

Физическая аппаратура

УДК 621.378.3

Разработка радиометра гамма-излучения на основе синтетического алмазного материала

В. Н. Амосов, С. А. Мещанинов, Н. Б. Родионов, Р. Н. Родионов

Представлен радиометр гамма-излучения на основе синтетического алмазного материала. В результате создан радиометр с высокой помехозащищенностью, реализованный в схеме с вынесенным предусилителем на длинной (до 200 м) коаксиальной линии. Конструкция радиометра включает спектрометрический алмазный детектор, предусилитель, усилитель-формирователь, спектрометрический АЦП и анализатор импульсов. Разработана математическая модель регистрации гамма-излучения алмазным детектором с учетом его размеров. Созданы коды для расчета отклика гамма-излучения алмазного детектора и восстановления исходного спектра гамма-излучения.

PACS: 29.40.VK, 81.05.ug, 07.79.KA

Ключевые слова: радиометр, калибровка, гамма-излучение, синтетический алмаз.

Введение

Гамма-излучение в настоящее время широко используется в науке и технике, в частности, в радиационной химии, медицине, пищевой промышленности и др. Изучение спектров ядерного гамма-излучения является важнейшим инструментом ядерной физики. Актуальной задачей является разработка эффективных аппаратных средств в интересах систем защиты от ионизирующих излучений на предприятиях топливного ядерного цикла и контроля продуктов деления в технологических средах, для радиационных технологий и радиотерапии.

При диагностике гамма-излучений в экстремальных условиях эксплуатации необходимо иметь эффективные детекторы, стойкие к воздействию внешних факторов. Использование алмазных детекторов, имеющих компактные размеры, высокую радиационную стойкость, механическую прочность, термостойкость и химическую инертность, позволяет создавать эффективные радиометры гамма-излучений, удовлетворяющие требованиям надежности и устойчивости по воздействию внешних факторов.

Цель работы — создание радиометра гамма-излучения на основе спектрометрического алмазного детектора, обеспечивающего измерение потоков гамма-квантов с разрешением по энергии. Благодаря малым размерам чувствительного элемента алмазный детектор может использоваться для измерения мощных полей гамма-излучения в труднодоступных местах.

Алмазный детектор гамма-излучения

Основные процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом — фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект), комптоновское рассеяние (комpton-эффект) и образование пар электрон—позитрон. При фотоэффекте гамма-квант поглощается, но при этом выбивает из атома один из его электронов. При комптон-эффекте гамма-квант рассеивается на одном из электронов, который или слабо связан с атомом, или свободен. Если энергия гамма-кванта превышает 1,02 МэВ, то возможно его превращение в электрическом поле ядер в пару электрон—позитрон (процесс, обратный аннигиляции). Возникающие во всех этих процессах быстрые заряженные частицы производят ионизацию атомов среды. В алмазном детекторе спектр отклика формируется в основном комптоновскими электронами.

Алмазный детектор представляет собой алмазную пластину из синтетического алмаза, смонтированную в корпусе, снабженным разъемом типа BNC. Конструкция детектора обеспечивает коаксиальное включение алмазной пластины, что дает высокую помехозащищенность. Габариты детектора в корпусе — $\varnothing 16 \times 35$ мм. Чувствительный

Амосов Владимир Николаевич, начальник группы.
Мещанинов Сергей Анатольевич, научный сотрудник.
Родионов Николай Борисович, ведущий научный сотрудник.
Родионов Роман Николаевич, аспирант.
ФГУП "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований".

Россия, 142190, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, владение 12.

Тел. 8 (495) 334-55-80. E-mail: nbrodnik@triniti.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2011 г.

© Амосов В. Н., Мещанинов С. А., Родионов Н. Б., Родионов Р. Н., 2012

элемент детектора приведен на рис. 1. Расчетная чувствительность при регистрации гамма-излучения алмазным детектором с типичными размерами $4,5 \times 4,5 \times 0,5$ мм уменьшается с ростом энергии гамма-квантов и в рабочем диапазоне измерения спектра варьируется в диапазоне 10^{-4} — 10^{-1} см² отсчетов в расчете на единичный поток (1 гамма-квант/см²). При энергии гамма-кванта 1 МэВ эффективность детектора составляет порядка 10^{-3} см² на 1 гамма-квант/см². В счетном режиме детектор может регистрировать гамма-кванты с энергией выше 50 кэВ, нижний порог регистрации гамма-квантов определяется шумами предусилителя.

