

Использование изогнутого кристалла со спадающей кривизной для увеличения эффективности вывода и коллимации пучка в ускорителе

И. А. Языбин, В. А. Майшев, Ю. А. Чесноков

ГНЦ “Институт физики высоких энергий”, 142281 Протвино, Россия

Поступила в редакцию 26 мая 2011 г.

В работе показывается, что использование переменного радиуса кривизны кристалла позволяет на порядок уменьшить деканализированную фракцию частиц. Этот эффект дает возможность значительно снизить плотность частиц на кромке коллиматора или перегородке септума при многооборотном выводе пучка в кольцевом ускорителе. Так, на синхротроне У-70 можно увеличить эффективность вывода пучка до 95%, а на Большом адронном коллайдере – создать систему коллимации пучка с эффективностью 99.65%.

В настоящее время на нескольких крупных ускорителях проводятся исследования коллимации циркулирующего пучка с помощью когерентных явлений в ориентированных кристаллах. В пионерских работах ИФВЭ на синхротроне У-70 [1–3] показано, что с помощью канализирования в коротких изогнутых кристаллах кремния можно повысить эффективность вывода и коллимации пучка до 85%. Сейчас эта возможность подтверждена на коллайдерах СПС в ЦЕРН [4] и Теватроне в Фермилаб [5]. В связи с запуском Большого адронного коллайдера (БАК) и задачей увеличения его светимости проблема улучшения эффективности коллимации пучка становится особенно актуальной [6]. Проведены перспективные эксперименты по коллимации пучка с помощью явления отражения частиц в кристаллах [7–10]. Интересные предложения по использованию отражения частиц в кристаллах с нарастающей кривизной сформулированы в [11, 12].

В данной работе мы предлагаем способ улучшения коллимации или вывода циркулирующего пучка с помощью канализирования в коротком изогнутом кристалле со спадающей кривизной, что технически выглядит более просто. В этом случае нужно подготовить только один кристалл, в то время как при использовании отражения требуется несколько хорошо ориентированных кристаллов.

Существует несколько экспериментальных работ [13, 14], в которых исследовалось канализирование в кристаллах с переменной кривизной. Было замечено, что на участках кристалла со спадающей кривизной наблюдается низкое деканализование. Теоретически данный вопрос рассматривался в [15] для случая протяженного кристалла. Там в общем виде было отмечено, что кристаллы со спадающей кривизной

полезны для уменьшения радиационных нагрузок на элементы ускорителя за счет подавления процесса деканализования.

На рис. 1 продемонстрирован принцип применения короткого изогнутого кристалла для коллимации

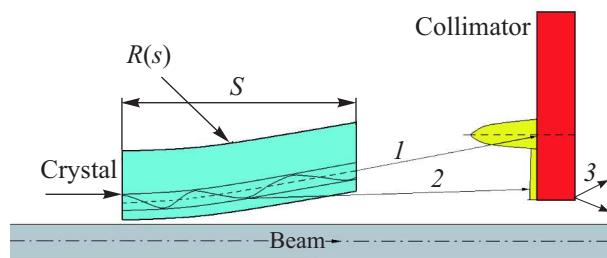


Рис. 1. Принцип коллимации пучка с помощью канализирующего кристалла

пучка в ускорителе. Частицы циркулирующего пучка увеличивают амплитуду поперечных колебаний за счет множества эффектов, таких, как рассеяние на остаточном газе, влияние нелинейностей, взаимодействие в точке встреч и т.д. В результате образуется гало пучка, частицы которого попадают на передний край кристалла. За счет эффекта канализирования большая часть гало пучка (фракция 1) отклоняется в глубь поглотителя. Лишь несколько процентов частиц отклоняется на неполный угол за счет деканализирования (фракция 2), что приводит к радиационным потерям на ускорителе (вторичные частицы 3). Кристалл со спадающей кривизной может уменьшить эту долю частиц.

