

УДК 539.17

ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЙ СПЕКТРОМЕТР БЕТА-ЧАСТИЦ

© 2012 г. **В. Ф. Апалин**, К. А. Балыгин, В. И. Зайцев, М. Д. Каретников, А. И. Климов,
В. И. Копейкин, Е. А. Мелешко, А. А. Сабельников

НИЦ “Курчатовский институт”

Россия, 123182, Москва, пл. И.В. Курчатова

Поступила в редакцию 31.05.2011 г.

Измерения β -спектров продуктов деления проводятся при большом фоне γ - и нейтронного излучения. Для уменьшения влияния фона при сохранении высокой эффективности регистрации β -частиц разработан сцинтилляционный β -спектрометр, обеспечивающий хорошую передачу формы β -спектров в диапазоне энергий >1 МэВ. Рассмотрена функциональная схема спектрометра, представлены результаты тестирования спектрометра с помощью радиоактивных источников электронов.

ВВЕДЕНИЕ

При решении ряда фундаментальных и прикладных задач возникает потребность в измерениях энергетических спектров β -частиц, испускаемых смесями продуктов деления, накопленных при облучении изотопов урана и плутония нейтронами [1–3]. Например, данные о спектрах β -частиц позволяют определить спектр реакторных антинейтрино ($\bar{\nu}_e$) в экспериментах по изучению природы нейтрино [4, 5], найти тепловую энергию, выделяющуюся в реакторе на один акт деления, и изучить ее динамику [6, 7]. Мощность остаточного тепловыделения остановленного реактора и отработавшего ядерного топлива в бассейне выдержки также определяется β -распадом продуктов деления [8, 9].

Диапазон энергий β -частиц простирается до 10 МэВ. Измерения β -спектров продуктов деления проводятся на пучках тепловых нейтронов при большом фоне γ - и нейтронного излучения, сопровождающего акт деления. Быстрый спад спектральной плотности β -частиц с увеличением их энергии (для смеси продуктов деления изотопа ^{235}U спектральная плотность меняется на 4 порядка в диапазоне 1.5–9 МэВ) существенно усугубляет фоновые условия эксперимента при больших энергиях β -частиц.

Ниже описывается сцинтилляционный β -спектрометр, разработанный для снижения влияния фона при достаточной эффективности регистрации β -частиц (электронов) и хорошей передачи β -спектра.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА
 β -СПЕКТРОМЕТРА

На рис. 1 приведена функциональная схема спектрометра. Блок детекторов (D_1 – D_3) представ-

ляет собой телескопическую систему, состоящую из двух органических сцинтилляционных детекторов: основного (E -детектор) – кристалл стиблена $\varnothing 50 \times 50$ мм, в котором поглощается практически вся энергия β -частиц, и тонкого пролетного (ΔE -детектор) на основе пластикового сцинтиллятора $\varnothing 30 \times 0.18$ мм, расположенного на пути электронов к основному детектору.

Детекторы оптически разделены светоотражающими покрытиями. E -детектор сопряжен с фотоумножителем ФЭУ-110. Сцинтилляционная пластинка ΔE -детектора помещена в светоотражающую коробочку из тонкого майлара и просматривается двумя ФЭУ-97 с противоположных открытых сторон.

Для подавления влияния шумов фотоумножителей ФЭУ-97 используется метод совпадений: регистрация β -частиц осуществляется при совпадении ΔE - и E -сигналов, при этом энергия, оставленная частицей в обоих сцинтилляторах, суммируется. Основной и пролетный детекторы вместе с двумя алюминиевыми коллиматорами электронов размещены в корпусе детекторов спектрометра. Со стороны коллиматоров корпус закрыт только тонкой светонепроницаемой майларовой мембраной, через которую проходят электроны. С целью уменьшения отражения электронов коллиматоры и внутренняя поверхность корпуса покрыты слоем оргстекла.

