

К. ф.-м. н. А. В. РЫБКА, А. А. ЗАХАРЧЕНКО, к. ф.-м. н. Л. Н. ДАВЫДОВ,
И. Н. ШЛЯХОВ, А. А. БЛИНКИН, К. В. КУТНИЙ

Украина, ННЦ "Харьковский физико-технический институт"
E-mail: rybka@kipt.kharkov.ua

Дата поступления в редакцию
13.12.2005 г.

Оппонент д. т. н. В. К. КОМАРЬ
(Ин-т монокристаллов, г. Харьков)

СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ CdZnTe ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе CdZnTe можно с успехом создавать дозиметрические и спектрометрические измерительные приборы, работающие при комнатной (и близких к ней) температуре.

Дозиметрические и спектрометрические приборы с сенсорами из полупроводниковых кристаллов CdZnTe (CdTe) в последнее время находят все более широкое применение при регистрации ионизирующего излучения, как рентгеновского, так и гамма-излучения [1]. Благодаря широкой запрещенной зоне (1,6 эВ для CdZnTe) и совершенствованию технологии производства создаются кристаллы с необходимыми, а в некоторых случаях уникальными, физическими свойствами, что позволяет получать на их основе блоки детектирования с хорошими спектрометрическими и эксплуатационными характеристиками. Они отличаются высокой эффективностью регистрации излучения, хорошим соотношением сигнал/шум и энергетическим разрешением при комнатной температуре. Линейность в счетном и токовом режимах работы в широком диапазоне измеряемой мощности дозы и высокая радиационная стойкость CdZnTe [2] позволяют использовать его при производстве дозиметрических блоков с высоким радиационным ресурсом, в частности, для работы в радиационных полях большой интенсивности. Это определяет все более перспективное использование сенсоров на основе CdZnTe (CdTe) как в системах дозиметрического контроля (например, на АЭС, на предприятиях по производству и переработке ядерного топлива, при экологическом контроле), так и в спектрометрических системах (например, для анализа радиоактивных отходов, в ядерно-физических методах элементного анализа и др.).

В настоящей работе приведены результаты испытаний двух блоков детектирования — рентгеновского дозиметра, который в токовом режиме способен работать в широком диапазоне мощности экспозиционных доз, и рентгеновского спектрометра. Используемые в них сенсоры из CdZnTe, в отличие от традиционно используемых полупроводниковых сенсоров, не требуют криогенного охлаждения.

Контроль мощности дозы рентгеновского излучения

Для измерения большой мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения был разработан

и создан блок детектирования (БД), который работает в токовом (аналоговом) режиме. Такой БД включает в себя сенсор из CdZnTe и преобразователь "ток—напряжение" (рис. 1). Измерительный тракт, кроме БД, содержит еще блок нормирующих усилителей, универсальный вольтметр и блок питания (на рисунке не показаны). БД может при необходимости помещаться на удалении от блока нормирующих усилителей, будучи соединенным с ним кабельным каналом связи.



Рис. 1. Блок детектирования для контроля мощности дозы рентгеновского излучения

В аналоговом режиме работы ток, возникающий в результате воздействия кванта излучения на сенсор, поступает на преобразователь "ток—напряжение" с коэффициентом преобразования ≈ 1 мкА/В. На выходе прибора возникает напряжение, пропорциональное мощности экспозиционной дозы (МЭД). Как показали испытания, сигналы сенсора можно передавать по кабельным каналам связи на расстояния до 50 м.

С целью выяснения работоспособности сенсора из CdZnTe в рентгеновских полях высокой интенсивности с помощью описываемого блока детектирования были проведены измерения МЭД на технологической рентгеновской установке (трубка с молибденовым анодом). Для этого в корпусе БД было сделано специальное окно из бериллиевой фольги. Это позволило регистрировать рентгеновское излучение в диапазоне энергий, начиная с ≈ 5 кэВ.