Суть процесса подавления деканализирования можно проиллюстрировать с помощью представления

движения частиц на фазовой плоскости координата – угол (подробности такого подхода можно найти в [15]). Рассмотрим кристалл с постоянно изменяющимся радиусом кривизны с длиной s по ходу пучка. Зависимость радиуса от длины будет определяться как $R(s) = R_1(1 + sC_r/S)$, где C_r – коэффициент изменения кривизны. На входе кристалла радиус будет равен $R(0) = R_1$, а на выходе кристалла длиной S он увеличится до максимального значения $R(S) = R_1(1 + C_r)$. Угол изгиба и средний радиус кривизны кристалла будут определяться как

$$\alpha = \int_0^s \frac{ds}{R(S)} = \frac{S}{R_1} \frac{\ln(1 + C_r)}{C_r}, \quad R_0 = \frac{S}{\alpha} = \frac{R_1}{\chi(C_r)},$$

$$\chi(C_r) = \frac{\ln(1 + C_r)}{C_r}.$$

Для примера рассмотрим движение протонов на фазовой плоскости в кристалле кремния ориентации (110) (далее используются такие же кристаллы). Для случая протонов с энергией 7 ТэВ, соответствующей условиям работы БАК, коллимация пучка осуществляется кристаллом длиной 3 мм со средним радиусом 100 м и коэффициентом $C_r = 1$. Оптимальные длина кристалла и средний радиус изгиба рассчитаны в [16]. На рис. 2 замкнутая кривая 1 показывает гра-

приводит к выбыванию некоторой доли частиц из режима канализирования (процесс деканализирования). С другой стороны, за счет увеличения радиуса кривизны по ходу движения частиц доступная область канализирования увеличивается (кривая 2), частицы отодвигаются от границы максимального рассеяния и фракция деканализирующих частиц падает. Для строгого количественного описания взаимодействия протонов с изогнутым кристаллом переменной кривизны применялась программа SCRAPER [17], основанная на методе Монте-Карло. Варификация программы была проведена путем сравнения с экспериментальными данными [18] по канализированию пучка 400 ГэВ протонов в коротком кристалле кремния. Рассчитанная фракция деканализированных частиц совпала с измеренной в [18] с точностью до процента.

Далее был промоделирован процесс однократного прохождения протонов через кристалл со спадающей кривизной для двух энергий частиц в пучке. Первый расчет был выполнен для протонов с энергией $E = 70$ ГэВ, имеющихся на ускорителе У-70 (ИФВЭ). Оптимальная с точки зрения наиболее эффективного многооборотного вывода и коллимации длина кристалла составляет в этом случае $S \approx 0.4$ мм при угле отклонения $\alpha = 400$ мрад [16]. На рис. 3а приведены распределения отклоненного кристаллом пучка при разных коэффициентах изменения кривизны кристалла: от равномерно изогнутого ($C_r = 0$) до максимального значения $C_r = 4$.

Величина канализированной фракции (правый пик) уменьшается с 77 до 63% с увеличением градиента кривизны фракция первоначально не захваченных в режим канализирования протонов (левый пик) увеличивается с 20 до 35%, что объясняется уменьшением входного аксептанса. Плотность деканализированных протонов (область между пиками) при угле отклонения $x' = (0.2–0.25)$ мрад, что соответствует частичам, попадающим на септум или край коллиматора, уменьшается почти на два порядка.

Аналогичные угловые распределения протонов с энергией $E = 7$ ТэВ на выходе из кристалла с оптимальными для коллимации пучка на БАК параметрами ($\alpha = 30$ мрад, $L_c = 3$ мм) приведены на рис. 3б. Плотность деканализированной фракции уменьшается на два порядка в месте расположения края главного коллиматора, $x' = (15–20)$ мкрад. Это позволяет значительно уменьшить количество протонов, вышедших из коллиматора и теряющихся в кольце. Фракция канализированных протонов (правый пик) падает с 83 до 74% с увеличением градиента кривизны. Поэтому для оптимизации схемы коллимации или вывода пучка на БАК необходимо провести моделирование с

