



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФЭ 2008–8
ОП

А.А. Архипенко, А.Г. Афонин, В.Т. Баранов, А.П. Бугорский,
В.А. Гаврилушкин, В.Н. Запольский, В.И. Котов, А.В. Минченко,
С.Ф. Решетников, Ю.А. Чесноков

**ДЕЛЕНИЕ ПУЧКА ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 50 ГЭВ
СЛАБОВОЗМУЩАЮЩИМ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ
СПЛИТТЕРОМ**

Направлено в ПТЭ

Протвино 2008

Аннотация

Архипенко А.А., Афонин А.Г., Баранов В.Т. и др. Деление пучка протонов с энергией 50 ГэВ слабовозмущающим кристаллическим сплиттером: Препринт ИФВЭ 2008–8. – Протвино, 2008. – 6 с., 6 рис., библиогр.: 9.

Приводится описание станции деления пучка протонов с энергией 50 ГэВ, основанной на применении изогнутого кристалла. Ее особенностью является рациональная конструкция изгибающего устройства, позволившая минимизировать потери частиц при делении. Благодаря запуску новой станции 2 экспериментальные установки могли работать одновременно.

Abstract

Arhipenko A.A., Afonin A.G., Baranov V.T. et al. Splitting of 50 GeV Proton Beam by Low-Disturbing Bent Crystal Device: IHEP Preprint 2008–8. – Protvino, 2008. – p. 6, figs. 6, refs.: 9.

The description of splitting station of 50 GeV proton beam, based on application of bent crystal is resulted. Its feature is the rational design of crystal bending device, allowed to minimize losses of particles at splitting. Due to commissioning of the new station 2 experimental setups could work simultaneously in different beam lines.

Введение

Идеи использования каналирования частиц в изогнутых кристаллах для управления пучками были проверены и развиты во многих экспериментах (см. [1,2,3] и ссылки в них). Наиболее широкое практическое применение этот метод нашел на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ, где кристаллы используются в регулярных сеансах для вывода и формирования пучков [4,5]. Одним из направлений в использовании изогнутых кристаллов на ускорителе У-70 является деление выводимого пучка [4, стр. 172]. Такой подход дает возможность увеличить число одновременно проводимых экспериментов, что особенно важно при ограниченном количестве проводимых сеансов работы ускорителя. Ранее [6] в ИФВЭ были проведены эксперименты по делению пучка кристаллом, который располагался в конце блока № 29 У-70.

Недавно была создана станция деления выводимого пучка с использованием изогнутого кристаллического сплиттера, изготовленного по новой технологии. Этот кристалл практически не возмущает делимый пучок. С использованием этой станции обеспечен режим параллельной (одновременной) работы системы медленного вывода пучка в направлении каналов № 8/21/23 и в направлении канала № 22 экспериментальной зоны У-70. При этом в направлении каналов № 8/21/23 возможны различные режимы медленного вывода пучка (резонансного, стохастического либо медленного вывода с помощью изогнутого кристалла, расположенного в кольце ускорителя) без ограничения интенсивности.

Описание установки

В первых экспериментах [6] станция располагалась в конце блока № 29 ускорителя, перед квадрупольной линзой Q30. Это приводило к тому, что отклоненный кристаллом пучок попадал в линзу со смещением в горизонтальной плоскости ~6мм при осевом прохождении основного пучка. Таким образом, новое расположение станции устраняет этот фактор неустойчивости, упрощая процедуру настройки кристалла. Новая станция установлена в конце прямолинейного промежутка № 30 ускорителя (рис. 1).

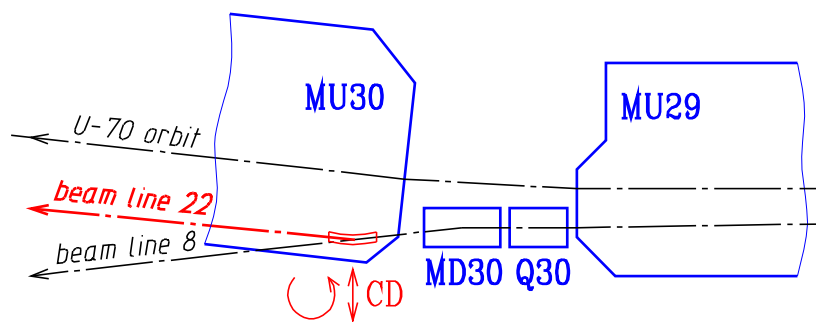


Рис. 1. Схема расположения кристаллической станции деления пучка (CD) в У-70: MU29, MU30 – магнитные блоки ускорителя, Q30 – квадрупольная линза, MD30 – раздаточный магнит.

