

## НОВАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ПИКСЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*А. Рахматуллина*\*, *В. Жеребчевский*, *Н. Мальцев*,  
*Д. Нестеров*, *Д. Пичугина*, *Н. Прокофьев*

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Калориметрия играет важную роль как в экспериментальных исследованиях в области физики высоких энергий, так и в прикладных исследованиях. Для определения энергии падающих частиц может использоваться цифровая калориметрия, обладающая более высоким энергетическим разрешением по сравнению с аналоговыми калориметрами. В данной работе предложен новый тип цифрового электромагнитного калориметра на основе кремниевых пиксельных детекторов для определения характеристик пучка ускоренных электронов, представлена концепция такого калориметра с соответствующими результатами модельных расчетов.

Calorimetry plays an important role both in experimental studies in high energy physics and in applied research. For determination of incident particles energy with higher energy resolution the digital calorimetry can be used. The digital electromagnetic calorimeter includes the segmented layers and counts the total number of particles passing through the detector volume as opposed to an analogue calorimeter, which counts the total deposited energy in a given volume. In this work the new type of digital electromagnetic calorimeter, based on silicon pixel sensors, has been proposed for the identification of electron beam parameters. The conception of such a calorimeter was provided together with the experimental results from beam tests and GEANT4 Monte Carlo simulations.

PACS: 07.20.Fw; 29.40.-n; 29.40.Vj

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня калориметрия играет ключевую роль как в экспериментальных исследованиях в фундаментальной ядерной физике, так и в прикладных исследованиях. Электромагнитные и адронные калориметры активно используются практически во всех экспериментах в области физики высоких энергий и элементарных частиц [1]. В прикладных задачах цифровые калориметры могут применяться при создании новых диагностических комплексов в ядерной медицине [2]. Поэтому для прецизионного определения энергии регистрируемых заряженных частиц

---

\* E-mail: [alina.rakhmatullina@cern.ch](mailto:alina.rakhmatullina@cern.ch)

в рамках этих задач необходимо использовать новые методы цифровой калориметрии [3].

Цифровые калориметры состоят из нескольких сегментированных слоев и регистрируют общее количество частиц пучка, проходящих через объем детектора, в то время как аналоговые калориметры определяют общую потерянную частицами энергию в данном объеме. Цифровые калориметры имеют высокую степень гранулярности по сравнению с другими типами калориметров, поэтому электромагнитные ливни (вызванные различными частицами) могут быть зарегистрированы с высокой точностью. В работе представлен новый тип компактного цифрового электромагнитного калориметра на основе кремниевых пиксельных сенсоров для определения энергии пучка электронов в диапазоне энергий до 200 МэВ.

Цифровой калориметр разрабатывается на базе существующей экспериментальной установки, предназначенной для исследования характеристик монолитных активных пиксельных детекторов (МАПД). Предполагается, что такие детекторы будут использованы при создании внутренней трековой системы (вершинный детектор) эксперимента MPD на коллайдере NICA [4].

В данной работе представлена концепция цифрового калориметра, состоящего из четырех слоев кремниевых пиксельных детекторов и свинцовых поглотителей. Проведены расчеты параметров поглотителей исходя из геометрических характеристик существующей экспериментальной установки и предполагаемых параметров электронного пучка, разработана методика определения энергии налетающих частиц с использованием цифрового калориметра. Были сделаны модельные оценки всей калориметрической системы с использованием пакета GEANT4 (для различных энергий и толщин поглотителей) для определения оптимальных параметров калориметра.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состоит из четырех детектирующих плоскостей. Каждая плоскость содержит прототип чипа монолитных активных пиксельных сенсоров размерами  $1,5 \times 3,0$  см и толщиной 50 мкм, установленных на несущих конструкциях вместе с соответствующими платами сопряжения детекторов с ПК (DAQ board). Детекторные модули работают в телескопном режиме с запуском от триггерной системы (сцинтилляционные детекторные модули, включенные в схему совпадений, расположены перед и за плоскостями с прототипами МАПД). Расстояние между детекторными плоскостями может меняться в зависимости от экспериментальных задач. В режиме калориметра это расстояние выбирается и фиксируется на основе данных монте-карло-моделирования в пакете GEANT4.

