

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

К. А. Воробьев,<sup>1</sup> С. А. Доронин,<sup>2</sup> К. И. Жуков,<sup>3</sup> И. Н. Жутиков,<sup>2</sup> В. С. Попов,<sup>2,\*</sup>  
С. Ю. Смирнов,<sup>2</sup> Ю. С. Смирнов,<sup>2</sup> П. Е. Тетерин,<sup>2</sup> В. О. Тихомиров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Университет Дьюка, Дарем, Северная Каролина, США

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>3</sup>Университет Индианы в Блумингтоне, Блумингтон, США

<sup>4</sup>Физический 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](mailto:mr.vovapopov@yandex.ru)

ной 500 мкм, соединённого с чипом Timerix3 [4]. Сенсор представляет собой матрицу  $256 \times 256$  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 ТоТ от энергии, особенно для близких низкоэнергетических линий  $^{55}\text{Fe}$  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 полувысоте пика. Такой подход повышал точность определения калибровочных точек.

При построении калибровочных зависимостей использовались только однопиксельные события, что позволяет сопоставлять измеренный ТоТ 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. Основываясь на разности восстановленной и табличной энергии, были получены энергетические коррекции для кластеров разного размера. После применения коррекций восстановленная энергия совпадает с табличными значениями. 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 распределени-

ем, 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 электродах, однако создают наведённый сигнал на пиксельной плоскости. После моделирования энерговыделения пучковой частицы в слое детектора рассчитывалось распределение носителей заряда, захваченных в объёме сенсора во время дрейфа. Вероятность захвата описывалась экспоненциальным законом с длинами пробега электронов и дырок, равными 2200 и 80 мкм соответственно [7]. Поверхностная плотность заряда, наведённого захваченными носителями на пиксельной плоскости, определялась методом изображений. Поскольку форма этого распределения зависит только от геометрии детектора и длин пробега носителей, она рассчитывалась один раз, после чего нормировалась на энергию, выделенную частицей в данном слое. Затем наведённый сигнал интегрировался по площади каждого сработавшего пикселя и добавлялся к зарегистрированному заряду в соответствующем канале. Влияние учёта наведённого сигнала на энергетические спектры фотонов ПИ показано на рис. 5.

#### 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 энерго-

выделения 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 съемом 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. Doronin<sup>1</sup>, V. S. Popov<sup>1</sup>, S. Yu. Smirnov<sup>1</sup>, Yu. S. Smirnov<sup>1</sup>, P. E. Teterin<sup>1</sup>,  
V. O. Tikhomirov<sup>2</sup>, K. A. Vorobyev<sup>3</sup>, K. I. Zhukov<sup>4</sup>, I. N. Zhutikov<sup>1</sup>

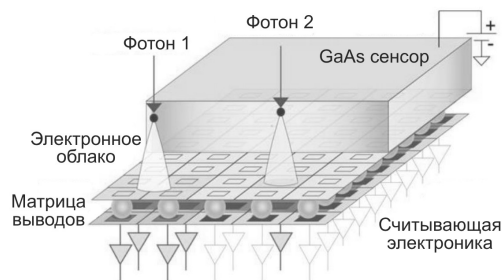
<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

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

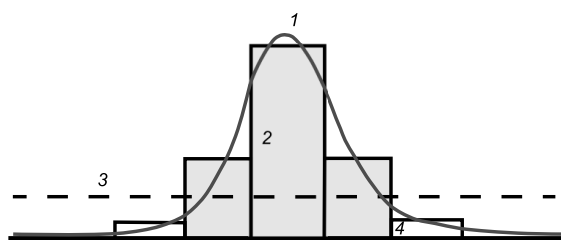
<sup>3</sup>*Duke University, Durham, North Carolina, USA*

<sup>4</sup>*Indiana University Bloomington, Bloomington, USA*

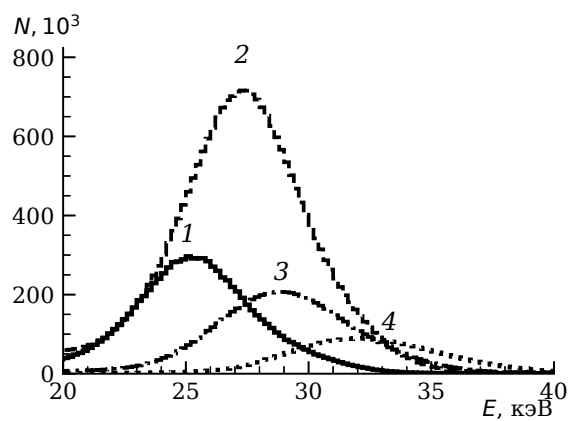
A method for energy calibration of a pixel transition radiation detector based on a GaAs:Cr sensor bonded to a Timepix3 chip is presented. Energy corrections for multipixel clusters are derived, taking into account charge sharing between pixels and threshold losses. It is shown that including charge-carrier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



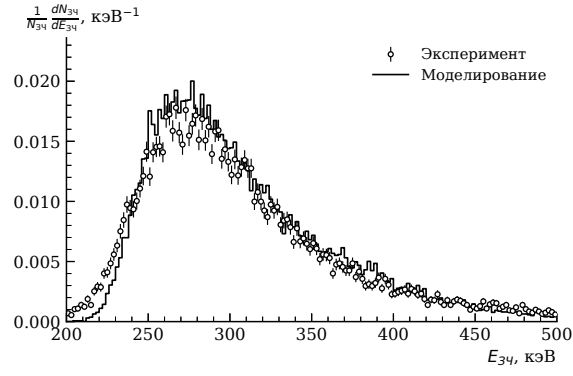
**Рис. 1.** Схема работы пиксельного детектора на основе GaAs:Cr+Ti:epix3.



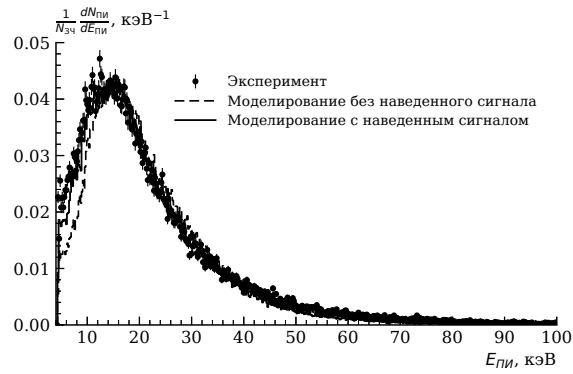
**Рис. 2.** Схематичное представление эффекта разделения и потери заряда. 1 — распределение заряда; 2 — зарегистрированный заряд; 3 — порог срабатывания электроники; 4 — потерянный заряд.



**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.