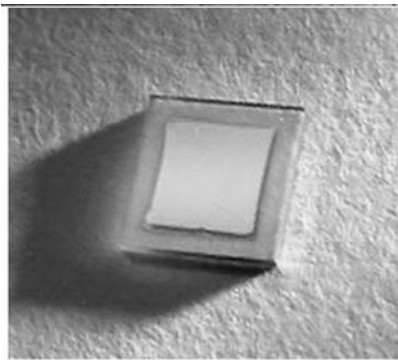


Рис. 1. Чувствительный элемент алмазного детектора — монокристалл синтетического алмаза с нанесенными электрическими контактами

На рис. 2 показан пример регистрации алмазным детектором излучения гамма-источника из набора ОСГИ с изотопом ²²Na. Энергетическая шкала нормирована по спектру регистрации источника альфа-частиц. При максимальном усилении видна область шумов предусилителя при энергии менее 40 кэВ.

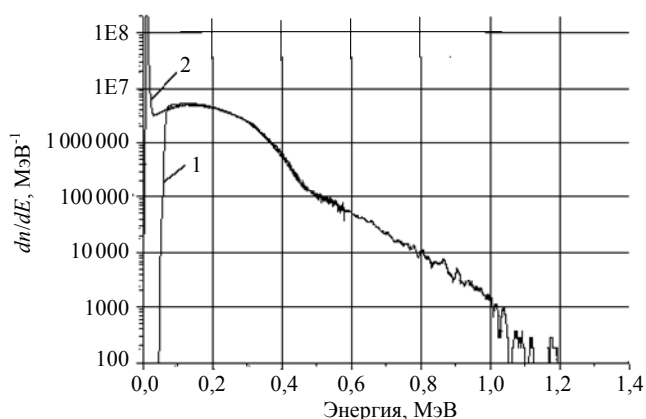


Рис. 2. Спектры отклика алмазного детектора WX32 при облучении γ -источником ²²Na. Спектры сняты при разных настройках усилителя-формирователя:
1 — WX32 Na22 — 100 В усиление $\times 2$;
2 — WX32 Na22 — 100 В усиление $\times 10$

Ранее проведенные исследования работы алмазных детекторов в условиях облучения на мощ-

ных источниках гамма-излучения показали, что детекторы практически не изменяют своих характеристик при дозах гамма-облучения порядка 10 МГр. Доказанный радиационный ресурс спектрометрических алмазных детекторов в потоках быстрых нейтронов составляет до 2×10^{14} см⁻² [1]. Это означает, что детектор может выдерживать поле мощных радиационных потоков, если гамма-излучение даже сопровождается излучением быстрых нейтронов.

Опыт эксплуатации алмазных детекторов при повышенных температурах показывает, что алмазные детекторы надежно работают в температурном интервале 0—150 °С [2]. Некоторое ухудшение разрешения детекторов при нагреве происходит в результате более интенсивного накопления объемных зарядов в толще детектора, а также за счет увеличения токов утечки. Проведенные тесты работоспособности детекторов из высокочистого алмазного материала при нагреве показали возможность работы без потери качества измерений при температуре до 250 °С.

Гамма-радиометр на основе алмазного спектрометрического детектора

Радиометр, работающий в спектрометрическом режиме, может обеспечить большую точность и больший динамический диапазон при определении дозовых нагрузок в сравнении с приборами, работающими на принципе регистрации постоянного тока. Медленные флуктуации токов утечки детектора величиной до нескольких наноампер практически не ухудшают работу детектора в импульсном режиме работы, тогда как в токовом режиме такие токи утечки не позволили бы измерить дозу. Токковый режим работы детектора не позволяет получить информацию об энергии излучения.

Алмазный радиометр гамма-излучения включает в себя собственно алмазный детектор (АД), предусилитель (ПУ), блок обеспечения (БО), включающий усилитель-формирователь (УФ), спектрометрический АЦП и анализатор импульсов (АИ) в виде программы для компьютера и программное обеспечение для восстановления спектра. Схема алмазного радиометра представлена на рис. 3. В данной работе для гамма-радиометра использована схема с вынесенным на длинной коаксиальной линии предусилителем. В этом случае алмазный детектор и ПУ находятся в зоне гамма-излучения (при необходимости ПУ можно поместить в защитный свинцовый кожух), а БО с УФ, а также АЦП могут размещаться на расстоянии вне действия гамма-излучения, т. е. не требуется изыскания специальных решений по их эксплуатации в условиях измерения.

