

УДК 539.1.078

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВ ПРОТОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2024 г. В. В. Петров^{1,*}, В. И. Жеребчевский¹, Н. А. Мальцев¹, С. Ю. Торилов¹,
Н. А. Прокофьев¹, Е. О. Землин¹, Д. А. Комарова¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия

* E-mail: v.petrov@spbu.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 25.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Приведены результаты исследований характеристик пучков протонов с энергией 1 ГэВ, полученные с использованием экспериментальной установки на основе телескопа пиксельных детекторов. Исследована кластерная множественность пикселей в детекторах, определены эмиттанс пучка и разрешающая способность установки в заданной геометрии.

DOI: 10.31857/S0367676524110184, EDN: FKEHSF

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день пучки заряженных частиц находят широкое применение как в фундаментальных исследованиях в ядерной физике и физике высоких энергий, так и для решения прикладных задач в области ядерной медицины, радиационного материаловедения и ядерно-физических технологий. В используемых для этих целей ускорителях созданы специальные детекторно-диагностические системы контроля и мониторинга характеристик пучков. Такие системы позволяют получить основные параметры пучка: ток, профиль, эмиттанс и играют важную роль при настройке, тестировании и последующей эксплуатации соответствующих ускорительных комплексов.

Определение параметров и характеристик пучков могут проводиться методами, которые не приводят к деградации пучка (неразрушающие методы), например с использованием электромагнитных полей или синхротронного излучения. Однако в первом случае нет возможности построить профиль пучка, а во втором случае синхротронное излучение применяется для пучков высоких энергий (>100 ГэВ) и с его помощью невозможно получить характеристики уже выведенного пучка. Поэтому в большинстве случаев используют методы, в которых происходит взаимодействие частиц пучка с детектирующими системами. В диагностических ускорительных технологиях широко применяются люминофорные или сцинтилляционные экраны

и радиохромные пленки, имеющие ряд преимуществ для визуализации пучков, но при этом происходит разрушающее воздействие на них за счет полного поглощения частиц пучка в материале детекторных слоев. Менее разрушительными являются вторично-эмиссионные датчики, которые представляют собой сетку из металлических проволочек, помещенных на пути пучка. Пространственное разрешение определяется расстоянием между проволочками, которое, как правило, составляет порядка 1 мм. Данный способ имеет также вариант с одной сканирующей проволокой, которая вводится в область, занимаемую пучком, в определенные временные промежутки. В случае медленного сканирования пространственное разрешение может доходить до 10 мкм, однако общая картина искажается за счет быстрых изменений пространственных характеристик пучка в режиме реального времени. Также для определения интенсивности и пространственных характеристик пучков используются газонаполненные ионизационные и пропорциональные камеры, пространственное разрешение которых составляет порядка нескольких сотен микрон. Помимо этого, недавно было предложено использование мониторов пучка, основанных на черенковских детекторах [1]. Разрабатываемые черенковские мониторы, в отличии от стандартных ионизационных камер и радиохромных пленок, применимы для определения дозы в условиях высокой интенсивности протонов при флэш-терапии.

Развитие ускорительных технологий предъявляет новые требования к системам диагностики и мониторинга пучков. С одной стороны, необходимо получить в течение короткого промежутка времени высокое пространственное разрешение при определении профиля пучка, а с другой стороны, оказать на него минимальное разрушающее воздействие. В данной работе для достижения этих целей предложено использовать тонкие кремниевые пиксельные детекторы (толщина 50 мкм). Они являются практически прозрачными для пучков протонов с энергиями 1 ГэВ и выше, но при этом обладают высоким пространственным разрешением. Детекторы с такими качествами дают возможность определить пространственные характеристики пучка, его интенсивность, а также проследить его эволюцию в режиме реального времени.

ПИКСЕЛЬНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Детекторные системы, построенные на основе кремниевых пиксельных сенсоров, хорошо зарекомендовали себя в современных экспериментах физики высоких энергий и элементарных частиц. Такие пиксельные детекторы играют ключевую роль в трековых системах экспериментов ALICE [2], ATLAS [3], CMS [4], LHCb [5] на Большом адронном коллайдере (БАК), а также в создаваемой внутренней трековой системе эксперимента MPD на коллайдере NICA [6, 7]. Обладая высокой гранулярностью, пиксельные детекторы позволяют идентифицировать траектории регистрируемых частиц с высоким пространственным разрешением.

Детектор представляет собой матрицу размером 15×30 мм, состоящую из 512×1024 пиксельных сенсоров (пикселей). Размер каждого пикселя 29.24×26.88 мкм². Структура пиксельного сенсора представлена на рис. 1, где показано, что на низкорезистивной кремниевой подложке формируется эпитаксиальный слой *p*-типа с высоким удельным сопротивлением, который является активным объемом детектора. Каждый пиксель содержит чувствительный диод (происходит сбор заряда), front-end-электронику для усиления и оцифровки сигнала и логические элементы. Диод реализован как переход между эпитаксиальным слоем и карманом *n*-типа (*n-well*). Размер обедненной зоны можно менять, подавая на детектор напряжение смещения $V_{\text{Смещения}}$ и дополнительно напряжение смещения на подложку — $V_{\text{Смещения к подложке}}$. Сбор заряда осуществляется как путем дрейфа электронов (образуются в результате взаимодействия ионизирующих частиц и излучений с веществом детектора) в обедненной зоне к карману *n*-типа, так и путем диффузии электронов из остального объема эпитаксиального слоя [2, 8]. В результате этих

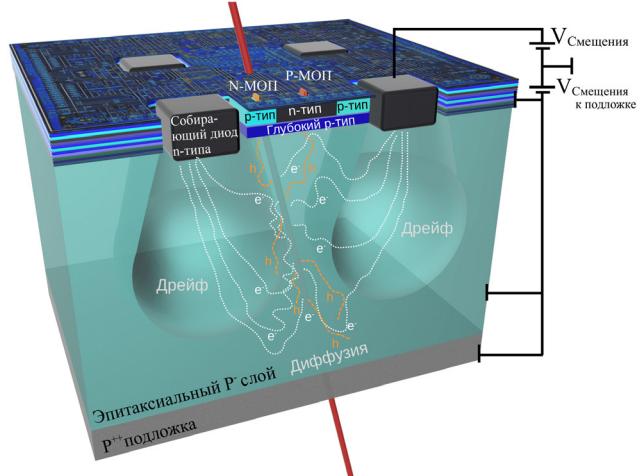


Рис. 1. Структура пиксельного детектора.

процессов заряд от одной частицы собирается несколькими расположенными рядом пикселями — пиксельными кластерами.

Свойства, которыми обладают указанные пиксельные детекторы, подходят для их использования в качестве систем диагностики и мониторинга пучков заряженных частиц. В частности, малая толщина всего детектора (50 мкм) практически не влияет на пространственную структуру пучка, а высокая гранулярность и быстродействие позволяют регистрировать отдельные частицы пучка при общей высокой интенсивности. Пространственное разрешение пиксельной матрицы при реконструкции треков заряженных частиц на уровне 4 мкм [2, 8] дает возможность для прецизионного определения таких характеристик пучков, как профиль, эмиттансы, параметры Твисса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Использование пиксельных детекторов в качестве системы мониторинга пучков заряженных частиц предполагает их проводку через один или несколько детекторных модулей. Для определения эмиттанса пучка, требуется его прохождение через несколько последовательно расположенных пиксельных детекторов, реализованных в телескопном варианте. Общий вид экспериментальной установки на пучке протонов 1 ГэВ синхроциклотрона СЦ-1000 НИЦ «Курчатовский институт» ПИЯФ показан на рис. 2а, вместе с ее конструкционными особенностями (см. рис. 2б). Внутри установки каждый пиксельный детектор вместе с интерфейсной платой сопряжения детектора с ПК закреплены на специальной подвижной раме. Также установка включает в себя модуль автономного стабилизированного источника напряжения обратного