Так как спектр сигналов с пролетного детектора начинается примерно с нескольких килоэлектронвольт, для обеспечения приемлемой эффективности регистрации необходимо уменьшать шумы ф.э.у. снижением их напряжения питания. При этом приходится устанавливать предельно низкие пороги дискриминаторов в каналах пролетного детектора и использовать зарядовые предусилители, расположенные вблизи детекто-

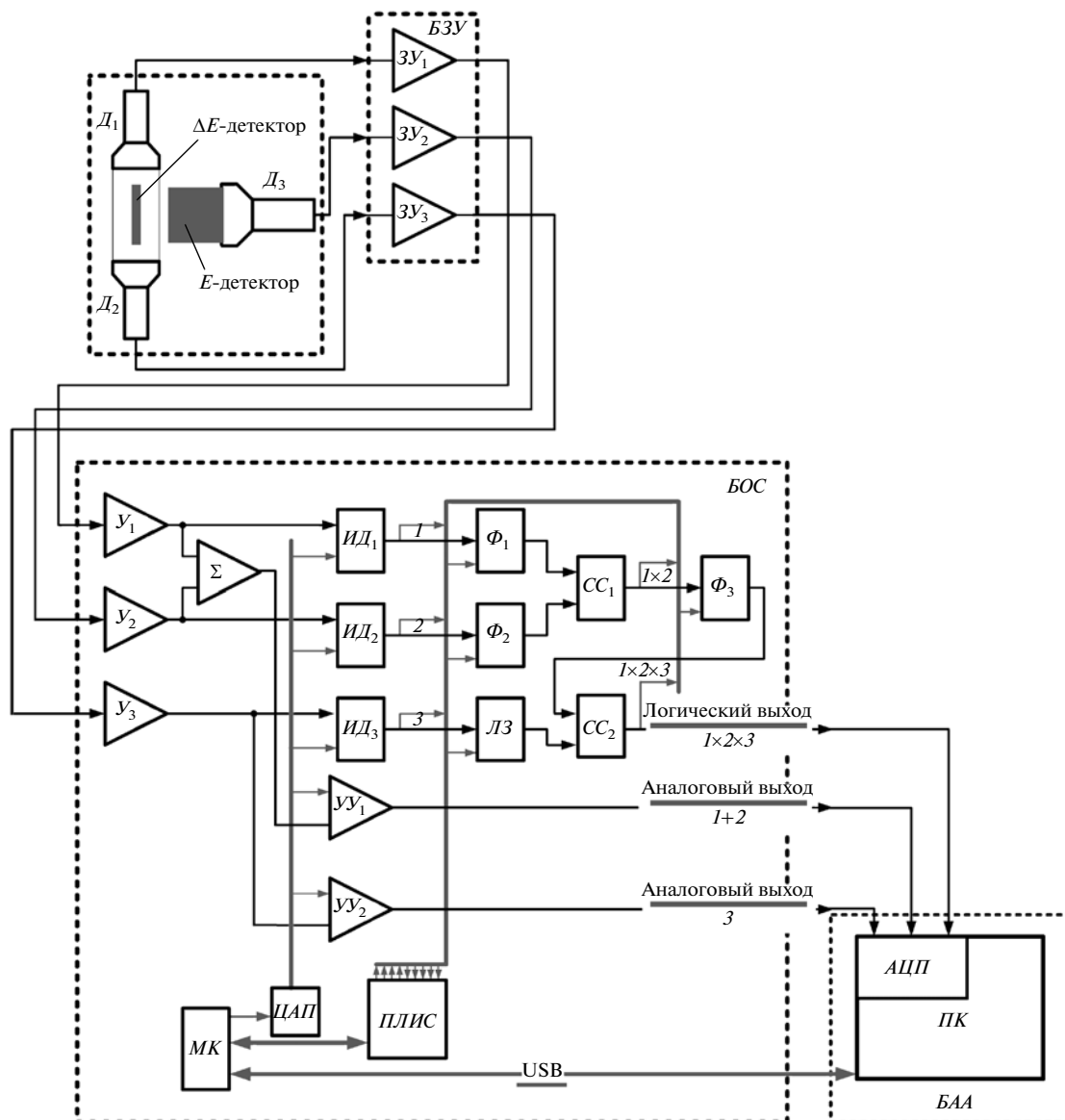


Рис. 1. Функциональная схема регистрирующей аппаратуры β -спектрометра. $Д_1$ – $Д_3$ – блок детекторов; $БЗУ$ – блок зарядовых усилителей; $БОС$ – блок обработки сигналов; $БАА$ – блок амплитудного анализа; $ПК$ – персональный компьютер; E - и ΔE -детекторы – соответственно основной и тонкий пролетные органические сцинтилляционные детекторы; $У_1$ – $У_3$ – буферные усилители; Σ – двухвходовой усилитель; $ИД_1$ – $ИД_3$ – интегральные дискриминаторы; Φ_1 – Φ_3 – формирователи длительности импульсов; $СС_1$, $СС_2$ – схемы совпадений; $ЛЗ$ – линия задержки; $УУ_1$, $УУ_2$ – управляющие усилители; $ЦАП$ – цифроаналоговый преобразователь; $МК$ – микропроцессор С8051F314OFP-32 (CYGNAL); $ПЛИС$ – программируемая логическая интегральная схема EP3C10E144C8N (ALTERA); $АЦП$ – блок 12-разрядных а.п.п. ЛА-н20-12РС1.

