

УДК 539.1.074

ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРОВ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ CdZnTe-ДЕТЕКТОРОВ

*Бушуев А.В., Зубарев В.Н., Кожин А.Ф., Николаев А.Г.,
Петрова Е.В., Портнов А.А., Прошин И.М. (МИФИ)*

В последнее десятилетие интенсивно разрабатываются новые полупроводниковые детекторы γ -излучения на основе CdZnTe. Такие детекторы находят все более широкое применение при контроле отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов [1, 2].

По энергетическому разрешению CdZnTe-детекторы занимают промежуточное положение между сцинтилляционными и германиевыми детекторами и, несмотря на малые размеры, обладают удовлетворительной эффективностью регистрации γ -излучения. В отличие от германиевых детекторов они не требуют охлаждения жидким азотом.

CdZnTe-детекторы, выпускаемые фирмой BSI (Латвия), изготавливаются в виде зонда, включающего в себя миниатюрный кристалл CdZnTe и предусилитель, помещенные в герметичный металлический корпус диаметром 8, длиной 90 мм. Малые размеры зонда и возможность его работы без охлаждения дают возможность проводить измерения в труднодоступных местах. Малые габаритные размеры позволяют достаточно просто защитить CdZnTe-детектор от рассеянного γ -излучения и коллимировать пучок регистрируемых γ -квантов.

В настоящей статье описано применение CdZnTe-детекторов для различных измерений. В экспериментах использовали два детектора, характеристики которых приведены в таблице. Эффективность регистрации γ -излучения ^{137}Cs детекторами различалась примерно в 10 раз.

Характеристики используемых CdZnTe-детекторов

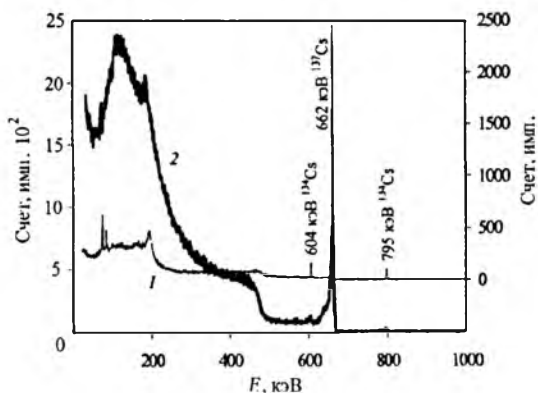
Характеристики	Детектор	
	№ 1	№ 2
Размер кристалла, мм	3,4×3,4×1,7	2,3×2,3×1,1
Размер зонда (диаметр×длина), мм	8×90	8×90
Энергетическое разрешение, кэВ:		
$E_{\gamma} = 122,1$ кэВ (^{57}Co)	6,1	3,2
$E_{\gamma} = 661,7$ кэВ (^{137}Cs)	11	6,3

Регистрирующими устройствами служили два разных электронных тракта — спектрометрическое устройство Multispectrum (BSI, Латвия), предназначенное для работы с данным типом детекторов, и набор модулей ORTEC в стандарте NIM со встроенной в компьютер платой АЦП (НПЦ «Аспект», Дубна).

Измерение γ -спектров отработавших ТВС ИРТ МИФИ. Важной и масштабной задачей являются контрольные измерения отработавших ТВС разных реакторов, хранящихся в бассейнах выдержки и сухих хранилищах. Для таких измерений подходят CdZnTe-детекторы, имеющие малые размеры и способные работать в мощных радиационных полях. В настоящей работе были проведены опыты с ТВС, выгорание которых достигало 52%, время охлаждения — более 4 лет.

