

Фокусировка пучка частиц высокой энергии на предельно коротком расстоянии

А. Г. Афонин, Е. В. Барнов, Г. И. Бритвич, М. К. Булгаков, А. А. Дурум, М. Ю. Костин, А. В. Лутчев, В. А. Маишеев, Ю. Е. Сандомирский, В. И. Питалев, И. В. Полуэктов, С. Ф. Решетников, Ю. А. Чесноков¹⁾, П. Н. Чирков, А. А. Янович

Институт физики высоких энергий им. А.А. Лагунова – НИЦ “Курчатовский институт”, 142281 Протвино, Россия

Поступила в редакцию 22 мая 2017 г.

После переработки 24 мая 2017 г.

Недавно в физике высоких энергий были сформулированы перспективные задачи о необходимости фокусировать пучки частиц на расстоянии порядка одного сантиметра. В работе предложена новая идея для фокусировки пучка на коротком расстоянии, основанная на использовании изгиба плоско-параллельной кремниевой пластины, в которой боковые грани повернуты относительно кристаллографических плоскостей на небольшой угол. В опыте, проведенном на ускорителе У-70 в Институте физики высоких энергий, пучок протонов с энергией 50 ГэВ фокусировался в узкую линию с размером не более 30 мкм на расстоянии 17 см.

DOI: 10.7868/S0370274X17120037

В настоящее время на нескольких крупных ускорителях проводятся исследования коллимации и вывода циркулирующего пучка с помощью каналирования в изогнутых кристаллах [1–5]. Поскольку критический угол каналирования (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), достаточно эффективно применение кристаллов для управления первичным протонным пучком, но для манипуляций со вторичными пучками π , K , p и другими, требуется их не только отклонять, а также фокусировать, так как здесь расходимости пучков гораздо выше [6].

На данный момент успешно испытаны кристаллические фокусирующие устройства, в основе которых – скошенный выходной торец изогнутого кристалла [7–11]. Достигнуты фокусные расстояния порядка одного метра. Сейчас в физике высоких энергий сформулированы перспективные задачи: эксперименты по измерениям магнитных моментов короткоживущих частиц на ускорителях ЛНС и FCC с помощью вращения спина в изогнутом кристалле [12], и уменьшение размера пучка в электронном линейном коллайдере CLIC [13], где необходимо фокусировать пучки частиц на расстоянии порядка одного сантиметра. Применяемую ранее идею кристалла со скошенным выходным торцом здесь трудно реализовать, поскольку для такого короткого фокусного

расстояния нужен острый угол скоса, около одного градуса и меньше (при таких условиях кремний начинает крошиться вблизи острого ребра). В работе предложена новая идея для фокусировки на коротком расстоянии, основанная на использовании изгиба обычной плоско-параллельной кремниевой пластины, в которой боковые грани повернуты относительно кристаллографических плоскостей на небольшой угол. Этот угол $Miscut = D/L$, где D – толщина пластины, а L – длина пластины вдоль направления пучка, так что кристаллографические плоскости совпадают с направлением диагонали пластины (рис. 1).

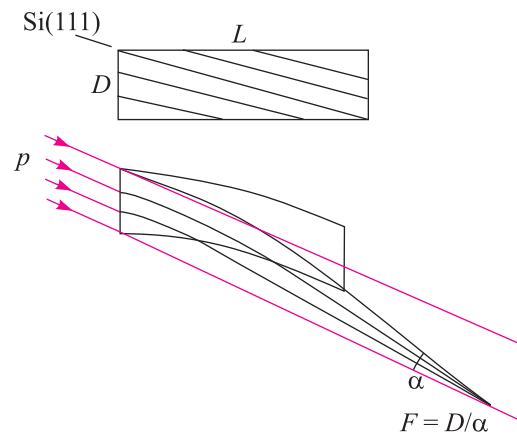


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема фокусировки пучка пластиной кремния, в которой кристаллографические плоскости совпадают с направлением диагонали в прямоугольном сечении

