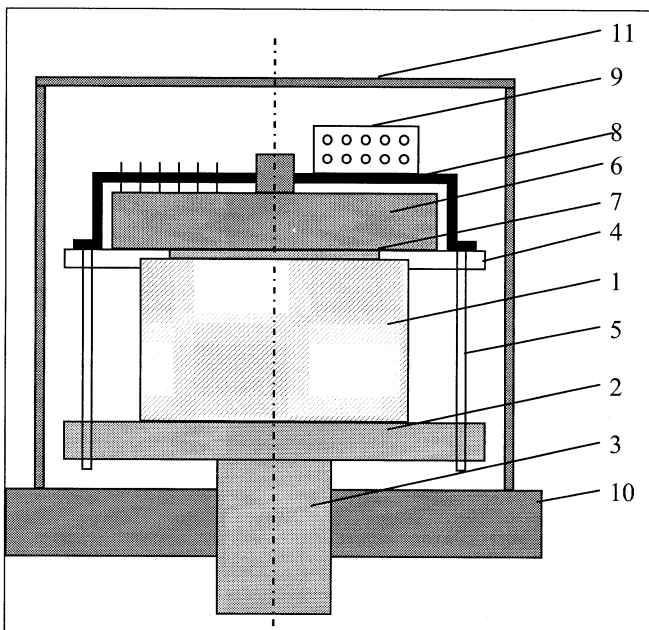


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кристалл ВГО, 2 – основание хладопровода, 3 – хладопровод, 4 – прижимная пластина, 5 – стойка, 6 – ФЭУ-165, 7 – пластиковый световод, 8 – прижимной кронштейн, 9 – колодка с делителем, 10 – основание криостата, 11 – крышка криостата

Размещённый в криостате кристалл ВГО размером $40 \times 40 \times 20$ мм (1) прижимается к основанию (2) хладопровода (3) прижимной пластиной (4), перемещающейся по направляющим стойкам из фторопласта (5). Оптический контакт между кристаллом и фотокатодом ФЭУ-165 (6) осуществляется через пластиковый световод (7) посредством прижимного кронштейна (8). На кронштейне расположена колодка с делителем высокого напряжения (9), где коммутируются выводы ФЭУ. Две термопары для контроля температуры располагаются на поверхности основания хладопровода и на входном окне фотоумножителя. Спектрометрический выход, высоковольтный разъем и выводы термопар расположены в основании криостата (10), закрытого герметичной крышкой (11). Охлаждение кристалла ВГО осуществляется через хладопровод, опускаемый в сосуд Дьюара с жидким азотом.

Делитель собран по схеме, рекомендованной в паспорте ФЭУ для спектрометрических измерений. Ток делителя для рабочего напряжения 2000 В составляет 1 мА, что значительно превышает анодный ток умножителя и предотвращает нелинейность его коэффициента усиления. Сигнал с анода

усиливается спектрометрическим усилителем с постоянной времени формирования 1 мкс, обеспечивающей предельную загрузку спектрометра, кодируется амплитудно-цифровым преобразователем и через контроллер с интерфейсной картой поступает на шину персонального компьютера.

Описание эксперимента

На первом этапе экспериментальных исследований определялись спектрометрические параметры сборки ВГО-ФЭУ-165 при нормальной температуре. С этой целью проводились опорные измерения спектров калибровочных гамма-источников ^{137}Cs (661,6 кэВ) и ^{22}Na (511 и 1274,5 кэВ) для двух экземпляров фотоумножителей с различными характеристиками, приведенными в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики тестируемых фотоумножителей

Параметры	ФЭУ-165(А)	ФЭУ-165(Б)
Световая чувствительность фотокатода, мкА/лм	76	33
Спектральная чувствительность фотокатода на длине волны 480 нм, мА/Вт	36	-
Световая анодная чувствительность, А/лм	100	100
Напряжение питания, В	1535	1995
Темновой ток, нА	7	0,1

