

КАЛИБРОВКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ФОТОНОВ И ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПИКСЕЛЬНОМ GaAs ДЕТЕКТОРЕ ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К. А. Воробьев,¹ С. А. Доронин,² К. И. Жуков,³ И. Н. Жутиков,² В. С. Попов,^{2,*}
С. Ю. Смирнов,² Ю. С. Смирнов,² П. Е. Тетерин,² В. О. Тихомиров⁴

¹Университет Дьюка, Дарем, Северная Каролина, США

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Университет Индианы в Блумингтоне, Блумингтон, США

⁴Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

В работе представлена методика энергетической калибровки пиксельного GaAs:Cr+Ti-детектора переходного излучения. Определены энергетические поправки для многопиксельных кластеров, учитывающие перераспределение заряда между пикселями и пороговые потери. Показано, что учёт захвата носителей заряда в объёме GaAs-сенсора улучшает согласие экспериментальных спектров с моделированием.

1. ВВЕДЕНИЕ

Идентификация заряженных частиц является важной задачей в физике высоких энергий. Одним из методов идентификации ультрарелятивистских частиц стала регистрация переходного излучения, возникающего при пересечении заряженной частицей границ раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Детекторы переходного излучения применяются для разделения электронов и адронов и рассматриваются как перспективный инструмент идентификации частиц в области больших энергий [1–3].

В настоящей работе рассматривается прототип на основе сенсора GaAs:Cr толщи-

* Electronic address: mr.vovapopov@yandex.ru

ной 500 мкм, соединённого с чипом Timerix3 [4]. Сенсор представляет собой матрицу 256×256 пикселей с шагом 55 мкм. Такой детектор за счет малого размера пикселя позволяет пространственно разделить ионизационные потери заряженной частицы от фотонов переходного излучения (ПИ). Данный прототип совмещает возможности координатного детектора и системы идентификации заряженных частиц [5, 6]. Схема детектора представлена на рис. 1. Целью настоящей работы является разработка достоверной модели отклика такого детектора и подготовка экспериментальных данных для сравнения с симуляцией.

2. КАЛИБРОВКА И КОРРЕКЦИЯ ЭНЕРГИИ КЛАСТЕРОВ

В режиме Время-над-Порогом (ToT) чип Timerix3 измеряет не энергию, выделенную в пикселе, а длительность нахождения сигнала выше порога электроники. Поэтому для восстановления энергетических спектров фотонов переходного излучения и ионизационных потерь заряженной частицы необходимо перевести ToT-сигнал в энергетическую шкалу. Поскольку каждый пиксель имеет индивидуальный отклик, связанный с разбросом усиления и порогов каналов, калибровка выполнялась отдельно для каждого из 65536 пикселей. Порог срабатывания электроники в используемых данных примерно соответствовал 3.4 кэВ.

Для поканальной калибровки детектор облучался фотонами известных энергий в диапазоне от 5.95 до 59.5 кэВ при помощи радиоактивных источников и характеристического рентгеновского излучения. В каждом пикселе определялось среднее значение ToT, соответствующее известной энергии. Полученные точки аппроксимировались функцией

$$\text{ToT} = aE + b - \frac{c}{E - t},$$

где E — энергия, выделенная в пикселе, а a , b , c и t — индивидуальные параметры калибровки конкретного пикселя. Параметры a и b задают линейную часть зависимости при больших энергиях, а параметры c и t описывают нелинейность вблизи порога.

Среднее значение ToT для каждой калибровочной линии определялось по результатам аппроксимации ToT-спектра функцией Гаусса. При этом границы аппроксимации выбирались динамически для каждого пикселя отдельно, поскольку фиксированные границы, одинаковые для всех каналов, могут смещать найденное среднее значение за

счёт учёта шумовых срабатываний, не относящихся к полезному сигналу. Это может приводить даже к нарушению монотонности зависимости ToT от энергии, особенно для близких низкоэнергетических линий ^{55}Fe и Fe с энергиями 5.95 и 6.4 кэВ соответственно. Для таких линий диапазон аппроксимации задавался относительно бина с максимальным наполнением с дополнительными ограничениями на нижний предел для эффективного отделения сигнала от шума, а для остальных энергий — по высоте пика. Использование динамического выбора границ аппроксимации уменьшило число пикселей с нарушением монотонности калибровочной зависимости по сравнению с процедурой с фиксированными границами примерно в два раза.

