

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ И КАЛИБРОВКА ГИБРИДНЫХ ПИКсельНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ GaAs:Cr И МИКРОСХЕМЫ TIMEPIX

*А. Батлер^а, Ф. Батлер^б, Ст. Белл^в,
М. И. Госткин^г, Д. В. Дедович^г, М. А. Демичев^г,
В. Г. Елкин^г, А. С. Жемчугов^г, М. М. Захваткин^г,
С. А. Котов^г, Д. А. Кожевников^г, В. Г. Кручонок^г,
А. А. Ноздрин^г, С. Ю. Пороховой^г, И. Н. Потрап^г,
П. И. Смолянский^{г,1}, Г. А. Шелков^г*

^а Университет Отаго, Новая Зеландия

^б Университет Кентербери, Новая Зеландия

^в MARS Bioimaging Ltd., Новая Зеландия

^г Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В статье представлен разработанный итерационный метод попиксельной энергетической калибровки гибридных пиксельных детекторов на основе GaAs:Cr и микросхемы Timepix, в котором используется свертка прецизионно измеренных спектров рентгеновского характеристического излучения различных металлов с разрешением и эффективностью пиксельного детектора. В ходе процесса калибровки также измеряется и энергетическое разрешение детектора. Благодаря применению попиксельной калибровки удалось достичь хорошего энергетического разрешения детектора Timepix с сенсором из GaAs:Cr: 8% на 60 кэВ и 13% на 20 кэВ.

This paper describes an iterative method of per-pixel energy calibration of hybrid pixel detectors with GaAs:Cr sensor and Timepix readout chip. A convolution of precisely measured spectra of characteristic X-rays of different metals with the resolution and the efficiency of the pixel detector is used for the calibration. The energy resolution of the detector is also measured during the calibration. The use of per-pixel calibration allows one to achieve a good energy resolution of the Timepix detector with GaAs:Cr sensor: ~ 8% and ~ 13% at 60 and 20 keV, respectively.

PACS: 29.40.Wk

¹E-mail: smolyanskiy@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все более широкое применение в различных областях науки, где от детекторов ионизирующих излучений требуется высокое пространственное разрешение и низкий уровень шумов, находят гибридные пиксельные полупроводниковые детекторы. В физике высоких энергий их используют для регистрации треков частиц, в геологии — для рентгеновской радиографии при изучении внутренней структуры различных образцов, в биологии и медицине — при компьютерной томографии. В большинстве таких детекторов чувствительные элементы сделаны из кремния Si ($Z = 14$), который, наряду с неоспоримыми преимуществами, обладает и рядом существенных недостатков, в частности, низкой эффективностью регистрации фотонов с энергией больше 20 кэВ ¹ и недостаточной радиационной стойкостью. Поэтому в последнее время все активнее ведутся разработки пиксельных детекторов на основе альтернативных кремнию более тяжелых полупроводниковых материалов, таких как арсенид галлия GaAs ($Z = 31,33$) и теллурид кадмия CdTe ($Z = 48,52$).

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, совместно с Томским государственным университетом, коллаборацией Medipix [1], Чешским техническим университетом (Прага) и исследовательским центром DESY (Гамбург), проводятся работы по созданию и тестированию гибридных пиксельных детекторов на основе микросхемы считывания Timerix [2] с сенсорной матрицей из арсенида галлия, допированного хромом (GaAs:Cr) [3]. В публикации приводятся последние результаты этих работ.

1. ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕРМАНИЕВЫМ ДЕТЕКТОРОМ CANBERRA

Для проведения спектрометрических измерений, описываемых в данной работе, была собрана экспериментальная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 1. Свинцовый коллиматор, установленный перед чувствительным окном детектора для пре-

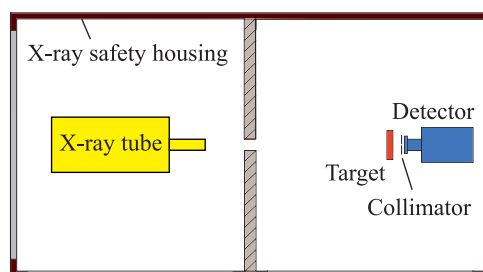


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для регистрации рентгеновского излучения. Внутри свинцовой рентгенозащитной камеры расположены: X-Ray tube — рентгеновская трубка, target — мишень из различных металлов, collimator — коллиматор для уменьшения загрузки детектора, detector — прецизионный γ -спектрометр на базе германиевого детектора Canberra GL0515R

¹Этот параметр особенно важен для компьютерной томографии плотных тканей и минералов.

дотвращения его перегрузки при работе без мишеней, представлял собой свинцовую пластину $9 \times 9 \times 0,5$ см с круглым отверстием диаметром 0,8 мм. В измерениях использовался набор мишеней из различных металлов от никеля до свинца.

В качестве источников рентгеновского излучения использовались микрофокусные рентгеновские аппараты РАП-150МН [4] и SB120 [5]. Их основные характеристики представлены в табл. 1. Важно отметить, что рентгеновская трубка РАП-150МН имеет анод прострельного типа, изготовленный из алюминия с вольфрамовым напылением, а рентгеновская трубка SB120 имеет анод отражательного типа, изготовленный из меди, с покрытием из вольфрама.

Таблица 1. Основные характеристики рентгеновских аппаратов РАП-150МН и SB120

Характеристика	РАП-150МН	SB120
Анодное напряжение, кВ	20–150	60–120
Анодный ток, мкА	20–100	10–350
Размер фокусного пятна, мкм	60	70

Измерение энергетических спектров производилось прецизионным γ -спектрометром на основе германиевого детектора Canberra GL0515R [6]. Он обладает высоким разрешением в интересующем нас энергетическом диапазоне рентгеновского излучения (15–100 кэВ) и имеет заводскую калибровку высокой точности для энергетической шкалы. Основные характеристики германиевого детектора Canberra представлены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики германиевого детектора Canberra GL0515R

Активная площадь кристалла Ge, мм ²	500
Толщина кристалла Ge, мм	15
Толщина Ве-окна, мм	0,05
Разрешение (σ) на 5,9 кэВ, кэВ	0,1
Разрешение (σ) на 122 кэВ, кэВ	0,23

1.1. Спектры рентгеновских трубок РАП-150МН и SB120. Для получения представления о распределении по энергиям интенсивности излучения используемых рентгеновских трубок РАП-150МН и SB120 их энергетические спектры были сняты в рабочем диапазоне их анодных напряжений (для SB120 он существенно уже, чем для РАП-150МН). Нормированные на время экспозиции спектры излучения при различных напряжениях на аноде для рентгеновских трубок РАП-150МН и SB120 показаны, соответственно, на рис. 2 и 3. Как видно из рисунков, граница рентгеновского спектра РАП-150МН не соответствует анодному напряжению, задаваемому на блоке управления, в то время как для трубки SB120 граница спектра строго соответствует выставленному напряжению на аноде¹. Поскольку рентгеновские трубки РАП-150МН и SB120 имеют аноды с вольфрамовым покрытием, на их непрерывных спектрах отчетливо выделяются пики, соответствующие K_{α} -, K_{β} - и L_{α} -линиям характеристического излучения вольфрама. События, соответствующие «хвостам» спектров, объясняются наложением нескольких сигналов в детекторе.

¹По-видимому, реальное ускоряющее напряжение для РАП-150МН отличается от устанавливаемого на блоке управления.

