

РАЗРАБОТКА ДЕТЕКТОРА ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ

В статье рассмотрены современные блоки детектирования, предназначенные для контроля состояния защитных барьеров в составе систем радиационного контроля АЭС путем измерения мощности дозы гамма-излучения в воздухе. Представлен сравнительный анализ режимов токового и импульсного пропорционального режимов работы CdZnTe-датчиков. Решена важная теоретическая и техническая задача коррекции энергетической зависимости чувствительности детектора. Созданы аналитические модели и образец CdZnTe-детектора.

Ключевые слова: радиационно-технологический контроль, дозиметрия, блок детектирования, ионизирующие излучения.

Вступление. Уровень развития и применение радиационных технологий в значительной мере определяется состоянием ядерного приборостроения. За сравнительно небольшой период времени эта отрасль прошла несколько этапов развития и каждый из них был отмечен появлением разнообразных приборов, регистрирующих и измеряющих параметры ионизирующих излучений ядерных материалов: газоразрядных счетчиков, скинтилляторов, полупроводниковых детекторов и других. Их появление и дальнейшее широкое применение было обеспечено в прошлом работами от Крукса, Резерфорда, Гейгера и Мюллера до более близких к нам по времени работ Дмитриева А.Б., Перельмана С. Н., Чайковского В. Г., а также Баранова В. И., Гольбека Г. Р., Немировского Б. В., Якубовича А. Л. и многих других. Основой прогресса ядерного приборостроения послужило одновременное развитие двух направлений – ядерно-физических исследований и электроники. Однако оба направления в то время развивались самостоятельно, без должной взаимной связи.

Разработка современных блоков детектирования, предназначенных для контроля состояния защитных барьеров путем измерения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, в составе систем радиационного контроля АЭС является важной и актуальной задачей. Находящиеся в настоящее время в эксплуатации блоки детектирования системы АКРБ-03 (АКРБ – аппаратура контроля радиационной безопасности) [1, 2], разработанные более 20-ти лет назад, не только выработали свой ресурс, но и морально устарели [3]. Очевидно, что новые блоки детектирования должны обладать более высокими метрологическими и эксплуатационными показателями. Существенное улучшение таких характеристик де-

текторов, как показано выше, может быть получено только на основе применения новых материалов, в частности, широкозонных полупроводников CdZnTe для изготовления датчиков гамма-излучения [4]. Статья посвящена описанию разработки детектора ионизирующего излучения для дозиметрии на основе полупроводников CdZnTe.

Основная часть. Как правило, твердотельные детекторы ионизирующего излучения могут быть представлены в виде генератора тока. Но в этом случае следует различать токовый и импульсный режимы работы детектора. В токовом режиме устанавливается зависимость между силой постоянного тока, протекающего через чувствительный объем датчика под действием излучения, и мощностью поглощенной дозы.

В импульсном режиме следует различать два варианта. В первом устанавливается связь между зарядом, переносимым единичными импульсами тока в единицу времени, и мощностью поглощенной дозы. Во втором режиме устанавливается связь между частотой следования импульсов тока в единицу времени и мощностью поглощенной дозы. Этот вариант также характерен для работы газоразрядных детекторов, которые являются генераторами напряжения, а не тока [5].

В таблице 1 представлен сравнительный анализ режимов токового и импульсного пропорционального режимов работы CdZnTe-датчиков различных размеров [6].

Проведем перерасчет заданного из условий эксплуатации сигнала на входе предварительного усилителя, соответствующего шуму, в эквивалентную мощность дозы. Сравним полученный результат с чувствительностью детектора для типичных размеров датчика. При этом восполь-

зуються соотношениями дозиметрических величин, приведенными далее [7].