В новой станции двигатели, обеспечивающие перемещение кристалла-сплиттера по координате и углу, вынесены на расстояние ~ 660 мм от трассы выводимого пучка, что существенно снижает величину магнитного поля ускорителя, действующего на станцию, т.к. станция расположена в непосредственной близости к ускорителю. Механизм станции обеспечивает радиальное перемещение кристалла-сплиттера и установку его в рабочее положение с точностью 0,1 мм (см. рис. 2). Полный ход каретки с кристаллом составляет 115 мм. В выведенном положении кристалл находится на значительном удалении от пучка, что существенно снижает его облучение.

Дистанционно управляемый гониометр, установленный на станции, создан на основе использования шагового двигателя и обеспечивает вращение сплиттера вокруг вертикальной оси с точностью 10 мкрад. Такая точность обеспечивает надежную юстировку кристалла по углу в максимуме функции распределения плотности пучка с расходимостью ~ 0.5 мрад. Полный диапазон углового перемещения равен 40 мрад, что обеспечивает возможность уверенного нахождения рабочего угла при ожидаемых погрешностях в монтаже станции на рабочем месте в диапазоне ± 5 мрад.

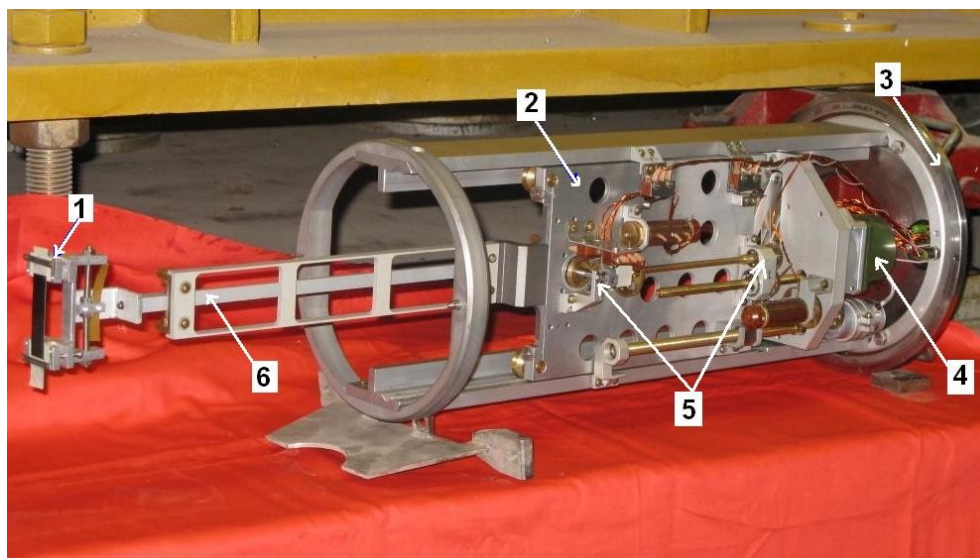


Рис. 2. Общий вид станции деления пучка с кристаллом и гониометром: 1 – изогнутый кристалл в держателе, 2 – каретка линейных перемещений, 3 – фланец вакуумного соединения, 4 – шаговый мотор, 5 – редуктор, 6 – коромысло угловых перемещений.

Поле раздаточного магнита MD30 обеспечивает угол ± 4 мрад отклонения пучка, так что угол разводки каналов 8 мрад. С учетом смещения центра поворота вдоль трассы (в кристалле по сравнению с магнитом), оптимальный угол изгиба кристалла составляет 10 мрад. Ранее подобный изгиб кристалла осуществлялся металлическими скобами (см. [4], стр. 85), так или иначе вносящими дополнительное вещество в пучок и, как следствие, вызывающими потери частиц из-за ядерных взаимодействий. Приготовление изогнутого кристалла с использованием двух оригинальных методов позволило снизить потери частиц при делении пучка до 0.01%, что на порядок лучше, чем в первых экспериментах [6].