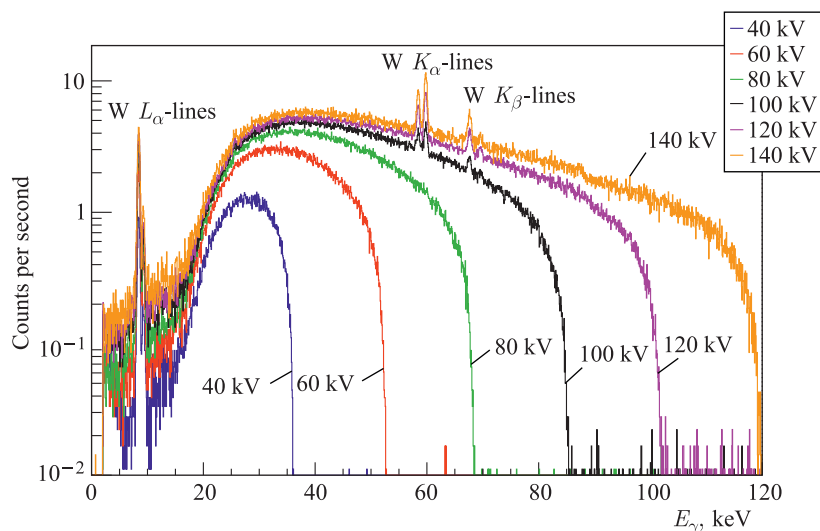


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Спектры излучения рентгеновской трубки РАП-150МН при разных анодных напряжениях

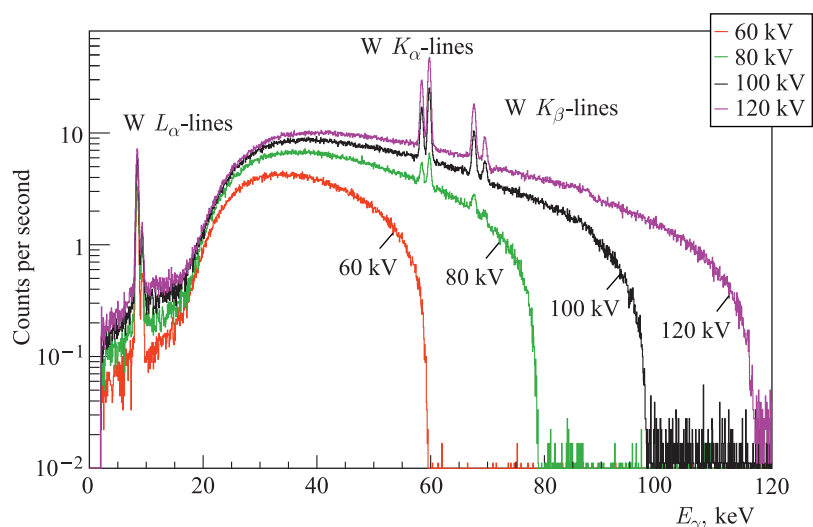


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Спектры излучения рентгеновской трубки SB120 при разных анодных напряжениях

1.2. Спектры характеристического излучения металлов. Для измерения с помощью германиевого детектора Canberra спектров характеристического излучения металлов, представленных в табл. 3, использовалась рентгеновская трубка РАП-150МН. Измерения проводились в двух геометриях: «на просвет», когда мишень (фольга из различных металлов) находилась на оси излучатель–детектор, и «на отражение», когда детектор установлен под углом 90° , а мишень — под углом 45° к оси излучателя.

Для измерений в геометрии «на просвет» схема экспериментальной установки отличается от схемы, представленной на рис. 1, только отсутствием свинцового коллиматора.

Таблица 3. Энергии характеристического излучения различных металлов

Элемент	K_{α_2} , кэВ	K_{α_1} , кэВ	K_{β_1} , кэВ	K_{β_2} , кэВ	K_{β_3} , кэВ	K_{β_4} , кэВ	K_{β_5} , кэВ
²⁸ Ni	7,46	7,48	8,27	—	8,27	—	8,33
³⁰ Zn	8,62	8,64	9,57	—	9,57	—	9,65
⁴⁰ Zr	15,69	15,78	17,68	17,97	17,65	17,97	17,82
⁴² Mo	17,38	17,48	19,61	19,97	19,59	19,97	19,77
⁴⁵ Rh	20,07	20,22	22,72	23,17	22,70	23,17	22,91
⁴⁸ Cd	22,98	23,17	26,10	26,64	26,06	26,64	26,30
⁴⁹ In	22,98	23,17	26,10	26,64	26,06	26,64	26,30
⁵⁰ Sn	25,04	25,27	28,49	29,11	28,44	29,11	28,71
⁷³ Ta	56,28	57,54	65,22	67,01	64,95	66,95	65,24
⁷⁴ W	57,98	59,32	67,24	69,10	66,95	69,03	67,65
⁸² Pb	72,81	74,97	84,94	87,36	84,45	87,24	85,42

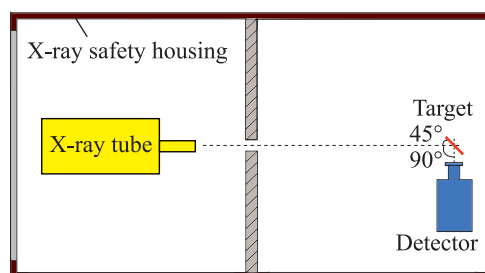


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки для регистрации рентгеновского излучения в геометрии «на отражение»

Мишень в этом случае была закреплена на корпусе детектора перед чувствительным окном. Схема экспериментальной установки для измерений в геометрии «на отражение» представлена на рис. 4.

На рис. 5 приведены спектры рентгеновского излучения, прошедшего через циркониевую фольгу (измерение «на просвет») и отраженного от такой же фольги (измерение «на отражение»). В обоих случаях толщина циркониевой фольги составляла 0,3 мм, а рабочие напряжение и ток на трубке — 45 кВ и 100 мкА соответственно. На этих спектрах видны не только пики характеристического излучения циркония K_{α} , K_{β} , но и пики (отмечены на рис. 5 как Escape 1, Escape 2, Escape 3, Escape 4), соответствующие вылету характеристических рентгеновских фотонов германия из детектора Canberra, образованных при возбуждении атома германия первичными фотонами характеристического излучения циркония. Четыре дополнительных пика обусловлены тем, что атом германия может переизлучать фотон как K_{α} ($E_{\alpha}^{Ge} \approx 9,9$ кэВ), так и K_{β} ($E_{\beta}^{Ge} \approx 11$ кэВ) линий.

Отметим, что, как видно из табл. 3, в каждой области энергий E_{α}^{Zr} и E_{β}^{Zr} находится по несколько пиков, но поскольку разрешение детектора составляет порядка 0,1 кэВ, то пики с близкой энергией не разрешаются и сливаются в один.