Поглощенная доза – отношение средней энергии (dW), переданной излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме (dm):

$$D = \frac{dW}{dm}, \text{ Гр.} \quad (1)$$

Мощность поглощенной дозы – отношение приращения дозы за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$P = \dot{D} = \frac{dD}{dt}, \text{ Гр/с.} \quad (2)$$

Плотность потока энергии ионизирующего излучения или интенсивность излучения – отношение суммарной энергии (dE), перенесенной за единицу времени (dt) излучением, попавшим в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения этой сферы (dS):

$$I = \frac{dNdE}{dSdt} = \varphi dE, \text{ МэВ/(м}^2\text{с)}, \quad (3)$$

где $\varphi = \frac{dN}{dSdt}$ – плотность потока ионизирующих частиц; dN – число частиц излучения.

Связь плотности потока энергии (E_γ) мезоэнергетических фотонов с плотностью потока имеет вид:

$$I = \varphi E_\gamma = \frac{A}{4\pi r^2} E_\gamma, \text{ МэВ/(м}^2\text{с)}. \quad (4)$$

Связь мощности дозы и плотности потока энергии имеет вид:

$$D = I \mu_{em}, \text{ см}^2/\text{г}, \quad (5)$$

где μ_{em} – массовый коэффициент поглощения энергии фотонов в веществе.

Таким образом, из расчетов и таблицы 1 видно, что включение датчика в режиме работы импульсной пропорциональной ионизационной камеры позволяет увеличить чувствительность в $\sim(2,55 \dots 2,8) \cdot 10^5$ раз при прочих равных условиях и характеристиках кристаллов. В таблице 2 показаны параметры сигнала на входе предварительного усилителя в импульсном режиме.

Как показано, включение CdZnTe-детектора в режиме работы импульсной пропорциональной ионизационной камеры позволяет существенно повысить его чувствительность, расширить динамический диапазон значений регистрируемой мощности дозы от фоновых значений до обусловленных аварийными режимами работы реакторной установки. Применение импульсного режима позволяет практически реализовать и другие возможности и, прежде всего, – компенсацию энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ), т.н. «хода с жесткостью».

Таблица 1 – Анализ режимов работы CdZnTe-датчиков

Вариант детектора	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5
1	2	3	4	5	6
Размеры кристалла (датчика), мм					
X	5	5	10	10	4
Y	5	5	10	10	4
H (толщина, высота)	2	3	3	2	2
Объем датчика, мм ³	50	75	300	200	32
Плотность CdZnTe, г/см ³	~6				
Энергия образования пары носителей заряда в CdZnTe (ϵ), эВ	4.7				
Масса чувствительной области, г	0.3	0.45	1.8	1.2	0.192
Мощность поглощенной дозы (\dot{D}), Гр/час	1				
Мощность (\dot{P}) (энергия в чувствительном объеме датчика в единицу времени), поглощенная в датчике при мощности поглощенной дозы 1 Гр (Вт/Гр)	8.333E-08	1.25E-07	5.0E-07	3.33E-07	5.333E-08