ров β -спектрометра. Степень интегрирования импульсов тока ф.э.у. в предусилителе оптимизирована по отношению сигнал/шум. В рассматриваемом случае применение зарядовых усилителей, расположенных вблизи детекторов, позволило обеспечить устойчивую работу спектрометра при порогах дискриминаторов, эквивалентных импульсам тока амплитудой 0.5–1 мкА на входе зарядового усилителя.

Для первичной обработки сигналов, поступающих со сцинтилляционных детекторов β -спектрометра, определения счетных характеристик и выработки логического (стробирующего) сигнала для амплитудного анализа служит блок обработки сигналов $БОС$. Усиленные и проинтегрированные сигналы с ф.э.у. детекторов $Д_1$ – $Д_3$ спектрометра с выходов блока зарядовых усилителей $БЗУ$ подаются на входы $БОС$ и далее, через буферные уси-

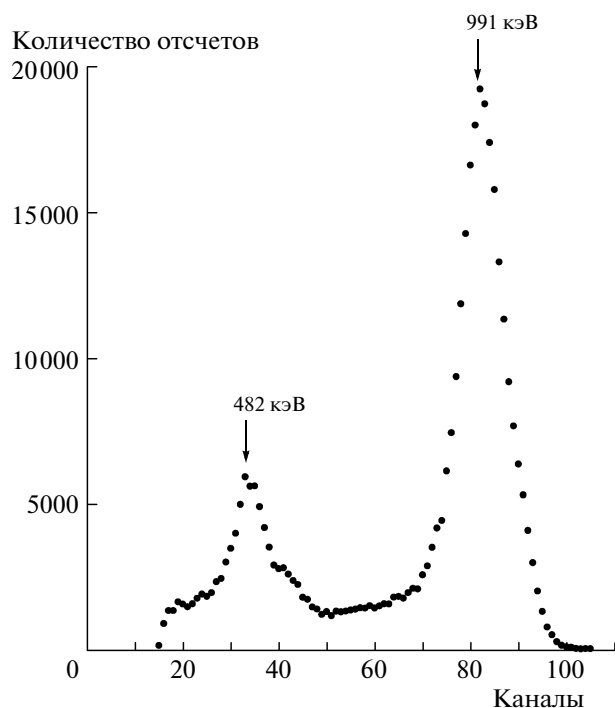


Рис. 2. Спектр электронов конверсии от источника ^{207}Bi . Энергии пиков 991 и 482 кэВ даны без поправки на потери в воздухе и пленках.

лители $У_1$ – $У_3$, приходят на интегральные дискриминаторы $ИД_1$ – $ИД_3$. Сигналы с $ИД_1$ и $ИД_2$ поступают на формирователи длительности импульсов Φ_1 и Φ_2 и далее на схему совпадений $СС_1$, вырабатывающую сигнал совпадения импульсов $Д_1$ и $Д_2$ (сигнал срабатывания ΔE -детектора). Пороги срабатывания интегральных дискриминаторов задаются с помощью цифроаналогового преобразователя ЦАП в диапазоне 0–2 В. Формирователи длительности позволяют задавать разрешающее время схемы совпадений в интервале 10–2500 нс.

