

Исследование эффективности вывода пучка протонов с энергией 50 ГэВ из кольцевого ускорителя кремниевыми кристаллами, изогнутыми на разные углы

А. А. Архипенко, А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, Г. И. Бритвич, В. И. Котов, В. А. Маишеев¹⁾, А. В. Максимов, С. Ф. Решетников, В. Н. Чепегин, Ю. А. Чесноков¹⁾, И. А. Язынин

ГНЦ ИФВЭ, Протвино, 142281 Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 4 июля 2008 г.

Приводятся данные измерения эффективности вывода протонов из У-70 кристаллами кремния с углами изгиба 36 и 64 мрад. Данные подтверждены результатами компьютерного моделирования. Сделаны предложения по использованию нескольких кристаллов для вывода частиц из У-70 в моде ускорения ионов углерода.

PACS: 29.27.–a, 42.79.Ag, 61.85.+p

В настоящее время в Государственном научном центре Институт физики высоких энергий (ГНЦ ИФВЭ) активно ведутся работы по получению и ускорению пучков ионов. Это направление связано с применением ионов, в частности, ионов углерода, для медицинских целей, а также развитием программы физических исследований с пучками ионов высоких энергий на ускорителе У-70, которая включает в себя как исследование кварк-глюонной плазмы, так и развитие современных технологий ионной имплантации и физики материалов, в частности наноструктур. В экспериментальном зале У-70 должно работать не менее 4 установок одновременно. Традиционные методы организации выведенных пучков для этого представляются слишком дорогостоящими и требуют больших площадей. Настоящая работа исследует возможности использования изогнутых кристаллов для вывода ускоренных частиц из У-70.

В основе метода вывода лежит использование нескольких изогнутых на разные углы кристаллов вместо аморфных мишеней. В ГНЦ ИФВЭ накоплен большой опыт по использованию изогнутых кристаллов для вывода протонов из У-70 (см. [1] и ссылки), а также использованию аморфных мишеней на циркулирующем пучке для генерации вторичных частиц [2], на которых сейчас работает примерно половина экспериментальных установок. В новой моде работы У-70 на все установки необходимо транспортировать первичные частицы, то есть ионы, из кольца. С помощью каналирования в нескольких изогнутых кристаллах, устанавливаемых в оптимальных местах

на циркулирующий пучок У-70, эта проблема может быть решена.

Ожидаемое количество циркулирующих ионов в ускорителе и каналирующие свойства кристаллов для отклонения ионов существенно отличаются от соответствующих величин для протонов. Кроме того, эффективность вывода протонов и ионов из У-70 с ростом угла отклонения из кольца (который может меняться в пределах от 1 до 80 мрад для разных установок) уменьшается на несколько порядков.

Поэтому для оптимизации системы вывода в новой моде У-70, в первую очередь, должна быть исследована зависимость эффективности вывода от угла отклонения частиц кристаллом. Ранее в [1] было установлено, что при углах изгиба кристалла ~ 1 мрад достигается высокая эффективность вывода частиц, 85%. В [3] при выводе протонов в направлении канала частиц № 2 под углом 80 мрад к орбите пучка был получен пучок частиц до 10^7 в секунду при эффективности $\sim 10^{-4}$.

Для определения эффективности вывода протонов в промежуточном случае были изготовлены новые кристаллы Si(111) с углами изгиба 36 и 64 мрад (рис.1). Показанная конструкция изгибающих устройств, опробованная в [4] на выведенном пучке, содержит относительно малое количество вещества держателя и обеспечивает необходимые углы изгиба кристалла при их оптимальных размерах. Новые кристаллы были установлены в 19 магнитном блоке У-70 в высоковакуумном гониометре. Параметры гониометра и другие технические подробности опыта можно найти в [1].

С помощью медленно нарастающего поля бамп-магнита на кристаллы наводился циркулирующий