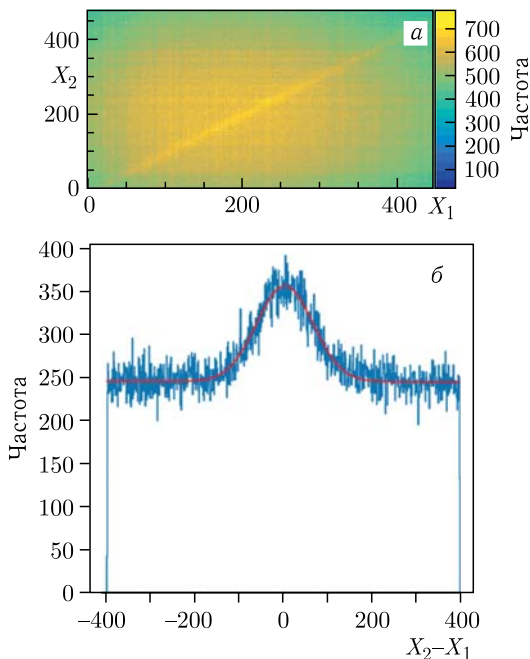


Рис. 1. Корреляции между пиксельными кластерами по оси  $X$  между соседними детекторными плоскостями ( $X_1$  и  $X_2$ )

Характеристики прототипов модулей МАПД и всей установки исследовались в экспериментах с регистрацией заряженных частиц космических лучей, а также в экспериментах на линейном ускорителе электронов (до энергии 200 МэВ) LINAC-200 в ОИЯИ. В ходе регистрации частиц космических лучей были идентифицированы треки этих частиц с довольно высоким пространственным разрешением. В экспериментах по регистрации электронов с энергиями 50 и 200 МэВ наблюдались корреляции между пиксельными кластерами (группа прилегающих друг к другу сработавших пикселей). Появление этих корреляций связано с тем, что координаты центров кластеров в разных плоскостях линейно связаны. На рис. 1, *а* такая корреляция отчетливо наблюдается в плоскости регистрации частиц по оси  $X$  в виде наклонной прямой на соответствующем двумерном распределении в координатах  $X$  двух соседних плоскостей. Аналогичная картина наблюдалась в плоскости регистрации частиц по оси  $Y$ . Это говорит о практически полном пространственном выравнивании детекторных плоскостей (отклонение от 0, т.е. относительное смещение по осям  $X$  и  $Y$  практически отсутствует, см. рис. 1, *б* для плоскости  $X$ ) и последующем точном восстановлении треков электронов, проходящих через все плоскости МАПД. Таким образом, используя дан-

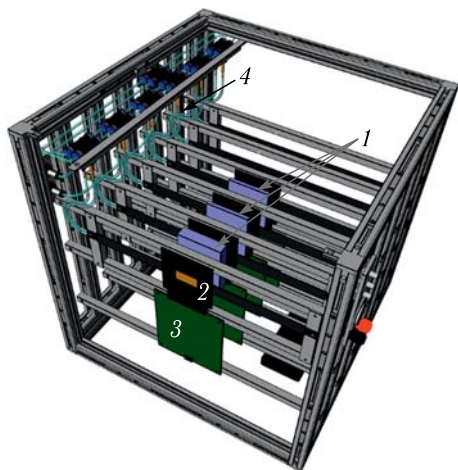


Рис. 2. Экспериментальная установка на основе четырех прототипов монолитных активных пиксельных сенсоров для решения задач цифровой калориметрии

экспериментальной установки, включая элементы системы жидкостного охлаждения (4), расположены на металлическом каркасе и помещены в алюминиевый разборный корпус, предназначенный для экранирования от электромагнитных помех и защиты детекторов от света и внешнего воздействия при проведении эксперимента.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ МОДУЛЕЙ ЦИФРОВОГО КАЛОРИМЕТРА

Современные сегментированные (в том числе и цифровые) калориметры состоят из нескольких слоев чередующихся поглотителей и детекторных модулей. При создании цифрового калориметра важно учитывать как физико-химические характеристики поглотителя, так и особенности взаимодействия регистрируемых частиц с веществом поглотителя. Важная характеристика поглотителя — радиус Мольера  $R_M$  (радиус цилиндра конкретного вещества, в котором поглощается почти 90% энергии электромагнитного ливня). Задачей цифрового калориметра является регистрация как можно большего числа частиц электромагнитного ливня, поэтому при разработке и создании такого калориметра на основе кремниевых пиксельных детекторов возможны следующие варианты:

1) использование поглотителей с малым радиусом Мольера (например, вольфрама:  $R_M = 0,899$  см) [3];

ные детекторы, можно с высокой точностью определять координаты и интенсивность регистрируемых частиц во всех детекторных плоскостях, что послужит отправной точкой для создания цифрового калориметра.