Сработавшие пиксели, близкие по координате и времени регистрации, объединялись в кластеры. Кластером называется группа соседних пикселей, соответствующих одному зарегистрированному событию. Однопиксельным считалось событие, в котором кластер состоит из одного пикселя, а многопиксельным — событие, в котором заряд распределён между несколькими соседними пикселями. При построении калибровочных зависимостей использовались только однопиксельные события, поскольку в этом случае измеренный ToT можно сопоставить с полной энергией поглощённого фотона. Однако в реальных событиях заряд, образованный фотоном или заряженной частицей, может распределяться между несколькими соседними пикселями. В этом случае часть заряда может оказаться ниже порога срабатывания отдельного пикселя и не быть зарегистрирована. Этот эффект разделения заряда проиллюстрирован на рис. 2. Поэтому простое суммирование энергий пикселей в многопиксельном кластере приводит к завышению восстановленной энергии относительно табличного значения, как показано на рис. 3.

Для получения энергетических коррекций для каждой калибровочной линии и для каждого размера кластера определялось положение максимума спектра восстановленной энергии E_{rec} . Затем это значение сравнивалось с табличной энергией соответствующего фотона E_{tab} . Разность

$$\Delta E_n(E_{\text{rec}}) = E_{\text{rec}} - E_{\text{tab}},$$

где n — число пикселей в кластере, характеризует смещение восстановленной энергии для кластеров данного размера. Такие смещения были определены для всех калибровочных энергий, после чего для каждого размера кластера была построена зависимость

ΔE_n от E_{rec} полученная при помощи аппроксимации ломанной кривой состоящей из трех сегментов. Полученные зависимости использовались как энергетические коррекции. Для каждого зарегистрированного кластера сначала вычислялась его энергия как сумма откалиброванных энергий входящих в него пикселей, затем по размеру кластера и восстановленной энергии выбиралась соответствующая поправка. Исправленная энергия определялась как разность E_{rec} и $\Delta E_n(E_{\text{rec}})$. После применения таких поправок положения максимумов калибровочных спектров согласуются с табличными энергиями фотонов. В последующем анализе коррекции применяются ко всем полученным данным, а также к результатам моделирования

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА

Для описания экспериментальных спектров использовалась Монте-Карло модель отклика детектора, учитывающая энерговыделение заряженной частицы, фотоэффект и эффект Комптона, транспорт носителей заряда, шумы электроники, порог срабатывания пикселей и перекрёстные наводки между соседними каналами [3, 7]. Отклик на заряженную частицу моделировался как сумма энерговыделений в 50 условных слоях сенсора, параллельных плоскости считывающей электроники, где в каждом слое энергия определялась согласно распределению Ландау с параметрами $E_{\text{mpv}} = 4.3$ кэВ и $\sigma_L = 0.725$ кэВ. Выбор этих параметров обеспечивал наилучшее согласие положения и ширины максимума смоделированного спектра с экспериментальным распределением, которое хорошо описывается свёрткой распределения Ландау и гауссовой функции. Сравнение экспериментального спектра частицы с моделированием приведено на рис. 4.

Разработанная модель хорошо описывает энергетические спектры и угловые распределения фотонных кластеров ПИ, расположенных на достаточном расстоянии от кластера ионизационных потерь заряженной частицы. Однако при приближении фотонного кластера к треку частицы возникают расхождения между экспериментальными данными и моделированием. Это указывает на необходимость учёта дополнительных эффектов, вклад которых существенно зависит от расстояния между кластером фотона ПИ и заряженной частицей. В частности, таким эффектом является наведённый сигнал от носителей заряда, захваченных на ловушках в объёме GaAs-сенсора.

Захваченные на дефектах носители заряда не собираются непосредственно на элек-

тродах и поэтому не входят в обычный вклад собранного заряда. Однако они создают наведённый сигнал на пиксельной плоскости, который влияет на амплитуды сигналов в соседних каналах. Этот эффект особенно важен вблизи трека заряженной частицы, где энергосодержание значительно больше, чем в кластере отдельного фотона ПИ. В результате захваченный заряд, образованный вдоль трека частицы, может изменять восстановленную энергию фотонных кластеров, зарегистрированных на малом расстоянии от кластера частицы.