¹⁾e-mail: Maisheev@ihep.ru, Chesnokov@ihep.ru

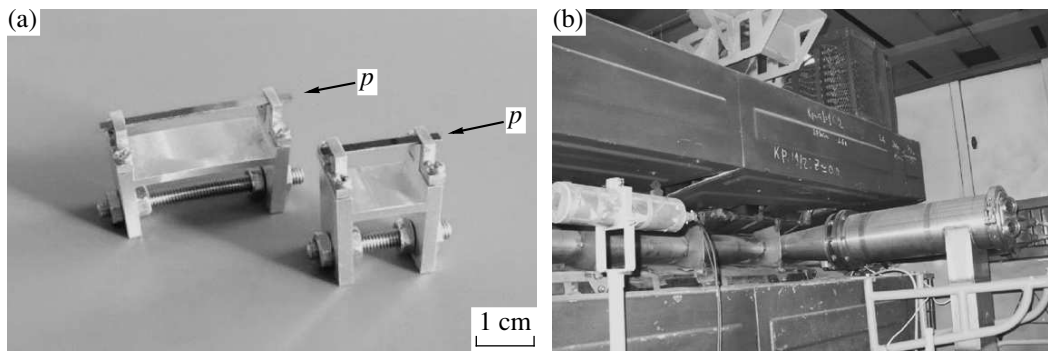


Рис.1. (а) Подготовка кристаллов с углами изгиба 36 мрад (более короткий кристалл) и 64 мрад. (б) Установка кристаллов в ускоритель (цилиндрический бокс с гониометром внутри)

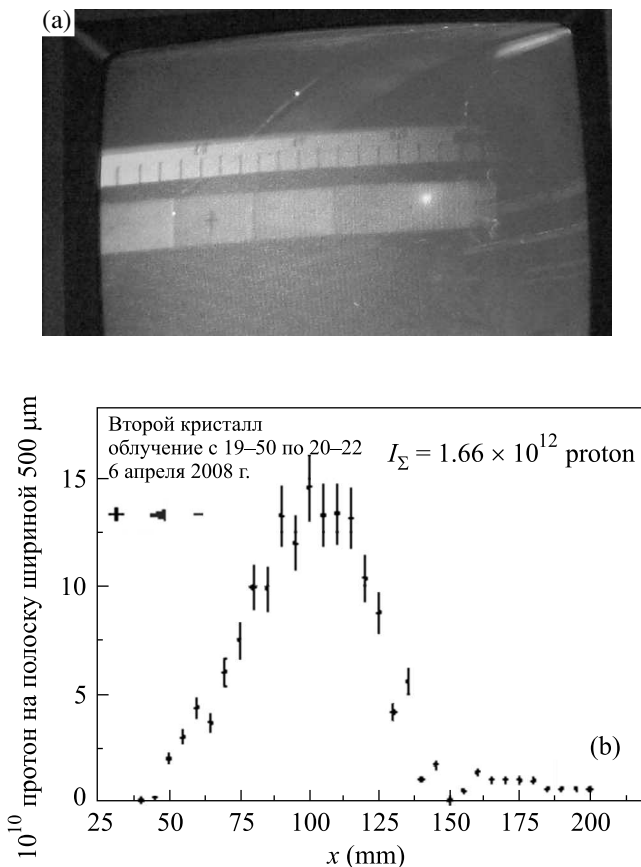


Рис.2. (а) Изображение выведенного пучка на экране (яркое пятно справа). (б) Профиль этого пучка, измеренный активационным методом

пучок интенсивностью 10^{12} протонов в цикле. На выходе из вакуумной камеры ускорителя был установлен люминофорный экран и настройка вывода пучка осуществлялась с помощью телевизионной системы. Далее измерение интенсивности и профилей выведенного пучка осуществлялось активационным методом. На рис.2 представлены изображения выведенно-

го пучка на экране и восстановленный по активации слойки из алюминиевых фольг профиль этого пучка.

При наведении на кристаллы 10^{12} протонов в цикле кристалл 1 (36 мрад) отклонял $5 \cdot 10^9$ частиц, кристалл 2 (64 мрад) отклонял $\sim 10^9$ частиц. С учетом потерь частиц на стенке вакуумной камеры при выходе из У-70, измеренная эффективность первого кристалла равна $(1.0 \pm 0.5)\%$, другого – $(0.15 \pm 0.08)\%$ при накоплении статистики по 300 циклам ускорения. Экспериментальные данные по эффективности вывода в зависимости от угла изгиба кристаллов приведены на рис.3 в сравнении с результатами компьютерно-

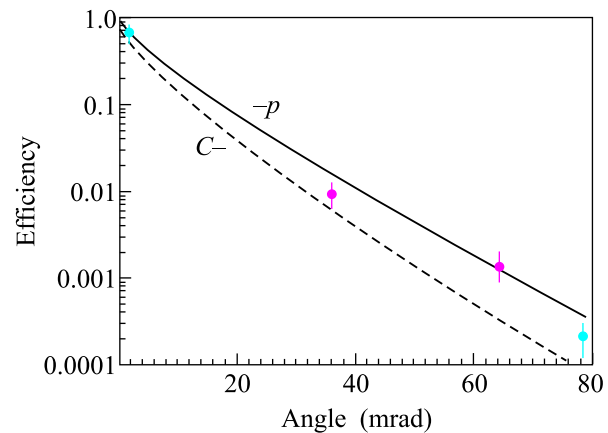


Рис.3. Зависимость эффективности вывода пучка из У-70 от угла его отклонения в изогнутом кристалле: кривые – компьютерное моделирование для протонов и ионов углерода, точки – эксперимент на протонах

