

Прогресс в исследовании вывода пучка протонов из У-70 с помощью изогнутых монокристаллов

А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, В. М. Бирюков, В. И. Котов, В. А. Маишеев, В. И. Терехов, Е. Ф. Троянов, Ю. С. Федотов, В. Н. Чепегин, Ю. А. Чесноков¹⁾, Ю. М. Иванов⁺, В. Гвиди*, Г. Мартинелли*, М. Стефанчик*, Д. Винченци*, Д. Трбоевич[□], В. Скандале[△], М. Б. Х. Бриз[▽]

Институт физики высоких энергий РАН, 142284 Протвино, Россия

⁺ Санкт-Петербургский институт ядерной физики РАН, 188350 Санкт-Петербург, Россия

* Ferrara University, I-44010 Italy

□ Brookhaven National Laboratory, Opton, 11973 USA

△ CERN, Geneva, Switzerland

▽ Surrey University, Surrey, UK

Поступила в редакцию 30 мая 2001 г.

Благодаря применению коротких кристаллов длиной до 1.8 мм, изогнутых на небольшой угол ~ 1 мрад, достигнуто радикальное увеличение эффективности вывода пучка из ускорителя, связанное с ростом кратности прохождения частиц через кристалл. Экспериментально достигнута рекордная эффективность вывода 70 ГэВ протонов свыше 80%, согласующаяся с предсказанием теории. Показана возможность эффективной работы кристалла при энергии инжекции 1.3 ГэВ.

PACS: 29.27.Ac

В нескольких лабораториях мира развивается новый метод вывода пучков из ускорителей, основанный на применении изогнутых кристаллов [1–5].

Положительными сторонами этого метода являются простота реализации, возможность совмещения с коллайдерным режимом или внутренними мишенями и малая величина пульсаций интенсивности во времени. Кристалл имеет минимальную “толщину септума” и поэтому очень удобен также для применения в системе локализации потерь в качестве когерентного рассеивателя.

Однако долгое время исследователям не удавалось достичь высокой эффективности вывода, так как при однократном прохождении пучка ускорителя через кристалл в режим каналирования захватывалась лишь небольшая часть частиц. Идея резкого увеличения эффективности вывода заключается в использовании очень короткого кристалла [6, 7]. В протяженных, изогнутых на большие углы кристаллах, которые использовались ранее, потери частиц при деканалировании были велики. В случае короткого кристалла, помимо уменьшения потерь частиц из-за деканалирования, выигрыш в росте эффективности достигается также за счет значительного уменьшения рассеяния на длине кристалла. При этом начи-

нает работать механизм роста эффективности вывода частиц, связанный с увеличением среднего числа прохождений частиц через кристалл. Уже первые экспериментальные работы в этом направлении [3–5], выполненные коллаборацией исследователей на 70 ГэВ ускорителе ИФВЭ, привели к существенному улучшению параметров вывода в сравнении с известными мировыми данными: была достигнута интенсивность вывода пучка протонов с энергией 70 ГэВ свыше 10^{11} протонов в цикле при эффективности около 40%. Этим были использованы короткие кристаллы кремния длиной и 5 мм и углами изгиба 1.7 и 1.5 мрад, соответственно, по двум разным технологиям: в виде и 0-образной формы (эти конструкции описаны в [3–5]).

Эти технологии приготовления изогнутых кристаллов получили дальнейшее развитие. Путем создания новых кристаллов, более коротких, лучше полированных и лучше изогнутых, удалось получить эффективность вывода до 85%.

В настоящее время на ускорителе У-70 размещено несколько кристаллов. Их места расположения выбраны таким образом, чтобы изогнутые кристаллы представляли собой первые ступени системы медленного вывода. Характеристики кристаллов представлены в таблице. Кристаллы в виде полосок (П-тип) имеют ориентацию Si(111), 0-кристаллы

¹⁾ e-mail: chesnokov@mx.ihep.su

Характеристики установленных кристаллов

№ кристалла	Место расположения, № магнитного блока	Тип	Угол, мрад	Длина × высота × толщина, мм ³	Эффективность, %	Примечания
1	106	П	1.0	2.0×35×0.5	85 80	схема вывода: 106-24-26 схема вывода: 106-20-22
2	106	О	0.7	3.5×5.0×0.7	60	
3	19	П	2.0	5.0×45×0.5	67	
4	19	О	2.1	5.0×5.0×0.7	65	
5	19	О	2.3	5.0×5.0×0.6	45	поток частиц $\sim 2 \times 10^{20}/\text{см}^2$
6	84	П	0.8	1.8×27×0.5	85 20	70 ГэВ 1.3 ГэВ
7	84	О	1.7	2.5×5.0×0.5	60	
8	86	П	1.4	4.0×45×0.5	65	

(О-тип) имеют ориентацию Si(110). Специально создаваемое локальное искажение орбиты обеспечивает подведение пучка к рабочему кристаллу. Расположение оборудования и приборов диагностики, а также характеристики пучка в ускорителе подробно описаны в [3–5].