Для учёта этого эффекта после моделирования энергосодержания заряженной частицы в каждом слое сенсора рассчитывалось распределение носителей заряда, захваченных в объёме GaAs во время дрейфа. Электроны и дырки дрейфуют в противоположных направлениях, поэтому их вклады в распределение захваченного заряда рассчитывались отдельно. Вероятность захвата описывалась экспоненциальным законом с характерными длинами пробега электронов и дырок, равными 2200 и 80 мкм [7]. При этом вклад каждого условного слоя определялся количеством заряда, образованного в этом слое, и расстоянием, которое носители проходят до захвата.

Полученный профиль захваченного заряда использовался для определения поверхностной плотности наведённого заряда на пиксельной плоскости. Для этого расчета применялся метод изображений для заряда, расположенного между двумя проводящими плоскостями, соответствующими электродам сенсора. Поскольку форма наведённого распределения определяется геометрией детектора и длинами пробега носителей, она не зависит от абсолютной величины энергосодержания. Поэтому пространственный профиль наведённого заряда рассчитывался один раз, а затем для каждого события нормировался на энергию, выделенную частицей в соответствующем слое сенсора.

После этого наведенный сигнал интегрировался по площади каждого сработавшего пикселя. Полученный вклад с учётом его знака добавлялся к заряду, зарегистрированному в соответствующем канале, после чего выполнялось восстановление энергии кластера. Таким образом, в модели учитывалось влияние носителей, захваченных на треке заряженной частицы, на амплитуды сигналов в пикселях, относящихся как к кластеру частицы, так и к близко расположенным фотонным кластерам.

Как видно из рис. 5, без учёта наведённого сигнала моделирование хуже описывает энергетический спектр фотонов ПИ в области малых энергий. Введение этого вклада уменьшает расхождение между экспериментальными данными и результатами моде-

лирования, что подтверждает необходимость учёта захваченного заряда при описании отклика детектора вблизи трека заряженной частицы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм попиксельной энергетической калибровки детектора переходного излучения на основе GaAs:Cr-сенсора и чипа Timerix3. Продемонстрировано влияние разделения заряда на восстановленную энергию многопиксельных кластеров и получены энергетические коррекции для кластеров разного размера. В модель отклика детектора был введен эффект захвата заряда, устранивший расхождение в описании энергетических спектров фотонов ПИ. Уточнены параметры модели энерговыделения заряженной частицы, что позволило обеспечить хорошее согласие между экспериментальным и смоделированным положением максимума энергетического спектра. Разработанная модель может быть использована для описания детекторов ПИ на основе твердотельных кристаллов с пиксельным съёмом информации.

Авторы работы выражают благодарность Проф. Романюку А.С. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект "Изучение физических явлений микро и макромира для разработки технологий будущего" № FSWU 2026 0010.

-
1. B. Dolgoshein, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **326**, 434 (1993).
 2. A. Andronic and J. P. Wessels, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **666**, 130 (2012).
 3. M. Albrow, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1055**, 168535 (2023).
 4. T. Poikela, *et al.*, JINST **9**, C05013 (2014).
 5. J. Alozy, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **961**, 163681 (2020).
 6. F. Dachs, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **958**, 162037 (2020).
 7. J. Alozy, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1090**, 171597 (2026).

CALIBRATION AND SIMULATION OF PHOTON AND CHARGED-PARTICLE ENERGY DEPOSITION IN A PIXEL GaAs TRANSITION RADIATION DETECTOR

S. A. Doronin¹, V. S. Popov¹, S. Yu. Smirnov¹, Yu. S. Smirnov¹, P. E. Teterin¹,
V. O. Tikhomirov², K. A. Vorobyev³, K. I. Zhukov⁴, I. N. Zhutikov¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

²*P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Duke University, Durham, North Carolina, USA*

⁴*Indiana University Bloomington, Bloomington, USA*

A method for energy calibration of a pixel transition radiation detector based on a GaAs:Cr sensor bonded to a Timepix3 chip is presented. Energy corrections for multipixel clusters are derived, taking into account charge sharing between pixels and threshold losses. It is shown that including charge-carrier trapping in the GaAs sensor volume improves the agreement between the experimental spectra and the simulation.