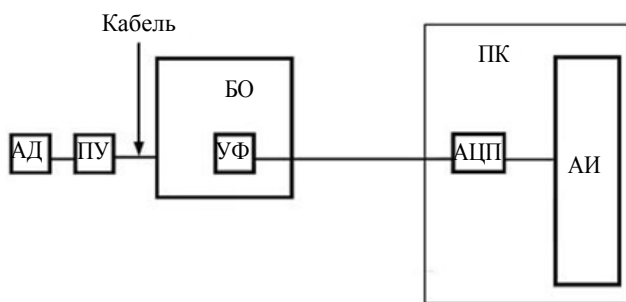


Рис. 3. Схема алмазного-радиометра гамма-излучения

Предусилитель, который используется в данной схеме, уже показал хорошие эксплуатационные характеристики на термоядерных установках, где регистрировались одновременно нейтроны и гамма-излучение. В схеме радиометра используется модернизированное решение монитора, в котором спектрометрический усилитель-формирователь, блок питания предусилителя и напряжения смещения детектора, а также узел разделения импульсного сигнала выполнены в виде единого блока [3]. В результате были достигнуты приемлемые спектрометрические характеристики при повышенной помехозащищенности схемы и малых габаритах выносного блока. Характеристики применяемой электроники ограничивают энергетическое разрешение спектрометра, которое при малых энергиях гамма-квантов может быть лучше 10 %.

Математическая модель взаимодействия гамма-квантов с алмазом

Основной принцип работы алмазного детектора основан на сборе носителей заряда, возникающих в кристалле алмаза под действием ионизирующего облучения [1, 2]. При условии реализации полного сбора заряд, собираемый на электродах детектора, равен $q = e(E' / E_0)$, где e — заряд электрона, E' — кинетическая энергия образованных заряженных частиц, E_0 — энергия образования электронно-дырочной пары (13,2 эВ). В диапазоне энергии регистрируемого гамма-излучения более 0,1 МэВ сечение фотоэффекта на углероде мало, поэтому спектр отклика алмазного детектора формируется, в основном, комптоновскими электронами [1].

Пусть на мишень, содержащую концентрацию атомов n (в единицах $1/\text{см}^3$), падает моноэнергетический поток гамма-фотонов N_0 (в единицах $1/(\text{см}^2\text{с})$). В процессе взаимодействия гамма-квантов с электронами атомных оболочек углерода рождаются комптон-электроны [4]. Число электронов отдачи, вылетающих в телесный угол $d\Omega$ в интервале полярных углов от $\bar{\theta}$ до $\bar{\theta} + d\bar{\theta}$ в системе центра масс, можно выразить следующим образом:

$$dN = N_0 n \sigma(\bar{\theta}) d\Omega = N_0 n \sigma(\bar{\theta}) 2\pi \sin(\bar{\theta}) d\bar{\theta},$$

где $\sigma(\bar{\theta}) = \frac{d\sigma(\bar{\theta})}{d\bar{\Omega}}$.

Ввиду инвариантности сечения относительно преобразования координат (в системе центра масс и лабораторной) имеем:

$$dN = N_0 n \sigma(\theta) 2\pi \sin(\theta) d\theta. \tag{1}$$

Энергия электронов отдачи при комптон-эффекте равна: $T_e = hv - hv'$, где ν, ν' — частота падающего и рассеянного фотона, соответственно, h — постоянная Планка.

Выразим энергию электронов отдачи через угол рассеянного фотона и:

$$T_e = hv \left(\frac{\varepsilon(1 - \cos(\theta))}{1 + \varepsilon(1 - \cos(\theta))} \right). \tag{2}$$

Здесь $\varepsilon = \frac{hv}{m_e c^2}$, m_e — масса электронов, c — скорость света.

