Письма в ЖЭТФ, том 93, вып. 4, с. 205 – 208

Коллимация циркулирующего пучка в синхротроне У-70 с помощью отражения частиц в кристаллах с осевой ориентацией

А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, М. К. Булгаков, И. С. Войнов, В. Н. Горлов, И. В. Иванова, Д. М. Крылов, А. Н. Луньков, В. А. Маишеев, С. Ф. Решетников, Д. А. Савин, Е. А. Сыщиков, В. И. Терехов, Ю. А. Чесноков, П. Н. Чирков, И. А. Язынин

Государственный научный центр "Институт физики высоких энергий", Протвино, 142281 Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 18 января 2011 г.

В сеансе осень-2010 на У-70 были проведены экспериментальные исследования возможностей вывода и коллимации циркулирующего пучка новым способом – за счет отражения частиц в кристаллах с осевой ориентацией. Положительные особенности таких кристаллов связаны с тем, что осевой потенциал примерно в 5 раз выше плоскостного. Показано, что эффективность коллимации за счет осевых эффектов в кристалле может достигать величины 90%. В несколько раз уменьшены потери циркулирующего пучка на коллиматоре, за счет этого подавлен мюонный факел в районе стального коллиматора циркулирующего пучка.

Недавно сотрудниками ГНЦ ИФВЭ совместно с коллегами из нескольких российских и зарубежных научных центров было открыто новое физическое явление – отражение пучка протонов высокой энергии от изогнутых атомных плоскостей кристалла кремния [1 – 4]. Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит на малой длине в области, касательной к изогнутой атомной плоскости, приводя к отклонению частицы в сторону, противоположную изгибу. Вероятность отражения высока и при энергиях около 100 ГэВ приближается к единице. Явление отражения происходит в широкой области углов и более эффективно, чем обычное каналирование [5]. Поэтому имеются реальные перспективы для использования отражения при выводе и коллимации пучков на больших ускорителях.

Угол отклонения частиц при отражении от кристаллографических плоскостей ограничен величиной $1.5\,\theta_c$ (см., например, [2, 4]), где $\theta_c = (2U_c/pv)^{1/2}$ – критический угол каналирования, $U_c \sim 20$ эВ – величина плоскостного канала (111) в кремнии, p, v – импульс и скорость налетающей частицы. Для задач ускорительной физики требуется увеличение угла отражения в несколько раз. Было предложено два пути для этого: отражение на цепочке кристаллов [6]; отражение в одном кристалле, ориентированном вблизи оси, суммарным потенциалом нескольких косых плоскостей [7, 8].

Принцип усиления угла отражения на цепочке кристаллов показан на рис.1. Применяя $N \leq 10$ последовательно расположенных ориентированных кристаллов, можно увеличить угол отклонения частицы в $\sim(5-10)$ раз. Дальнейшее увеличение количества кристаллов приводит к потере эффективности процесса из-за возрастания количества ядерных взаимодействий.

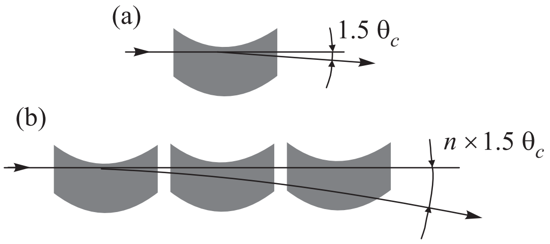


Рис.1. Усиление угла отражения на цепочке кристаллов

На рис.2 показано увеличение отклонения частицы при отражении в кристалле кремния, ориентированном вблизи кристаллографической оси. Эффект отражения от нескольких косых плоскостей, суммируясь, способен увеличить отклонение траектории частицы в $A_F \sim 3-5$ раз (A_F – аксиальный фактор).