го моделирования. В расчетах учитывался многооборотный характер движения частиц через кристалл и рассматривалось взаимодействие частиц с кристаллом и держателем [5]. Канализующие свойства описывались программой SCRAPER [6]. Наблюдается согласие экспериментальных данных с расчетом, поз-

воляющее делать прогнозы для вывода ионов и оптимизации режимов работы У-70 с ионами. Поскольку ожидаемая интенсивность ионов углерода составляет 10^{10} частиц в цикле, для одновременной работы нескольких установок, использующих кристаллические мишени, целесообразно ограничивать углы вывода частиц к орбите У-70 величиной 60 мрад. Один из проработанных вариантов разводки ионных пучков в каналы У-70 показан на рис.4.

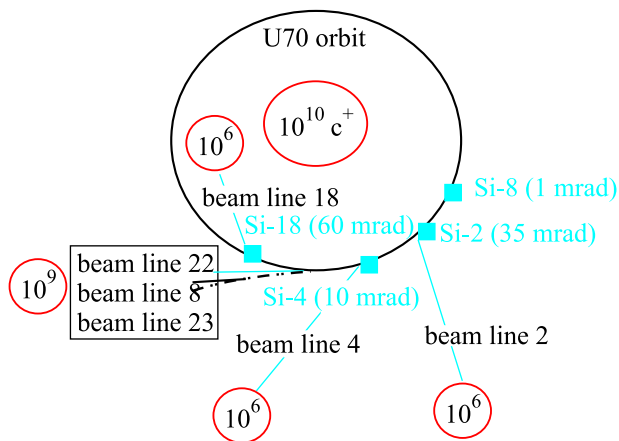


Рис.4. Возможная схема вывода ионов в каналы частиц У-70

Предлагаемый метод вывода частиц несколькими изогнутыми на разные углы кристаллами представляется рациональным и удобным. Положительными сторонами метода вывода пучка кристаллами являются также возможность одновременной работы нескольких установок на ограниченном пространстве, отсутствие пульсаций интенсивности во времени и простота реализации. Полученные зависимости эффективности вывода пучка кристаллом от уг-

ла изгиба характерны не только для У-70. При небольшой вариации, учитывающей особенности расположения кристалла и параметры машины, эти данные отражают общую закономерность для мультигигаэлектронвольтных ускорителей и коллайдеров.

Авторы 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 Российского фонда фундаментальных наук ## 07-02-00022-а, 08-02-01453-а, 08-02-13533-офи.ц.

1. А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, В. М. Бирюков и др., *Вывод пучка протонов из ускорителя ИФВЭ с помощью коротких кристаллов кремния*, ЭЧАЯ **36**, 44 (2005).
2. V. I. Gridasov, K. P. Myznikov, and V. N. Chepegin, *Zh. Tekh. Fiz.* **44**, 1477 (1974).
3. A. A. Aseev, M. D. Bavizhev, E. A. Lyudmirsky et al., *Nucl. Instrum. Meth. A* **309**, 1 (1991); A. P. Bugorsky, A. N. Vasiliev, V. N. Grishin et al., *Instrum. Exp. Tech.* **44**, 1 (2001); *Prib. Tekh. Eksp. N1*, 14 (2001).
4. S. Stokov, V. Biryukov, Yu. Chesnokov et al. *J. Phys. Soc. Jap.* **76**, 064007 (2007).
5. А. Г. Афонин, Ю. С. Федотов, Ю. А. Чесноков, И. А. Язынин, *О возможности вывода ускоренного пучка легких ионов в направлении 18 канала при помощи изогнутого кристалла*, Доклад на Международном совещании "Взаимодействие легких ядер с ионами", Протвино, октябрь, 2006 г.
6. I. I. Degtyarev, O. A. Liashenko, and I. A. Yazynin, *Applications of Coupled SCRAPER-RTS&T Code in Radiation Therapy*, Paper presented at Particle Accelerator Conference, 2001, p. 2506.