Отсюда можно получить максимальную энергию отдачи электрона:

$$T_{\max} = \frac{2hv\varepsilon}{1 + 2\varepsilon}. \tag{3}$$

Число электронов отдачи в интервале энергии dT_e :

$$\frac{dN}{dT_e} = 2\pi N_0 n \sigma(\theta) \frac{(1 + \varepsilon(1 - \cos\theta))^2}{hv\varepsilon}, \tag{4}$$

при этом формула для дифференциального сечения $\sigma(\theta)$ имеет вид:

$$\sigma(\theta) = \frac{d\sigma}{d\Omega} = r_e^2 \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \frac{1}{(1 + \varepsilon(1 - \cos\theta))^2} \times \left[1 + \frac{\varepsilon^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)[1 + \varepsilon(1 - \cos\theta)]} \right], \tag{5}$$

где $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$.

Комптон-электроны, образующиеся в процессе взаимодействия гамма-квантов с электронами атомных оболочек углерода, движутся через кристалл и образуют электрон-дырочные пары. Для расчета ионизационных потерь электронов, движущихся в кристалле алмаза, используется уравнение из работы [4]:

$$\frac{dT_e}{dx} = \frac{2\pi e^4 n_e}{m_e v^2} \times \left[\ln \left(\frac{m_e v^2 T_e}{2\bar{T}^2(1-\beta^2)} \right) - \ln 2(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + 1 - \beta^2 \right], \quad (6)$$

где $\beta = \frac{v}{c}$, $T_e = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_e c^2$, v — скорость электрона; \bar{T} — средний ионизационный потенциал атомов углерода; n_e — концентрация электронов в кристалле.

Введем обозначение $E_k = \frac{T_e}{m_e c^2}$. Тогда дифференциальное уравнение для ионизационных потерь электронов запишется в виде:

$$\frac{dE_k}{dx} = \frac{\theta(E_k + 1)^2}{E_k(E_k + 2)} \left[\ln \left(\frac{1}{2} \left(\frac{m_e c^2}{\bar{T}} \right)^2 E_k^2(E_k + 2) \right) - \left(\frac{2}{E_k + 1} - \frac{1}{(E_k + 1)^2} \right) \ln 2 + \frac{1}{(E_k + 1)^2} \right]. \quad (7)$$

При этом длина полного поглощения электрона с заданной энергией E_k равна:

$$x = \int_0^{E_k} \frac{E_k(E_k + 2)dE_k}{\theta(E_k + 1)^2 \Psi(E_k)}, \quad (8)$$

где

$$\Psi(E_k) = \ln \left(\frac{1}{2} \left(\frac{m_e c^2}{\bar{T}} \right)^2 E_k^2(E_k + 2) \right) - \frac{2E_k + 1}{(E_k + 1)^2} \ln 2 + \frac{1}{(E_k + 1)^2}.$$

Алмазный детектор представляет собой квадратную пластинку толщиной h , т. е. ее размеры можно представить как $H \times H \times h$ (конкретные расчеты проведены для $H = 4$ мм, $h = 0,5$ мм). Так как характерные длины поглощения электронов превышают размеры кристалла, особенно в поперечном направлении, то расчет отклика детектора необходимо проводить с учетом конечных размеров детектора. Из каждой точки детектора электрон может вылететь в любом направлении с одинаковой вероятностью (рис. 4). Но при разных направлениях он пройдет, очевидно, разные расстояния, и, следовательно, в зависимости от направления его вылета в кристалле поглощается разная энергия. Сформируем функцию $F(x)$ весов всех расстояний x от заданной точки до границы кристалла в зависимости от положения точки в кристалле.

Ясно, что $\int_0^{x_{\max}} F(x) dx = 1$. Тогда число регистри-

руемых событий в энергетическом интервале dE по Комптону с энергией E_k размывается на интервал от 0 до E_k с учетом поглощения на заданной длине x , т. е. имеем $\left(\frac{dN}{dE} \right)_k = \frac{E_{\text{погл}}(x)}{E_k} F(x) \left(\frac{dN}{dE} \right)_{E_k}$, где $E_{\text{погл}}(x)$ — поглощенная энергия электрона. Эта поглощенная энергия рассчитывается с помощью уравнения (7). Для контроля сечений элементарных процессов использовались данные [5]. Суммирование по всем откликам комптоновских электронов дает суммарный отклик гамма-детектора.