В первом опыте ТВС ИРТ-3М [3] помещали в перегрузочный контейнер таким образом, чтобы ее центральное сечение находилось напротив коллимационного отверстия диаметром 16 мм. Оба детектора размещали на оси пучка γ -квантов на расстоянии 50 см от стенки контейнера. Для измерения спектров ТВС детекторы по очереди под-

ключали к блоку Multispectrum. Скорость счета достигала ~ 50 тыс. имп./с для первого и ~ 5 тыс. имп./с для второго детектора. Детектор из особоочистого германия (HPGe) располагали также на оси пучка, но на расстоянии 7 м от контейнера за свинцовой защитной стенкой толщиной 10 см, имеющей коллимационное отверстие 10 мм. Такая геометрия измерений обеспечивала интегральную загрузку спектрометрического тракта ~ 5 тыс. имп./с [4].

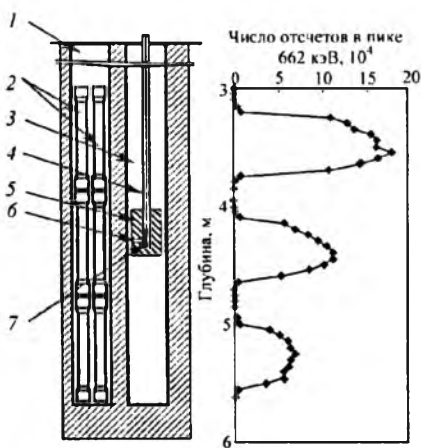


Р и с. 1. Спектры γ -излучения отработавшей ТВС ИРТ, измеренные с помощью коаксиального HPGe- (1) и CdZnTe-детектора № 2 (2)

ние от 0,5 м до нескольких сантиметров. Главную проблему измерений составляло мощное радиационное поле, формирующееся в воде вокруг ТВС. Детектор приходилось окружать свинцовой защитой толщиной около 5 см с направленным на ТВС коллимационным отверстием диаметром 5 мм. Интегральная загрузка даже при измерениях со вторым детектором достигала 150 тыс. имп./с, и нормальная работа спектрометра была возможна только при использовании электронного блока Multispectrum. Во избежание соприкосновения с водой детектор помещали в герметичную оболочку из нержавеющей стали. Металлический корпус зонда был дополнительно изолирован от оболочки, чтобы не образовывался паразитный контур заземления, что привело бы к

ухудшению энергетического разрешения спектрометра. Спектры γ -излучения ТВС, находившейся в бассейне, аналогичны полученным в первом опыте.

В третьем опыте выполняли γ -сканирование секции сухого хранилища, в которой находились отработавшие ТВС ЭК-10, выгруженные из активной зоны реактора около 20 лет назад. ТВС выгоранием от 4 до 25% размещались ярусами в специальных пеналах по три в каждом (рис. 2). Детектор перемещали по вертикали в соседней секции сухого хранилища с шагом 5 см. Таким образом γ -излучение ТВС измеряли через слой бетона толщиной около 50 мм. Измерительный зонд был снабжен свинцовой защитой с коллимационным отверстием 8 мм. Максимальная интегральная загрузка измерительного тракта составила 25 тыс. имп./с, время одного измерения — 2—3 мин. Наблюдаемое различие в интенсивности излучения ^{137}Cs объясняется как разной глубиной выгорания ТВС, так и расположением ТВС по отношению к детектору во время измерения.



Р и с. 2. Схема измерения γ -излучения отработавших ТВС в сухом хранилище ИРТ и распределение выгорания ТВС: 1 — канал сухого хранилища ТВС; 2 — отработавшие ТВС; 3 — измерительный канал; 4 — держатель детектора; 5 — защита детектора; 6 — коллимационное отверстие; 7 — CdZnTe-детектор

Обработка спектров. При обработке пиков в спектрах возникли затруднения. Форма пика 661,7 кэВ ^{137}Cs асимметрична, на его левом склоне проявляется пик вылета γ -квантов кадмия. По существу отдельный фотопик представляет собой сумму двух пиков, причем форма пика в наблюдаемом спектре зависит от разрешения и объема кристалла. Поэтому использование математических моделей, которые применяются при обработке спектров, полученных с помощью Ge-детекторов, может приводить к значительным погрешностям.

