

Исследование фокусировки пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства

А. Г. Афонин, В. И. Баранов, В. Т. Баранов, Г. И. Бритвич, А. П. Бугорский, М. К. Булгаков, А. А. Дурум, И. С. Лобанов, А. Н. Луньков, А. В. Лутчев, В. А. Маишеев, Ю. Е. Сандомирский, А. В. Склезнев, Ю. А. Чесноков, П. Н. Чирков, И. А. Язынин, А. А. Янович

Институт физики высоких энергий, 142281 Протвино, Россия

Поступила в редакцию 21 августа 2012 г.

Изогнутые кристаллы применяются на крупных ускорителях для отклонения пучков частиц при выводе и коллимации. Недавно сформулированы предложения по исследованиям на Большом адронном коллайдере (БАК) с фиксированной мишенью, где может потребоваться не только отклонение, но и фокусировка пучков изогнутыми кристаллами. В данной работе приводятся экспериментальные результаты по фокусировке пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства, которое может быть использовано на циркулирующем пучке крупного ускорителя, в том числе БАК.

1. Введение. В настоящее время на нескольких крупных ускорителях проводятся исследования коллимации и вывода циркулирующего пучка с помощью когерентных явлений в ориентированных кристаллах. Так, в пионерских работах ИФВЭ на синхротроне У-70 [1–4] показано, что с помощью каналирования в коротких изогнутых кристаллах кремния можно повысить эффективность вывода и коллимации пучка до 85%. Сейчас эта возможность подтверждена на коллайдерах СПС в ЦЕРН [5] и Теватрон в Фермилаб [6].

Недавно в [7, 8] сформулированы предложения широкой программы физических исследований с фиксированной мишенью на Большом адронном коллайдере. В этих работах отмечено, что необходимые выведенные пучки частиц тераэлектронвольтных энергий можно получить с помощью каналирования в изогнутых кристаллах. При этом для выполнения программы может потребоваться не только отклонять пучки частиц, но и фокусировать их. В данной работе приводятся экспериментальные результаты по фокусировке пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства, которое может быть использовано в том числе на БАК.

Принципиальная возможность фокусировки пучка кристаллом была показана в [9], где фокусирующий эффект достигался за счет разности углов поворота частиц в равномерно изогнутом кристалле со скошенным задним торцом. Однако использованное там устройство было затруднительно применить вблизи циркулирующего пучка ускорителя, так как изгиб кристалла выполнялся массивными цилиндрическими зеркалами. Новое кристаллическое устройство для фокусировки пучка, удоб-

ное в плане установки в ускоритель, показано на рис. 1.

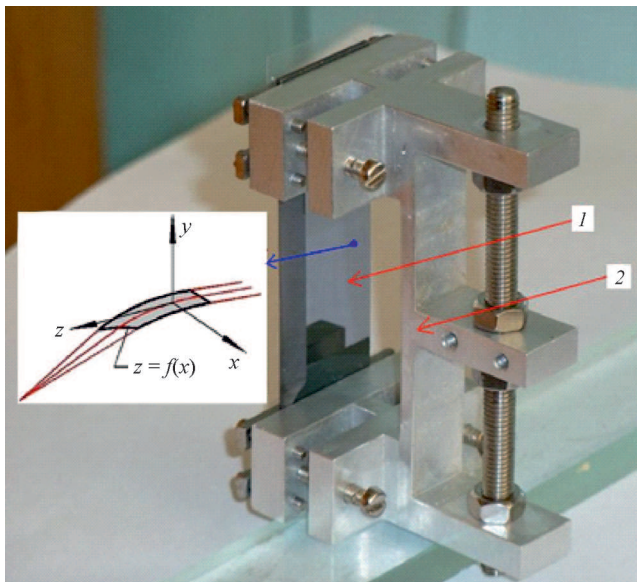


Рис. 1. Кристаллическое устройство для фокусировки пучка: 1 – изогнутая кристаллическая пластина, 2 – металлический держатель для изгиба пластины

Протяженная по высоте кремниевая пластина 1, вырезанная вдоль кристаллографической плоскости (111), изгибается в продольном направлении с помощью металлического держателя 2. Размеры пластины равны $x \times y \times z = 1 \times 70 \times 20 \text{ мм}^3$. За счет анизотропных свойств материала пластины возникает поперечный изгиб, который и используется для поворота и фокусировки пучка [10]. Траектории частиц при движении через кристалл в плоскости канали-

рования (в горизонтальной плоскости) показаны на вставке в левой части рисунка.