Аналогичное сравнение спектров характеристического излучения, полученных в геометрии «на просвет» и в геометрии «на отражение», — на рис. 6 для фольги из тантала толщиной 0,3 мм. Рабочие напряжение и ток на рентгеновской трубке РАП-150МН в этом

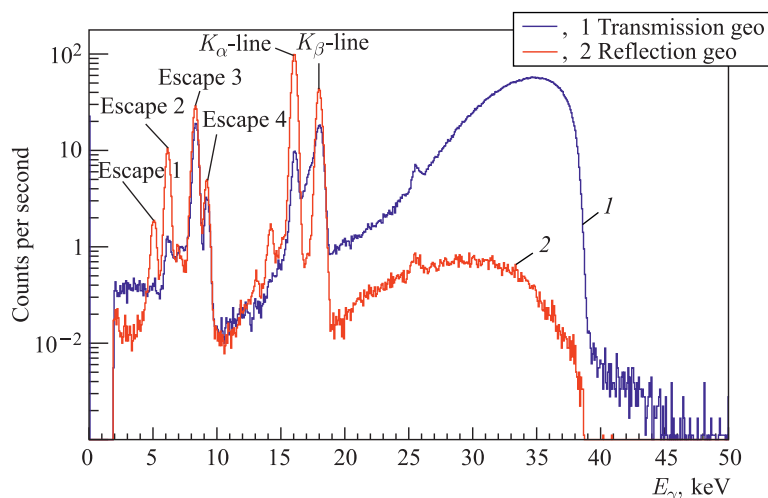


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Спектры рентгеновского излучения циркония, снятые в геометрии «на просвет» (синий, 1) и в геометрии «на отражение» (красный, 2). K_{α} , K_{β} — характеристические линии циркония. Escape 1, Escape 2, Escape 3, Escape 4 — пики, соответствующие вылету характеристических рентгеновских фотонов германия из детектора Canberra

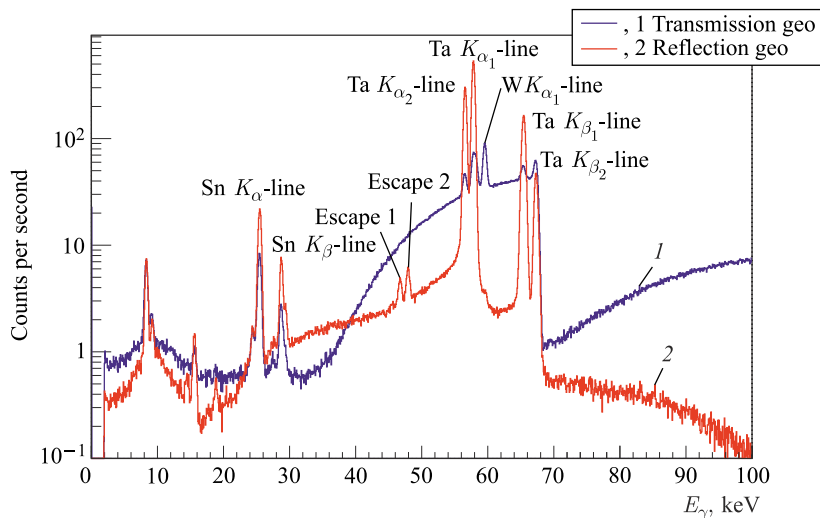


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Спектры рентгеновского излучения тантала, снятые в геометрии «на просвет» (синий, 1) и в геометрии «на отражение» (красный, 2). $Ta K_{\alpha_1}$, $Ta K_{\alpha_2}$, $Ta K_{\beta_1}$, $Ta K_{\beta_2}$ — характеристические линии тантала. $W K_{\alpha_1}$ — характеристическая линия вольфрама. $Sn K_{\alpha}$, $Sn K_{\beta}$ — характеристические линии олова. Escape 1, Escape 2 — пики, соответствующие вылету характеристических рентгеновских фотонов германия из детектора Canberra

случае составляли 140 кВ и 30 мкА соответственно. На рассматриваемых спектрах четко выделяются линии K_{α_1} , K_{α_2} , K_{β_1} , K_{β_2} характеристического излучения тантала. Кроме того, на спектре прохождения появляется линия K_{α_1} характеристического излучения вольфрама, которым покрыт анод рентгеновской трубки. Стоит также обратить внимание

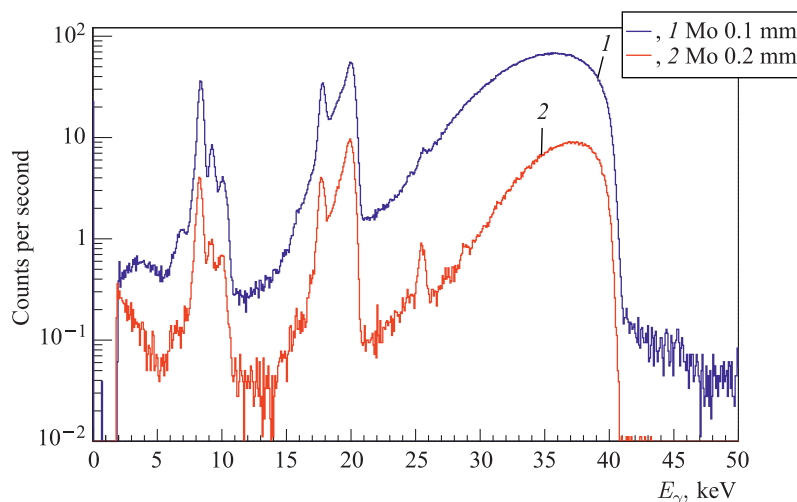


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Спектры рентгеновского излучения, прошедшего через молибденовую фольгу толщиной 0,1 мм (синий, 1) и толщиной 0,2 мм (красный, 2), снятые в геометрии «на просвет»

на наличие в спектрах четырех дополнительных пиков (Escape 1 и Escape 2 на рис. 6), два из которых соответствуют вылету характеристических рентгеновских фотонов германия из детектора (в результате взаимодействия с характеристическими фотонами тантала), а два других (Sn K_{α} -line и Sn K_{β} -line на рис. 6) — линиям характеристического излучения олова, содержащегося в дюралюминии, из которого изготовлена несущая часть внутренней перегородки защитного шкафа (см. схему на рис. 4).

Из рисунков видно, что при измерениях в геометрии «на отражение» пики, соответствующие характеристическим линиям, имеют большую интенсивность, чем аналогичные пики при измерениях в геометрии «на просвет». Поскольку для работ по измерению энергетического разрешения и калибровке детекторов Timerix принципиально важно регистрировать спектры с хорошо выделяемыми на непрерывном фоне линиями характеристического излучения, для калибровки детекторов Timerix была выбрана геометрия «на отражение». Более подробно об этом речь пойдет в следующем разделе.

На рис. 7 представлено сравнение спектров рентгеновского излучения, прошедшего через фольгу из молибдена толщиной 0,1 и 0,2 мм. В обоих случаях рабочее напряжение и ток составляли 45 кВ и 100 мкА соответственно. Как видно, изменение толщины мишени влияет только на интенсивность излучения, но не на вид спектра.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ И КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА TИМЕРИХ

2.1. Пиксельный детектор Timerix. Микросхемы Timerix были разработаны в ЦЕРН коллаборацией Medipix при поддержке EUDET. Детекторы на их основе могут быть использованы для измерения треков и энергий частиц одновременно. Конструкция исследуемых в данной работе пиксельных детекторов на основе микросхемы Timerix приведена на рис. 8, а. Детектор состоит из двух основных частей — сенсора (в данной работе

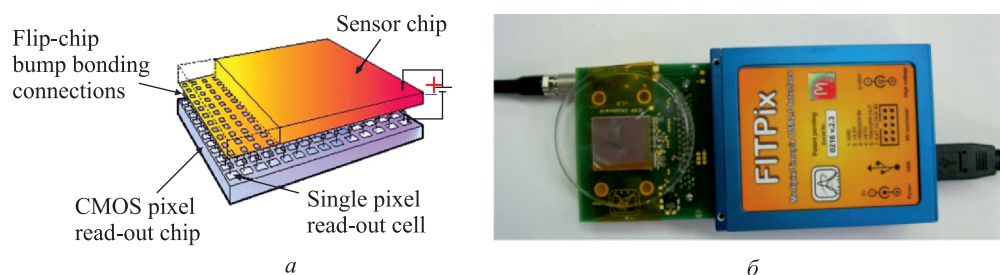


Рис. 8. а) Структура детектора Тimerix; б) пиксельный детектор на микросхеме Тimerix с USB-интерфейсом FITPIX