Для расчета площадей фотопиков был применен способ обработки, реализованный в программе ЛСРМ (ВНИИФТРИ). На этапе калибровки конкретного детектора с помощью стандартных источников γ -излучения рассчитываются два пика-образа в начале и конце измеряемого диапазона энергии. Затем линейная суперпозиция этих двух пиков-образов используется в обработке измеренного спектра. Обработка γ -спектров по программе ЛСРМ дала удовлетворительные результаты. Соотношение между площадями фотопиков ^{137}Cs в спектрах различных ТВС, полученных на CdZnTe-спектрометрах, совпали в пределах погрешностей с результатами аналогичных измерений на HPGe-спектрометре.

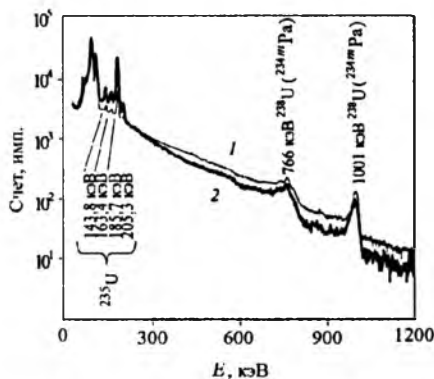
Измерение γ -излучения необлученных ядерных материалов. С помощью второго детектора измерены спектры γ -излучения блоков из металлического природного урана, твэлов ВВЭР из диоксида урана обогащением 3,6% (рис. 3) и плутониевого образца. Анализ спектров привел к следующим выводам:

в спектрах γ -излучения урановых образцов наблюдаются фотопики, принадлежащие ^{235}U и ^{238}U . Определить обогащение по результатам измерений в области 100 кэВ невозможно из-за недостаточно высокого разрешения;

энергетическое разрешение детекторов достаточно, чтобы выделить в спектре γ -излучения образцов урана с различным обогащением изолированные фотопики 143,8 и 185,7 кэВ, связанные

с α -распадом ^{235}U , и фотопики энергий 766,4 кэВ и 1001 кэВ, принадлежащие $^{234\text{m}}\text{Pa}$ — продукту α -распада ^{238}U . Это позволяет, используя метод бесконечно толстого образца, выполнять контрольные измерения обогащения урановых твэлов, блоков, ТВС и др. Достижимая точность измерения обогащения выше, чем при аналогичных измерениях с помощью NaI-детекторов, поскольку пики изолированы и отношение пик/фон лучше. В принципе, отношение числа ядер ^{235}U и ^{238}U может быть определено по γ -излучению ^{235}U и ^{238}U с помощью программы FRAM, но для этого ее нужно модернизировать, так как модель фотопика, используемая в программе, не соответствует форме пиков в спектрах, полученных посредством CdZnTe-детекторов. Интегральная загрузка измерительного тракта при подобных измерениях невелика, поэтому спектрометрический тракт можно комплектовать из блоков как в стандарте NIM, так и производимых НПЦ «Аспект». Время измерения зависит от объема детектора и свойств образца (массы, геометрии и др.) и может составлять десятки минут;

спектры плутониевых образцов имеют более сложную структуру и содержат много близких по энергии линий, принадлежащих разным изотопам плутония. Разрешающая способность CdZnTe-детекторов во всех диапазонах энергии недостаточна для наблюдения отдельных пиков (кроме пика 59,4 кэВ ^{241}Am) даже при использовании детек-



Р и с. 3. Спектры γ -излучения блоков природного урана (1) и твэлов из UO_2 обогащением 3,6% (2), измеренные CdZnTe-детектором № 1

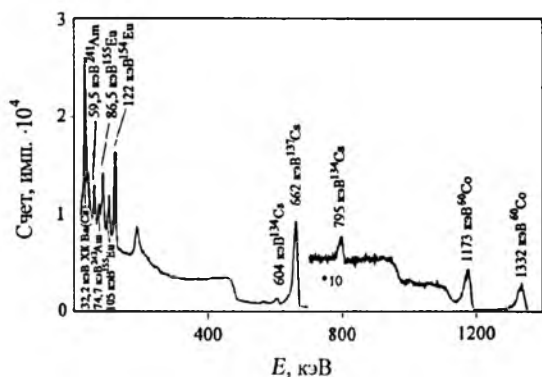


Рис. 4. Спектр γ -излучения образца графита реактора АДЭ-3 Сибирского химического комбината, измеренный CdZnTe-детектором № 1