На рис. 2 показана модифицированная экспериментальная установка для решения задач цифровой калориметрии. Данная установка состоит из трех свинцовых поглотителей (1), расположенных между четырьмя детекторными плоскостями, состоящими из прототипов монолитных активных пиксельных сенсоров (2) и соответствующих плат сопряжения детекторов с ПК (3). Все элементы

2) использование нескольких пиксельных детекторов в одном чувствительном слое.

Предложенные варианты сильно усложняют конструкцию и увеличивают стоимость цифрового калориметра. Поэтому, ввиду того, что для определения энергии частиц моноэнергетического пучка электронов (с энергиями до 200 МэВ) продольные размеры электромагнитного ливня (вызванного электронами пучка) зависят от начальной энергии электронов, можно создать довольно простой и компактный калориметр. В таком калориметре энергия электронного пучка будет определяться с учетом регистрации изменения интенсивности частиц пучка в каждом чувствительном слое. В данном случае предлагается использовать поглотитель из свинца (радиус Мольера  $R_M = 1,6$  см). В табл. 1 приведены расчеты длины  $L_{95\%}$  свинцового цилиндра, который будет содержать 95 % электромагнитного ливня (в цилиндре с радиусом  $= 2R_M$  поглощается 95 % энергии ливня), вызванного электронами с энергией  $E$  от 50 до 250 МэВ. Расчеты проводились с использованием формулы [5]:

**Таблица 1. Расчеты продольной характеристики электромагнитного ливня, вызванного прохождением электронов различных энергий в свинцовом поглотителе**

$E$ , МэВ	$L_{95\%}$ , см
10	8,67356
50	9,57485
100	9,96301
200	10,3512
250	10,4761

$$L(95\%) = X_0 \left( \ln \left( \frac{E(Z + 1,24)}{610 \text{ МэВ}} \right) + 0,08Z + 8,6 \right), \quad (1)$$

где  $X_0$  и  $Z$  — радиационная длина и зарядовое число вещества поглотителя;  $E$  — энергия налетающих электронов.

Результаты проведенных расчетов показывают, что продольные размеры электромагнитного ливня в поглотителе заметно отличаются для разных начальных энергий частиц (см. табл. 1). Поэтому интенсивность частиц электромагнитного ливня на определенной глубине свинцового поглотителя тоже зависит от начальной энергии пучка электронов, что может быть применено при создании цифрового калориметра.

В представленной работе моделирование калориметра проводилось с использованием пакета GEANT4 для экспериментальной установки, работающей в телескопном режиме. Основные элементы калориметра показаны на рис. 3. Калориметр состоит из:

- 1 — свинцового коллиматора толщиной 15 см с диаметром внутреннего отверстия 0,4 см;
- 2 — входного окна (алюминиевая фольга толщиной 7 мкм);
- 3 — четырех кремниевых монолитных активных пиксельных детекторов  $1,5 \times 3,0$  см;
- 4 — свинцовых поглотителей разной толщины.

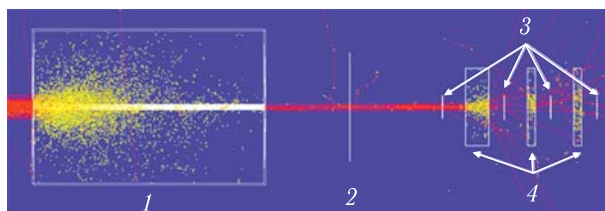


Рис. 3. Моделирование цифрового калориметра. Общий вид установки с поглотителями и детекторами

Прямыми линиями на рис. 3 обозначены траектории движения электронов, а точками — места взаимодействия электронов с веществом поглотителя. На рис. 3 не показаны траектории гамма-квантов.