Вариант детектора	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5
1	2	3	4	5	6
Поглощенная энергия в ед. времени (мощность P_0), МэВ/с	1000				
Поглощенная энергия в ед. времени (мощность), эВ/с	1.00E+09				
Коэффициент преобразования поглощенной энергии в ток (Ампер), соответствующий мощности поглощенной энергии 1000 МэВ/с, $k_1=(P_0 \cdot q_e)/\varepsilon$, где q_e — заряд электрона	3.40E-11				
Чувствительность (отклик) CdZnTe-датчика единичного объема при работе в токовом режиме, А/Вт	2.13E-01			Характеристика материала из которого изготовлен детектор	
Сигнал (ток, соответствующий мощности дозы 1 Гр/час), А/(Гр/час)	1.77E-08	2.66E-08	1.06E-07	7.09E-08	1.13E-08
Ток утечки, А. Наиболее типичное значение для кристаллов среднего качества	1.00E-09				
Минимальная мощность дозы, которая может быть измерена в токовом режиме, рад/час (исходя из чувствительности и тока утечки)	5.64E+00	3.76E+00	9.40E-01	1.41E+00	8.81E+00
Коэффициент поглощения гамма-излучения с энергией 0,600 МэВ в CdZnTe	8.04E-02				
Вероятность поглощения гамма-кванта с энергией 0,6 МэВ в датчике при нормальном направлении движения фотонов относительно поверхности датчика (пробег минимальный, поэтому это граничное условие)	0.09197194	0.1347355	0.13473547	0.091972	0.0919719
Коэффициент перевода преобразования поглощенной дозы в 1 Гр в МэВ/г	6.266E+09				
Плотность (концентрация) фотонов при дозе 1 Гр для энергии 0,600 МэВ (фотонов/см ³)	1.740E+09				
Количество зарегистрированных детектором в пике полного поглощения фотонов при дозе 1 Гр для энергии 0,600 МэВ	8.004E+06	1.76E+07	7.035E+07	3.20E+07	5.12E+06
Минимальная мощность дозы, которая может быть измерена в импульсном режиме, Гр/час (исходя из чувствительности и шумов)	2.213E-07	1.343E-07	3.358E-08	5.53E-08	3.458E-07
Минимальная мощность дозы, которая может быть измерена в импульсном режиме, рад/час (исходя из чувствительности и шумов)	2.213E-05	1.343E-05	3.358E-06	5.533E-06	3.458E-05
Минимальная мощность дозы, которая может быть измерена в импульсном режиме, мкрад/час (исходя из чувствительности и шумов)	2.213E+01	1.34E+01	3.358E+00	5.53E+00	3.46E+01
Фон, мкрад/час	10÷30				

Таблица 2 – Параметры сигнала на входе предварительного усилителя в импульсном режиме

Вариант детектора	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5
1	2	3	4	5	6
Емкость предусилителя и включения (C_{amp}) 25 пФ. Консервативное значение, реально меньше (12 пФ)	25				
Емкость детектора $C_d=21 \cdot 10^3 \cdot (X \cdot Y) \cdot (R_s \cdot U_b)^{-0.5}$, пФ	1.6602	1.66	6.6408	6.6408	1.063
Запирающее напряжение (U_b), В. Консервативное значение для кристаллов среднего качества.	100				
Удельное сопротивление (R_s). Консервативное значение для кристаллов среднего качества.	1.00E+09				
Коэффициент преобразования выходного сигнала, В/МэВ $U=Q/(C_d+C_{amp})$	1.28E-03	1.28E-03	1.08E-03	1.08E-03	1.31E-03
$Q=(E_\gamma \cdot q_e)/\varepsilon$ – суммарный заряд образовавшихся носителей заряда при поглощении фотона с энергией $E_\gamma=1$ МэВ.			3.40E-14		

В настоящее время серийно выпускаются дозиметрические приборы с полупроводниковыми блоками детектирования на основе Si [6]. Преимущества CdZnTe перед Si – большее значение чувствительности и меньшее значение энергетического эквивалента шума [7, 8]. Однако, большой эффективный атомный номер обуславливает и большее (более 10) значение энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ).

В литературе приводится описание метода аппаратной коррекции ЭЗЧ при помощи устройства, собранного на дискретных элементах с низкой степенью интеграции [8]. Такое устройство ненадежно, дорого, имеет низкий динамический диапазон. В данной работе предложено и изготовлено на основе современной элементной базы устройство цифровой корректировки ЭЗЧ при работе кристалла в счетном режиме.

Коррекция осуществляется путем изменения частоты импульсов на выходе блока детектирования в зависимости от энергии зарегистрированного излучения E_γ :

$$n_{out} = n_{inp} \cdot K(x), \quad (6)$$

где n_{out} – частота импульсов на выходе блока детектирования; n_{inp} – частота импульсов на выходе предусилителя детектора; $K(x)$ – коэффициент изменения частоты импульсов на выходе блока детектирования; x – номер канала, со-

ответствующего энергии E_γ .