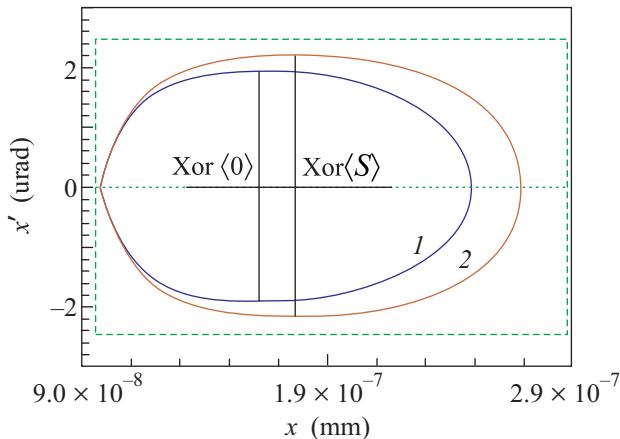


Рис. 2. Области канализирования пучка в изогнутом кристалле кремния со спадающей кривизной: 1 – в начале кристалла, 2 – в конце

ницу фазовой области траекторий частиц, доступной для канализирования в начале кристалла (входной аксептанс). Частицы, попавшие в эту область, будут осуществлять периодические колебания вокруг равновесной орбиты $x_{\text{ог}}$.

По мере движения в кристалле частицы испытывают рассеяние на электронах и ядрах решетки, что

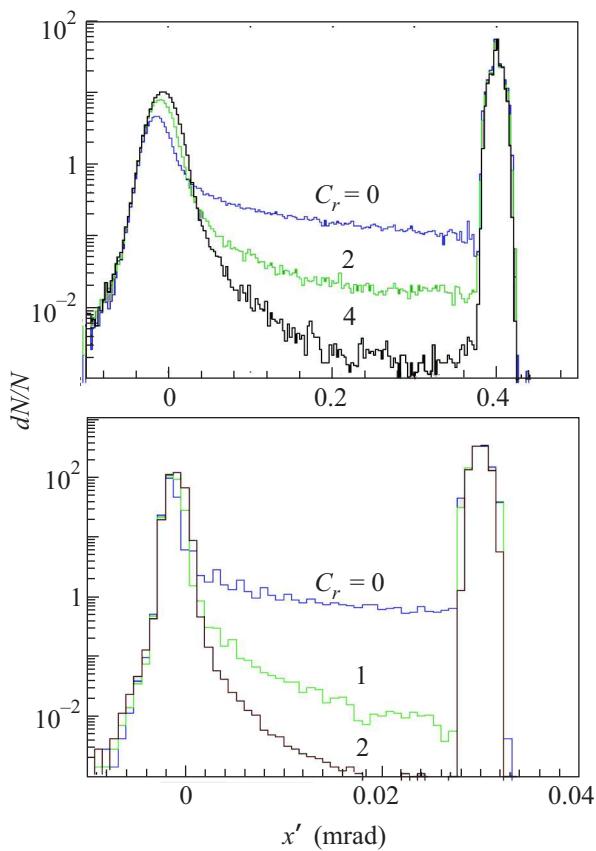


Рис. 3. Распределение протонов по угловому отклонению на выходе из кристалла Si(110) с энергией $E = 70$ ГэВ (а) и $E = 7$ ТэВ (б).

учетом многооборотного прохождения частиц через кристалл в ускорителе и потерь частиц как на коллиматоре, так и на кристалле.

Ранее было показано [16], что кристалл с постоянным радиусом кривизны может забросить достаточно глубоко в глубь коллиматора около 99% частиц на колладере БАК. Использование кристалла со спадающей кривизной, как показывают расчеты по программе SCRAPER, выполненные с учетом многооборотного движения частиц в ускорителе, позволяет дополнительно увеличить эффективность системы колиммации. Рассчитанные распределения частиц по координате попадания на основной коллиматор БАК для кристалла с переменной кривизной приведены на рис. 4.