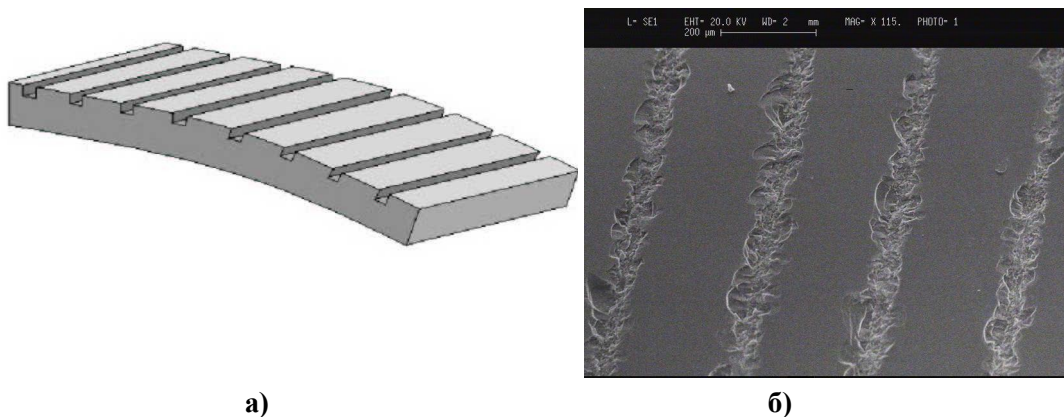


Рис. 3а, б. Изгиб кристалла с помощью нанесения микроканалов на его поверхности.

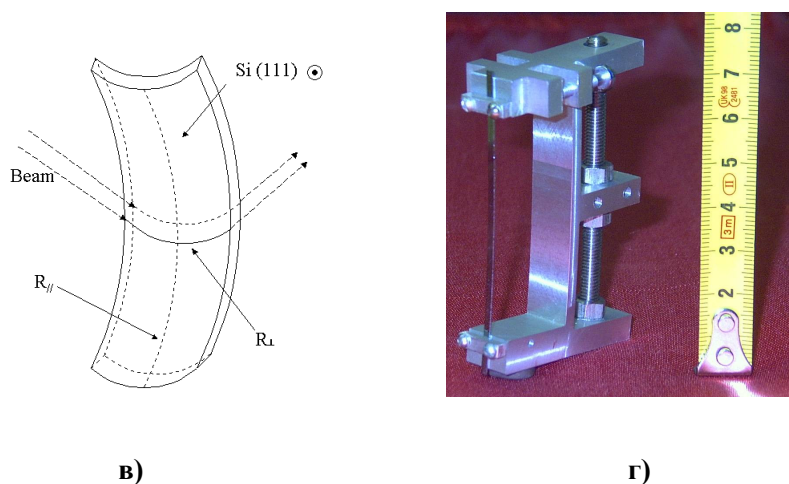


Рис. 3в, г. Изгиб за счет анизотропных свойств кристалла.

Первый способ заключается в придании кристаллу кривизны с помощью нанесения на одну из его поверхностей микроканалов (глубиной около 20 микрон), вызывающих неглубокие зоны с дефектами, которые создают суммарные напряжения, способные изгибать кристалл [6]. Рис. 3а показывает принцип, а рис. 3б реализацию этого метода. Другой способ изгиба кристаллической пластины связан с использованием анизотропных свойств атомной решетки [7]. При продольном изгибе пластины (рис. 3в) возникает заметный поперечный изгиб. Этот эффект обеспечивается специальной конструкцией держателя кристалла (рис. 3г). В новом приборе мы совместили оба этих метода: кристалл с канавками на поверхности дополнительно

изгибался в устройстве типа (рис 3г). Такой подход обеспечивает высокий темп изгиба кристалла – около 1 мрад на 1 миллиметре длины, так что требуемый размер кристалла вдоль пучка составляет всего 10 мм. Толщина кристалла была 0.5 мм, а вертикальный размер 50 мм. С учетом геометрии наведения пучка (при его размере 15 мм) потери частиц на кристалле в результате ядерных взаимодействий составили 0.01% от интенсивности всего пучка. Это приемлемая величина для любой интенсивности протонных и ионных пучков на У-70, вплоть до 10^{13} частиц в цикле.