Численное значение коэффициента изменения частоты импульсов на выходе блока детектирования определяется на основании аналитической зависимости отношения чувствительности детектора к регистрируемому гамма-излучению $S(E_\gamma, x)$ и чувствительности к гамма-излучению с энергией, на которой проводилась его градуировка $S(E_{\gamma k}, x)$:

$$\varepsilon(E_\gamma) = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} S(E_\gamma, x) \cdot K(x) dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} S(E_{\gamma k}, x) \cdot (x) dx}, \quad (7)$$

где x_{min} – номер канала, соответствующего уровню шума; $\varepsilon(E_\gamma)$ – заданная относительная зависимость чувствительности детектора от энергии.

Таким образом, задача коррекции энергетической зависимости чувствительности заключается в получении значения $K(x)$ для определенного энергетического диапазона зарегистрированных фотонов $E_{\gamma j}$.

На рисунке 1 приведена структурная схема первого варианта дозиметрического блока детектирования с цифровой корректировкой “хода с жесткостью”. Разработанный детектор по габ-

ритам и выходным сигналам совместим с применяемым сегодня блоком детектирования типа БДМГ-41 [3].

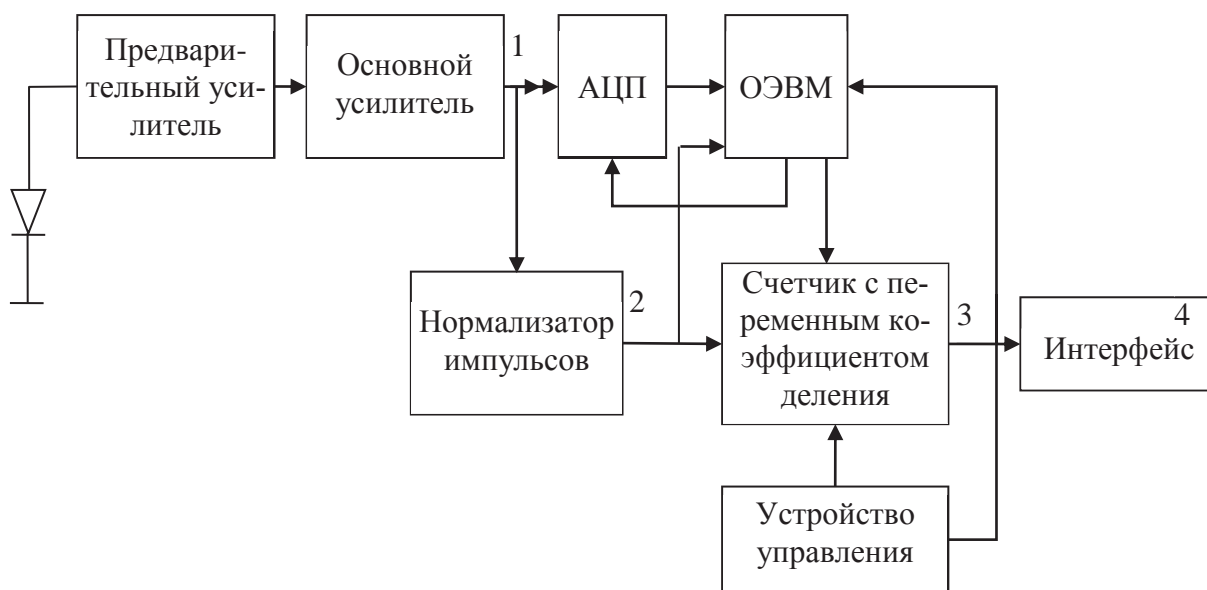


Рисунок 1 – Структурная схема блока детектирования на основе CdZnTe-датчика

Выводы. Таким образом, на основе разработанной модели создан детектор ионизирующего излучения для дозиметрии. Принципиальным отличием его от известных приборов служит применение в качестве первичного преобразователя гамма-излучения (датчика) кристаллов CdZnTe. Достоинства такого решения, доказанные предыдущими исследованиями, позволили создать детектор, имеющий:

- большую разрешающую способность, не более 40 кэВ;
- более широкий динамический диапазон значений регистрируемой мощности дозы излучения – от фоновых до аварийных режимов работы реактора;
- меньшее значение энергетического эквивалента шума.

