

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.66

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА 50-ГЭВ-НЫХ ПРОТОНОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ С БОЛЬШИМ УГОЛОВЫМ АКСЕПТАНСОМ

© 2025 г. А. Г. Васильева^a, *, А. А. Дурум^a, М. Ю. Костин^a, А. В. Лутчев^a, В. А. Маишев^a, В. И. Питалев^a, И. В. Полуэктов^a, Ю. Е. Сандомирский^a, Ю. А. Чесноков^a, А. А. Янович^a

^aИнститут физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”, Протвино, Московская обл., 142281 Россия

*E-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

После доработки 19.04.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Созданные на сегодня фокусирующие кристаллические устройства подходят для применений на ускорителях тераэлектронвольтного класса, поскольку имеют малые поперечные размеры. Чтобы увеличить аксептанс устройства предлагается прибор, состоящий из нескольких кристаллов, собранных в массив. В работе приводятся результаты тестирования нового устройства на пучке У-70.

Ключевые слова: ускорители, фокусировка пучков, изогнутые кристаллы

DOI: 10.56304/S2079562925010257

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на нескольких современных ускорителях проводятся исследования коллимации и вывода циркулирующего пучка с помощью канализации в изогнутых кристаллах. Поскольку критический угол канализации (угол Линдхарда) довольно мал ($\theta_L \sim (1/E)^{1/2} = (0.02–0.002)$ мрад для протонов с энергиями $E = (100–10000)$ ГэВ соответственно), применение кристаллов достаточно эффективно для управления первичным протонным пучком, но для манипуляций со вторичными пучками π , K и др., требуется не только отклонять их, но и фокусировать, так как здесь расходимости пучков гораздо выше. Для этих целей разработаны фокусирующие кристаллические устройства. На данный момент успешно испытаны кристаллические фокусирующие устройства, в основе которых – склоненный выходной торец изогнутого кристалла. Достигнуты фокусные расстояния порядка одного метра.

КОНСТРУКЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Созданные на сегодня кристаллические фокусирующие устройства подходят для применений на ускорителях тераэлектронвольтного класса [1]. Если энергия ускоренного пучка протонов $E \geq 1$ ТэВ, как на больших коллайдерах (класса БАК и выше), то энергия вторичных частиц смещается за сотни ГэВ. Разлет таких частиц с мишени в лабора-

торной системе отчета θ [мрад] = $400/(P$ [ГэВ/с]) становится менее или порядка 1 мрад. Для такого углового аксептанса кристаллическое фокусирующее устройство имеет простой вид (рис. 1).

Это фокусирующее устройство реализуется с помощью одной кристаллической пластины около 1 мм толщиной. Для промежуточных энергий 50 ГэВ, которые достигаются сейчас на отечественном ускорителе У-70, такие кристаллы не оптимальны из-за малых поперечных размеров.

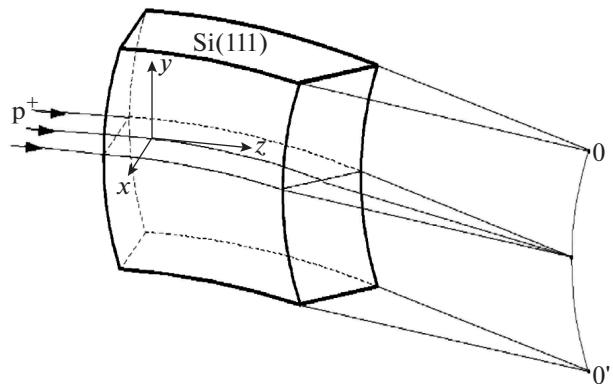


Рис. 1. Схема фокусирующего кристаллического устройства: из-за линейного среза торца кристалла частицы, захваченные в режиме канализации, имеют разные углы поворота (при разных поперечных координатах) и фокусируются на некотором расстоянии от кристалла на линии 0–0'.

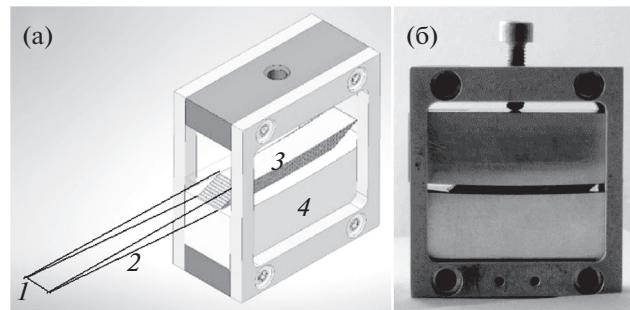


Рис. 2. (а) Схема фокусировки пучка из мишени массивом кристаллов: 1 – мишень, 2 – траектории частиц, 3 – фокусирующий массив кристаллов, 4 – металлическое изгибающее устройство. (б) Внешний вид фокусирующего устройства для У-70.