В ходе тестирования пиксельных детекторов на линейном ускорителе электронов LINAC-200 обнаружено, что поперечное сечение электронных пучков с энергией как 50, так и 200 МэВ гораздо больше, чем линейные размеры детекторов (см. рис. 1). Поскольку для создания калориметра используются свинцовые поглотители с  $R_M = 1,6$  см при поперечных размерах детектора 1,5 см, во избежание сильного поперечного рассеяния электромагнитного ливня было принято решение использовать свинцовый коллиматор длиной 15 см с внутренним диаметром отверстия 0,4 см (см. 1 на рис. 3). В табл. 2 приводятся результаты моделирования изменения интенсивности пришедших на детекторы электронов при разных энергиях электронного пучка после свинцового коллиматора. Количество электронов на каждом детекторе рассчитывалось как функция энергии пучка.

Для первого детектора были сделаны оценки общего количества электронов, не потерявших свою энергию при прохождении через коллиматор, а для остальных детекторов оценивалось общее количество электронов, попавших на эти детекторы после прохождения свинцовых поглотителей. Толщина всех свинцовых поглотителей в данном случае составляла 2 см, начальное число электронов в пучке (для каждой установленной энергии пучка) — 100 000.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что с увеличением энергии электронов растет их интенсивность на четвертой детекторной плоскости. Это говорит о возможности использования такой конфигурации калориметра для определения энергии электронов, начиная с 200 МэВ, при достаточно хорошей статистической значимости.

Во время прохождения электронного пучка в свинцовом поглотителе генерируется большое количество фотонов. Детектор (МАПД) может регистрировать фотоны с энергией не более 10 кэВ. Проведены расчеты и сделана количественная оценка числа таких фотонов (10 кэВ или меньше) для каждого детектора в зависимости от энергии пучка электронов и начального количества электронов, равного 100 000 (данные в табл. 3).

**Таблица 2. Интенсивность электронов на каждом детекторе при использовании коллиматора и свинцовых поглотителей**

Энергия электронов $E_0$ , МэВ	Детектор 1	Детектор 2	Детектор 3	Детектор 4
200	18081	10814	2260	413
150	10299	4066	870	136
100	4171	788	184	17
50	809	47	12	0

**Таблица 3. Количество фотонов с энергией 10 кэВ и меньше в зависимости от энергии электронного пучка**

Энергия электронов $E_0$ , МэВ	Детектор 1	Детектор 2	Детектор 3	Детектор 4
200	10	2	1	1
150	12	2	1	0
100	6	1	0	0
50	2	0	0	0

Данный анализ показал, что количество регистрируемых детекторами фотонов мало по сравнению с количеством электронов (см. табл. 2, 3), поэтому в дальнейших расчетах принимается во внимание вклад только электронной компоненты.

Далее было проведено моделирование калориметра с различными толщинами поглотителей. Энергия моноэнергетического электронного пучка определяется путем измерения интенсивности частиц, регистрируемых каждым детектором. После первого детектора частицы пучка попадают в поглотитель и создают электромагнитный ливень. В эксперименте энергия пучка может быть определена путем подсчета количества частиц, зарегистрированных на детекторах 2, 3, 4, и сравнения их значений с результатами моделирования в GEANT4. Таким образом, для цифрового калориметра данного типа необходимо правильно подобрать толщину свинцовых поглотителей, чтобы определить энергию в выбранном диапазоне (50–200 МэВ).

На первом этапе моделирования толщина свинцовых поглотителей выбиралась равной 3 см. Результаты моделирования показали, что при такой толщине поглотителей только небольшое количество частиц из диапазона энергий 50–200 МэВ достигает последнего детектора. Поэтому толщина свинцовых пластин должна быть уменьшена. Кроме того, на основании расчетов (см. табл. 1) для более точного определения энергии пучка электронов толщина поглотителей должна быть постепенно уменьшена по мере распространения электромагнитного ливня. С учетом

этих выводов цифровой калориметр на основе пиксельных детекторов моделировался со следующими толщинами свинцовых поглотителей:

А. Толщина первого поглотителя 4 см, второго — 2 см, третьего — 0,5 см;

Б. Толщина первого поглотителя 3 см, второго — 2 см, третьего — 0,5 см;

В. Толщина первого поглотителя 2 см, второго — 2 см, третьего — 0,5 см;

Г. Толщина первого поглотителя 2 см, второго — 0,5 см, третьего — 0,5 см;

Д. Толщина первого поглотителя 1,5 см, второго — 0,5 см, третьего — 0,5 см.