На подготовительном этапе работы была проведена калибровка технологической рентгеновской установки ДРОН-4 для измерения МЭД в зависимости от режима работы рентгеновской трубки. В дальнейшем установка служила источником рентгеновского излучения при испытании БД. Калибровка проводилась поверенным медицинским дозиметром фирмы VEB RFT 27 012 в точке, удаленной на 150 мм от источ-

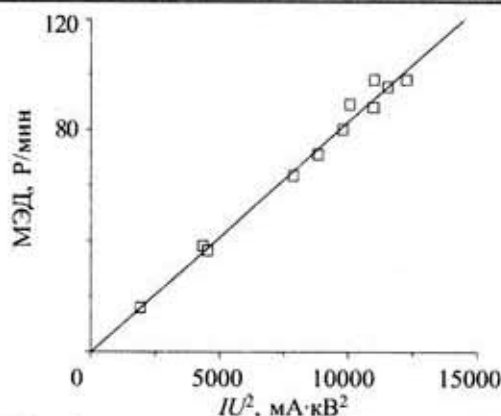


Рис. 2. Калибровочная зависимость рентгеновской установки, полученная с помощью дозиметра RFT 27 012 (рис. 2). Полная мощность излучения (W_p) непрерывного рентгеновского спектра определялась как [3, с. 11]

$$W_p = kZIU^2,$$

где k — калибровочная постоянная;

Z — атомный номер материала анода;

I — ток, протекающий через рентгеновскую трубку;

U — напряжение на трубке.

Отсюда следует пропорциональность МЭД произведению $I \cdot U^2$.

Калибровочная зависимость на рис. 2 позволяет определить коэффициент пропорциональности, равный $kZ=0,0083$ (Р/мин)/(мА·кВ²) для пересчета произведения IU^2 на рентгеновской трубке в мощность экспозиционной дозы ($Z_{Mo}=42$).

Зависимость от МЭД величины тока, создаваемого БД для контроля мощности дозы с сенсором из CdZnTe, представлена на рис. 3 для разных значений напряжения смещения. Видно, что эта зависимость имеет линейный характер.

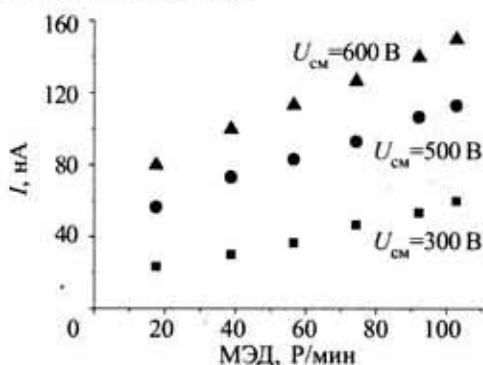


Рис. 3. Дозовая зависимость тока в блоке детектирования для контроля мощности дозы с сенсором из CdZnTe при разных напряжениях смещения

Для сравнения на рис. 4 показана аналогичная зависимость описываемого БД, в котором вместо сенсора из CdZnTe был установлен сенсор из CdTe. Эту зависимость также с достаточной точностью можно считать линейной. Основное отличие в том, что сенсор из CdZnTe вырабатывает при той же МЭД меньший ток, что коррелирует с его более высоким удельным сопротивлением. Это позволяет БД с CdZnTe

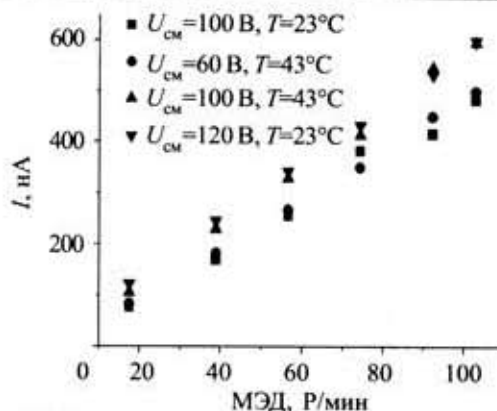


Рис. 4. Дозовая зависимость тока в БД с сенсором из CdTe при разных температурах и напряжениях смещения сохранять работоспособность при большей интенсивности излучения, чем БД с CdTe.