Вторичные частицы с энергией 20 ГэВ в этом случае разлетаются в конусе около 20 мрад. Поэтому аксептанс устройства должен быть несколько миллирадиан. Кроме того, кристалл должен иметь большой угол изгиба, около 100 мрад, чтобы на короткой базе вывести отклоненный пучок из зала ускорителя У-70. При ограниченной длине кристалла, сравнимой с длиной деканализования (это несколько см) пластина должна изгибаться при этом с радиусом < 50 см. Согласно известному эмпирическому правилу, кристалл можно изогнуть упруго, если радиус изгиба кристалла R_b в тысячу раз больше толщины кристалла T : $R_b \geq 1000T$. То есть, толщина пластины должна быть менее 0.5 мм. Чтобы увеличить аксептанс устройства, создается прибор, состоящий из нескольких кристаллов, собранных в массив (рис. 2а). В этом случае решаются обе задачи: обеспечивается большой угол изгиба и приемлемый угловой аксептанс устройства.

Для тестирования в пучке 50 ГэВ-ных протонов было создано несколько экземпляров таких устройств с разным фокусным расстоянием (следовательно, с разным угловым аксептансом) для

применений на ускорителе У-70 (рис. 2б). Взаимная ориентация пластин на фокусирующем торце устройства подвергалась оптической проверке с помощью лазерного прибора по методу, представленному в [3], стр. 85. Параллельный луч лазера отражался от поверхности каждой пластины на удаленном экране с одинаковым смещением, что говорит о хорошем качестве устройства.

ЭКСПЕРИМЕНТ НА У-70

В сеансе работы У-70 проведено тестирование устройства в пучке. Устройство состоит из семи кристаллических пластин кремния толщиной 0.4 мм, длиной по пучку 40 мм, которые вырезаны и изогнуты вдоль кристаллографической плоскости (111) на угол 100 мрад. Пучок протонов с энергией 50 ГэВ с малой угловой расходностью $\alpha_x = 0.1$ мрад, интенсивностью 10^6 част./с, наводился на кристаллический прибор с помощью телескопа из нескольких сцинтилляционных счетчиков S1&S2&S3 (рис. 3).

Кристаллическая сборка была ориентирована так, чтобы траектории протонов выходили на ка-

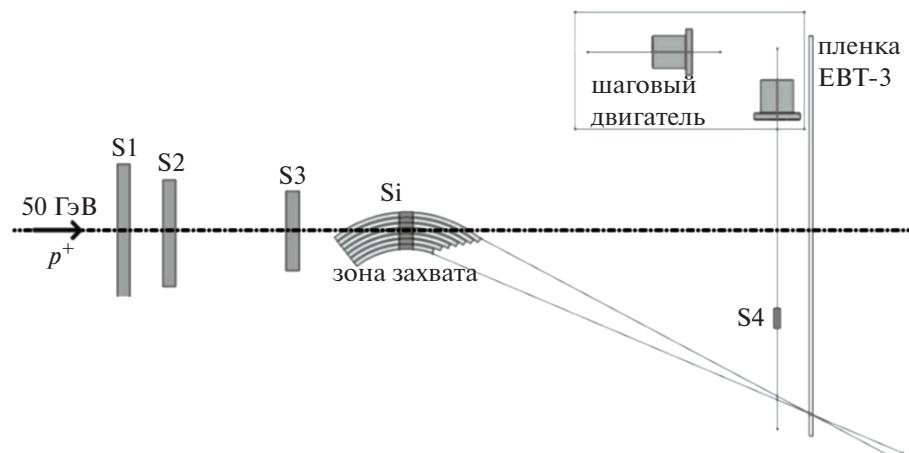


Рис. 3. Схема опыта по тестированию кристаллического устройства на протонном пучке.

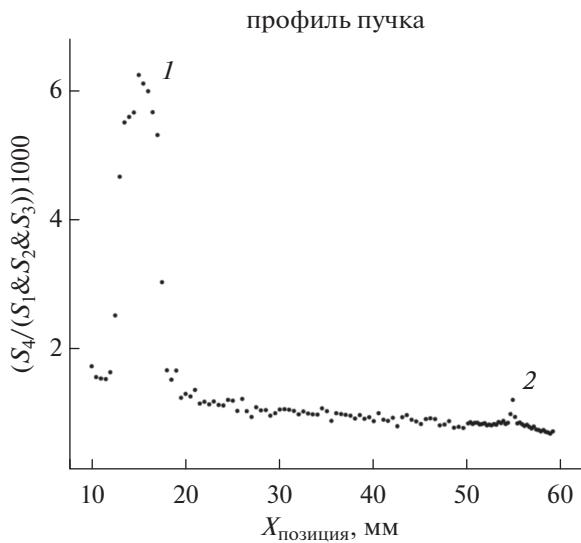


Рис. 4. Профиль пучка за кристаллическим устройством, пик 1 – неотклоненный пучок, пик 2 – отклоненный сфокусированный пучок.