¹⁾e-mail: Yury.Chesnokov@ihep.ru

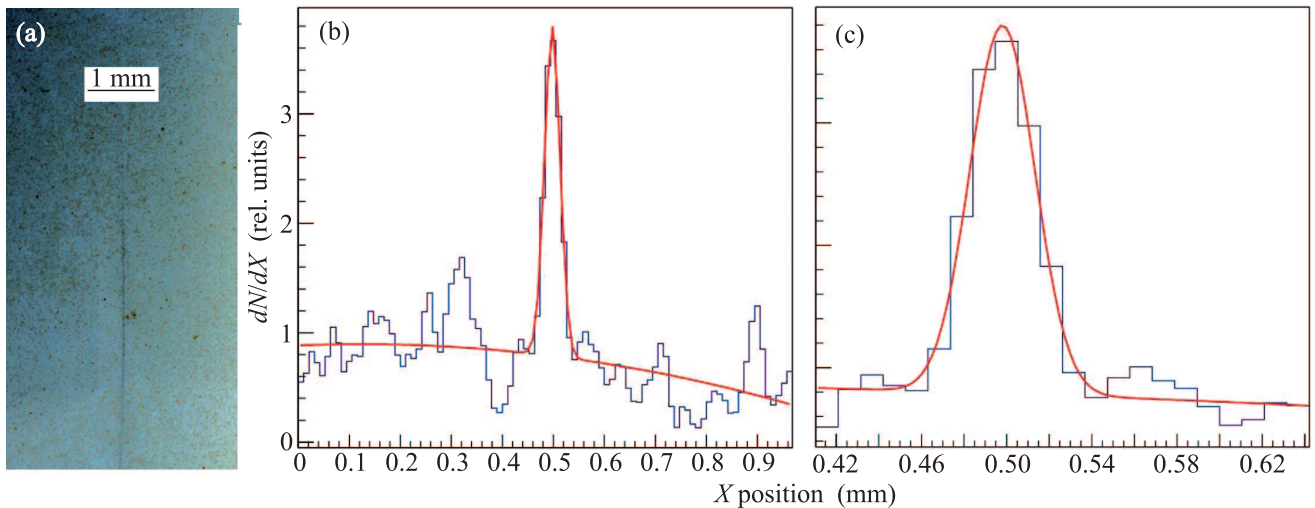


Рис. 2. (Цветной онлайн) (а) – Изображение пучка на пленке. (б) – Профиль пучка со сканера. (с) – Зум профиля с максимальным разрешением

Из геометрии рис. 1 видно, что при изгибе пластины на угол α достигается фокусное расстояние $F = D/\alpha$. Фокусное расстояние в один сантиметр может быть достигнуто при использовании пластины толщиной 100 мкм при длине 10 мм, изогнутой на угол 10 мрад. В проведенном первом опыте с новым устройством по фокусировке пучка протонов с энергией 50 ГэВ использовали кремниевую пластину длиной 10 мм и толщиной 500 мкм. Боковые грани пластины при вырезке были повернуты на угол 3° относительно кристаллографических плоскостей (111). Пластина была равномерно изогнута на угол 3 мрад способом, аналогичным примененному в [11]. При этом фокусное расстояние равно 17 см.

Пучок протонов умеренной интенсивности $\sim 10^6$ частиц/с выводился из ускорителя У-70 кристаллическим дефлектором, эта техника подробно описана в [14]. Пучок имел расходимость $\sigma_x \sim 0.1$ мрад, с помощью коллиматоров формировался профиль пучка с резкими границами размером $S_x \times S_y = 20 \times 20$ мм.

Геометрия расположения детекторов и кристалла в гониометре описана в [11]. Режим каналирования находился с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков. Эффект фокусировки был зарегистрирован дозиметрической пленкой ЕВТЗ при обработке изображения цифровым сканером с высоким разрешением. На рис. 2 показаны результаты опыта: рис. 2а увеличенное изображение сфокусированного пучка на пленке в виде узкой линии; рис. 2б – профиль пучка, полученный при цифровом сканировании. Как следует из рис. 2, сфокусированный пучок (пик в центре), прошедший через кристалл в режиме

каналирования, в несколько раз выше по плотности, чем падающий пучок. И это несмотря на то, что только $\sim 10\%$ падающих частиц отклонялись за счет каналирования в кристалле. Измеренный диаметр пучка в фокусе равен 30 мкм на полувысоте, как это видно на рис. 2с. При идеальных условиях размер пучка в фокусе определяется величиной $2F\theta_L \sim 10$ мкм. Однако измерить точно такую малую величину трудно, поскольку разрешение сканера и пленки также находится на уровне ~ 10 мкм. Поэтому наш измеренный профиль дает завышенную оценку реального размера сфокусированного пучка.