Сигнал от $СС_1$ подается на формирователь длительности Φ_3 (10–1200 нс), который формирует импульс временных ворот для $СС_2$. Импульс от $ИД_3$ поступает на $СС_2$ через линию задержки ЛЗ. Схема $СС_2$ вырабатывает сигнал совпадения импульсов от ΔE - и E - детекторов ($1 \times 2 \times 3$). Установка порогов интегральных дискриминаторов и коэффициентов усиления управляемых усилителей, контроль линий задержек и счетчиков, а также съем данных с блока осуществляется ПК по магистрали USB. Управляющее ядро в блоке отбора событий реализовано на основе микропроцессора МП и ПЛИС, кроме того, ПЛИС используется для измерения скоростей счета сигналов с $ИД_1$ – $ИД_3$, $СС_1$ и $СС_2$.

Блок БОС вырабатывает два аналоговых сигнала (суммарный сигнал с двух ФЭУ-97 пролетного детектора и сигнал с ФЭУ-110). При совпадении

сигналов со всех трех фотоумножителей на выходе формируется логический сигнал $1 \times 2 \times 3$. В аналоговых трактах для нормализации сигналов используются управляемые усилители $УУ_1$ и $УУ_2$, а для суммирования – двухвходовой усилитель Σ . Для амплитудного анализа используется блок 12-разрядных АЦП [10], выполненный на плате, встраиваемой в PCI-шину ПК. Аналоговые сигналы с выходов БОС подаются на измерительные входы блока АЦП, логические сигналы – на управляющий вход блока АЦП.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Основными функциями разработанного программного обеспечения являются опрос готовности устройства БОС, передача массива данных в память компьютера, предварительная обработка и визуализация массива информации, соответствующего каждому физическому событию. Средства обработки более высокого уровня производят восстановление энергий зарегистрированных частиц и построение соответствующих гистограмм. Эти гистограммы в режиме реального времени доступны для анализа и могут быть экспортированы для off line-обработки. Средства управления позволяют задавать режим работы БОС, автоматическое управление сериями измерений, отображение хода эксперимента в виде динамического графика скорости счета, запоминание и восстановление режима работы и параметров спектрометра.

ТЕСТИРОВАНИЕ β -СПЕКТРОМЕТРА С РАДИОАКТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

Тестирование β -спектрометра проводили с помощью источника конверсионных электронов ^{207}Bi ($T_{1/2} = 33.4$ года) [11] и источника β -электронов ^{144}Ce ($T_{1/2} = 285$ сут, $E_{\beta}^{\max} = 318$ кэВ)– ^{144}Pr ($T_{1/2} = 17$ мин, $E_{\beta}^{\max} = 2996$ кэВ) [3]. Основные конверсионные линии ^{207}Bi составляют 482 и 991 кэВ (991 кэВ – сумма K - и L -линий). Полные коэффициенты конверсии для этих двух групп электронов равны соответственно 2.21% и 12.8%. Для изотопа ^{144}Pr форма β -спектра близка к разрешенной [3], поэтому источник ^{144}Ce – ^{144}Pr удобен при калибровках.

На рис. 2 показан спектр конверсионных электронов ^{207}Bi , измеренный с помощью β -спектрометра. Использование пролетного детектора позволило существенно (в 200 раз) подавить фон γ -квантов. Энергетическое разрешение (отношение полуширины к максимуму пика) составило ~12% для энергии электронов 1 МэВ.

Прохождение электронного пучка через тонкий скинтиллятор характеризуется асимметрич-

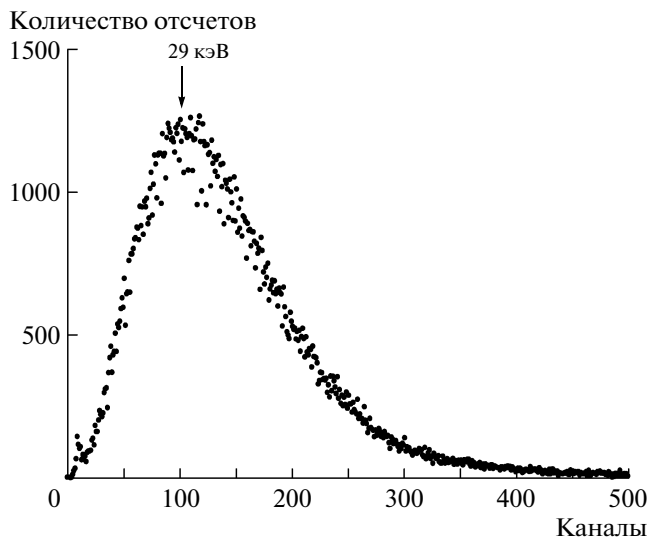


Рис. 3. Спектр потерь энергии электронов от источника ^{207}Bi в пролетном детекторе.

