

РАЗРАБОТКА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ И СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ БЛОКОВ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ CdTe (CdZnTe) ДЛЯ АЭС УКРАИНЫ

*В.Е. Кутний, А.В. Рыбка, Д.В. Кутний, И.Н. Шляхов, Д.В. Наконечный
Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий
ННЦ «Харьковский физико-технический институт», г. Харьков, Украина*

В существующих системах ядерной и радиационной безопасности АЭС Украины используются блоки детектирования ионизирующих излучений на основе ионизационных счетчиков, камер деления, сцинтилляционных датчиков. По сравнению с ними полупроводниковые детекторы обладают меньшими габаритами и весом, более широким динамическим диапазоном, более высоким квантовым выходом, радиационной стойкостью, лучшими энергетическим разрешением и отношением сигнал/шум. В работе приведены исследования, подтверждающие указанные качества.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десять лет резко возрос интерес к широкозонным полупроводниковым соединениям CdTe, CdZnTe, GaAs. Этот интерес связан с возможностью получения на основе этих кристаллов детекторов ионизирующего излучения, которые имеют небольшой объем, не требуют охлаждения жидким азотом и обеспечивают высокую эффективность регистрации гамма-излучения. Энергетический диапазон детектируемого ими гамма-излучения лежит в интервале от 20 до 3000 кэВ, диапазон рабочих температур – в интервале от – 40 до + 50 °С. Спектрометры γ -излучения на основе CdTe и CdZnTe обладают энергетическим разрешением порядка нескольких процентов. Эти свойства обусловлены, прежде всего, наличием широкой запрещенной зоны (1,5...2,2 эВ) и большим средним атомным номером ($Z \sim 50$).

На основе сенсоров из полупроводниковых соединений CdTe (CdZnTe), GaAs (рис. 1, 2) в ННЦ ХФТИ разработаны и изготовлены детекторы гамма-излучения и блоки детектирования (БД) спектрометрического и дозиметрического назначения, а также сопутствующая электроника.

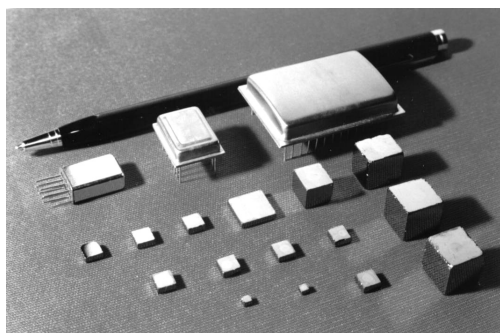


Рис. 1. Кристаллы и детекторы из CdTe и CdZnTe

Эти приборы отвечают существующим требованиям по надежности и сроку службы, радиационной и температурной устойчивости. Предполагается использование указанных БД для мониторинга и

контроля оборудования АЭС (теплоносителя I контура, парогенератора, протечек трубопровода, измерения мощности дозы гамма-излучения гермооболочки и хранения радиоактивных отходов (РАО)).



Рис. 2. Детекторы с кристаллами большого размера

В настоящей работе описан широкодиапазонный БД, предназначенный для работы в составе автоматизированной системы контроля радиационной безопасности (АСКРБ) АЭС. Приводятся сведения о разработанных спектрометре контроля изотопного состава теплоносителя I контура и блоке аварийного контроля мощности дозы, которые проходят испытания.

БЛОКИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ В СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

Для использования в составе автоматизированной системы контроля радиационной безопасности (АСКРБ) [1], предназначенной для комплексного контроля радиационной безопасности АЭС, разработаны блоки детектирования гамма-излучения. Блок детектирования мощности экспозиционной дозы (рис. 3) состоит из детектора (CdTe или CdZnTe), малозумящего предусилителя и микропроцессорного контролера, обеспечивающего высокую чувствительность детектирования, практически независимую от спектра излучения.

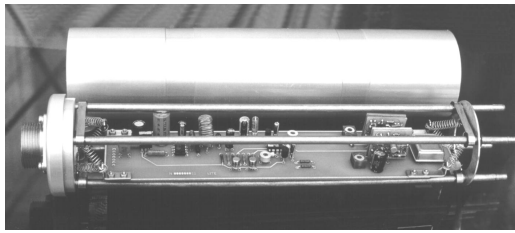


Рис. 3. Общий вид и функциональные узлы блока детектирования

Этот компактный прибор с автоматической подготовкой к работе позволяет контролировать режимы работы непосредственно в процессе эксплуатации. Он обеспечивает устойчивую работу на линии связи до 500 м в широком диапазоне измеряемых мощностей экспозиционной дозы (МЭД) — от 20 мкР/ч до 1000 Р/ч (рис. 4)