Усиление угла отражения на цепочке из 10 изогнутых кристаллов применялось на У-70 для улучшения коллимации пучка [9]. Для этих же целей цепочка из 8 ориентированных кристаллов применялась на ускорителе Тэватрон [10]. В данной работе мы продемонстрировали наиболее оптимальный способ усиления угла отклонения частицы в кристалле при отражении, применив одновременно два упомянутых метода: цепочка из 6 изогнутых кристаллов ориентировалась вблизи кристаллографической оси $\langle 110\rangle$. Таким образом угол отражения протонов был увеличен в $(N \times A_F) \sim 20$ раз в сравнении с процессом в одиночном изогнутом кристалле с плоскостной ориентацией.

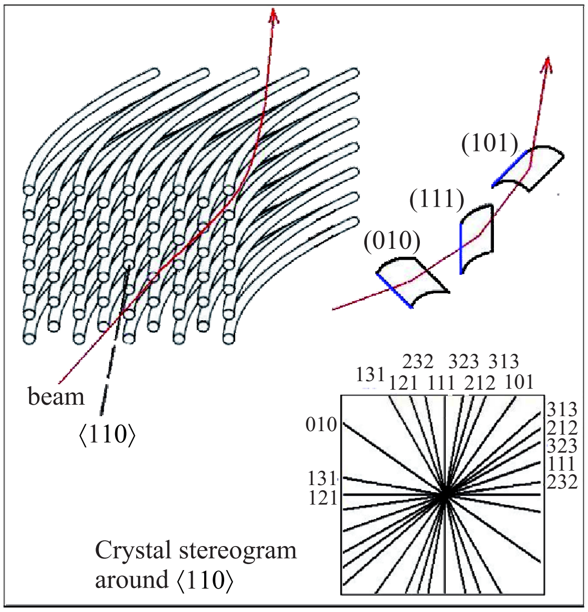
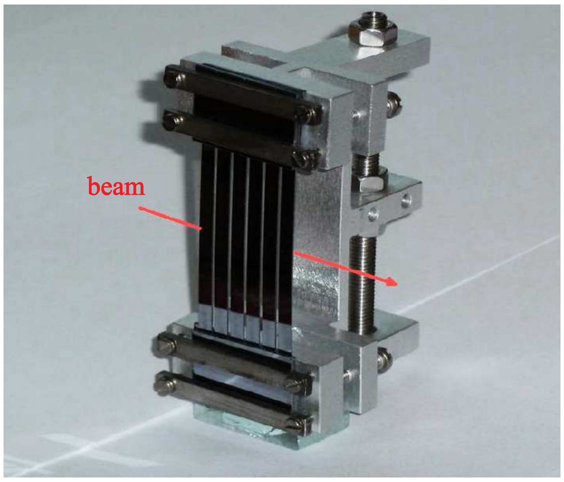


Рис.2. Схема отклонения частиц вблизи кристаллографической оси ⟨110⟩: к эффекту от основной изогнутой плоскости (111) добавляется отражение от косых плоскостей (010), (101) и других, менее сильных



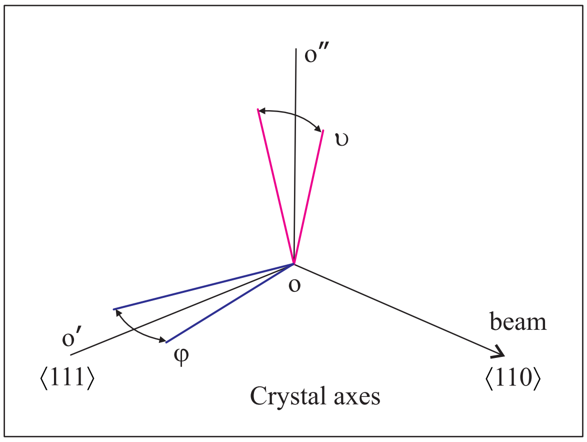


Рис.3. Конструкция кремниевого мультидефлектора (6 кристаллов) и схема его вращения в двухосевом гониометре