Полученные в этих измерениях спектры, с гамма-линиями 511 и 661,6 кэВ, показаны на рис. 2 и 3. В случае ФЭУ-165(А) энергетическое разрешение для этих линий составило 26 и 34 %, а для ФЭУ-165(Б) 35 и 43 % соответственно. Согласно данным работы [4], в которой исследовались спектрометрические характеристики ФЭУ-165, их собственное энергетическое разрешение при работе с кристаллом NaI(Tl) составляет 8-10 % (для энергии γ -квантов 661,6 кэВ). Полученное в проведенных измерениях невысокое разрешение сборки ВГО-ФЭУ-165 объясняется неполным светосбором с кристалла ВГО и его собственным разрешением, составляющим ~20 %. Учитывая лучшие электронные и спектроскопические характеристики первого фотоумножителя и весомую вероятность его разрушения при глубоком охлаждении, дальнейшие эксперименты с охлаждением мы проводили с ФЭУ-165(Б), имеющим параметры существенно хуже типовых (его собственное разрешение для линии 661,6 кэВ составляет ~25 %).

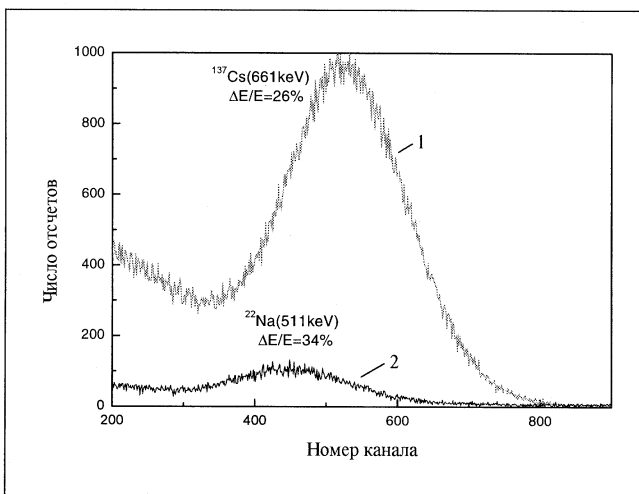


Рис. 2. Спектры гамма-квантов калибровочных источников ^{137}Cs (1) и ^{22}Na (2), полученные с использованием ФЭУ-165(А)

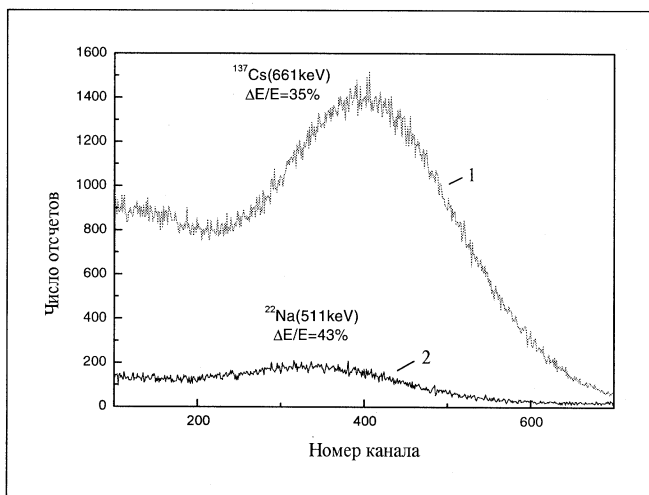


Рис. 3. Спектры гамма-квантов калибровочных источников ^{137}Cs (1) и ^{22}Na (2), полученные с использованием ФЭУ-165(Б)