При создании такого детектора решена важная задача коррекции энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ). Для этого разработана модель, связывающая частоту импульсов на выходе блока детектирования с энергией регистрируемого излучения. Предложенный в ней алгоритм позволяет коррекцию ЭЗЧ с погрешностью менее 7 % для энергии излучения от 20 кэВ до 1,5 МэВ.

На такой основе предложена структурная схема и разработан образец дозиметрического блока детектирования с цифровой коррекцией ЭЗЧ. По конструкции и выходным сигналам он совместим с БДМГ-04, 08, 41 и может применяться в любых системах АКРБ АЭС.

Список использованных источников

1. Банзак О. В. Полупроводниковые детекторы нового поколения для радиационного контроля и дозиметрии ионизирующих излучений / О. В. Банзак, О. В. Маслов, В. А. Мокрицкий: Под ред. В. А. Мокрицкого, О. В. Маслова. – Монография. – Одесса, 2013. – Изд-во «ВМВ». – 220 с.
2. Маслов О. В. Автоматизированная система контроля распределения продуктов деления в ТВС ВВЭР-1000 при проведении перегрузки ядерного топлива / О. В. Маслов, С. Г. Олейник // Вторая рос. междунар. конф. "Учет, контроль и физ. защита ядерн. материалов", Обнинск, 22-26 мая, 2000 г. – С. 3-7.
3. Олейник С. Г. Метрологическое обеспечение определения выгорания, времени выдержки и обогащения облученного ядерного топлива при проведении измерений в реальном времени / С. Г. Олейник, О. В. Маслов, С. В. Сергеев, М. В. Максимов // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2004. – № 3(11). – С. 72-79.
4. Маслов О. В. Блок детектирования γ -излучения на основе CdZnTe для систем радиационного контроля / О. В. Маслов, В. А. Мокрицкий, Ю. Е. Николаенко, М. В. Максимов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – №3 (57). – С. 15-18.

5. Susumu Naito. Development of a New CdTe Area Radiation Monitor using the G(E) Function Method / Susumu Naito, Mikio Izumi, Toru Onodera, eds. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2006. – Vol. 43. – No 10. – P. 1173–1181.

6. Owens Alan. Compound semiconductor radiation detectors / Alan Owens, A. Peacock // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 531, 2004. – P. 18-37.

7. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. – Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.

8. Горев В. С. Применение детекторов на основе теллурида кадмия в дозиметрии гамма-излучения / В. С. Горев, В. А. Кожемякин, О. А. Матвеев и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1981. – № 1. – С. 60-64.

Поступила в редакцию 19.05.2015

Рецензент: д.т.н., проф. Мокрицкий В. А., Одесский национальный политехнический университет, г. Одеса.

О. В. Банзак, к.т.н.

РОЗРОБКА ДЕТЕКТОРА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ДОЗИМЕТРІЇ

У статті розглянуті сучасні блоки детектування, призначені для контролю стану захисних бар'єрів у складі систем радіаційного контролю АЕС шляхом виміру потужності дози гамма-випромінювання в повітрі. Представлений порівняльний аналіз режимів струмового і імпульсного пропорційного режимів роботи CdZnTe-датчиків. Вирішено важливе теоретичне і технічне завдання корекції енергетичної залежності чутливості детектjра. Створені аналітичні моделі і зразок CdZnTe- детектора.

Ключові слова: радіаційно-технологічний контроль, дозиметрія, блок детектування, іонізуючі випромінювання.

O.V. Banzak, PhD

DEVELOPMENT DETECTORS OF IONIZING RADIATION OF NEW GENERATION FOR DOSIMETRY

In clause the modern blocks of detecting intended for the control of condition protective barriers in structure systems of the radiating control atomies power station by measurement of capacity of a doze scale-radiation in air are considered. The comparative analysis of modes токового and pulse proportional operating modes of CdZnTe-gauges is presented. The important theoretical and technical problem corrections of power dependence of sensitivity detectors are solved. Analytical models and the sample of the CdZnTe-detector are created.

Keywords: radiation-technological control, dosimetry, block of detecting, ionizing radiation.