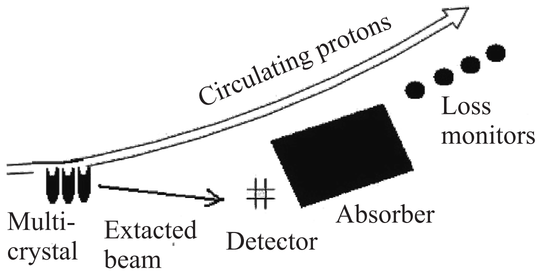


Рис.4. Схема эксперимента с мультикристаллом на циркулирующем пучке У-70

Для реализации такого кристаллического устройства мы применили конструкцию, показанную на рис.3a. Изгиб кристаллов осуществляется за счет анизотропных свойств кристаллической решетки. При изгибе каждой полоски в продольном направлении возникает нужный поперечный изгиб 1 мрад. Кроме того, поскольку все полоски выполнены из одной кремниевой пластины, сохраняется идеальная взаимная ориентация отдельных полосок как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. Это позволяет разместить мультидефлектор в двухосевом гониометре и достичь отклонения частиц как в плоском, так и осевом случаях (рис.3b).

Двухосевой гониометр с мультикристаллом был установлен в вакуумную камеру ускорителя и размещался в системе локализации потерь ускорителя У-70 на некотором расстоянии перед стальным поглотителем для обеспечения необходимого заброса пучка (рис.4). Эффективность работы установленных кристаллов определяется профилометрами на торце поглотителя, а качество работы системы коллимации – ионизационными камерами, расположенными после поглотителя.

В проведенном опыте пучок 50 ГэВ протонов подводился к мультикристаллу с помощью горизонтального искажения замкнутой орбиты медленно нарастающим бампом. После настройки наведения пучка мультикристалл вводился в режим отражения частиц на плоскостном потенциале (111) с помощью горизонтального вращения. Затем варьировался вертикальный угол гониометра. На рис.5a показана зависимость величины заброса частиц на поглотитель (расстояние, отсчитываемое от передней грани) от вертикального угла вращения гониометра. Отчетливо виден эффект усиления заброса, обусловленный осевым потенциалом кристалла, совпадающий с предска-

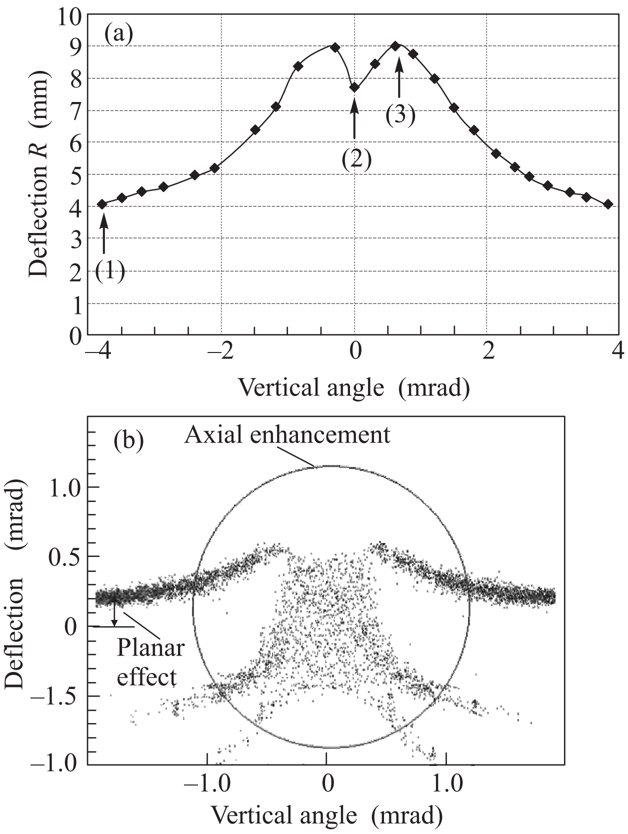


Рис.5. (a) – Глубина заброса протонов 50 ГэВ на поглотитель в зависимости от вертикального угла вращения. (b) – Расчет методом Монте-Карло увеличения угла отражения частиц в мультирефлекторе за счет осевых эффектов