Все приборы диагностики пучка (телевизионная система наблюдения, мониторы потерь, профилометры, измерители интенсивности) предварительно тестировались в режиме быстрого вывода и калибровались с помощью трансформаторов тока. Согласно результатам калибровки, абсолютная ошибка измерений интенсивности выведенного пучка не превышала 2% [8]. Фоновые условия периодически измерялись при разориентации кристалла и при выводе его из пучка ускорителя. Согласно измерениям, уровень фона вместе с шумами аппаратуры не превышал 3% от интенсивности каналированного пучка. Доля наведенного на кристалл пучка определялась с систематической ошибкой $\sim 1\%$ по измерениям интенсивности циркулирующего пучка до и после осуществления вывода. С учетом всех факторов общая систематическая ошибка измерений эффективности составляла $\simeq 4\%$. Эффективность вывода (отношение интенсивности выведенного пучка к величине интенсивности, наведенной на кристалл) определялась в каждом цикле работы ускорителя. Для каждой экспериментальной точки набиралась статистика в течение нескольких сотен циклов. Для получения равномерного наведения пучка на кристалл использовался монитор обратной связи на основе ФЭУ с сцинтиллятором.

Наилучший результат был получен с применением самых коротких кристаллов №1 и №6 длиной

2 мм и 1.8 мм, соответственно, выполненных в виде узких полосок. На рис.1 представлены результаты исследований для кристалла №1. При работе с этим кристаллом достигалась эффективность вывода $(85 \pm 2.8)\%$ при интенсивности пучка в ускорителе $1 \cdot 10^{12}$ частиц в цикле. Дальнейшие исследования должны показать, насколько интенсивность выводимого кристаллом пучка может быть увеличена.

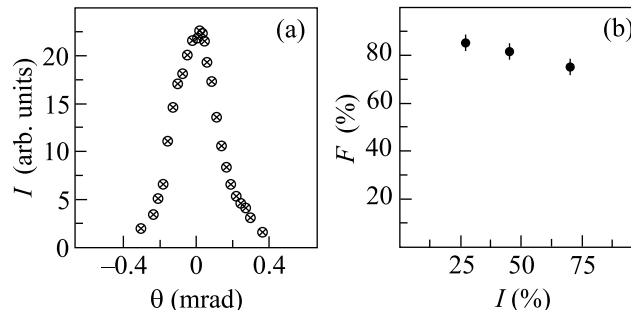


Рис.1 (а). Зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла №1, (б) Зависимость эффективности вывода пучка F кристаллом №1 от интенсивности пучка I , наведенного на кристалл (в процентах от пучка, циркулирующего в У-70)

Кристалл №6 был использован в системе локализации потерь в качестве когерентного рассеивателя. Он был установлен в 20 м перед коллиматором пучка и $(85 \pm 2.8)\%$ падающих частиц забрасывал в глубь его тела. На рис.2 представлены результаты измерения профиля пучка на входе коллиматора в различных режимах. При наведении непосредственно на край коллиматора (рис.2а), как и ожи-

далось, параметры заброса частиц очень малы, сосредоточены вблизи края, это уменьшает эффективность коллимации. Случай рис.2b соответствует разориентированному кристаллу, рис.2c – ориентированному, когда большая часть частиц падает в глубь коллиматора. График рис.2d отражает ситуацию, когда пучок забрасывается на коллиматор быстрым кикер-магнитом. Заброс кикер-магнитом использовался для калибровки измерений доли отклоненного кристаллом пучка.

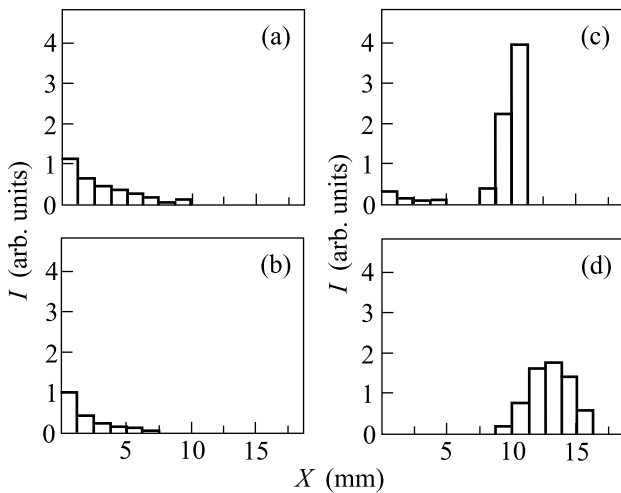


Рис.2. Профили пучка, измеренные на торце коллиматора: (a) кристалла нет, наведение прямо на коллиматор; (b) кристалл в пучке, разориентирован; (c) кристалл в пучке, ориентирован; (d) кристалла нет, пучок забрасывается кикер магнитом

При применении кристалла радиационные уровни за коллиматором были снижены в несколько раз.