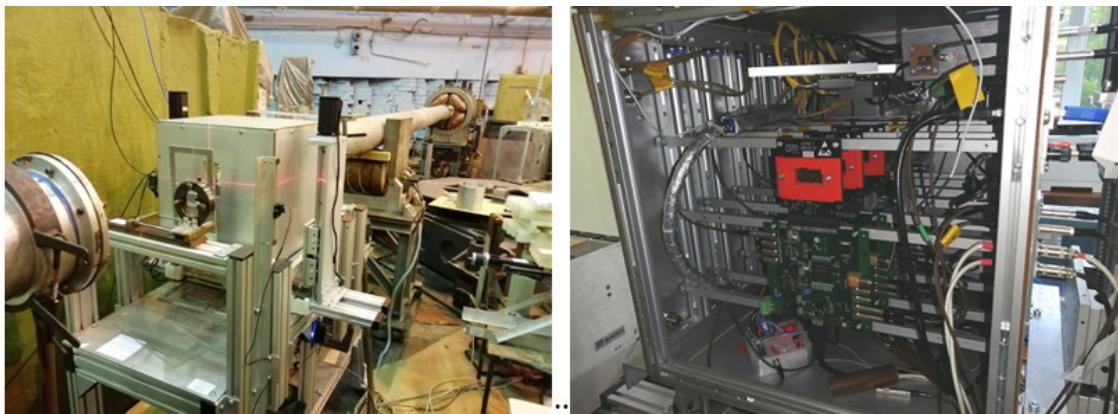


Рис. 2. Экспериментальная установка на основе телескопа пиксельных детекторов: общий вид установки на пучке протонов синхроциклоэлектрона СЦ-1000 НИЦ «Курчатовский институт» ПИЯФ (а); конструкционные особенности экспериментальной установки (б).

смещения для всех пиксельных детекторов, коммуникационный модуль и модуль мониторинга температуры, давления, а также влажности с передачей информации на ПК в режиме реального времени. Детекторный телескоп и все вспомогательные модули монтируются внутри светонепроницаемого, электрически изолированного кожуха, входные окна которого сделаны из тонкой алюминиевой фольги (7 мкм) для минимизации энергетических потерь пучка протонов. Схема проводимых экспериментальных исследований с использованием пиксельных детекторов в телескопном варианте представлена на рис. 3. Четыре детектора располагаются друг за другом в плоскости перпендикулярной пучку. Триггерная система установки состоит из двух пластических сцинтилляторов, включенных в схему совпадений. Триггерный сигнал подается на плату сопряжения каждого пиксельного детектора для синхронизации системы сбора и обработки сигналов с пикселями.

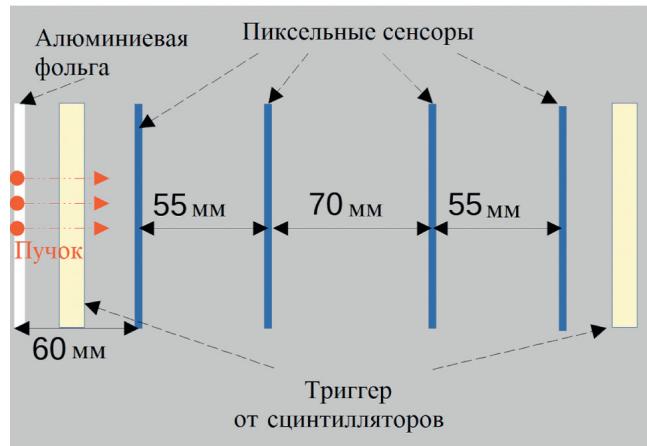


Рис. 3. Схема эксперимента с телескопом пиксельных детекторов на пучке протонов 1 ГэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При взаимодействии протонов с веществом пиксельные детекторы в последних генерируются носители заряда, которые собираются на соответствующих пикселях, формируя сигналы. На рис. 4 представлено распределение сработавших пикселей для каждого из 4 детекторов за получасовой период облучения детекторов протонами с энергией 1 ГэВ.