из арсенида галлия, допированного хромом GaAs:Cr), в котором заряженная частица «оставляет след» в виде некоторого числа свободных носителей заряда, пропорционального выделившейся в сенсоре энергии, и микросхемы Тimerix, в которой образованный в сенсоре заряд усиливается, анализируется, оцифровывается и передается в компьютер. Толщина сенсора из GaAs:Cr определяется возможностями технологии его производства и может меняться в настоящий момент в пределах от 0,2 до 1 мм. Размер сенсора соответствует размеру микросхемы Тimerix и составляет $14,2 \times 14,2$ мм, а геометрия считывающих электродов, образованных путем металлизации поверхности сенсора, соединяемой с микросхемой электроники, соответствует геометрии рабочей поверхности микросхемы электроники Тimerix. Полупроводниковый сенсор и микросхема соединяются по технологии «flip-chip». Микросхема Тimerix состоит из 65536 независимых каналов (пикселей), собранных в матрицу 256×256 элементов. Размер отдельного пикселя 55×55 мкм. Каждому пикселю соответствует усилитель, дискриминатор с регулируемым порогом и счетчик сигналов. Первые результаты исследования пиксельных детекторов с сенсором из GaAs:Cr и микросхемой Тimerix приведены в [7]. На рис. 8, б показан один из первых, собранных в 2008 г. для ЛЯП ОИЯИ, детекторов с USB-интерфейсом FITPIX [8].

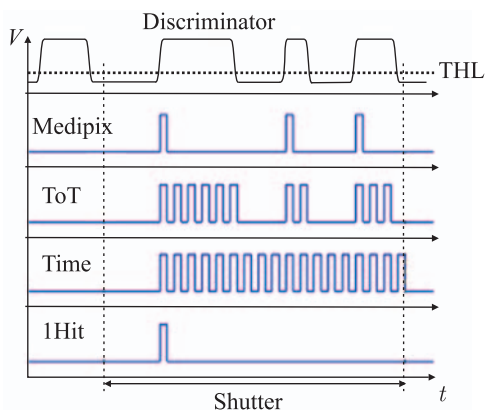


Рис. 9. Режимы работы детектора Тimerix. THL — пороговое значение для сигнала

Для измерения энергии, выделившейся в сенсоре детектора после прохождения частицы, используется режим ToT работы микросхемы Тimerix. В этом режиме в каждом пикселе при пересечении сигналом некоторого порогового уровня THL включается счет-

Микросхема Тimerix может работать в одном из четырех режимов (рис. 9):

- Medipix-режим: считается, сколько раз во временном окне сигнал в пикселе превышает некоторый порог;
- Time-over-Threshold (ToT) режим: измеряется длительность пребывания сигнала над порогом;
- Time-of-Arrival (ToA) режим: считается время с момента превышения порогового уровня до закрытия временного окна;
- OneHit-режим: считается хотя бы одно превышение порогового уровня во временном окне.

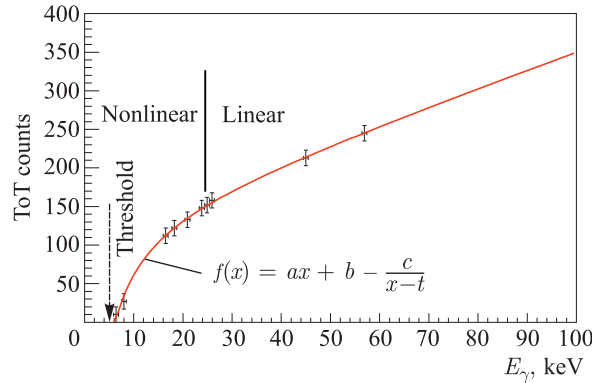


Рис. 10. Общий вид калибровочной кривой (1)

чик сигналов от генератора, который останавливается в момент, когда амплитуда входного сигнала становится ниже порога. Число посчитанных импульсов зависит от количества поглощенной энергии. Частота генератора устанавливается в диапазоне 10–100 МГц.

Для определения связи между значением ТоТ и величиной выделенной в сенсоре энергии E требуется энергетическая калибровка. Такая взаимосвязь может быть аппроксимирована функцией, общий вид которой представлен на рис. 10,

$$\text{ToT}(E) = aE + b + \frac{c}{E - t}. \quad (1)$$

Обратная ей функция имеет вид

$$E(\text{ToT}) = \frac{at + \text{ToT} - b + \sqrt{(b + at - \text{ToT})^2 + 4ac}}{2a}. \quad (2)$$

Эмпирические формулы (1) и (2) были впервые предложены в [9].

Вследствие неоднородности материала сенсора и разброса параметров отдельных каналов микросхемы Timerix коэффициенты a , b , c и t будут отличаться для разных пикселей, что требует проведения процедуры попиксельной калибровки энергетической шкалы. Она будет подробно рассмотрена далее, наряду с обобщенной калибровкой, когда коэффициенты a , b , c и t устанавливаются одинаковыми для всей пиксельной матрицы.

2.2. Процедура калибровки и измерения энергетического разрешения детектора Timerix. Здесь описывается методика проведения обобщенной и попиксельной калибровок и совмещенное с ней измерение энергетического разрешения детектора Timerix с сенсором GaAs:Cr. Хотя основная идея проведения такой процедуры несложна и успешно применяется на детекторах с Si в качестве чувствительного слоя [10], специфические свойства GaAs:Cr как материала, а также особенности опытных образцов детекторов на его основе требуют некоторого изменения процедуры калибровки.

В данной работе использовался гибридный детектор Timerix (№ E11-W0110) с сенсором из GaAs:Cr толщиной 500 мкм. Напряжение смещения $V_{\text{bias}} = -500$ В на сенсор подавалось от мультиметра Keithley 6517В со встроенным источником питания. Для исключения температурных эффектов сенсор термостабилизировался (на уровне 18°C) с помощью элемента Пельтье с тепловой мощностью до 5 Вт.

Калибровка пиксельного детектора проводилась в два этапа. Первый этап — пиксельная пороговая эквализация. Для этого использовался пакет программ Pixelman [11]. По-

пороговый уровень THL устанавливается одинаковым для каждого пикселя считывающего чипа, но электрические свойства каждого пикселя в силу технологических особенностей отличаются, из-за чего каждый пиксель имеет свой уровень шума. Поэтому в канал усилителя каждого пикселя вводилось дополнительное корректирующее напряжение смещения, которое подбирается таким образом, чтобы выровнять уровни шумов с пикселей при некотором едином для всех пикселей детектора уровне порога THL.

Второй шаг — установление взаимно-однозначного соответствия между временем сигнала над порогом ToT и поглощенной энергией частицы E . Процедуру получения зависимости $E(\text{ToT})$ называют ToT-калибровкой. Она может быть проведена для каждого пикселя индивидуально (попиксельная калибровка) и для всей матрицы в целом (обобщенная калибровка). В общем случае ToT-калибровка состоит из следующих этапов:

- запись спектров хорошо известных радиоактивных γ -источников и спектров характеристического излучения выбранных материалов в единицах ToT;
- идентификация пиков в ToT-спектрах и установление связи значений ToT с известными энергиями излучения;
- фитирование пиков и построение точечной диаграммы $\text{ToT}(E)$;
- фитирование полученных точек функцией (1) и вычисление обратной зависимости $E(\text{ToT})$ согласно (2).

В качестве реперных спектров для калибровки были выбраны спектры характеристического излучения Zr, Mo, Rh, Cd, In, Sn, Ta, энергии K -линий для которых представлены в табл. 3. Такой выбор фольг позволяет откалибровать детектор в диапазоне 15–100 кэВ и обусловлен наличием двух областей у калибровочной кривой — линейной, где достаточно двух точек для ее задания, и нелинейной, где необходимо больше реперных точек для определения параметров кривой с достаточной точностью.