Для вариантов А–Д были построены графики зависимости интенсивности электронов на каждом из детекторов от энергии электронного пучка. Пример таких графиков представлен на рис. 4 для четырех детекторных плоскостей (Det 1, Det 2, Det 3, Det 4), для вариантов А и Д (рис. 4, а — толщины поглотителей: 4, 2, 0,5 см соответственно; рис. б — толщины поглотителей 1,5, 0,5, 0,5 см соответственно). Видно, что при использовании свинцовых поглотителей 4, 2, 0,5 см (вариант А) интенсивность для энергий ниже 150 МэВ практически не меняется

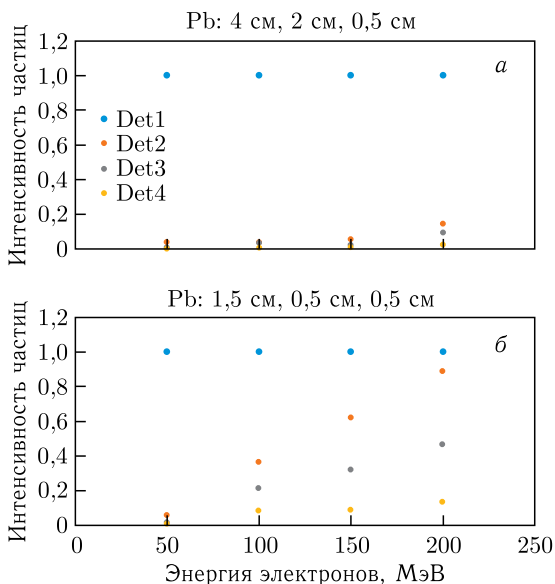


Рис. 4. Графики зависимости интенсивности регистрируемых электронов от энергии для каждого детекторного слоя (Det 1, Det 2, Det 3, Det 4) при разной толщине свинцовых поглотителей: а) 4, 2, 0,5 см; б) 1,5, 0,5, 0,5 см



для всех детекторных плоскостей (рис. 4, а). Для вариантов Б, В и Г интенсивность регистрируемых частиц на втором детекторе заметно изменяется в зависимости от энергии пучка электронов, но интенсивности частиц на третьем и четвертом детекторах по-прежнему остаются на одном уровне. Таким образом, использование свинцовых поглотителей с толщинами 1,5, 0,5, 0,5 см (вариант Д) оказывается наиболее оптимальным для определения энергий в выбранном диапазоне энергий пучка (рис. 4, б). Так как при данном выборе толщин свинцовых поглотителей наблюдается заметное изменение числа регистрируемых частиц для каждой детекторной плоскости, это позволит с хорошей статистической точностью определить их интенсивность в выбранном энергетическом диапазоне.

В дальнейшем предполагается провести экспериментальные исследования, тестирование и калибровку всего калориметра на электронных пучках ускорителя LINAC-200 в ОИЯИ.

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе предложена концепция цифрового калориметра на основе четырех монокристаллических активных пиксельных детекторов для измерения энергии моноэнергетического электронного пучка в диапазоне энергий 50–200 МэВ. На основании расчетов параметров электромагнитного ливня, а также моделирования GEANT4 выбраны свинцовые поглотители калориметра с различной толщиной (1,5, 0,5, 0,5 см по направлению распространения электромагнитного ливня). В дальнейшем разработанный цифровой калориметр будет испытан на электронном пучке LINAC-200 в ОИЯИ. Во время эксперимента на линейном ускорителе электронов характеристики калориметра будут сравниваться с результатами моделирования, на основании чего будет выполнена калибровка калориметра.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-02-40075).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brau J. E., Jaros J. A., Ma H.* Advances in Calorimetry // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2010. V. 60. P. 615–644; <https://doi.org/10.1146/annurev.nucl.012809.104449>.
2. *Tambave G. et al.* Characterization of Monolithic CMOS Pixel Sensor Chip with Ion Beams for Application in Particle Computed Tomography // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 958. P. 162626.
3. *de Haas A. P. et al.* The FoCal Prototype — an Extremely Fine-Grained Electromagnetic Calorimeter Using CMOS Pixel Sensors // J. Instrum. 2018. V. 13.

4. *Zherebchevsky V.I., Kondratiev V.P., Vechernin V.V., Igolkin S.N.* The Concept of the MPD Vertex Detector for the Detection of Rare Events in Au + Au Collisions at the NICA Collider // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2021. V. 985.
5. *Wigmans R.* Calorimetry – Energy Measurements in Particle Physics. 2nd ed. Oxford Press, 2018.