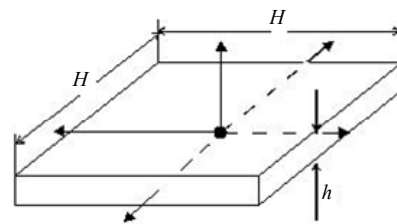


Рис. 4. Детекторная пластинка. Вылет электрона при взаимодействии гамма-кванта с алмазом равновероятен в разных направлениях

На рис. 5 и 6 представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных для, соответственно, гамма-источника ^{137}Cs [5] и гамма-источника ^{60}Co [5]. Излучение ^{137}Cs состоит из одной линии 661 кэВ. Излучение ^{60}Co происходит в двух линиях, а именно, 1332,5 и 1173,2 кэВ, причем интенсивность излучения на этих линиях одинаковая. Из рис. 6 видно, что наблюдается перелом графика в области $\sim 0,95$ МэВ. Такая особенность наблюдается и на экспериментальной кривой. Это обусловлено тем, что гамма-источник ^{60}Co излучает на двух линиях.

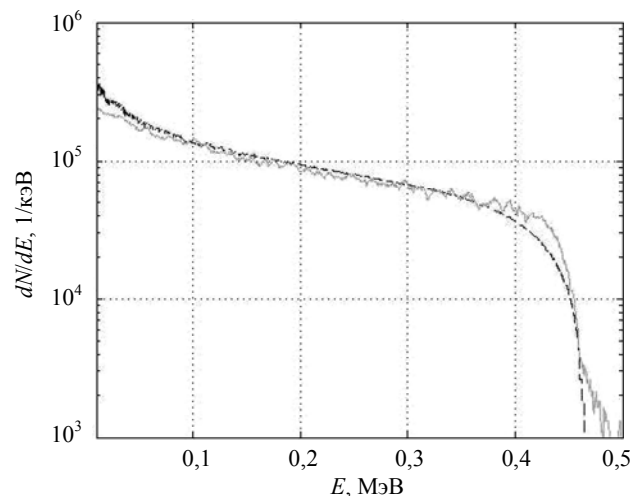


Рис. 5. Сравнение экспериментальных (сплошная кривая) и расчетных (пунктирная кривая) данных для гамма-источника ^{137}Cs

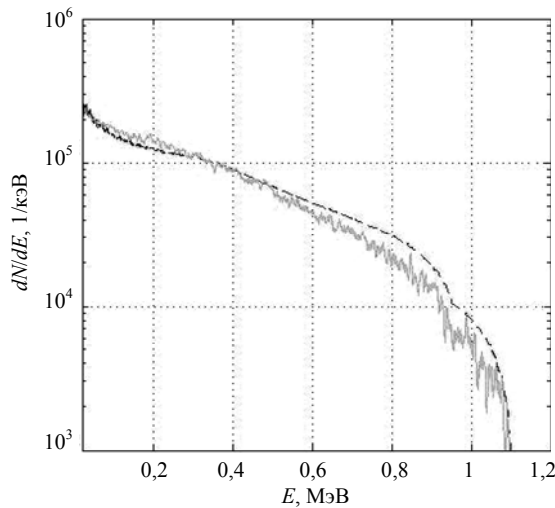


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (сплошная кривая) и расчетных (пунктирная кривая) данных для гамма-источника ⁶⁰Со

Код в целом описывает экспериментальный отклик алмазного детектора на гамма-излучение. Следует отметить, что на измеряемый экспериментальный спектр влияет корпус детектора, а также под каким углом к гамма-излучению расположен детектор. Поэтому для более корректного сравнения необходимо в дальнейшем более тщательно учитывать корпус детектора или вообще снизить его влияние.

Восстановление модельного спектра гамма-источника

Задача восстановления экспериментального гамма-спектра в данной работе формулируется как минимизация функции F :

$$F = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^m \alpha_k \left(\frac{dN}{dE} \right)_{ki} - \left(\frac{dN}{dE} \right)_{\text{эксп}i} \right)^2. \quad (9)$$

Здесь $\left(\frac{dN}{dE} \right)_{ki}$ — расчетные значения отклика для гамма-квантов энергии E_k и величины поглощенной энергии E_i ; $\left(\frac{dN}{dE} \right)_{\text{эксп}i}$ — экспериментально измеренные значения отклика детектора для гамма-квантов поглощенной энергии E_i ; m — количество групп гамма-квантов, на которые разбивается определяемый спектр; n — количество точек на шкале поглощенной энергии.

Минимизация функции (9) производится методом наискорейшего спуска [6], в результате которой определяются коэффициенты α_k , которые пропорциональны количеству гамма-квантов с заданной энергией E_k определяемого источника.