Ожидаемые изменения спектроскопических свойств системы ВГО-ФЭУ-165 при охлаждении связаны с изменением параметров обеих её составляющих. Температурные зависимости параметров сцинтиллятора ВГО исследованы в работах [5-6]. Из результатов этих работ следует, что основным недостатком сцинтиллятора ВГО при комнатной температуре является низкий световыход (порядка 10 % световыхода сцинтиллятора NaI(Tl)). При понижении температуры от комнатной до -70°C световыход ВГО возрастает в четыре раза, что позволяет надеяться на улучшение энергетического разрешения системы. Однако при охлаждении увеличивается также и время высвечивания сцинтиллятора: от 300 нс при комнатной температуре до 8 мкс при -170°C , поэтому быстродействие системы резко ухудшается. Максимум спектрального состава излучения ВГО смещен в длинноволновую область и находится в диапазоне 480-500 нм, что не полностью совпадает с максимумом спектральной чувствительности фотокатода исследованных экземпляров ФЭУ-165. Несколько меняется с понижением температуры и спектральный состав излучения.

В процессе охлаждения изменяются и собственные характеристики ФЭУ [7]. Из всех параметров фотоумножителя наиболее важно изменение величины темнового тока. При охлаждении темновой ток значительно уменьшается из-за снижения термоэмиссии с поверхности фотокатода. Это позволяет улучшить энергетическое разрешение, особенно при регистрации слабых световых вспышек. Темновой ток ФЭУ-165 очень мал, для данного экземпляра его значение составляло 1×10^{-10} А при комнатной температуре. Кроме темнового тока с понижением температуры незначительно изменяются такие параметры ФЭУ, как спектральная и световая чувствительность фотокатода и коэффициент усиления, что приводит к изменению световой анодной чувствительности. Исследования, проводившиеся ранее производителями, показали, что при охлаждении до -60°C наряду со снижением темнового тока наблюдается также рост коэффициента усиления и анодной чувствительности, достигающий 100 %.

В ходе эксперимента проводилось охлаждение системы от комнатной температуры до -140°C в течение 8 часов. При этом периодически регистрировались показания термопар, фиксирующих температуру основания хладопровода и входного окна фотоумножителя. Значения последней были устойчиво выше на 20 %. Эти значения, соответствующие температуре фотокатода, указываются в приводимых ниже температурных зависимостях. На рис. 4 показана зависимость температуры фотокатода от времени, демонстрирующая интенсивность охлаждения.

В процессе охлаждения проводились измерения спектра гамма-квантов изотопа ^{22}Na с целью определения температурной зависимости спектроскопических параметров.

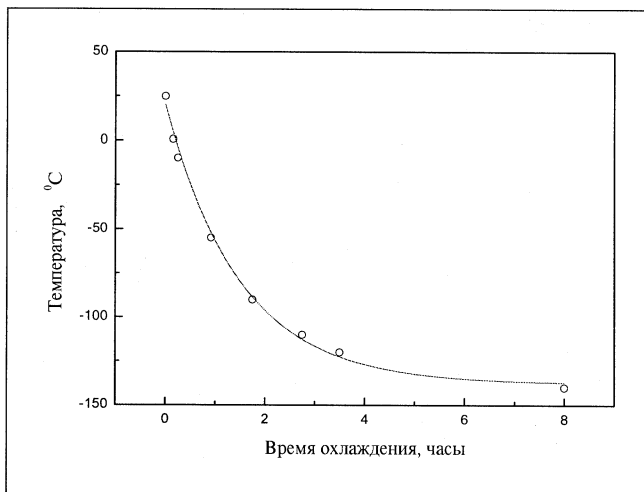


Рис. 4. Зависимость температуры фотокатода от времени охлаждения

Обсуждение результатов

На рис. 5 представлены измеренные спектры для трёх различных значений температуры: +25, -55 и -90 °С. В табл. 3 приведены полученные в ходе эксперимента данные об энергетическом разрешении для двух энергий гамма-квантов и отношение амплитуды сигнала, соответствующего энергии 511 кэВ, к амплитуде шумового сигнала для восьми точек в диапазоне температур от +25 до -140 °С. Из этих данных следует существование оптимума в области температур от -55 до -90 °С. При дальнейшем понижении температуры энергетическое разрешение и отношение амплитуд сигналов ухудшается. Это объясняется тем, что световыход ВГО по достижении температуры -70 °С растет незначительно, а время высвечивания становится таким большим, что постоянная времени усилителя, выбранная для обеспечения максимального быстродействия, недостаточна для оптимального формирования сигнала.