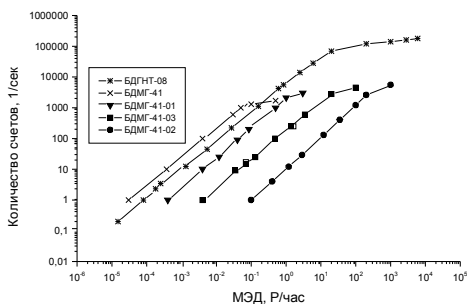


Рис. 4. Сравнительные характеристики серийного блока детектирования БДМГ-41, и блока детектирования БДРГ-Т с детектором из CdTe

Все разработанные технические средства системы АСКРБ отвечают требованиям "Специальных условий поставки оборудования на АЭС", имеют гарантийное обеспечение качества, обладают высокой надежностью, сейсмостойкостью и пожаробезопасностью [1]. Блоки детектирования в составе системы АСКРБ представляют собой распределенную сеть сбора данных, характеризующих радиационную безопасность объекта контроля, функционирующую в реальном масштабе времени во всех режимах работы АЭС (режим нормальной эксплуатации, режим остановки реакторной установки, аварийный режим, поставарийный режим).

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО БЕСПРОБООТБОРНОГО КОНТРОЛЯ НУКЛИДНОГО СОСТАВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ I-КОНТУРА РЕАКТОРА ВВЭР

Помимо непосредственной активации теплоносителя первого контура охлаждения реактора под действием мощного нейтронного потока активной зоны в нем возникают радионуклиды, образующиеся в результате реакций деления ядерного топлива и активации материалов активной зоны.

По нуклидному составу теплоносителя можно судить о текущей [2] тепловой мощности реактора, энерговыделении в активной зоне, величине выгорания ядерного топлива, расходе теплоносителя, герметичности оболочек твэлов, степени загрязнения контура радиоактивными продуктами коррозии.

Беспробоотборный непрерывный контроль нуклидного состава возможен с помощью гамма-спектрометрии теплоносителя во врезанной в первый контур "байпасной" линии. Такой контроль особенно актуален на ранней стадии разгерметизации оболочек твэлов. Для этой цели перспективны полупроводниковые детекторы с широкой запрещенной зоной, которые не требуют глубокого охлаждения. Так, детекторы на основе CdTe(CdZnTe) на время измерений достаточно охладить до минус 40°C. Такую температуру кристалла можно обеспечить с помощью портативного термоэлектрического холодильника.

В НИЦ ХФТИ проведен анализ гамма-спектров, измеренных от трубы с теплоносителем, по которым можно контролировать герметичность твэлов. В таблице представлены значения эффективности регистрации гамма-излучения CdTe детектором для разных толщин кристалла и разных энергий гамма-квантов. Эффективность оценивалась по величине поглощения гамма-излучения.

Эффективность регистрации (%) CdTe детектором гамма-линий некоторых нуклидов, характерных для теплоносителя реактора ВВЭР

Толщина кристалла, мм	Нуклид и энергия гамма-квантов						
	¹³³ Xe 81 кэВ	^{85m} Kr 151 кэВ	⁸⁸ Kr 196 кэВ	¹³⁵ Xe 250 кэВ	¹³¹ I 364 кэВ	⁸⁷ Kr 64 кэВ	¹³² I 668 кэВ
1	82	29	18	12	7	6	4
2	97	50	32	22	13	12	8
3	99	64	44	31	19	18	12
5	100	82	62	46	30	28	19
7	-	91	74	58	40	36	26
10	-	97	86	71	51	48	34

Индикаторами контроля герметичности оболочек твэлов являются продукты деления ядерного топлива: криптон, ксенон, радионуклиды йода, цезия, рубидия. Именно эти продукты первыми покидают оболочку при нарушении его герметичности. В принципе, контроль должен осуществляться по всем этим радионуклидам. Технически это не всегда выполнимо из-за того, что гамма-спектрометр имеет конечное разрешение по энергии и из-за разной интенсивности линий. Поэтому при разработке беспробоотборных методик контроля герметичности твэлов был проведен выбор линий в гамма-спектрах, относительные скачки интенсивности которых должны являться индикаторами появления дефектов в тепловыделяющих элементах.

Разрешение CdTe-детектора на уровне 2,5% полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым

к детекторам, которые используются для контроля герметичности твэлов при беспробоотборном методе контроля по продуктам деления в теплоносителе. В этом случае гамма-линии в спектре не перекрываются вплоть до энергии 403 кэВ и будут наблюдаться как отдельные пики. Гамма-линии в диапазоне от 403 до 529 кэВ перекрываются, и в спектре будут наблюдаться как мультиплетные пики. Гамма-линии в диапазоне энергий от 529 до 847 кэВ также не перекрываются. Типичный спектр представлен на рис. 5.