Непосредственное сравнение токов в БД с CdTe и CdZnTe в зависимости от МЭД при $U_{см}=120$ В приведено на рис. 5.

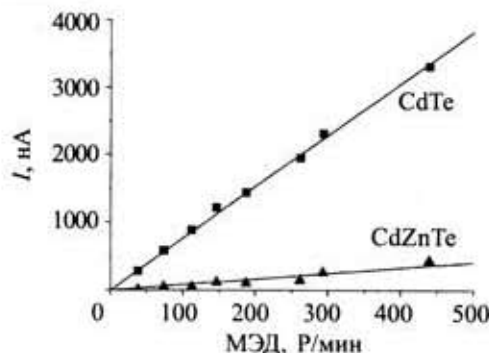


Рис. 5. Сравнение дозовых зависимостей токов БД с сенсорами из CdTe и CdZnTe при $U_{см}=120$ В

Таким образом, разработанный БД для контроля больших мощностей доз рентгеновского излучения в токовом режиме измерения может регистрировать рентгеновское излучение с энергией от 5 кэВ в широком интервале значений мощности экспозиционных доз, вплоть до аварийных уровней излучения (практически до 450 Р/мин и более).

Спектрометрия рентгеновского излучения

Основной задачей, которая ставилась при разработке спектрометрического блока детектирования, являлось улучшение его энергетического разрешения в рентгеновском диапазоне энергий. Энергетическое разрешение спектрометра ионизирующего излучения с полупроводниковым сенсором определяется рядом параметров. Это, прежде всего, эффективность собирания носителей заряда, возникающих при взаимодействии излучения с сенсором. Эта эффективность зависит как от качества материала сенсора (время жизни и подвижность носителей заряда, степень дефектности кристалла), так и от приложенного к сенсору напряжения. Важным фактором, вносящим существенный вклад в величину энергетического разрешения, является также электрический шум системы "сенсор—предусилитель". Эти особенности были учтены при разработке спектрометри-

ческого блока детектирования рентгеновского излучения.

Конструктивно спектрометрический БД состоит из CdZnTe-сенсора, предварительного усилителя и термостабилизатора. Для ввода излучения корпус БД снабжен тонким (20 мкм) Ве-окном. Измерительный тракт состоит также из блока усилителя-формирователя и компьютера (рис. 6).



Рис. 6. Спектрометр рентгеновского излучения

Измерительный тракт спектрометра был выполнен с использованием элементной базы фирмы Analog Devices. Сигнал с CdZnTe-сенсора поступал на предварительный усилитель. С предусилителя импульсы поступают в блок усилителя-формирователя, содержащий сам усилитель-формирователь, АЦП и блок питания всего прибора. После цифровой обработки при помощи 12-разрядного АЦП сигнал поступал в компьютер.

Для исключения шумового вклада входной разделительной емкости в данной конструкции БД сенсор подключен непосредственно к затвору транзистора первого каскада предусилителя. Конструкция прибора позволяла установку полупроводниковых CdZnTe-сенсоров разных размеров, а также сенсоров из CdTe. Кроме того, БД был оснащен устройством термостабилизации (на эффекте Пельтье), позволяющим поддерживать температуру сенсора в диапазоне $-30...+30^{\circ}\text{C}$.

Небольшие габариты ($30 \times 40 \times 35$ мм) и возможность размещения БД на удалении от усилителя-формирователя (до 10 м) позволяют применять спектрометр вместе с дистанционно управляемыми манипуляторами, например, для анализа радиоактивных отходов в труднодоступных местах либо в условиях высоких уровней рентгеновского излучения.

Спектры, иллюстрирующие работу спектрометра в рентгеновском диапазоне энергий, приведены на рис. 7—9. Отметим сразу, что приведенные спектры получены без электронной коррекции сигнала и без математической обработки результатов измерений, что позволяет дополнительно улучшить энергетическое разрешение прибора.