Форма горизонтального изгиба кристалла (вдоль координаты z) в фокусирующем сегменте измерялась лазерным прибором по схеме, описанной в [11] (с. 86). Изменение радиуса изгиба вдоль координаты z можно аппроксимировать зависимостью

$$R(z) = \frac{R_0}{1 - Cz/L_0}.$$

В этой аппроксимации радиус изгиба кристалла растет с ростом координаты от 6 м в начале среза до 18 м в конце среза. Для фокусировки пучка в точку (без аберраций) необходимо, чтобы угол поворота частиц был линейно связан с поперечной координатой: $\varphi = \kappa x$. В случае неравномерного изгиба кристалла с произвольной кривизной форму скошенного торца $z = f(x)$ необходимо спрофилировать. Как показано в [10], фокусировка без аберраций происходит в случае

$$z = f(x) = \frac{L}{C} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2CR_0\kappa x}{L_0}} \right),$$

где $\kappa = (1 - C/2)L_0/(R_0d)$ при $C = 0.8$, $L_0 = 0.3$ см, $d = 0.05$ см, $R_0 = 6$ м. Такая форма поверхности была получена при обработке кремниевой пластины алмазным лезвием, установленным на станке с ЧПУ.

Эксперимент по фокусировке выполнен на протонном пучке ускорителя ИФВЭ с энергией 50 ГэВ, выведенном в зону установки Истра-Кристалл, располагающейся в канале частиц 4А. Аппаратные возможности установки подробно описаны в [12]. На кристалл, установленный в гониометре, направлялся пучок размером $\sigma_x = 2$ мм с малой угловой расходимостью ($\sigma_\alpha = 0.1$ мрад). Интенсивность прямого и отклоненного кристаллом на угол 2.5–2.8 мрад пучка измерялась сцинтилляционными счетчиками. При оптимальной ориентации кристалл отклонял $\sim 3\%$ частиц прямого пучка. Это соответствует расчетам, так как критический угол каналирования составляет 0.03 мрад для частиц с энергией 50 ГэВ в плоскостном канале Si(111). Эффект фокусировки был зарегистрирован с помощью ядерной фотоэмульсии. Несколько слоев эмульсии располагались на различных расстояниях от кристалла. Рис. 2 иллюстрирует эффект фокусировки пучка на расстоянии 1.75 м от кристалла.

С помощью протяженного свинцового коллиматора сформирована резкая граница падающего пучка частиц, которая хорошо видна в центре фото. Ориентированный кристалл помещен в интенсивную часть

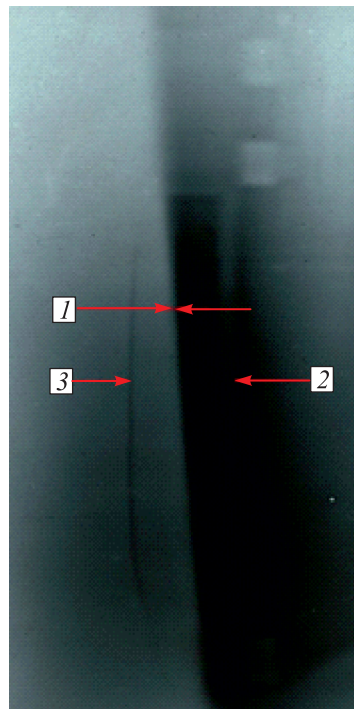


Рис. 2. Изображение пучка частиц на эмульсии вблизи фокуса: 1 – граница коллиматора, 2 – отражение кристалла, 3 – сфокусированный пучок