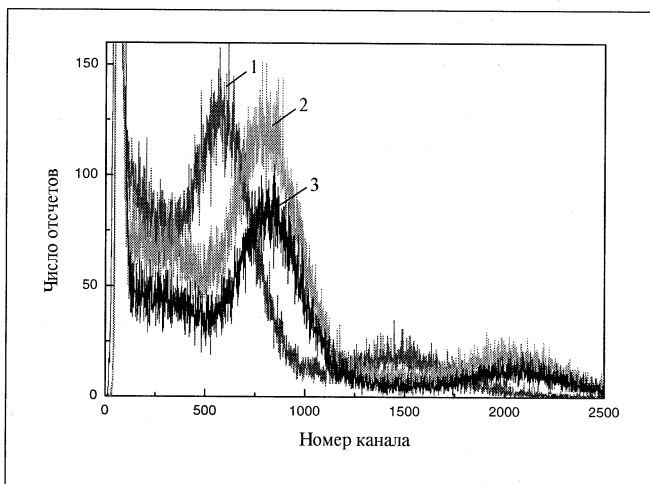


Рис. 5. Спектры гамма-квантов изотопа ^{22}Na при различных значениях температуры: $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1), $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2), $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3)

Таблица 3. Зависимость энергетического разрешения ФЭУ-165(Б) с кристаллом BGO от температуры

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Отношение сигнал/шум по пику 511 кэВ	Разрешение по пику 511 кэВ, %	Разрешение по пику 1275,4 кэВ, %
+25(1)	7,1	42±4	27±3
0	7,1	41±4	26±3
-10	7,9	38±4	27±3
-55	8,0	35±4	22±2
-90	7,9	33±3	21±2
-110	3,5	39±4	24±2
-120	3,6	37±4	27±3
-140	3,6	42±4	25±3
+25(2)	4,6	46±4	32±3

При достижении температуры $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ работа сцинтиблока стала неустойчивой. После отогрева и вскрытия криостата на поверхности входного окна фотоумножителя была обнаружена микротрещина. Результаты повторного измерения спектра при комнатной температуре, приведённые в последней строке табл. 3 и на рис. 6, свидетельствуют, что рабочие параметры сцинтиблока заметно снизились.

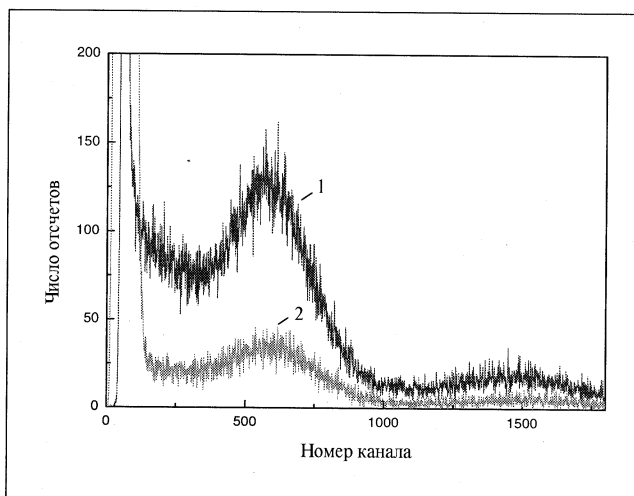


Рис. 6. Спектры гамма-квантов изотопа ^{22}Na , измеренные при температуре $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до (1) и после (2) охлаждения