Как уже отмечалось, в ходе сбора заряда и формирования сигналов на соседних пикселях могут образоваться пиксельные кластеры различной множественности (число сработавших пикселей в кластере). Координаты центров тяжести кластеров сработавших пикселей необходимы для последующей реконструкции треков протонов, прошедших сквозь детекторный телескоп.

Для поиска и идентификации пиксельных кластеров был разработан и применен алгоритм, основанный на плотности пространственной кластеризации для приложений с шумами. В проведенном эксперименте впервые была получена и оценена пиксельная множественность (количество пикселей в кластере) для процессов взаимодействия протонов с энергией 1 ГэВ с веществом кремния. На рис. 5 показаны частотные распределения центров масс кластеров (на каждом из четырех детекторов), которые соответствуют картам сработавших пикселей. Из этих частотных распределений видно, что наиболее вероятно образование кластеров с множественностью до четырех пикселей в кластере. В среднем преобладают кластеры, состоящие из 2 пикселей. Эта кластерная множественность в пределах погрешности одинакова для каждого из облучаемых пиксельных детекторов. Анализ интенсивности срабатывания пикселей и формирования пиксельных кластеров дал возможность получить данные по структурным особенностям пучка

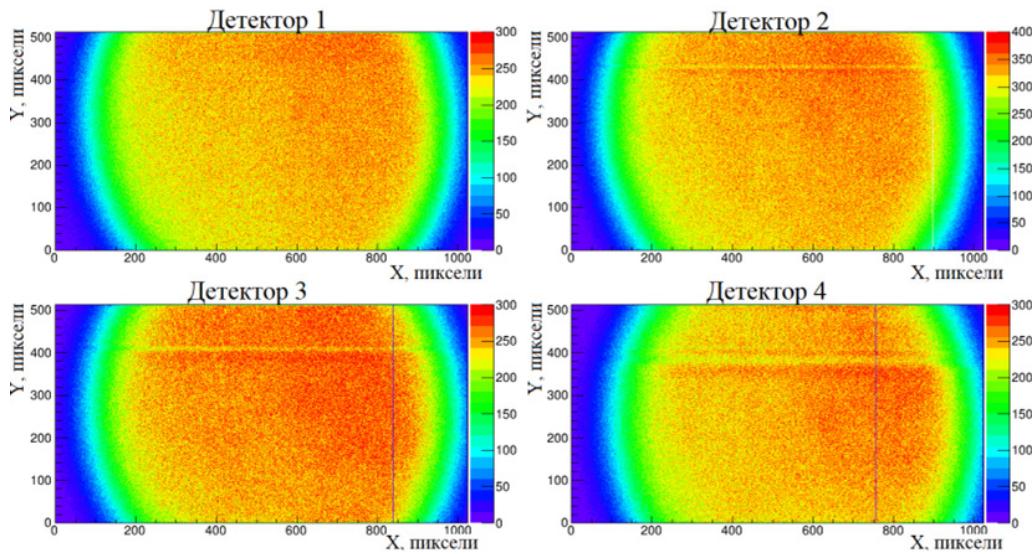


Рис. 4. Карты сработавших пикселей для каждого из 4 детекторов при их облучении протонами с энергией 1 ГэВ.

протонов. Было показано, что однородность пучка в центральной детекторной области ($15 \times 15 \text{ мм}^2$) составляет порядка 90%. В ходе экспериментов варьировалась интенсивность пучка протонов. При этом форма распределения и среднее значение размеров кластеров не менялись с изменением интенсивности пучка.