В ходе наладки станции при работе с пучком были использованы штатные средства диагностики пучка ускорительного комплекса [5, стр. 65-74]. Однако при выводе в канал № 22 пучка с интенсивностью ниже 10^9 протонов за цикл работы ускорителя проблема детектирования осложняется из-за фоновых условий, вызываемых близостью расположения головной части канала к ускорителю. Для контроля положения и размеров пучка использовалась телевизионная система диагностики, в состав которой входят промышленные ПЗС-камеры и люминофор цезий-йод. В ходе эксперимента была измерена ориентационная кривая – зависимость интенсивности отклоненного кристаллом пучка за счет явления каналирования от угла ориентации кристалла относительно падающего пучка. Эта зависимость представлена на рис. 4.

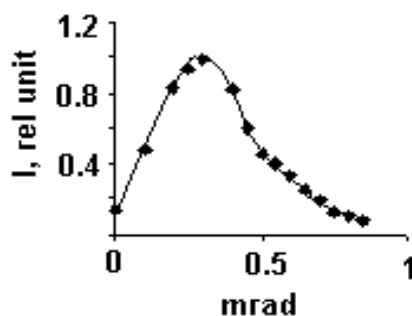


Рис. 4. Ориентационная кривая интенсивности отклоненного пучка.

В сеансе были проведены исследования в широком диапазоне интенсивности делимого пучка от 10^{11} до 10^7 протонов в цикле работы ускорителя. При этом эффективность кристалл-сплиттера оставалась неизменной и составила $\sim 10^{-3}$. С учетом геометрического фактора (соотношения размеров пучка и кристалла), эта величина хорошо согласуется с теоретическими моделями, описанными в [9]. В этом режиме была обеспечена работа в сеансе физической экспериментальной установки СВД. Было зафиксировано, что размер выводимого в этом режиме протонного пучка значительно меньше, чем в режиме медленного вывода пучка изогнутым кристаллом, работающим в кольце параллельно с внутренними мишенями.

Кроме того, фоновые условия на экспериментальной установке также существенно лучше, так как полярность включения раздаточного магнита MD30 соответствует основному направлению вывода, т.е. направлению каналов № 8/21/23. В этом случае все фоновые частицы, наряду с основным пучком, отклоняются в этом направлении. Частицы, рассеянные на веществе кристалла, также не попадают в канал № 22.

Так как стабильность характеристик выводимого таким образом пучка зависит от параметров основного пучка (его координаты и угла в месте расположения кристалла), то важным является исследование этих зависимостей. С этой целью были проведены следующие измерения:

- Зависимость от величины тока септум-магнита ОМ-26. Этот септум-магнит определяет положение первичного пучка в прямолинейном промежутке № 30 У-70, т.е. положение пучка по отношению к кристаллу. Изменение режима этого магнита меняет также и угол падения пучка

на кристалл. Изменение тока на 100 А приводит к смещению пучка на кристалле на 2,5 мм и к расстройке угла на 13 мкрад. Как показал эксперимент, достаточно сместить кристалл по координате на такое же расстояние, чтобы восстановить параметры пучка в канале № 22.

- Зависимость интенсивности пучка в канале № 22 от величины тока МД30. Эта зависимость без корректировки кристалла представлена на рис. 5.

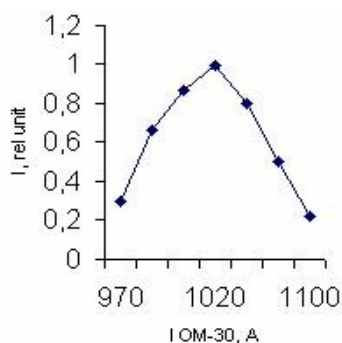


Рис. 5. Зависимость интенсивности отклоненного пучка от тока магнита МД30.

Как показывает практика, в ходе сеанса иногда возникает необходимость корректировки трассы основного пучка (выводимого в каналы 8/21/23). Это обеспечивается изменением режима отклоняющего магнита МД30 (см. рис.1) на ± 50 ампер. Такое изменение приводит к изменению положения первичного пучка (падающего на кристалл) на $\pm 0,2$ мм и угла падения пучка на кристалл на ± 200 мкрад. Как показали наши эксперименты, восстановление режима вторичного пучка (отклоняемого кристаллом) обеспечивается его соответствующей корректировкой по углу без изменения координаты.