Для вычисления градиента функции F используются частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \alpha_1} &= 2 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^m \alpha_k \left(\frac{dN}{dE} \right)_{ki} \right) \left(\frac{dN}{dE} \right)_{1i} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{dN}{dE} \right)_{\text{эксп}i} \left(\frac{dN}{dE} \right)_{1i}, \\ \frac{\partial F}{\partial \alpha_2} &= 2 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^m \alpha_k \left(\frac{dN}{dE} \right)_{ki} \right) \left(\frac{dN}{dE} \right)_{2i} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{dN}{dE} \right)_{\text{эксп}i} \left(\frac{dN}{dE} \right)_{2i}, \\ \frac{\partial F}{\partial \alpha_n} &= 2 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^m \alpha_k \left(\frac{dN}{dE} \right)_{ki} \right) \left(\frac{dN}{dE} \right)_{ni} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{dN}{dE} \right)_{\text{эксп}i} \left(\frac{dN}{dE} \right)_{ni}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для определения минимума функции строится итерационный процесс:

$$\bar{\alpha}^{m+1} = \bar{\alpha}^m - \gamma \nabla F,$$

где m — номер итерации; γ — коэффициент, который подбирается из условия достижения минимума функции на итерации m .

В результате минимизации функции F получаем значения α_k . Задача восстановления на основе спектра модельного отклика решается численно. Для решения задачи выбран стандартный алгоритм [6]. При необходимости в функцию (9) добавляются регуляризирующие добавки.

Исследуем возможность восстановления модельного спектра с помощью метода наискорейшего спуска. В качестве модельного отклика детектора выберем источник гамма-излучения, состоящий из трех линий, которые включают две линии ⁶⁰Со (1332,5 и 1173,2 кэВ) и одну ¹³⁷Сs (661 кэВ). Число точек по шкале поглощенной энергии взято 80.

Для демонстрации возможностей метода в данной работе проведены расчеты восстановления модельного спектра, если на расчетный отклик (прямая задача) накладывается случайный шум с заданной амплитудой, который задается с помощью генератора случайных чисел. На рис. 7 линия 1 — модельный спектр отклика, на который накладывается шум с заданной амплитудой, линия 2 — восстановленный спектр отклика. Амплитуда шума 10 %.

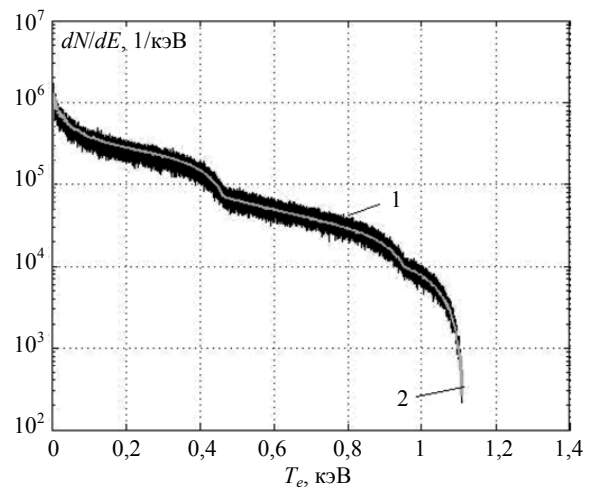


Рис. 7. Исходный и восстановленный модельный спектр отклика смешанного источника ⁶⁰Со+¹³⁷Сs

Как показали расчеты, вплоть до амплитуды шума 20 % по отношению к амплитуде исходного отклика спектр хорошо восстанавливается. В таблице приведены точность восстановления источников. Видно, что источник при наличии шума восстанавливается с удовлетворительной точностью. Таким образом, хорошее восстановление модельного спектра источника с помощью разработанного программного обеспечения обеспечивает восстановление и реального спектра гамма-источника.

Точность восстановления линии гамма-источника при заданном шуме

Амплитуда шума, %	^{60}Co		^{137}Cs
	1332,5 кэВ (%)	1173,2 кэВ (%)	661 кэВ (%)
1	3,2	1,3	1,9
3	2,6	1,4	1,0
5	8,7	2,0	1,0
10	5,0	3,5	13,0
20	8,0	4,0	12,0

В данной работе проведено восстановление спектра гамма-источника по экспериментально измеренному отклику алмазного детектора. На рис. 8 приведены результаты по определению величины активности гамма-излучения ^{60}Co -источника. Подобные же удовлетворительные результаты получены для ^{137}Cs -источника. В обоих случаях гамма-активность восстановлена с точностью до 3 % и составляла $3,2 \cdot 10^5$ Бк для ^{60}Co и $3 \cdot 10^5$ Бк для ^{137}Cs .