С целью определения пространственных характеристик пучка протонов с энергией 1 ГэВ

была разработана программа по реконструкции треков протонов с помощью алгоритма клеточного автомата. Треки протонов реконструируются по координатам центров масс кластеров, когда из всех центров масс кластеров пикселей, сработавших одновременно с триггером, отбираются координаты центров — кандидаты на трек. Далее такие центры аппроксимируются прямой с применением метода наименьших квадратов. Пример

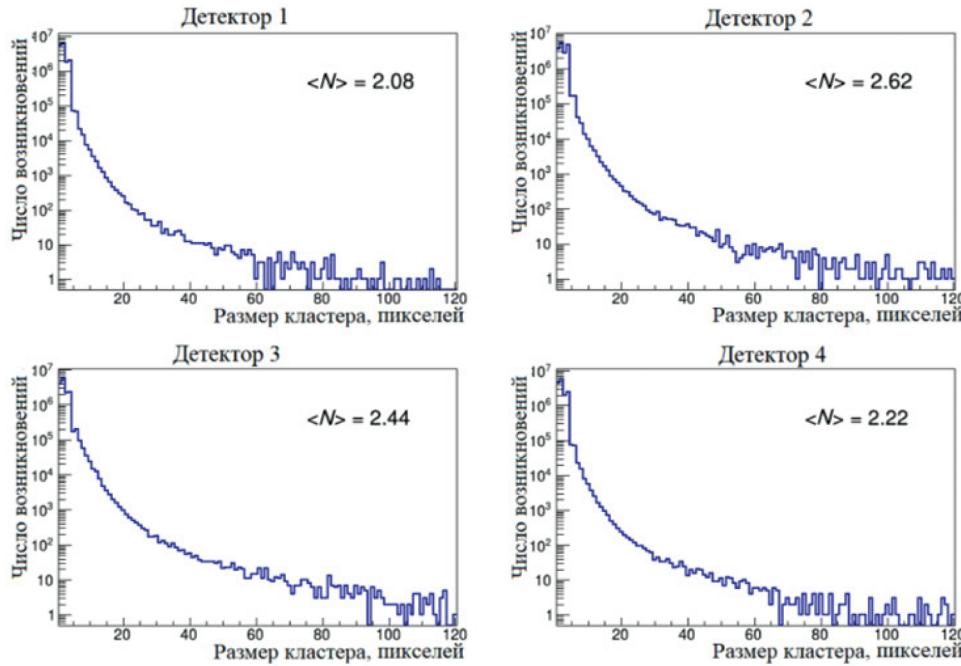


Рис. 5. Частотные карты кластерной множественности на пучке протонов 1 ГэВ. $\langle N \rangle$ — среднее значение кластерной множественности.

реконструированных треков с телескопа пиксельных детекторов, набранных за одно срабатывание триггера, представлен на рис. 6.

Были сделаны оценки пространственного разрешения телескопа экспериментальной установки из распределений отклонений центров масс кластеров от реконструированных прямолинейных треков по оси X и оси Y . Распределения аппроксимировались функци-

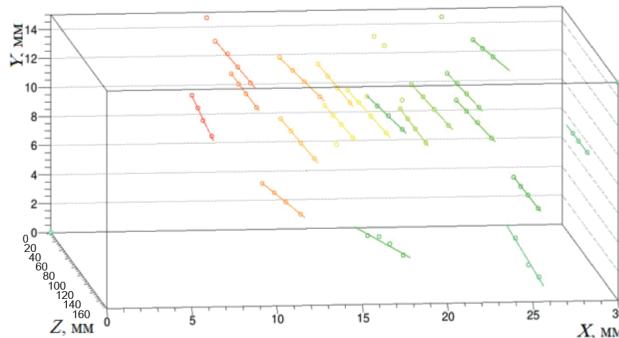


Рис. 6. Пример реконструированных треков протонов с энергией 1 ГэВ. Точками изображены центры масс кластеров сработавших пикселей, прямыми линиями показаны реконструированные треки протонов.