Как было сказано выше, для получения спектров характеристического рентгеновского излучения решено использовать геометрию на «отражение». Экспериментальная установка для калибровки детектора Timerix совпадает с установкой, представленной на рис. 4. В качестве источника рентгеновского излучения использовался микрофокусный рентгеновский аппарат РАП-150МН. Для записи ToT-спектров использовался программный пакет Pixelman. Обработка данных проводилась с помощью разработанного набора ROOT скриптов. Путем точной регулировки положения детектора Timerix относительно рентгеновской трубки была достигнута равномерная засветка матрицы детектора. Для всех дальнейших измерений тактовая частота генератора импульсов (режим ToT) составляла $f = 10$ МГц, пороговый уровень THL = 380, длительность временного окна (фрейма) $T_f = 0,05$ с.

Как известно, спектр характеристического рентгеновского излучения химического элемента состоит из набора близко расположенных K_α , K_β , L_α спектральных линий. Разрешающей способности детектора Timerix недостаточно для их разделения, поэтому в спектре, полученном детектором Timerix, эти линии сливаются в один пик. Для нахождения энергии, соответствующей максимуму в спектре, регистрируемом детектором Timerix, с учетом его разрешения и эффективности, было проведено монте-карло-моделирование, суть которого состоит в следующем:

- в спектре характеристического рентгеновского излучения, полученном германиевым детектором Canberra, выбирается область с интересующими спектральными линиями;

— для каждого i -го бина в выделенной области со средним значением энергии μ_i генерируется спектр с распределением Гаусса $G_i = (N_i, \mu_i, \sigma_i)$, где $N_i = S_i m$ — число генерируемых точек, S_i — число отсчетов в i -м бине исходного спектра, m — константа порядка 10^3 для «регуляризации» статистических флуктуаций, $\sigma_i = \sigma_E^{\text{MC}} \mu_i$, σ_E^{MC} — энергетическое разрешение детектора на данной энергии, закладываемое в моделирование;

— сгенерированные спектры гауссианов G_i для всех бинов в выделенной области суммируются:

$$S_{\text{model}} = \frac{1}{m} \sum_i G_i;$$

— учитывается эффективность регистрации фотонов детектором в соответствии с экспоненциальным законом Бугера–Ламберта–Бера:

$$\varepsilon(E) = 1 - \exp\left(-\frac{\mu}{\rho}(E)\rho d\right),$$

где ε — вероятность поглощения фотона веществом толщиной d , плотностью ρ , μ/ρ — массовый коэффициент поглощения рентгеновского излучения в веществе, зависящий от энергии фотона.

Так как до проведения калибровки энергетическое разрешение детектора Timerix σ_E^{MC} неизвестно, то для первой итерации моделирования использовалась относительная полуширина пика в обобщенном, т. е. просуммированном по всем пикселям, ToT-спектре. Это значение σ_E^{MC} оказалось в 1,5–2 раза больше, чем σ_E^{meas} для реального энергетического спектра, снятого детектором Timerix. Соответственно, требовалось проведение повторного моделирования с уточненными значениями σ_E^{MC} . Такой итеративный процесс можно вести до тех пор, пока разность между σ_E^{MC} и σ_E^{meas} не станет малой. Как правило, двух итераций оказывается достаточно.

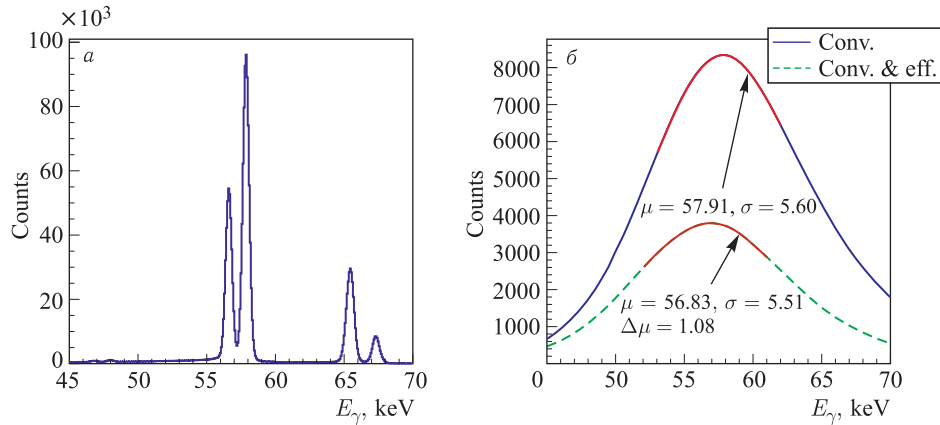


Рис. 11 (цветной в электронной версии). Спектр характеристического излучения тантала в диапазоне 45–70 кэВ: *a*) измеренный германиевым детектором Canberra; *б*) смоделированный, представляющий собой свертку спектра измеренного детектором Canberra с разрешением детектора Timerix (синий, верхняя кривая), и с учетом разрешения детектора Timerix плюс поглощение в GaAs (зеленый, нижняя кривая)

На рис. 11 показаны фрагменты спектра характеристического излучения Та, измеренного с помощью германиевого детектора Canberra и смоделированного согласно описанию выше. После того как при моделировании стала учитываться эффективность сенсора из арсенида галлия толщиной 500 мкм, изменилась не только форма спектра (см. рис. 11, б), но и, что более важно, значение в его максимуме ($\Delta\mu = 1,08$ кэВ). Таким Monte-карло-моделированием было достигнуто более точное определение энергии в реперных спектральных пиках, что позволяет улучшить точность калибровки детектора Timerix.

2.3. Обобщенная калибровка детектора Timerix. Исходными данными для обобщенной калибровки детектора Timerix являются суммарные ToT-спектры, полученные путем суммирования статистики со всех пикселей, примеры которых приведены на рис. 12. Такой подход позволяет быстро откалибровать детектор, поскольку время сбора данных в этом случае на несколько порядков меньше, чем при попиксельной калибровке, где рассматриваются распределения в каждом отдельном пикселе матрицы. Но точность обобщенной калибровки невысокая, так как не учитываются различия между пикселями, определяемые материалом сенсора и качеством сборки детектора.

При наборе статистики для устранения влияния эффекта разделения заряда [12] выбирались только одиночные события, когда прохождение частицы вызывает срабатывание только одного пикселя. Эффект разделения заряда состоит в том, что единичный поглощенный фотон создает сигнал в кластере, состоящем из нескольких соседних пикселей. Это происходит, потому что электронно-дырочное облако, созданное прошедшей частицей, увеличивается в процессе дрейфа к электродам, и в итоге заряд может быть зарегистрирован несколькими пикселями, составляющими кластер.