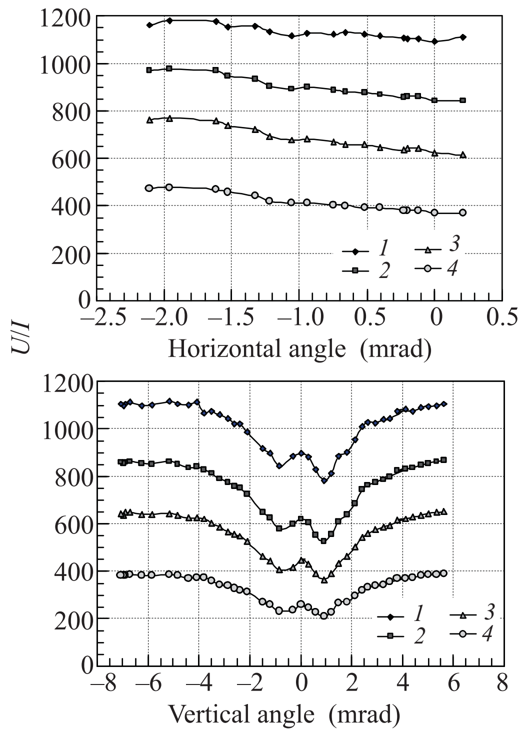


Рис.6. (a) – Уменьшение потерь при вращении горизонтального угла (плоскостное отражение). (b) – дальнейшее уменьшение потерь при настройке вертикального угла гониометра (отражение вблизи оси)

занием. Прохождение частиц в режиме отражения через 6 изогнутых кристаллов моделировалось методом Монте-Карло (рис.5b) по программе SCRAPER [11].

На рис.6 показаны эффекты уменьшения потерь частиц на ускорителе за поглотителем, измеренные четырьмя мониторами, при вариации горизонтального и вертикального углов вращения.

На рис.7 показаны характерные профили пучка на торце поглотителя, когда он коллимируется с помощью кристалла и без него. Видно, что максимальный заброс пучка и, следовательно, улучшение коллимации, происходит с применением отражения частиц в случае осевой ориентации кристаллического дефлектора.

Эффективность заброса пучка на поглотитель достигала 90%. Определение эффективности коллимации и другие экспериментальные подробности описаны в [12].

Таким образом, в работе продемонстрирован новый метод управления траекториями частиц, основанный на отражении частиц в мультикристалле, усиленном осевыми эффектами. Показано, что потери пучка при оптимальной юстировке мультикристалла уменьшаются в 2–3 раза по сравнению с разориентированным случаем, что соответствует расчету. Применение кристаллов с осевой ориентацией перспективно также для коллимации пучка в Большом адронном коллайдере и Международном линейном коллайдере.

Работа поддержана Дирекцией ГНЦ ИФВЭ, Госкорпорацией Росатом (контракт № Н.4е.45.03.09, 1047) и грантом Российского фонда фундаментальных исследований # 08-02-01453-а.

---

1. Y. M. Ivanov, A. A. Petrunin, V. V. Skorobogatov et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 144801 (2006).
2. W. Scandale, D. Still, A. Carnera et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007)
3. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, Phys. Lett. A **119**, 425 (1987).
4. V. A. Maisheev, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 084701 (2007).