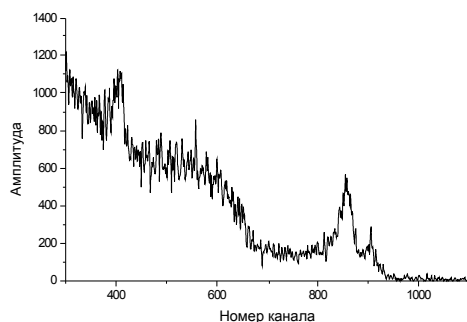


Рис. 5. Энергетический спектр γ -квантов от Mo^{99} , активированного γ -квантами с энергией до 15 МэВ

БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ

При высокой интенсивности излучения, которая может возникнуть в аварийной ситуации, предпочтительнее измерение тока, индуцированного облучением, или “токовый режим” работы детектора. Переход на токовый режим оказывается необходимым при скорости поглощения фотонов больше, чем 10^4 имп/с.

Нами разработан и подвергнут испытаниям БД мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения, работающего в токовом режиме и предназначенного для измерений мощных полей. В состав аварийного БД входят полупроводниковый детектор на основе соединения CdZnTe и преобразователь ток-напряжение (рис. 6).

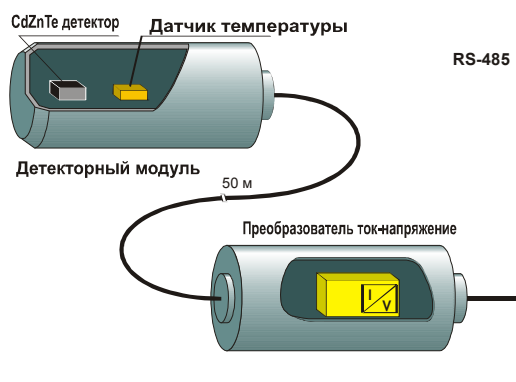


Рис. 6. Блок детектирования для контроля гамма-излучения в аварийном режиме

БД и преобразователь соединены между собой кабелем длиной до 50 м. Во время испытаний проверялись основные технические характеристики БД — диапазон измерения МЭД и предельной относительной погрешности измерения МЭД гамма-излучения.

Результаты исследований приведены на рис. 7–10. Выходной сигнал преобразователя БД линейно зависит от напряжения смещения на детекторе в интервале $U_{см} = 80...150$ В (см. рис. 7).

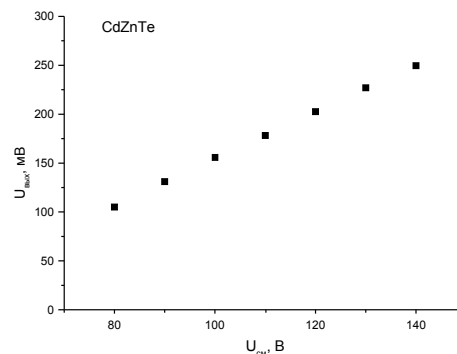


Рис. 7. Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от напряжения смещения, подаваемого на полупроводниковый детектор при МЭД 37,8 Р/ч (^{137}Cs)

Показания БД мало зависят от пространственной ориентации прибора (см. рис. 8). Максимальная анизотропия БД при изменении угла падения гамма-излучения от 0 до 360° вокруг оси вращения БД равна 11 %.

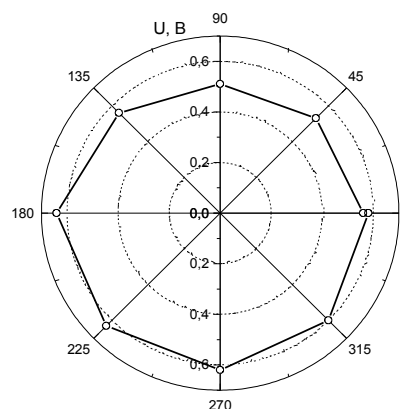


Рис. 8. Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от угла падения гамма-излучения при $U_{см} = 90$ В и МЭД — 422 Р/ч (^{60}Co)

На рис. 9 показана зависимость напряжения преобразователя БД с CdZnTe детектором размером $5 \times 5 \times 2$ мм³ от мощности дозы гамма-излучения ^{137}Cs . Начиная с ~ 20 Р/ч, эта зависимость линейна. Аналоговая чувствительность детектора из CdZnTe составляет $\sim 10^{-7}$ Кл/Р.