пучка. Его тень отражается справа в лучах падающего пучка как полоска с четкими границами. Отклоненный и сфокусированный кристаллом пучок виден слева в тени коллиматора как узкая вертикальная линия. Таким образом, наглядно продемонстрировано, как миллиметровый по горизонтали пучок с размером, равным толщине кристалла, отклоняется и сжимается в линию шириной $\text{FWHM} = 0.22$ мм (ширина на полувысоте). С помощью цифрового сканирования изображения (выделена полоса в несколько миллиметров по вертикали) получен горизонтальный профиль всего пучка (рис. 3а), а также профиль сфокусированного пучка (рис. 3б).

Обработка изображения проводилась с помощью цифрового сканера с высоким разрешением (10 мкм). На рис. 4 показана измеренная огибающая пучка, построенная по результатам обработки экспонированных эмульсий на цифровом сканере. Там же показана ожидаемая теоретическая кривая с учетом и без учета вещества на пути частиц от кристалла до фокуса 1.75 м (суммарное количество вещества около 1 г/см^2).

Как видно из рисунка, наблюдается хорошее согласие параметров фокусировки с ожидаемым значением. Размер пучка в фокусе в пределах 10% совпа

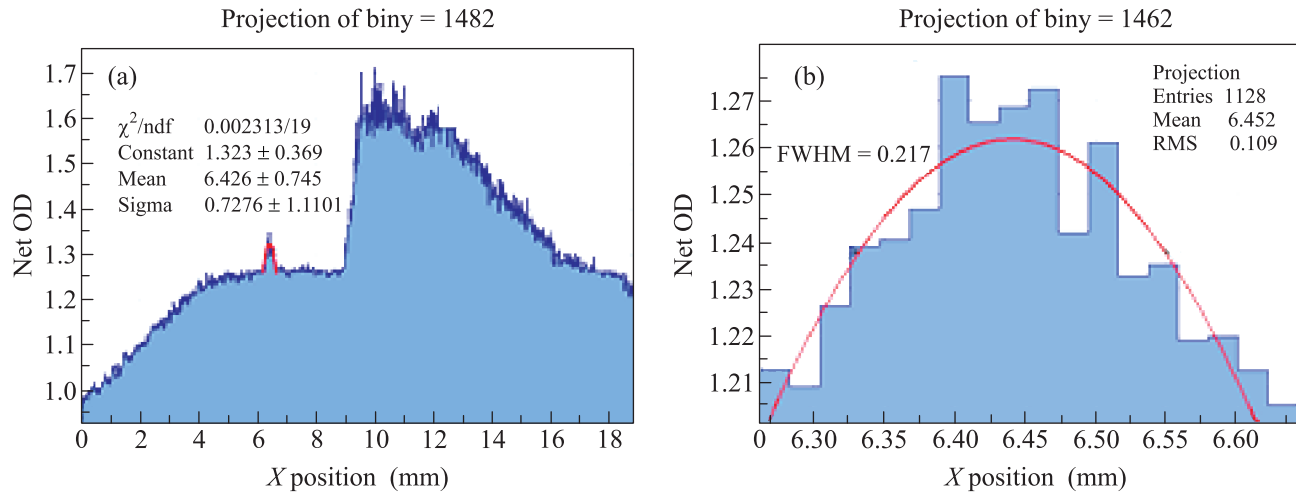


Рис. 3. (а) – Горизонтальный профиль пучка. Видны граница коллиматора в центре, тень от кристалла справа и сфокусированный пучок слева. (б) – Профиль сфокусированного пучка