Новая станция деления пучка работала около месяца и обеспечила пучок со средней интенсивностью 10^6 частиц в секунду на мишени экспериментальной установки СВД. Поперечные размеры выводимого пучка, его стабильность, фоновые условия полностью удовлетворяли требованиям экспериментальной установки. Профиль пучка на установке представлен на рис. 6

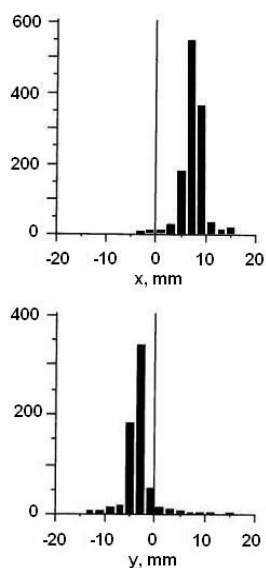


Рис. 6. Профиль пучка на мишени установки СВД.

Заключение

В ходе испытаний новой кристаллической станции были подтверждены положительные особенности метода формирования пучков изогнутыми кристаллами: высокая стабильность параметров выводимого пучка, возможность быстрой перестройки в широком диапазоне интенсивности, улучшенные фоновые условия. Эксперимент показал также высокую надёжность работы самой станции и системы управления. Новый режим внедрен в практику работы У-70.

Авторы работы выражают благодарность оперативному персоналу Отдела вывода и Отдела пучков за участие в проведении эксперимента и обеспечении этого сеанса.

Работа поддержана Дирекцией ИФВЭ, Госкорпорацией "Росатом" и грантами РФФИ № 07-02-00022-а, 08-02-01453-а, 08-02-13533-офи_ц.

Список литературы

- [1] **Steering Of The Charged Particle Trajectories By A Bent Crystal.** [A.F. Elishev et al](#) JINR-D1-12716, Aug 1979. 10 pp. Published in *Phys. Lett.* **B88: 387, 1979**, *JETP Lett.* **30:442, 1979**.
- [2] **Results of bent crystal channeling and collimation at the Relativistic Heavy Ion Collider.** [R.P. Fliller](#), [A. Drees](#), [D. Gassner](#) et al Jan 2006. 12 pp. Published in *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **9:013501, 2006**.
- [3] **High-efficiency volume reflection of an ultrarelativistic proton beam with a bent silicon crystal.** [W. Scandale et al.](#) 2007. 4 pp. Published in *Phys. Rev. Lett.* **98:154801, 2007**.
- [4] **Crystal channeling and its application at high-energy accelerators.** [V.M. Biryukov](#), [Yu.A. Chesnokov](#), [V.I. Kotov](#) ([Serpukhov, IHEP](#)). 1997. 219 pp. Berlin, Germany: Springer (1997), 219 p.
- [5] **Proton beam extraction from the IHEP accelerator using short silicon crystals.** [A.G. Afonin et al.](#) 2005. 57 pp. Published in *Phys. Part. Nucl.* **36:21-50, 2005**, *Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra* **36:43-99, 2005**.
- [6] **Использование кристаллического сплиттера для организации одновременной работы медленного вывода в двух направлениях.** А.А. Архипенко, А.Г. Афонин, А.П.Бугорский и др. Препринт ИФВЭ 90-91, Протвино, 1990.
- [7] **Crystal undulator experiment at IHEP.** [Afonin A. G. et al.](#) May 2005. 6 pp. Published in *Nucl. Instrum. Meth.* **B234:122-127, 2005**.
- [8] **Crystal deflector for highly efficient channeling extraction of a proton beam from accelerators.** [V. M. Biryukov](#), [Yu. A. Chesnokov](#), [V. I. Kotov](#) et al. Published in *Rev. Sci. Instrum.* **73:3170-3173, 2002**.
- [9] **Steering of high-energy charged particle beams by bent single crystals.** [V.M. Biryukov](#), [V.I. Kotov](#), [Yu.A. Chesnokov](#) ([Serpukhov, IHEP](#)). Oct 1994. 24 pp. Published in *Phys. Usp.* **37:937-960, 1994**.

Рукопись поступила 25 июня 2008 г.

А.А. Архипенко, А.Г. Афонин, В.Т. Баранов и др.
Деление пучка протонов с энергией 50 ГэВ слабозмущающим кристаллическим сплиттером.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 25.06.2008. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ. л. 1. Уч.- изд. л. 0,8. Тираж 80. Заказ 49. Индекс 3649.
ЛР №020498 от 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2008-8, ИФВЭ, 2008