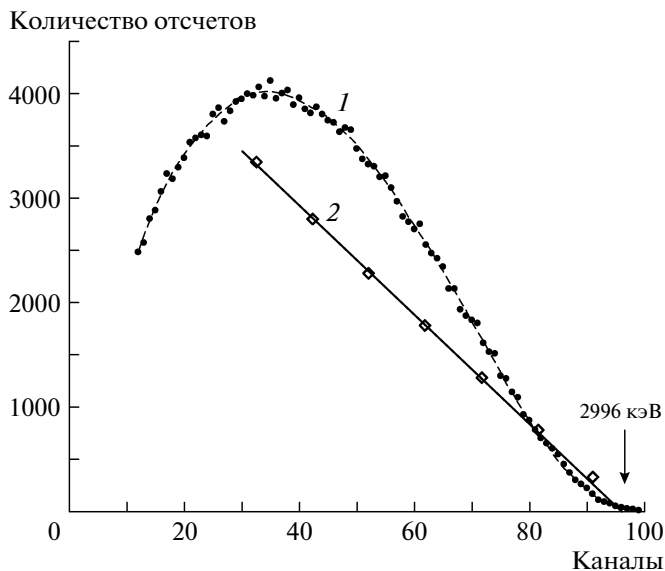


Рис. 4. β -спектр источника $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$ (кривая 1) с графиком Кюри (2).

ным спектром импульсов, соответствующим распределению Ландау. На рис. 3 представлен спектр потерь энергии электронов в пролетном детекто-

ре, измеренный с источником ^{207}Bi . Максимум спектра составляет ~ 29 кэВ.

На рис. 4 приведен β -спектр источника $^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$, полученный в наших измерениях. Для сравнения полученного β -спектра с теоретическим и нахождения граничной энергии спектра по этому спектру построен график Кюри. Видно, что график Кюри в области энергий >1 МэВ соответствует прямой линии и, таким образом, демонстрирует хорошую передачу формы β -спектра. Точка пересечения с осью энергии графика Кюри определяет граничную энергию β -спектра (2996 кэВ).

Таким образом, результаты тестирования показали, что разработанный β -спектрометр обеспечивает существенное уменьшение влияния фона при сохранении хорошего энергетического разрешения и передачи формы β -спектров в диапазоне энергий >1 МэВ.

Проект поддержан грантами РФФИ 10-02-00201-а и 11-02-93109 НЦНИЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schreckenbach K., Colvin G., Gelletly W. et al. // Phys. Lett. 1985. V. B 160. P. 325.
2. Hahn A., Schreckenbach K., Gelletly W. et al. // Phys. Lett. 1989. V. B 218. P. 365.
3. Алексанкин В.Г., Родичев С.В., Рубцов П.М. и др. Бета- и антинейтринное излучение радиоактивных ядер. М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Микаэлян Л.А. // ЯФ. 2002. Т. 65. С. 1206.
5. Lasserre T., Sobel H.W. // Comptes Rendus Physique. 2005. V. 6. P. 749; arXiv: nucl-ex/0601013.
6. Копейкин В.И., Микаэлян Л.А., Синёв В.В. // ЯФ. 2004. Т. 67. С. 1916; arXiv: hep-ph/0410100.
7. Копейкин В.И. Препринт 4305/2. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1986.
8. Глушков Е.С., Демин В.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Хрулев А.А. Тепловыделение в ядерном реакторе. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 1988.
10. Внешнее прецизионное устройство сбора аналоговой и цифровой информации с PCI портом LAN20-12PCI. <http://www.rudshel.ru/show.php?dev=41>
11. Хольнов Ю.В., Чечев В.П., Камынов Ш.В. и др. Характеристики излучений радиоактивных нуклидов: Справочник. М.: Атомиздат, 1980.