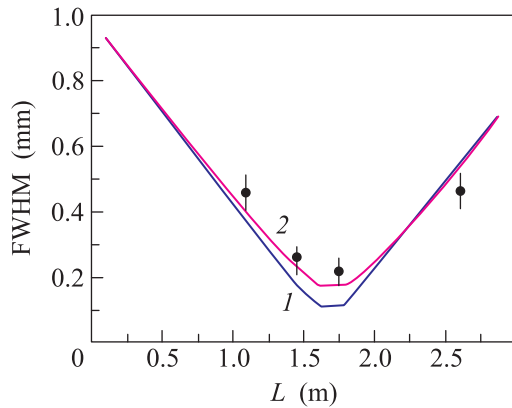


Рис. 4. Огибающая пучка (размер пучка в зависимости от расстояния, отсчитываемого от кристалла). Точки – эксперимент. Кривая 1 – расчет для транспортировки частиц в вакууме, 2 – расчет для реальных условий с учетом рассеяния на воздухе и эмульсиях

дает с результатами моделирования, учитывающего реальные условия проведения опыта.

Фокусирующее свойство нового кристаллического устройства можно применять на БАК или другом ускорителе высокой энергии для исследования малоугловых процессов. Кристалл можно ориентировать на точечную мишень фокусирующим торцом, как это показано на рис. 5, и, вращая его вокруг оси O , отклонять исследуемые частицы в сторону от циркулирующего пучка из неблагоприятной фоновой области. Таким образом, роль кристалла заключается в создании чистых условий для регистрации нужных частиц. Другим мотивом применения такой схемы является получение пучка вторичных частиц высокой энергии весьма простым способом.

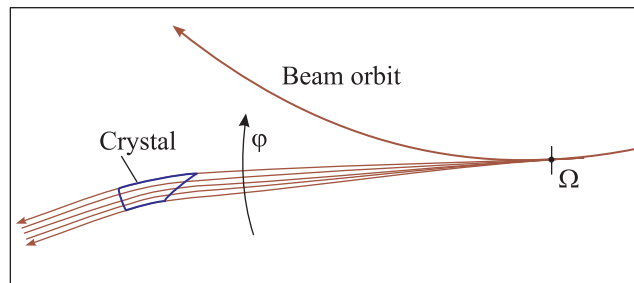


Рис. 5. Пример применения фокусирующего кристалла для исследования малоугловых процессов. С помощью этой схемы можно получать параллельный пучок вторичных частиц для широких физических исследований, предложенных в [7, 8]

Работа поддержана Дирекцией ГНЦ ИФВЭ, а также Российским фондом фундаментальных исследований (проект # 12-02-91532).

1. A. G. Afonin, V. M. Biryukov, V. A. Gavrilushkin et al., *JETP Lett.* **67**, 781 (1998).
2. A. G. Afonin, A. A. Arkhipenko, V. I. Baranov et al., *Phys. Lett. B* **435**, 240 (1998).
3. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. M. Biryukov et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 094802 (2001).
4. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. M. Biryukov et al., *Phys. Part. Nucl.* **36**, 21 (2005).
5. W. Scandale, G. Arduini, R. Assmann et al., *Phys. Lett. B* **692**, 78 (2010).
6. N. V. Mokhov, G. E. Annala, A. Apyan et al., *Proc. of Particle Accelerator Conference (PAC 09)*, Vancouver, BC, Canada, 2009, p. 1836.

7. J. P. Lansberg, V. Chambert, J. P. Didelez et al., <http://arxiv.org/pdf/1207.3507.pdf>.
8. S. J. Brodsky, F. Fleuret, C. Hadjidakis, and J. P. Lansberg, <http://arxiv.org/pdf/1202.6585.pdf>.
9. M. A. Gordeeva, M. P. Gur'ev, A. S. Denisov et al., JETP Lett. **54**, 487 (1991).
10. A. G. Afonin, V. T. Baranov, M. K. Bulgakov et al. <http://arxiv.org/pdf/1203.5586.pdf>.
11. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, and V. I. Kotov, *Crystal Channeling and its Application at High-energy Accelerators*, Berlin, Germany: Springer, 1997, 219 p.
12. A. G. Afonin, V. T. Baranov, G. I. Britvich et al., IET (in press).