Канализированная фракция протонов попадает в глубь коллиматора на расстояние 1.5 мм от его края и не вызывает потерь. На кромку коллиматора попадает только деканализированная фракция протонов. Из распределений видно, что плотность частиц на кромке коллиматора уменьшается более чем на порядок для кристалла со спадающей кривизной. Минимум

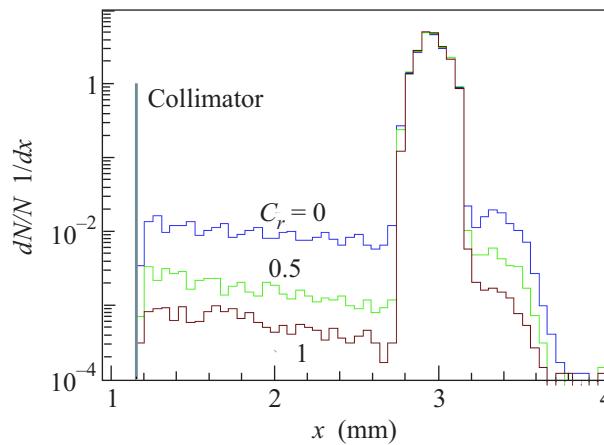


Рис. 4. Распределения частиц по координате на скрепе БАК при различных коэффициентах кривизны C_r

суммарных потерь на кристалле и коллиматоре наблюдается при коэффициенте кривизны $C_r = 1$. В этом случае величина потерь уменьшится в 4 раза (с 1.3 до 0.35%), то есть эффективность вывода при септуме 1 мм достигнет 99.65%, чего невозможно достичь даже с помощью медленного резонансного вывода.

Расчеты многооборотного вывода при энергии 70 ГэВ на У-70 показали, что с помощью кристалла со спадающей кривизной можно увеличить его эффективность с 85 до 95%.

В заключение отметим, что техническая реализация кристалла с переменным радиусом изгиба не вызывает проблем и может быть осуществлена с помощью устройств, примененных в [3].

Работа поддержана грантами РФФИ # 08-02-13533-офи-ц, 08-02-01453-а и 11-02-90415-Укр_фа.

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. W. Scandale, G. Arduini, R. Assmann et al., Phys. Lett. B **692**, 78 (2010).
5. N. V. Mokhov, G. E. Annala, A. Apyan et al., Proc. of Particle Accelerator Conference (PAC 09), Vancouver, BC, Canada, 1836 (2009).
6. R. Assmann, S. Redaelli, and W. Scandale, Proceedings of EPAC, Edinburgh, Scotland, 1526 (2006).
7. W. Scandale, D. A. Still, A. Carnera et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007).
8. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. N. Gorlov et al., Atomic Energy **106**, 409 (2009).

9. V. Shiltsev, G. Annala, A. Drozdin et al., Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 1243 (2010).
10. A. G. Afonin, V. T. Baranov, M. K. Bulgakov et al., JETP Lett. **93**, 187 (2011).
11. A. M. Taratin and W. Scandale, Nucl. Instrum. Meth. B **266**, 1012 (2008).
12. V. M. Biryukov and S. Bellucci, Nucl. Instrum. Meth. B **266**, 235 (2008).
13. W. M. Gibson, I. J. Kim, M. Pisharody et al., Nucl. Instrum. Meth. B **2**, 54 (1984).
14. Y. A. Chesnokov, N. A. Galyaev, V. I. Kotov et al., Nucl. Instrum. Meth. B **69**, 247 (1992).
15. 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.
16. I. A. Yazybin, V. A. Maishev, and Yu. A. Chesnokov, Proceedings of Channeling, Ferrara, Italy (2010).
17. I. I. Degtyarev., O. A. Liashenko, and I. A. Yazybin, Proceedings of EPAC 2506 (2000).
18. W. Scandale, A. Vomiero, E. Bagli et al., Phys. Lett. B **680**, 129 (2009).