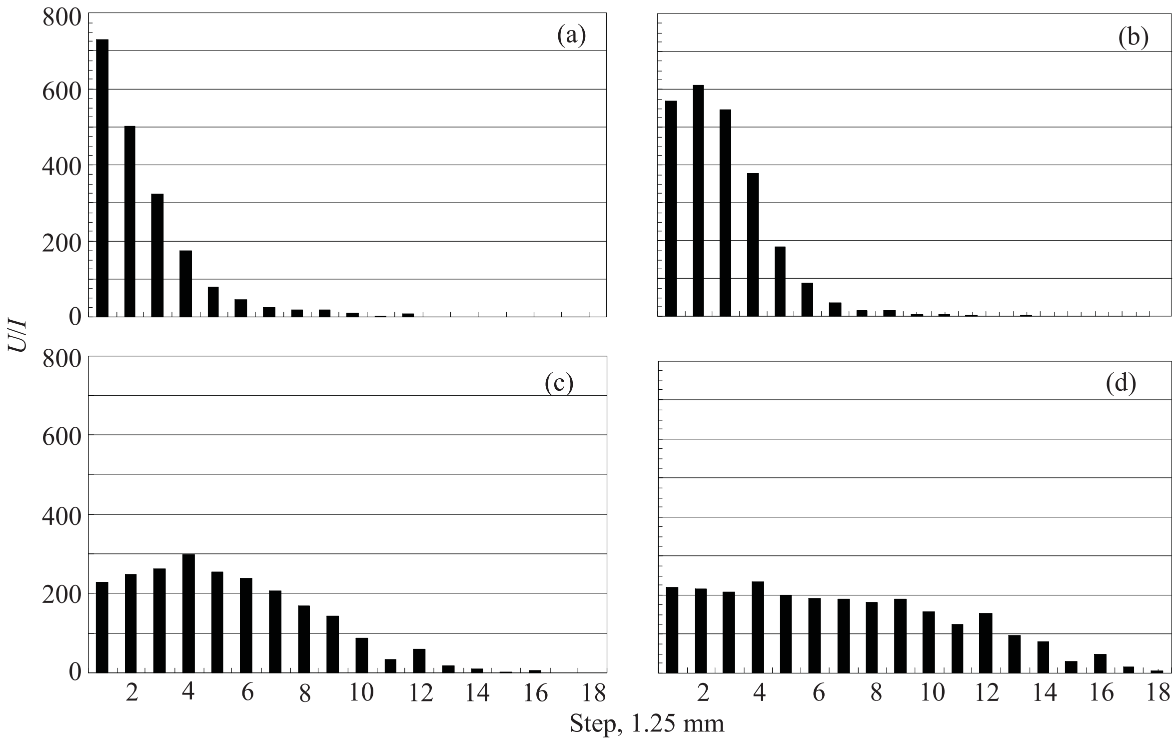


Рис.7. Профили пучка на торце поглотителя в случае: (a) – аморфного рассеяния, (b) – отражения на атомных плоскостях кристалла (угловое положение (1) на рис.5a), (c), (d) – отражения вблизи кристаллической оси (угловое положение (2) и (3) на рис.5a)

5. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, and V. I. Kotov, *Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators*, Springer: Berlin, 1997.
6. W. Scandale, A. Vomiero, S. Baricordi et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 084801 (2009).
7. V. V. Tikhomirov, Phys. Lett. B **655**, 217 (2007).
8. W. Scandale, A. Vomiero, E. Bagli et al., Phys. Lett. B **682**, 274 (2009).
9. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. N. Gorlov et al., Atomic Energy **106**, 409 (2009).
10. V. Shiltsev, G. Annala, A. Drozhdin et al., FERMILAB-CONF-10-127-APC, May 2010, p. 3, IPAC'10, Kyoto, Japan, 23–28 May 2010.
11. I. I. Degtyarev, O. A. Liashenko, and I. A Yazynin, Applications of Coupled SCRAPER-RTS&T Code in Radiation Therapy, Proc. of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 2506-2508.
12. A. G. Afonin, V. T. Baranov, S. Bellucci et al., JETP Letters **92**, 206 (2010).