Аналогичные измерения были проведены на установке с источником большей мощности (^{60}Co , 5000 Р/ч). Как следует из рис. 10, при регистрации гамма-излучения в токовом режиме измерений индуцированный излучением ток линейно зависит от МЭД.

Разработанные блоки детектирования будут использованы для измерения мощных полей гамма-излучения при реконструкции системы контроля топливосодержащих масс на «Объекте “Укрытие”».

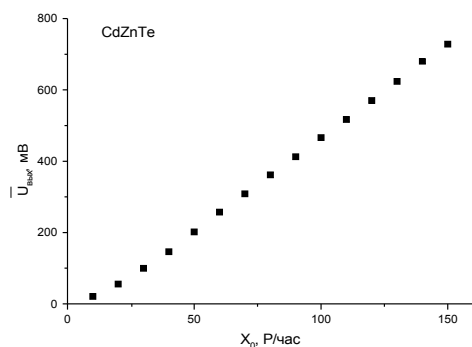


Рис. 9. Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от МЭД источника гамма-излучения ^{137}Cs

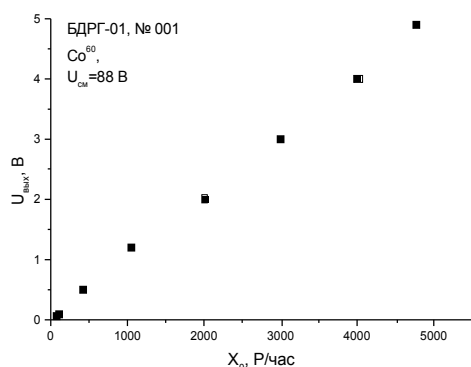


Рис. 10. Зависимость напряжения на выходе преобразователя БД от МЭД источника гамма-излучения ^{60}Co

Для регистрации интенсивных полей гамма излучения в аварийном режиме работы реактора в условиях высокой температуры внутри гермооболочки оказывается возможным применение полупроводниковых детекторов на основе GaAs. Такие детекторы разработаны и изготовлены в ННЦ ХФТИ и в настоящее время проходят испытания.

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ CdTe И CdZnTe

Детекторы ионизирующего излучения по своему назначению эксплуатируются в условиях, когда в них создаются радиационные повреждения. В полупроводниковых гамма-спектрометрах радиационные повреждения функционально вызывают ухудшение разрешения по энергии, увеличение тока

утечки и сдвиг положения пика в сторону меньших значений энергии. В полупроводниковых детекторах-радиометрах происходит ухудшение счетных характеристик. Кроме того, в зависимости от химического состава полупроводника может происходить активация вещества в результате ядерных реакций под воздействием нейтронов и гамма-квантов.

Для практического применения в системах мониторинга и контроля радиационной обстановки АЭС и «Объекта “Укрытие”» крайне важно знать радиационный ресурс полупроводниковых детекторов гамма-излучения. В частности, это относится к дозиметрическим детекторам на основе широкозонных полупроводников CdTe и CdZnTe. Поэтому мы определили и приводим ниже величины поглощенной дозы гамма-излучения, при которой метрологические характеристики детекторов неприемлемо изменяются [3].

Для испытаний были отобраны образцы, не обладающие спектрометрическими свойствами (выделенный фотопик отсутствовал) и предназначавшиеся для использования как в счетном, так и токовом дозиметрических режимах. Радиационная обработка образцов проводилась в поле тормозного излучения ускорителя КУТ [4].

Анализ дозовых зависимостей счетных характеристик кристаллов (рис. 11, 12) показывает, что CdZnTe сохраняет чувствительность до значения поглощенной дозы $\approx 800 \text{ кГр}$ ($8 \times 10^7 \text{ рад}$), в то время как радиационная деградация образцов из CdTe происходит при существенно меньших дозах $\approx 200 \text{ кГр}$ ($2 \times 10^7 \text{ рад}$).