Таким образом, в работе впервые экспериментально проверена фокусировка пучка частиц высокой энергии кристаллическим устройством на расстоянии порядка 10 см. Ожидается, что фокусное расстояние можно уменьшить до одного сантиметра при использовании более тонкой пластины (около 100 мкм). Такой прибор позволит реализовать предложенные в работах [12, 13] эксперименты.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 17-12-01532.

1. V.M. Biryukov, Yu.A. Chesnokov, and V.I. Kotov, *Crystal Channeling and its Application at High-energy Accelerators*, Springer Berlin, Germany (1997).
2. A.G. Afonin, V.T. Baranov, V.M. Biryukov, M.B.H. Breese, V.N. Chepegin, Yu.A. Chesnokov, V. Guidi, Yu.M. Ivanov, V.I. Kotov, G. Martinelli, W. Scandale, M. Stefancich, V.I. Terekhov, D. Trbojevic, E.F. Troyanov, and D. Vincenzi, *Phys. Rev. Lett.* **87** 094802 (2001).

3. R. P. Fliller, A. Drees, D. Gassner, L. Hammons, G. McIntyre, S. Peggs, D. Trbojevic, V. Biryukov, Y. Chesnokov, and V. Terekhov, Nucl. Instrum. Methods B **234**, 47 (2005).
4. N. V. Mokhov, G. E. Annala, A. Apyan et al. (Collaboration), Int. J. Mod. Phys. A **25**, 98 (2010).
5. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), Phys. Lett. B **758**, 129 (2016).
6. V. A. Maisheev, Y. A. Chesnokov, and P. N. Chirkov, Nucl. Instrum. Meth. B **355**, 360 (2015).
7. M. A. Gordeeva, M. P. Gur'ev, A. S. Denisov, Yu. P. Platonov, V. V. Skorobogatov, A. I. Smirnov, O. L. Fedin, A. I. Shchetkovskii, V. I. Baranov, N. A. Galyaev, V. V. Dudenko, V. N. Zapol'skii, V. I. Kotov, S. V. Tsarik, and Yu. A. Chesnokov, JETP Lett. **54**, 487 (1991).
8. V. I. Baranov, V. M. Biryukov, A. P. Bugarsky, Yu. A. Chesnokov, V. I. Kotov, M. V. Tarakanov, V. I. Terekhov, S. V. Tsarik, O. L. Fedin, M. A. Gordeeva, M. P. Gur'yev, Yu. P. Platonov, and A. I. Smirnov, Nucl. Instrum. Methods B **95**, 449 (1995).
9. A. G. Afonin, V. I. Baranov, V. T. Baranov et al. (Collaboration), JETP Lett. **96**, 424 (2012).
10. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), Phys. Lett. B **733**, 366 (2014).
11. A. G. Afonin, G. I. Britvich, A. P. Bugorskii, M. K. Bulgakov, A. A. Durum, M. Yu. Kostin, A. V. Lutchev, V. A. Maisheev, Yu. E. Sandomirskiy, V. I. Pitalev, I. V. Poluektov, Yu. A. Chesnokov, P. N. Chirkov, and A. A. Janovich, JETP Lett. **104**, 12 (2016).
12. L. Burmistrov, G. Calderini, Yu. Ivanov, L. Massacrier, P. Robbe, W. Scandale, and A. Stocchi, Preprint CERN-SPSC-2016-030; SPSC-EOI-012, <http://cds.cern.ch/record/2194564>.
13. R. Tomas, CLIC Workshop, March 2017, <https://indico.cern.ch/event/577810/contributions/2492715/>
14. A. G. Afonin, E. V. Barnov, G. I. Britvich, A. A. Durum, M. Yu. Kostin, V. A. Maisheev, V. I. Pitalev, S. F. Reshetnikov, Yu. A. Chesnokov, and P. N. Chirkov, Instrum. Exp. Tech. **59**, 497 (2016).