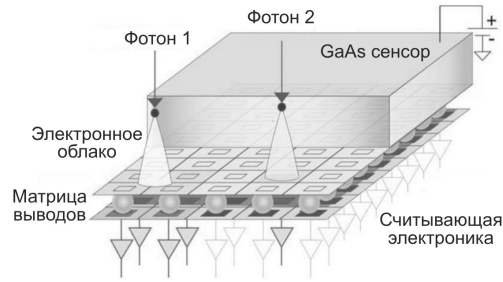


Рис. 1. Схема работы пиксельного детектора на основе GaAs:Cr+Ti:epix3.

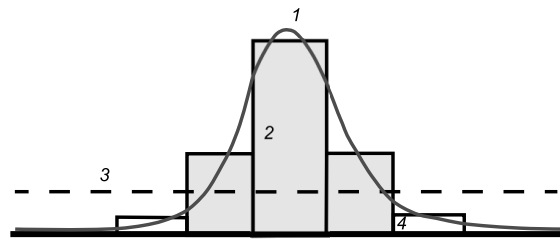


Рис. 2. Схематичное представление эффекта разделения и потери заряда. 1 — распределение заряда; 2 — зарегистрированный заряд; 3 — порог срабатывания электроники; 4 — потерянный заряд.

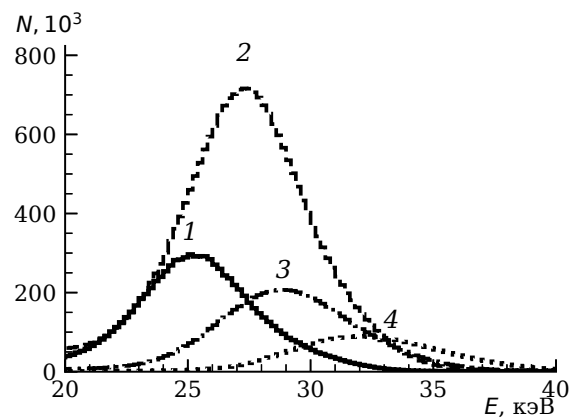


Рис. 3. Спектры восстановленной энергии кластеров для линии Sn с энергией 25.3 кэВ до применения коррекции. Цифры на графике соответствуют количеству пикселей в кластере.

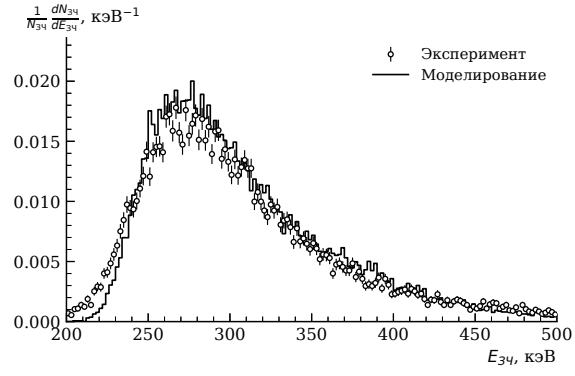


Рис. 4. Распределение энергии кластеров заряженной частицы: экспериментальные данные, моделирование.

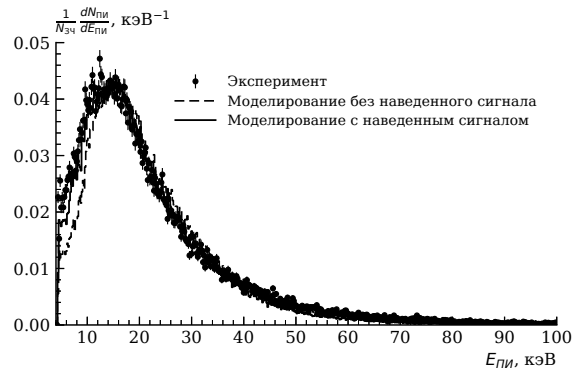


Рис. 5. Распределение энергии фотонных кластеров при условии $\theta < 4$ мрад, нормированное на количество заряженных частиц: экспериментальные данные, моделирование без учета наведенного сигнала и моделирование с учетом наведенного сигнала.