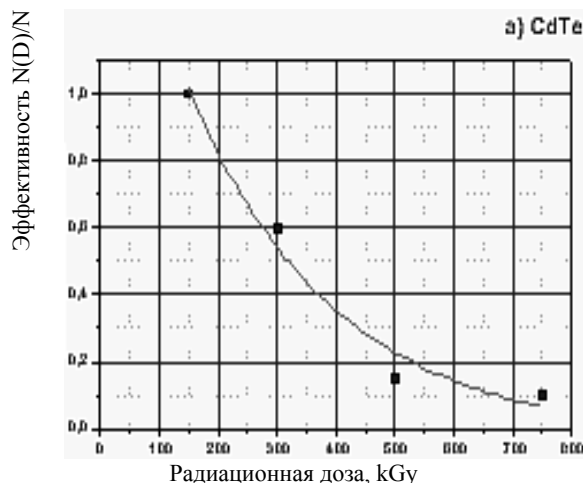


Рис. 11. Дозовая зависимость счетной характеристики детектора с CdTe

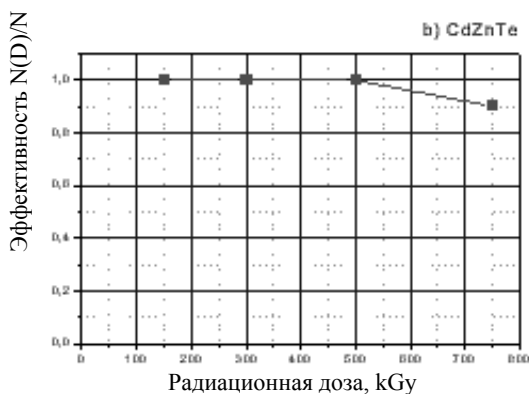


Рис. 12. Дозовая зависимость счетной характеристики детектора с CdZnTe

ВЫВОДЫ

Полученные в результате проведенных радиационных испытаний данные, в частности, показывают, что полупроводниковые детекторы на основе CdZnTe могут успешно применяться для дозиметрии в условиях значений мощности экспозиционной дозы до 2000 Р/ч с ожидаемым ресурсом эксплуатации не менее 10 лет. Следует особо подчеркнуть, что реальный ресурс эксплуатации детекторов может оказаться выше прогнозируемого, так как в условиях имитации радиационных повреждений, имевших место при испытаниях, не успевали проявляться механизмы отжига дефектов, которые воз-

можны в условиях умеренных, но более длительных радиационных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Е. Кутний, А.В. Рыбка, И.Н. Шляхов, Ю.А. Грибанов, В.С. Рингис, В.Г. Скоромный. Перспективы использования полупроводниковых материалов из CdTe (CdZnTe) при реконструкции АЭС Украины // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2000, в. 4, с. 203 – 207.
2. Ю.А. Егоров. Основы радиационной безопасности атомных электростанций // Под ред. Н.А. Доллежала. М.: «Энергоатомиздат», 1982, 272 с.
3. В.Е. Кутний, А.В. Рыбка, И.М. Прохорец, Л.Н. Давыдов, А.С. Абызов, А.Н. Довбня, С.П. Карасев, В.Л. Уваров, И.Н. Шляхов. Исследование радиационной стойкости детекторов ионизирующих излучений на основе CdTe и CdZnTe // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2000, в. 4, с. 212 – 214.
4. N.I. Ayzatsky et al. KUT – Industrial Technological Accelerator // *Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, октябрь 1994*. Т.4, с. 259 – 263.

РОЗРОБКА ДОЗИМЕТРИЧНИХ ТА СПЕКТРОМЕТРИЧНИХ БЛОКІВ ДЕТЕКТУВАННЯ ГАММА-ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ОСНОВІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СПОЛУК CdTe (CdZnTe) ДЛЯ АЕС УКРАЇНИ

V.E. Kutnij, A.V. Rybka, D.V. Kutnij, I.N. Shlyahov, D.V. Nakonechnij

В існуючих системах ядерної та радіаційної безпеки АЕС України використовуються блоки детектування іонізуючих випромінювань на основі іонізаційних лічильників, камер ділення, сцинтиляційних сенсорів. Порівняно з ними напівпровідникові детектори мають менші габарити та вагу, більш широкий динамічний діапазон, більш високий квантовий вихід, радіаційну стійкість, кращі енергетичне розрізнення та співвідношення сигнал/шум. В роботі надані дослідження, які підтверджують вказані ознаки.

DEVELOPMENT OF DOSIMETRIC AND SPECTROMETRIC DEVICES TO DETECT γ -IRRADIATION BASED ON SEMICONDUCTOR ALLOYS CdTe(CdZnTe) FOR AEPP OF UKRAINE

V.E. Kutnij, A.V. Rybka, D.V. Kutnij, I.N. Shlyahov, D.V. Nakonechnij

In existing systems of nuclear and radiating safety of Ukrainian AEPP the blocks of ionizing radiation detecting on a basis of ionization counters, fission chambers, scintillation sensors are used. In comparison with them the semi-conductor detectors have smaller dimensions and weight, wider dynamic range, higher quantum output, radiating stability, best energy resolution and relation signal/noise. The investigations that confirm the specified properties are given in this work.