Таким образом, работоспособность испытанного образца сохранялась вплоть до температуры $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$, что значительно ниже гарантируемой производителем. Возможность использования ФЭУ-165 в проекте суперкомпактного антикомптоновского гамма-спектрометра для ядерно-физических исследований, требующего обеспечения температуры кристалла Ge ($-175\text{ }^{\circ}\text{C}$), предполагает технологические изменения при производстве фотоумножителя или, что представляется более реальным, использование температурного моста для обеспечения оптимальной температуры входного окна фотоумножителя в интервале от -55 до $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Следует отметить, что полученные в работе экспериментальные данные для единичного экземпляра не следует считать универсальными, но они могут учитываться в качестве оценочных при рассмотрении вопроса об эффективности использования ФЭУ-165 при низких температурах. В случае возможности отбора экземпляров ФЭУ-165 со спектральной характеристикой, смещенной в зеленую область спектра, и имеющих спектральную чувствительность фотокатода 70 мА/Вт и более на длине волны 480 нм , можно ожидать существенного улучшения энергетического разрешения сцинтиблока и увеличения эффективности его использования в составе суперкомпактного антикомптоновского гамма-спектрометра.

Список литературы

- [1]. Айнбунд М.Р., Меньшиков Г.А., Фролов В.М. //ПТЭ.— 1989.—№6.- С. 183-184.
- [2]. Brudanin V.B. et al.//Proc. of conf. “Nuclear Data for Science and Technology”, SIF, Bologna, 1997, p. 567.
- [3]. Voigt de M.J.A. et al. //Nuclear Instruments and Methods., Vol. A356 (1995), p. 362-375.
- [4]. Айнбунд М.Р., Иванов А.И., Исаакьян Г.А. и др. Спектрометрические характеристики фотоумножителей на основе микроканальных пластин//ПТЭ.— 1988.- №1.- С. 161-162.
- [5]. Meicher C.L. and Schweitzer J.S. //IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-32 (1) (1985), p. 529-535.
- [6]. Цирлин Ю.А., Глобус М.Е., Сысоева Е.П. Оптимизация детекторного гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [7]. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. — М: Радио и связь, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 июня 2001 года.

Айнбунд М.Р. и др.

P13-2001-130

Исследования спектрометрических и эксплуатационных характеристик сцинтиблока ВГО-ФЭУ-165 для интервала температур от +25 до -140 °С

Фотоумножители на основе микроканальных пластин используются в быстрых системах формирования временных отметок физических установок, а также в специальных областях техники, нередко заменяя традиционные фотоумножители с диодной системой. В ходе эксперимента исследована возможность совместной работы фотоумножителя ФЭУ-165 с кристаллом ВГО при охлаждении до температуры, необходимой для работы полупроводникового Ge-детектора, с учетом температурной зависимости собственных характеристик ФЭУ. Проведено охлаждение системы от комнатной температуры до -140 °С в течение 8 часов. Зарегистрирована предельная температура, при которой сохраняется работоспособность фотоумножителя, и изучены температурные изменения спектроскопических характеристик такой системы: энергетического разрешения и отношения сигнал/шум.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Ainbund M.R. et al.

P13-2001-130

Research of Spectrometric and Exploitation Characteristics of BGO-PMP-165 Scintiblock in Temperature Interval from +25 to -140 °С

Photomultipliers based on microchannel plates are used for fast systems which form time marks of physical setups as well as in special technical areas. It is not uncommon when they substitute traditional dynode system photomultipliers. The possibility of compatible work of the PMP-165 photomultiplier with BGO crystal which were cooled down to temperature necessary for appropriate functioning of a semiconductor Ge detector with taking into account of temperature dependencies of own PMP characteristics is investigated during experiment. Cooling down of the system from room temperature down to -140 °С during 8 hours is done. Lower limit of temperature which allows PMP to function properly is registered. Changes of spectrometric characteristics caused by temperature are studied.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор А.Н.Шабашова. Макет Р.Д.Фоминой

Подписано в печать 30.07.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,18
Тираж 315. Заказ 52803. Цена 1 р. 40 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области