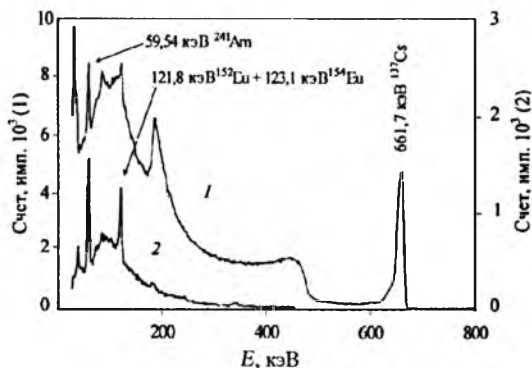


Рис. 5. Спектры γ -излучения образцов почвы из района аварии на Чернобыльской АЭС (Беларусь, д. Масаны Гомельской обл.) (1) и с Семипалатинского испытательного полигона (площадка «Опытное поле») (2)

Применение CdZnTe-детекторов дает возможность, кроме обычных способов измерения почвы (пробоотбор либо полевые измерения детектором, перемещаемым на тележке по исследуемой поверхности), помещать детектор в скважины на глубину до 10 см (согласно литературным данным в слое такой толщины обычно содержится 90% радионуклидов). При этом существенно повысится чувствительность метода, поскольку измерения будут проходить в 4 π -геометрии.

Таким образом, исследования показали возможное применение CdZnTe-детекторов. Есть и другие перспективы их использования, например, контроль технологических процессов при производстве ядерных материалов, контроль γ -излучения жидких радиоактивных отходов. В условиях, когда не требуется высокое разрешение, а главным является простота эксплуатации (работоспособность без охлаждения жидким азотом) и компактность, преимущество принадлежит CdZnTe-детекторам.

Вряд ли, как утверждают авторы работы [2], CdZnTe-спектрометры заменят NaI-и Ge-спектрометры, они, скорее, дополняют арсенал спектрометрических приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nicolaou G., Abbas K., Koch L. The use of a CdTe detector under dry conditions of spent nuclear fuel. — In: 17 Annual Symp. of Safeguards and Nuclear Material Management, Aachen, Germany, 9–11 May, 1995, p. 519.
2. Арлт Р., Иванов В. Преимущество использования индикаторов CdZnTe в системе мер безопасности (гарантий). Доклад на трехстороннем семинаре по измерениям, проверке наличных количеств и оценке баланса ядерных материалов, Обнинск, Россия, 9–13 октября 2000.

торов с малым объемом (лучшим разрешением), поэтому CdZnTe-детекторы вряд ли пригодны для изотопного анализа образцов плутония.

Измерение γ -излучения радиоактивных отходов. CdZnTe-детектор был также использован для измерения γ -излучения образцов графита остановленных промышленных реакторов (рис. 4). В спектре наблюдаются пики, принадлежащие γ -излучению ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{241}Am , ^{243}Am . Все эти пики изолированы и поддаются математической обработке, что позволяет сделать заключение о пригодности CdZnTe-детекторов для исследования радиоактивного загрязнения графита. Эти детекторы могут быть использованы для зондирования графитовых кладок остановленных промышленных реакторов и исследований как внутри хранилищ радиоактивных отходов, так и в скважинах вокруг них.

Измерение радиоактивного загрязнения почвы. Первый детектор использовали для измерения радиоактивного загрязнения почвы (рис. 5). Масса проб почвы составляла около 50 г, активность по ^{241}Am — 500–1000 Бк/кг.