На рис. 7 представлен типичный спектр источника ^{241}Am из набора образцовых спектрометрических источников гамма-излучения (ОСИ), измеренный в диапазоне энергий 10...60 кэВ при $+27^{\circ}\text{C}$ с помощью спектрометрического БД с сенсором из CdZnTe размерами $5 \times 5 \times 2$ мм. Время набора 30 с, расстояние до источника 1 см. Энергетическое разрешение составляет $\approx 14\%$ на линии 60 кэВ.

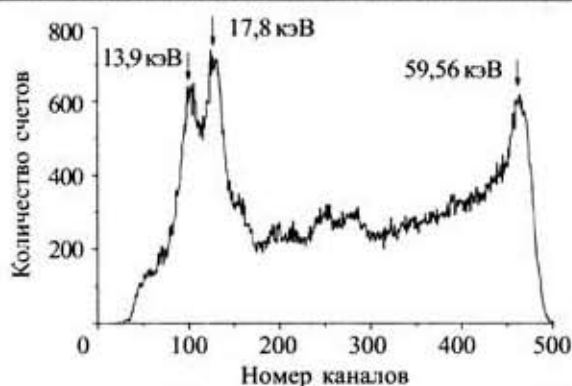


Рис. 7. Спектр ^{241}Am , полученный сенсором из CdZnTe

Мы видим, что полупроводниковые кристаллы CdZnTe, которые хорошо зарекомендовали себя в качестве материала для спектрометрических сенсоров гамма-излучения в диапазоне нескольких сотен кэВ, являются чувствительными сенсорами в рентгеновском диапазоне энергий, обеспечивая удовлетворительное энергетическое разрешение даже при работе сенсора без охлаждения. Дополнительное охлаждение сенсора с помощью термостабилизатора на эффекте Пельтье позволяет повысить спектрометрическое разрешение прибора.

Низкоэнергетический спектр радионуклидов ^{55}Fe и ^{241}Am , полученный спектрометрическим БД с CdZnTe-сенсором размерами $5 \times 5 \times 0,5$ мм, охлажденным до -30°C , показан на рис. 8.

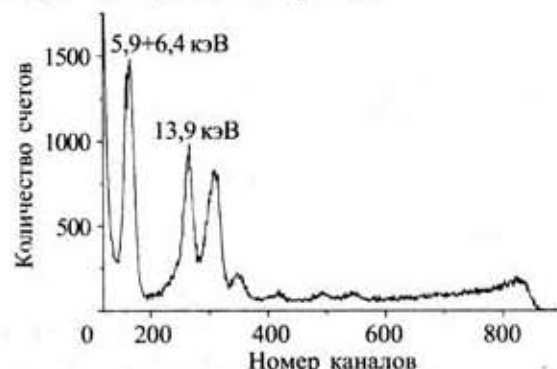


Рис. 8. Низкоэнергетический спектр радионуклидов ^{55}Fe и ^{241}Am , полученный БД с CdZnTe-сенсором толщиной 0,5 мм, охлажденным до -30°C

Понижение температуры до -30°C приводит к разделению линий 13,9 кэВ (разрешение 7,6%) и 17,8 кэВ (разрешение 9,1%), а также появлению линии 5,9+6,4 кэВ (^{55}Fe , разрешение $\approx 12\%$). В процессе измерений входной полевой транзистор предусилителя не охлаждался; не изменялись при охлаждении параметры цепей обработки сигнала и напряжение смещения сенсора (40 В).

С помощью спектрометрического БД с CdZnTe-сенсором имеется возможность регистрировать низкоэнергетические γ -кванты в рентгеновском диапазоне на фоне интенсивных (0,5 Р/ч) потоков высокоэнергетических γ -квантов. На рис. 9 показан спектр $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (дочернего ядра изотопа ^{99}Mo), полученный CdZnTe-сенсором ($5 \times 5 \times 1$ мм) при комнатной температуре. Высокоэнергетическая часть фона активированной