ей Гаусса. Это позволило получить пространственное разрешение детекторного телескопа, которое составило 40 мкм. Также для реконструированных треков был определен их наклон и средняя координата по осям X и Y . В итоге с использованием полученных параметров реконструированных треков были определены основные пространственные характеристики пучка протонов на уровне высокой точности в 40 мкм. Были построены распределения треков в фазовом пространстве (см. рис. 7), благодаря которым удалось получить эмиттанс и параметры Твисса. Их значения для выборки из 90% частиц пучка, сконцентрированных в центральной детекторной области, распределенных в фазовом пространстве, составили: продольный нормализованный эмиттанс — $\varepsilon_{90\%} = 0.058 \text{ мм}\cdot\text{рад}$, $\alpha_{90\%} = -0.12$, $\beta_{90\%} = 2485 \text{ мм}/\text{рад}$, $\gamma_{90\%} = 0.00041 \text{ рад}/\text{мм}$.

В дальнейших экспериментах планируется определить эмиттанс для пучков протонов меньших энергий (например, пучки протонов 200 МэВ, используемые в адронной терапии) и просканировать всю геометрическую область выведенного пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлены результаты измерений пространственных и структурных характеристик пучков протонов с энергией 1 ГэВ, полученных с помощью экспериментальной установки на основе кремниевых пиксельных детекторов. Пространственное разрешение установки составило 40 мкм,

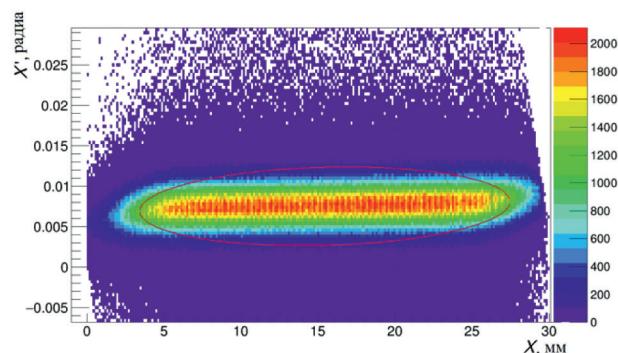


Рис. 7. Распределение треков протонов в фазовом пространстве плоскости X .

что позволило с высокой точностью определить эмиттанс пучка, плотность и распределение частиц пучка. При этом относительно небольшая толщина детекторов практически не оказывает разрушающее воздействие на пучок.

Разработанная методика определения пространственных характеристик пучков протонов высоких энергий, представляет большую ценность в ускорительных технологиях для изучения эволюции таких выведенных пучков.

Авторы благодарят ускорительный отдел отделения перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ за предоставленную возможность проведения экспериментальных исследований на пучке протонов ускорителя СЦ-1000.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00042, <https://rscf.ru/project/23-12-00042/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akulinichev S., Gavrilov Y., Djilkibaev R. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 8. P. 1242.
2. Abelev B., Adam J., Adamová D. et al. // J. Physics G. 2014. V. 41. Art. No. 087002.
3. <https://atlas.cern/Discover/Detector/Inner-Detector>
4. <https://cms.cern/detector/identifying-tracks/silicon-pixels>
5. <https://cerncourier.com/a/velos-voyage-into-the-unknown/>
6. Жеребчевский В.И., Вечернин В.В., Иголкин С.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 5. С. 702; Zhrebchevsky V.I., Vechernin V.V., Igolkin S.N. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 5. P. 541.
7. Жеребчевский В.И., Мальцев Н.А., Нестеров Д.Г. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 8. С. 1146; Zhrebchevsky V.I., Maltsev N.A., Nesterov D.G. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 8. P. 948.
8. Mager M. // NIM A. 2016. V. 824. P. 434.

Experimental setup based on pixel detectors for precision determination of high energy proton beams characteristics

V. V. Petrov^{1,*}, V. I. Zhrebchevsky¹, N. A. Maltsev¹, S. Yu. Torilov¹,
N. A. Prokofiev¹, E. O. Zemlin¹, D. A. Komarova¹

¹ Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia

* e-mail: v.petrov@spbu.ru

The characteristics of proton beams at 1 GeV have been studied using an experimental setup based on a telescope of pixel detectors. Such parameters as pixel cluster multiplicity, the beam emittance and the setup resolution in each geometry were investigated.