3. Гончаров В.В., Глухов А.М., Егоренков П.М. и др. Создание ТВС типа ИРТ-ЗМ для бассейновых реакторов и опыт их использования. Труды совещания специалистов по обмену опытом реконструкции исследовательских реакторов в странах — членах СЭВ. Москва, 22—25 июня 1982.
4. Бушуев А.В., Зубарев В.Н., Кожин А.Ф. и др. Экспериментально-расчетное исследование поля энерговыделения и выгорания топлива ИРТ. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 6, с. 426—431.

Поступила в Редакцию 23.01.02

УДК 539.125.5:621.384.6

МАЛОГАБАРИТНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ С ЛАЗЕРНЫМ ИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

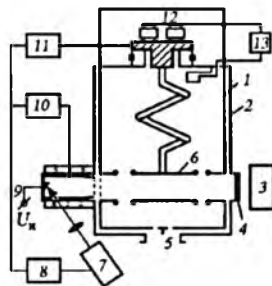
Козловский К.И., Симановский М.Ф., Цыбин А.С. (МИФИ), Ржевский А.В.
(Самарский центр стандартизации, метрологии и сертификации),
Шиканов А.Е. (ФГУП по ядерной геофизике и геохимии «ВНИИЯГГ»)

Для некоторых ядерно-физических экспериментов и экспрессного элементного анализа вещества путем многоканальной амплитудной или временной спектрометрии γ -квантов, образуемых при нейтронной активации, неупругом рассеянии или радиационном захвате, требуются малогабаритные радиационно безопасные генераторы, работающие в импульсно-периодическом режиме и излучающие в полный телесный угол нейтронный поток 10^8 — 10^{11} с $^{-1}$ при непрерывном ресурсе 300—500 ч. Создание нейтронных генераторов, обеспечивающих поток больше 10^{10} с $^{-1}$, идет по пути использования сильноточных источников дейтронов, повышения ускоряющего напряжения, совершенствования нейтронообразующих мишеней устройств. Однако трудно увеличить напряжение в традиционных ускорителях на основе высоковольтных трансформаторов, электростатических генераторов или специальных формирующих линий при сохранении малых габаритов прибора. Поэтому генераторы нейтронов с потоком на уровне 10^{11} с $^{-1}$ и выше представляют собой стационарные крупногабаритные установки [1].

Одним из перспективных технических решений, реализующих интенсивные и сравнительно малогабаритные нейтронные генераторы, является резонансный ускоритель, позволяющий получать дейтроны энергией ~ 1 МэВ [2]. Получение такой энергии позволяет также перейти от тритиевых нейтронообразующих мишеней, традиционно используемых в нейтронных генераторах на базе ускорителей прямого действия [1], к радиационно безопасным дейтериевым или бериллиевым мишеням, т.е. к преимущественному использованию ядерных реакций $D(d, n)^3\text{He}$ и $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$.

Известно [1], что нейтронный поток, излучаемый мишенью, пропорционален току бомбардирующих ее дейтронов. Поэтому для повышения нейтронного потока было предложено использовать в ускорителе лазерный ионный источник, обладающий высокой эмиссионной способностью. Такой источник дейтронов был разработан в МИФИ [3]. В настоящей работе сообщается об исследовании возможности эффективной генерации нейтронных потоков в малогабаритном резонансном ускорителе дейтронов с лазерным ионным источником и оптимизации его основных узлов.

Нейтронный генератор (рис. 1) имеет два ускоряющих зазора (слева и справа от трубки дрейфа), в каждом из которых формируется переменное электрическое поле. Для этого используется четвертьволновый спиральный коаксиальный ре-



Р и с. 1. Схема нейтронного генератора с резонансным ускорением дейтронов: 1 — резонатор; 2 — вакуумный объем; 3 — детектор нейтронов; 4 — нейтронообразующая мишень; 5 — емкостный датчик напряжения; 6 — трубка дрейфа; 7 — импульсный лазер; 8 — блок пуска и управления; 9 — лазерно-плазменный источник ионов; 10 — блок питания соленоида; 11 — анодный модулятор; 12 — ламповый блок; 13 — фазовращатель