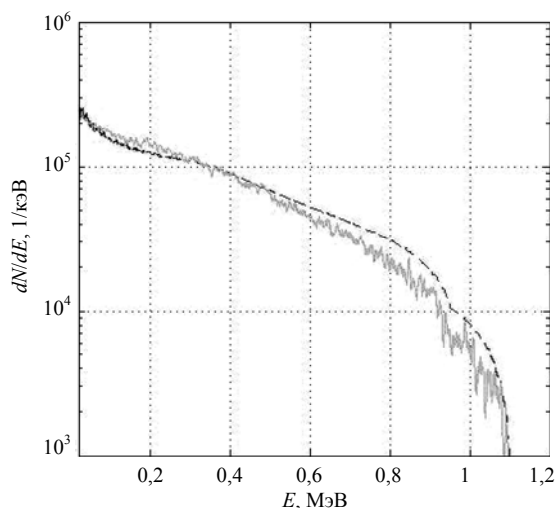


Рис. 8. Исходный (сплошная кривая) экспериментальный и восстановленный отклик (пунктирная кривая) ^{60}Co -источника

Аналогичные удовлетворительные результаты по восстановлению характеристик сразу двух радиоактивных источников (^{137}Cs и ^{60}Co) получены по функции совместного их отклика.

Заключение

Разработан гамма-радиометр, включающий спектрометрический алмазный детектор, предусилитель, блок обеспечения, спектрометрический АЦП и анализатор импульсов и программное обеспечение. Реализованный радиометр гамма-излучения на основе синтетического алмазного материала имеет следующие характеристики:

анализируемый диапазон энергии фотонов — более 0,1 МэВ;

динамический диапазон измерения потоков фотонов — 10^1 — 10^8 см⁻²с⁻¹;

энергетическое разрешение при регистрации излучения источника ^{137}Cs — не хуже 20 %.

В основе программного обеспечения лежит расчет отклика алмазного детектора на гамма-излучение (прямая задача). Восстановление спектра обеспечивается в ходе решения обратной задачи. Прямая и обратная задачи решаются численно.

Проведено восстановление интенсивности и спектра излучения источников ^{60}Co , ^{137}Cs . Исходный спектр гамма излучения восстановлен с точностью не хуже 10 %.

Литература

1. Красильников А. В., Квасков В. Б. Алмаз и ионизирующее излучение. Книга "Природные алмазы России". — М.: Полярон, 1997.
2. Козлов С. Ф. Алмазные детекторы ядерных излучений: Сборник статей "Алмаз в электронной технике". — М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Амосов В. Н., Красильников А. В., Скопинцев Д. А., Мецанинов С. А., Красильников В. А., Поповичев С. В., Varnsley R., Coffey I., Beldeshevsky M. // ПТЭ. 2008. № 2. С. 108.
4. Мухин К. Н. Введение в ядерную физику. — М.: Гостомиздат, 1963.
5. Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California. Photon Cross Section from 0.001 Mev to 100 Mev for Elements 1 through 100. LA-3753. Los Alamos, 1967.
6. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. — М.: Наука, 1987.

Gamma radiation radiometer on the basis of synthetic diamond

V. N. Amosov, S. A. Meshaninov, N. B. Rodionov, R. N. Rodionov

TRINITI,

Troitsk, Moscow region, Russia

E-mail: nbrodник@triniti.ru

The gamma-ray radiometer based on synthetic diamond was developed. High noise immunity is implemented in gamma-ray radiometer scheme with length of coaxial line up to 200 m with remote preamplifier. Radiometer includes diamond detector, preamplifier, driver amplifier, spectrometric ADC and pulse analyzer. The mathematical model of gamma-radiation registration by diamond detector; its dimensions are taken into account. Computer codes for calculation of the detector response to gamma radiation and gamma spectrum restoration have been developed.

PACS: 29.40.VK, 81.05.ug, 07.79.KA

Keywords: radiometer, calibration, gamma radiation, synthetic diamond.

Bibliography — 6 references.

Received September 25, 2011