Важным этапом калибровки является фитирование интересующих спектральных пиков, чтобы извлечь из них количественную информацию о их положении и ширине. Пики в суммарных спектрах имеют форму нормального распределения, поэтому они

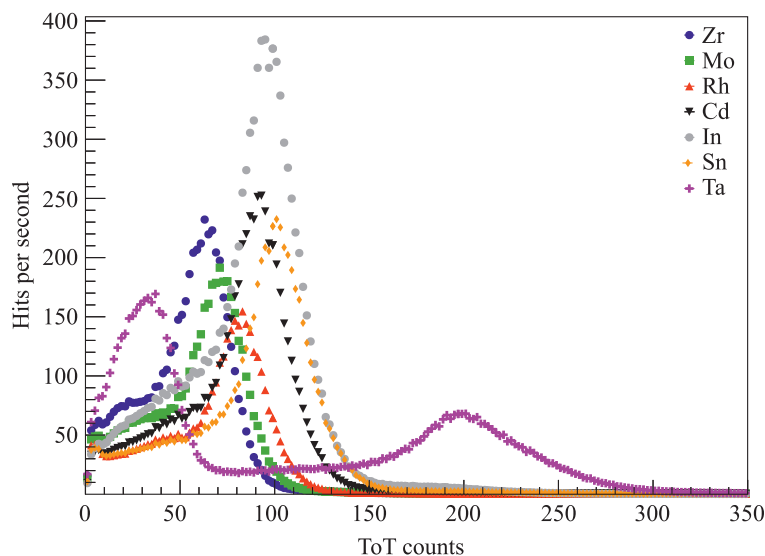


Рис. 12. Примеры суммарных ToT-спектров от различных металлов, используемых для обобщенной калибровки детектора Timerix

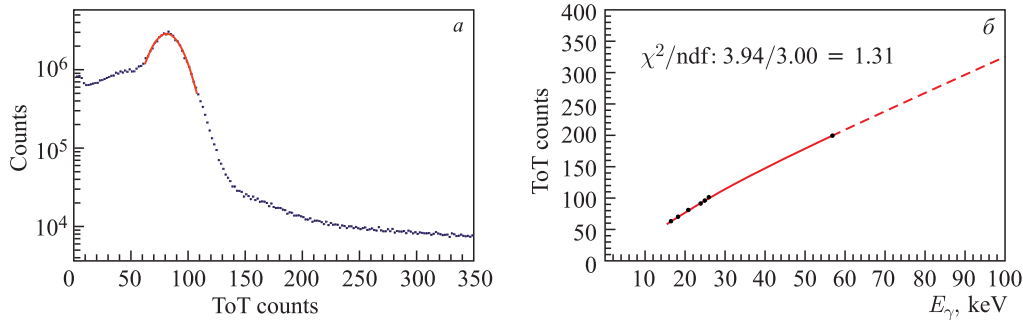


Рис. 13. *a*) Пример фитирования обобщенного ToT-спектра характеристического излучения родия с помощью функции распределения Гаусса; *б*) обобщенная калибровочная кривая, построенная по семи точкам: Zr, Mo, Rh, Cd, In, Sn, Ta

были профитированы с помощью функции распределения Гаусса с индивидуальными параметрами для каждого характеристического спектра, как это показано для спектра родия на рис. 13, *a*.

Зная значения ToT в пиках суммарных некалиброванных спектров и энергии характеристических линий, найденные с помощью монте-карло-моделирования, можно построить точечную диаграмму $ToT(E)$. Фитирование этих точек проводилось следующим образом: в диапазоне энергий 25–100 кэВ точки фитируются прямой $aE + b$ и находятся параметры a и b , а также ошибки их определения. Эти значения ошибок задают диапазон изменения для параметров a и b при фитировании функцией (1) всех точек в диапазоне энергий 15–100 кэВ. В итоге находятся все четыре параметра a , b , c , t . Результат обобщенной калибровки детектора Timerix (№E11-W0110) в диапазоне энергий 15–100 кэВ представлен на рис. 13, *б* с полученными значениями параметров: $a = 2,78$, $b = 57,25$, $c = 1020$, $t = -8,96$.

2.4. Попиксельная калибровка детектора Timerix. Поскольку все пиксели дают несколько разный отклик на прохождение частицы с определенной энергией, для получения максимального энергетического разрешения детектора, параметры калибровочной кривой должны быть определены для каждого пикселя индивидуально. Основная идея калибровочного процесса остается той же, что и при обобщенной калибровке, поэтому ниже будут обсуждаться особенности попиксельной калибровки и ее автоматизация.

При попиксельной калибровке рассматриваются ToT-спектры, полученные в каждом отдельном пикселе. Таким образом, один детектор Timerix дает 65536 ToT-спектров для каждой точки энергии на калибровочной кривой, которые требуется обработать и проанализировать. Для получения достоверных результатов фитирования попиксельных спектров в каждом пикселе необходимо собрать большую статистику. Подавляющая часть измерений проводилась из расчета 1000 событий на один пиксель. Для автоматизации процедуры попиксельной калибровки был разработан и реализован следующий алгоритм:

- набор необходимой статистики для построения попиксельных ToT-спектров характеристического излучения выбранного элемента;
- выделение в спектре одного пикселя части, которая содержит пик с известной энергией (окрестность пика выбирается индивидуально для каждого спектра);
- фитирование выбранной части спектра с помощью комбинированной функции.

Так как форма спектров различных источников меняется от пикселя к пикселю, пределы на параметры фитирующей функции подбираются для каждого ТоТ-спектра индивидуально для обеспечения лучшей сходимости фита, а диапазон фитирования определяется как некоторая окрестность бина с максимальным значением ТоТ. При фитировании использовался метод правдоподобия (likelihood), как дающий лучшие результаты в случае малой статистики. Если пиксель не работает или работает некорректно, результат фитирования распределения событий в нем заменяется на результат фитирования обобщенного спектра.

Эта процедура проводится с использованием всех выбранных материалов мишеней. После того как набрано достаточное число точек, проводится калибровочная кривая для каждого пикселя в отдельности аналогично случаю обобщенной калибровки. В итоге получают 65536 кривых, устанавливающих связь между измеряемым детектором значением ТоТ в пикселе и реальной энергией излучения.

Форма получаемых детектором Timerix попиксельных спектров асимметрична и отлична от формы нормального распределения. Особенно это существенно в нелинейной части калибровочной кривой (см. рис. 10), где большое влияние оказывают шумы и наводки между пикселями. Поэтому фитирование попиксельных спектров с помощью гауссиана дает систематически ошибочные результаты и для фитирования попиксельных спектров была смоделирована следующая функция, представляющая собой сумму квадратичного полинома (для учета вносимых шумов) и функции распределения Гаусса:

$$F = \begin{cases} K \exp\left(-\frac{(\text{ToT} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), & \text{если } \text{ToT} > \mu; \\ K \exp\left(-\frac{(\text{ToT} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + a \cdot \text{ToT}^2 + b \cdot \text{ToT} + c, & \text{если } \text{ToT} < \mu; \end{cases} \quad (3)$$

с дополнительным условием на квадратичный полином: $a\mu^2 + b\mu + c = 0$.

На рис. 14 показаны результаты фитирования ТоТ-спектров характеристического излучения родия и тантала, зарегистрированных одним из пикселей. Хорошо видны отличия фитов чистым гауссианом (черная линия, 1) и комбинированной функцией (3) (красная линия, 2). Зеленой (3) и фиолетовой (4) пунктирными линиями обозначены вклады в комбинированную функцию от распределения Гаусса и квадратичного полинома соответственно.

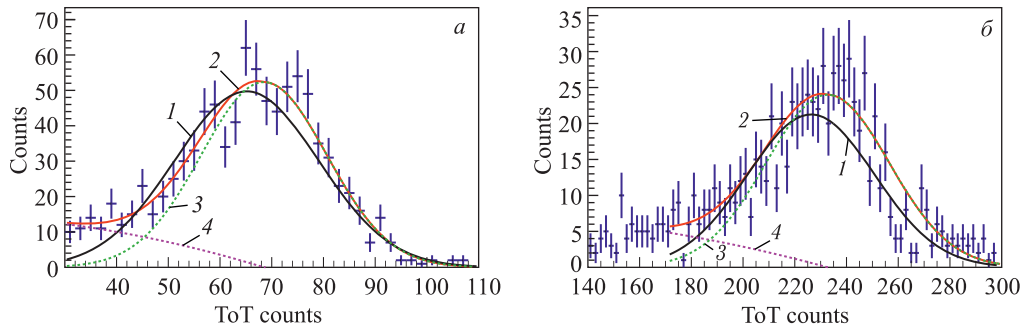


Рис. 14 (цветной в электронной версии). Пример фитирования функцией (3) ТоТ-спектра характеристического излучения а) родия; б) тантала. Пояснения см. в тексте

Распределения положений пика по значениям ToT, построенные для всех пикселей матрицы детектора, изображены на рис. 15 для спектров родия и тантала. Эти рисунки наглядно иллюстрируют сдвиг спектрального пика от пикселя к пикселю, что является основной мотивацией для проведения попиксельной калибровки. «Выбросы» на рис. 15 обусловлены неработающими или некорректно работающими пикселями, для которых значение ToT-пика устанавливалось равным среднему значению рассматриваемого пика обобщенного спектра.