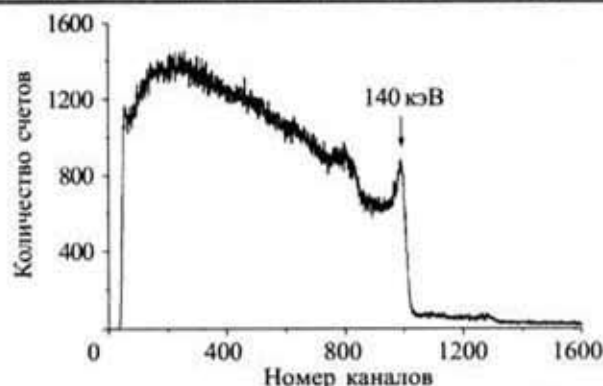


Рис. 9. Спектр активированной мишени ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), полученный CdZnTe-детектором ($5 \times 5 \times 1$ мм) при комнатной температуре. Использовался фильтр из Cu толщиной 0,5 мм

мишени ^{99}Mo , образованная γ -квантами с энергиями до 800 кэВ и β -частицами, практически не регистрируется за счет небольшой толщины кристалла сенсора (1 мм). Понятно, что чем выше энергия фона, тем меньше оказывается ее вклад.

Выводы

Результаты работы подтверждают, что CdZnTe является хорошим материалом для сенсоров рентге-

новского излучения. На его основе можно с успехом создавать дозиметрические и спектрометрические измерительные приборы, работающие при комнатной (и близких к ней) температуре.

Дозиметр для контроля больших мощностей доз рентгеновского излучения в токовом режиме измерения может регистрировать рентгеновское излучение с энергией от 5 кэВ в широком интервале мощности экспозиционных доз, вплоть до аварийных уровней излучения (практически до 450 Р/мин и более).

Спектрометр рентгеновского излучения на основе сенсора из CdZnTe может применяться для спектроскопии рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 5 кэВ, в частности для анализа состава радионуклидов в этом диапазоне.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Rybka A. V., Davydov L. N., Shlyakhov I. N. et al. Gamma-radiation dosimetry with semiconductor CdTe and CdZnTe detectors // Nucl. Instr. and Meth.— 2004.— Vol. 531, N 1–2.— P. 147–156.
2. Давыдов Л. Н., Захарченко А. А., Кутний Д. В. и др. Радиационная стойкость полупроводниковых детекторов корпускулярного и гамма-излучения (обзор) // Вісник ХНУ. Сер. „Ядра, частинки, поля”.— 2005.— № 627.— С. 3–22.
3. Русаков А. А. Рентгенография металлов.— М.: Атомиздат, 1977.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



СЕНСОРА ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ SENSORS ELECTRONICS AND MICROSYSTEM TECHNOLOGY



Научный совет по проблеме «Физика полупроводников» Национальной Академии наук Украины, Министерство образования и науки Украины, Министерство промышленной политики Украины, Украинское физическое общество, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

проводят

2-ю Международную научно-техническую конференцию «Сенсорная электроника и микросистемные технологии» («СЭМСТ-2»)

с выставкой разработок и промышленных образцов сенсоров
Украина, Одесса, 26—30 июня 2006 г.

Научные направления конференции

1. Физические, химические и другие явления, на основе которых могут быть созданы сенсоры.
2. Проектирование и математическое моделирование сенсоров.
3. Сенсоры физических величин.
4. Радиационные, оптические и оптоэлектронные сенсоры.
5. Акустоэлектронные сенсоры.
6. Химические сенсоры.
7. Биосенсоры.
8. Материалы для сенсоров.
9. Технологические проблемы сенсорики.
10. Сенсоры и информационные системы.
11. Деградация, метрология и аттестация сенсоров.
12. Микросистемные технологии (MST).

Оргкомитет «СЭМСТ-2»: НИЛ-3

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова; ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65026, Украина,
тел./факс +38(0482)-23-34-61, +38(048) 726 63 56, Лепих Ярослав Ильич
E-mail: semst-2@ukr.net, semst-2@onu.edu.ua, ndl_lepikh@mail.ru
<http://www.onu.edu.ua/ru/conference/semst2.html>