сательную к изогнутым кристаллам в середине изгиба. В этом случае протоны захватываются в режим канализации в результате эффекта объемного захвата [2]. Эффективность этого процесса невысока (около 0.3%, как можно рассчитать по формуле из работы [2]), но такой режим позволяет равномерно засветить пучком все кристаллы в сборке. С помощью сканирующего счетчика малого поперечного размера S_4 располагаемого за кристаллом, который мог перемещаться вдоль и поперек пучка, было уточнено фокусное расстояние, которое оказалось равным $f = 0.7$ м. Измеренный этим счетчиком профиль пучка в фокальной плоскости показан на рис. 4.

Более точное измерение профиля пучка в фокусе было проведено с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки ЕВТ-3. Пленка сканировалась на планшетном RGB сканере Epson Expression 10000 XL, в пропускающем режиме с пространственным разрешением 300 точек на дюйм (85 мкм). Полученное изображение в формате TIFF обрабатывалось по красному цвету. Результаты измерений показаны на рис. 5.

Размер сфокусированного пучка в фокусе (на расстоянии $f = 0.7$ м от кристаллов) равен $\sigma = 0.1$ мм, соответствует ожидаемому. Угловой аксептанс устройства равен ± 2 мрад по горизонтали (в плоскости поворота пучка) и ± 1 мрад по вертикали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройство готово для создания реально-действующих систем формирования пучков частиц на У-70. Кристаллическая оптическая схема об-

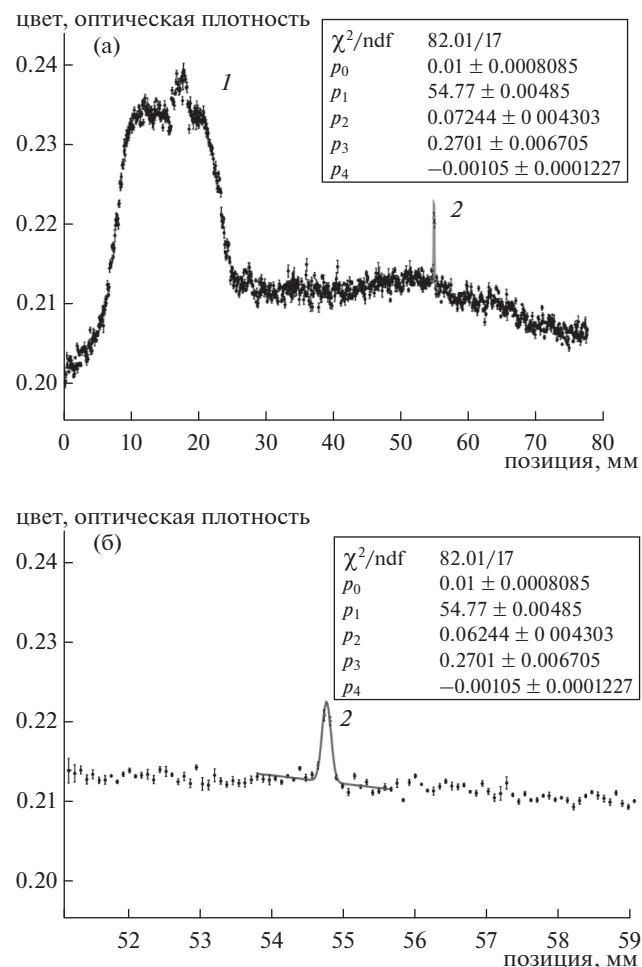


Рис. 5. (а) Профиль, измеренный пленкой: пик 1 – неотклоненный пучок, пик 2 – отклоненный сфокусированный пучок; (б) пик 2 в увеличенном масштабе.

ладает большой компактностью, всего несколько десятков метров, по сравнению с существующими магнитооптическими каналами частиц, имеющими длину сотни метров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Vasilyeva A.G., Chesnokov M.Yu., Chesnokov Yu.A., et al. // Proc. RUPAC-2023. Novosibirsk, Russia. 2023. P. 42.
2. Chesnokov Y.A., Galyaev N.A., Kotov V.I., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 1992. V. 69. P. 247.
3. Biryukov V.M., Chesnokov Y.A., Kotov V.I. Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators. Accelerator Physics. 1997. Berlin: Springer.

Study of 50-GeV Proton Beam Focusing by a Crystal Device with a Large Angular Acceptance

A. G. Vasileva¹, *, A. A. Durum¹, M. Yu. Kostin¹, A. V. Lutchev¹, V. A. Maisheev¹, V. I. Pitalev¹,
I. V. Poluektov¹, Yu. E. Sandomirsky¹, Yu. A. Chesnokov¹, and A. A. Yanovich¹

¹*Logunov Institute of High-Energy Physics, National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Protvino, Moscow ob., 142281 Russia*

*e-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

Received April 19, 2024; revised April 19, 2024; accepted May 21, 2024

Abstract—Modern crystal focusing devices are suitable for applications at TeV-class accelerators because they have small transverse dimensions. To increase the acceptance of the device, a device consisting of several crystals assembled into an array is proposed. The paper presents the results of testing a new device on the U-70 beam.

Keywords: accelerators, beam focusing, bent crystals