Зная, как меняются значения ToT спектрального максимума в разных пикселях, можно построить калибровочные кривые (1) для каждого из них аналогично тому, как это было сделано при обобщенной калибровке. На рис. 16 такие кривые представлены для 32 пикселей. Также для сравнения на рис. 16 приведена обобщенная калибровочная кривая. Количество «плохих» фитов уменьшается с ростом числа статистических данных в пикселе, но всегда есть пиксели, которые исходно были неработающими в результате дефектов сборки либо были испорчены в процессе их эксплуатации. Для большинства пикселей (~ 85 %) матрицы детектора Timerix (№ E11-W0110) фитирование спектров проходит без каких бы то ни было проблем. Таким образом, результатом попиксельной калибровки детектора Timerix являются четыре 256×256 матрицы с 65536 наборами параметров a , b , c , t для функции (1).

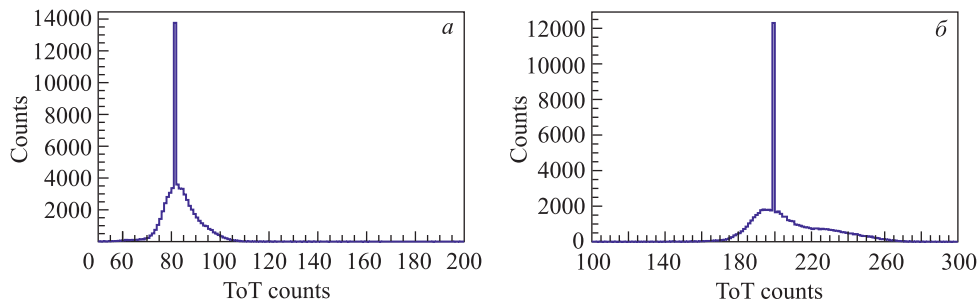


Рис. 15. Распределение положений максимума фитируемого пика в спектре характеристического излучения а) родия; б) тантала

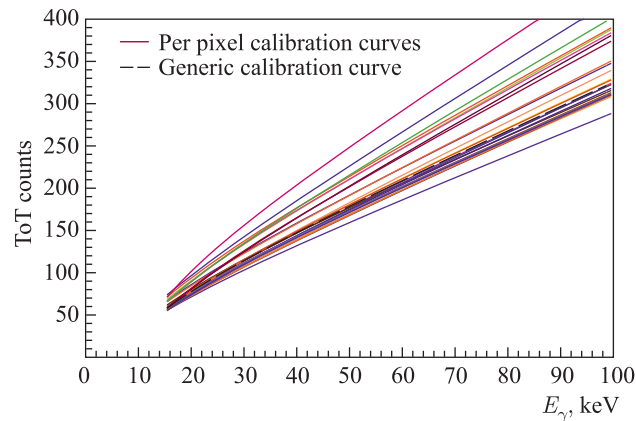


Рис. 16 (цветной в электронной версии). Калибровочные кривые для отдельных пикселей (тонкие линии) и обобщенная калибровочная кривая (красная пунктирная линия)

2.5. Сравнение результатов обобщенной и попиксельной калибровок. После проведения двух видов калибровки детектора Тимерих естественно изучить вопрос: как меняется его энергетическое разрешение σ/E в зависимости от вида калибровки. Для наглядности на рис. 17 приведены просуммированные¹ по всем пикселям энергетические спектры характеристического излучения циркония и тантала, полученные после обобщенной и попиксельной калибровок детектора Тимерих. Из рассматриваемого рисунка видно, что попиксельная калибровка заметно улучшает разрешение детектора и форму реконструируемых спектров.

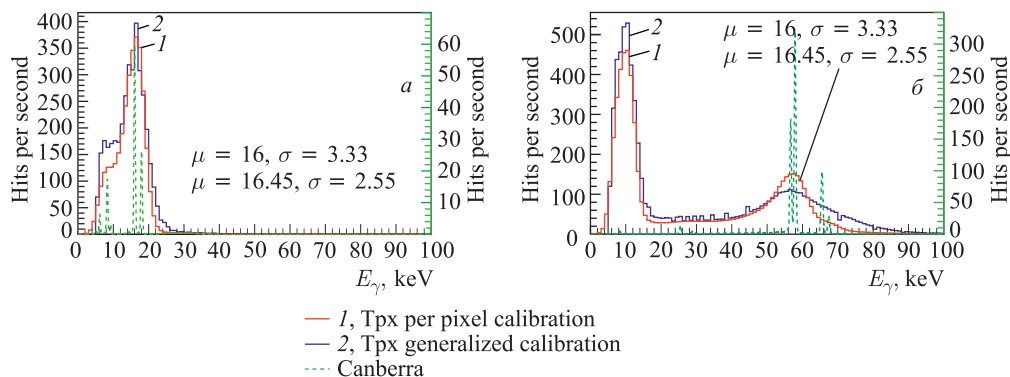


Рис. 17 (цветной в электронной версии). Спектр характеристического излучения а) циркония; б) тантала после попиксельной (красная линия, 1) и обобщенной (синяя линия, 2) калибровок

Таблица 4. Заложённое в расчет методом Монте-Карло и измеренное энергетическое разрешение детектора Тимерих (№ E11-W0110) после обобщенной и попиксельной калибровки

Элемент	Метод Монте-Карло			Обобщенная калибровка			Попиксельная калибровка		
	σ	E	$\sigma/E, \%$	σ	E	$\sigma/E, \%$	σ	E	$\sigma/E, \%$
⁴⁰ Zr	2,782	16,50	16,9	3,332	15,99	20,8	2,545	16,45	15,5
⁴² Mo	2,821	18,26	15,4	3,492	17,94	19,5	2,59	18,19	14,2
⁴⁵ Rh	2,792	20,93	13,3	3,661	20,55	17,8	2,562	20,87	12,3
⁴⁸ Cd	3,049	23,85	12,8	3,951	23,19	17,4	2,766	23,38	11,8
⁴⁹ In	3,037	24,92	12,2	4,245	24,56	17,3	2,825	24,63	11,4
⁵⁰ Sn	3,121	25,92	12,0	4,468	26,00	17,2	2,936	25,96	11,3
⁷³ Ta	5,655	56,91	9,9	8,602	56,64	15,2	4,641	56,98	8,1

Для количественного сравнения двух типов калибровки одиночные пики, соответствующие известной энергии излучения в однокластерных откалиброванных спектрах, просуммированных по всем пикселям, были отфитированы распределением Гаусса и посчитаны соотношения полуширины к среднему значению гауссианов для обобщенно и попиксельно откалиброванных спектров. Полученные таким образом значения для разрешения детектора $\sigma_E = \sigma/E$ в зависимости от энергии, а также сами значения энергии

¹ Везде на рис. 17–19 приводятся спектры, просуммированные по всем пикселям.

в реперных точках калибровки, приведены в табл. 4 (после двух итераций монте-карло-моделирования, как было описано выше).

На рис. 18, *а* изображен спектр характеристического излучения молибдена, измеренный с помощью германиевого детектора Canberra в диапазоне энергий 10–30 кэВ. На его основе смоделирован спектр с учетом эффективности и разрешения детектора Timerix с сенсором из GaAs:Cr, изображенный на рис. 18, *б*. На рис. 18, *в* показан аналогичный спектр, измеренный попиксельно откалиброванным детектором Timerix (№ E11-W0110). Видно, что эти спектры имеют пики с близкими значениями по энергии (в пределах ошибки фитирования). Стоит отметить, что при моделировании не учитывались шумы в электронике детектора Timerix и эффект разделения заряда, что обуславливает различие рассматриваемых спектров в области низких энергий.

Как следует из табл. 4, проведение попиксельной калибровки существенно улучшает энергетическое разрешение детектора Timerix. Причина этого в том, что ToT-спектры, измеряемые каждым пикселем, отличаются друг от друга, причем разница между максимальным и минимальным значением ToT в спектральном максимуме, измеренным разными пикселями, может достигать до 6σ . В диапазоне энергий 15–25 кэВ попиксельная калибровка дает улучшение разрешения детектора в 1,3–1,5 раза, а на энергии 57 кэВ

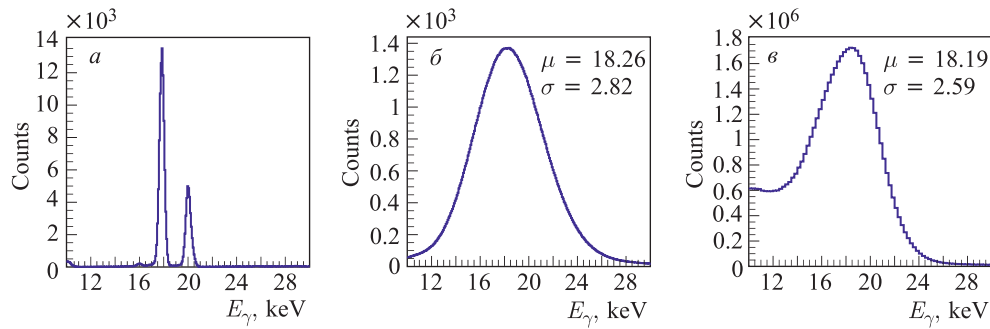


Рис. 18. Спектр характеристического излучения молибдена в диапазоне энергий 10–30 кэВ: *а*) измеренный германиевым детектором Canberra; *б*) смоделированный для детектора Timerix; *в*) измеренный детектором Timerix после попиксельной калибровки

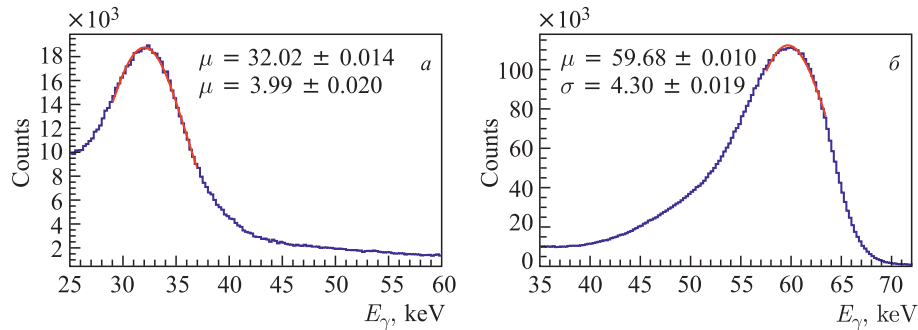


Рис. 19. Спектры, измеренные детектором Timerix после попиксельной калибровки, от γ -радиоактивных источников: *а*) ^{137}Cs ($E_\gamma = 32,18$ кэВ); *б*) ^{241}Am ($E_\gamma = 59,54$ кэВ)

разрешение улучшается приблизительно в два раза по сравнению с обобщенной калибровкой.

Чтобы оценить качество проведенной энергетической калибровки детектора Timepix, были измерены γ -спектры от радиоактивных источников цезия (^{137}Cs , $E_\gamma = 32,18$ кэВ) и америция (^{241}Am , $E_\gamma = 59,54$ кэВ). Как видно из рис. 19, положения пиков в измеренных спектрах отличаются от табличных меньше чем на 0,5 %, при этом энергетическое разрешение равно 12,5 % для 32 кэВ и 7,2 % для 60 кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе подробно описана разработанная процедура калибровки пиксельных детекторов Timepix. В калибровке используются характеристические линии в спектрах рентгеновского излучения, которые были получены путем свертки спектров, измеренных прецизионным германиевым спектрометром LEGe Canberra GL0515R с разрешением и эффективностью сенсора из GaAs:Cr. К преимуществам использования рентгеновского характеристического излучения стоит отнести высокую скорость набора необходимой статистики (рассмотренную процедуру можно повторить с использованием набора эталонных радиоактивных γ -источников, но время сбора данных при этом увеличивается на порядок). Точность получаемой энергетической шкалы в диапазоне энергий 15–100 кэВ для однопиксельных кластеров составляет $\sim 0,5$ %.

Благодаря применению попиксельной калибровки удалось достичь хорошего энергетического разрешения детектора Timepix с сенсором из GaAs:Cr: ~ 8 % на 60 кэВ и ~ 13 % на 20 кэВ (для однопиксельных кластеров). Улучшения качества калибровки в низкоэнергетической части спектра (5–15 кэВ) можно добиться увеличением в этой области числа реперных точек, по которым проводятся калибровочные кривые. В случае, если разброс параметров детекторов на основе микросхемы Timepix невелик, т. е. детекторы дают схожие ToT-спектры при одинаковых настройках ЦАП и стабилизованной температуре сенсора, разработанное программное обеспечение позволит проводить попиксельные калибровки детекторов в максимально автоматизированном режиме. Это особенно актуально для установок с большим числом детекторов Timepix.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Medipix Homepage. <http://medipix.web.cern.ch/MEDIPIX/>.
2. Llopert X. et al. Timepix, a 65k Programmable Pixel Readout Chip for Arrival Time, Energy and/or Photon Counting Measurements // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 581. P. 485–494.
3. Ayzenshtat G. I. et al. GaAs Resistor Structures for X-Ray Imaging Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 487. P. 96–101.
4. Рентгеновский аппарат РАП-150МН. <http://www.tsnk-lab.com/content/view/66/3/>.
5. Рентгеновский аппарат SB120-350. <http://www.sourceray.com/oem>.
6. Германиевый детектор LEGe Canberra GL0515R. <http://www.canberra.ru/html/products/detectors/ge/lege.htm>.
7. Tlustos L., Shelkov G., Tolbanov O. Characterisation of a GaAs(Cr) Medipix2 Hybrid Pixel Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 633. P. 103–107.

8. *Kraus V. et al.* FITPix — Fast Interface for Timepix Pixel Detectors // *J. Instr.* 2011. V. 6. C01079.
9. *Jakubek J. et al.* Pixel Detectors for Imaging with Heavy Charged Particles // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2008. V. 591. P. 155–158.
10. *Jakubek J.* Precise Energy Calibration of Pixel Detector Working in Time-Over-Threshold Mode // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 663. P. 262–266.
11. *Turecek D. et al.* Pixelman: A Multi-Platform Data Acquisition and Processing Software Package for Medipix2, Timepix and Medipix3 Detectors // *J. Instr.* 2011. V. 6. C01046.
12. *Soukup P. et al.* Dynamics of Charge Collection in Pixelated Semiconductor Sensor Studied with Heavy Ions and Timepix // *Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. (NSS/MIC).* Anaheim, 2012. P. 4184–4187.

Получено 11 апреля 2014 г.