На рис.3 представлены обобщенные экспериментальные результаты измерений эффективности вывода пучка кристаллами разной длины (см. таблицу) в сравнении с результатами моделирования, учитывающего транспортировку частиц в кристалле (программа SATSN [9]) и многооборотное движение в ускорителе. Как видно из этого рисунка, экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

Разработанные короткие кристаллы длиной по пучку ~ 1 мм могут применяться не только на ускорителях высоких энергий, но и при энергии частиц ~ 1 ГэВ. Так, на ускорителе У-70 были проведены первые тесты по отклонению протонов с энергией 1.3 ГэВ (энергия инъекции синхротрона У-70). Полученный в этих условиях профиль отклоненного кристаллом № 6 пучка показан на рис.4. Спецификой этого случая является значительное кулоновское рассея-

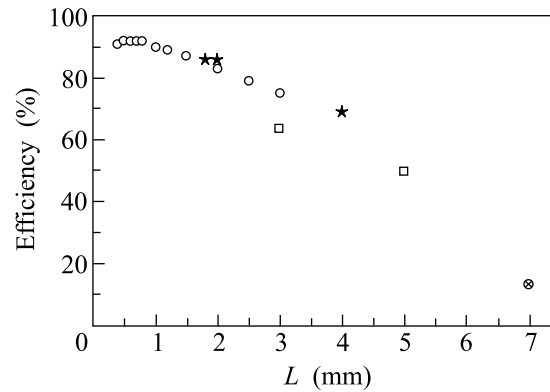


Рис.3. Эффективность вывода пучка протонов кристаллом, измеренная при энергии 70 ГэВ. (*) – результаты 2000 г., (□) – 1999–2000 гг., (⊗) – 1997 г., (o) – теоретически предсказанная (EPAC'2000 [11]) эффективность вывода для дефлектора с идеальным изгибом на 0.9 мрад

ние частиц на кристалле. Среднеквадратичный угол рассеяния ~ 1 мрад сравним с углом изгиба кристалла. Однако и здесь каналированные частицы состав-

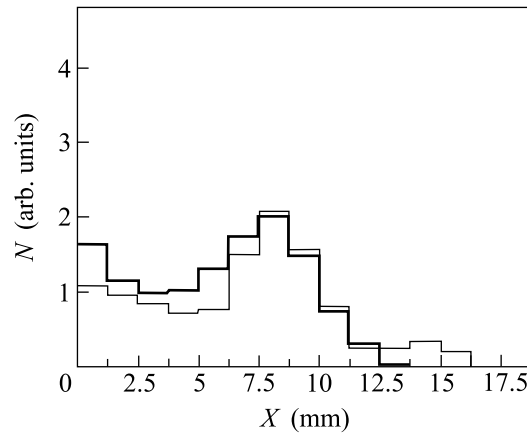


Рис.4. Профиль пучка протонов 1.3 ГэВ, измеренный на торце коллиматора при применении кристалла № 6. Тонкой линией показан смоделированный профиль частиц, каналированных и рассеянных в кристалле, с учетом вращения частиц в кольце

ляют заметную долю ($\sim 50\%$) от всего пучка, заброшенного на коллиматор. Соответствующая этому случаю эффективность заброса каналированного пучка кристаллом составляет, по оценкам, $\sim 20\%$. Дальнейшая оптимизация коротких кристаллов, предусматривающая применение новой технологии их выращивания [10], в принципе позволит достичь и для низких энергий, менее 1 ГэВ, эффективности вывода столь же высокой, как и при 70 ГэВ.

Внедрение на ускорителе ИФВЭ вывода пучка кристаллом на установку по изучению редких распадов K -мезонов позволило увеличить в 40 раз мировую статистику этих распадов за 2 месяца работы [11]. Заметим, что в этом режиме одновременно с выводом протонов с помощью кристалла работали две внутренние мишени, генерировавшие вторичные частицы для других экспериментов. Результаты исследований показывают, что изогнутые кристаллы могут успешно применяться для вывода и коллимации пучков на ускорителях в широком диапазоне энергий.

Работа была поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований грант # 01-02-16229 и INTAS-CERN # 132-2000.

1. H. Akbari, X. Altuna, S. Bardin et al., *Phys. Lett.* **B313**, 491 (1993).

2. C. T. Murphy, R. A. Carrigan, Jr., D. Chen et al., *Nucl. Instr. and Meth.* **B119**, 231 (1996).

3. А. Г. Афонин, В. М. Бирюков, В. А. Гаврилушкин и др., *Письма в ЖЭТФ* **67**, 741 (1998).

4. A. A. Arkhipenko, A. G. Afonin, V. I. Baranov et al., *Phys. Lett.* **B 435**, 240 (1998).

5. А. Г. Афонин, В. М. Бирюков, В. А. Гаврилушкин и др., *Письма в ЖЭТФ* **68**, 544 (1998).

6. V. Biryukov, *Nucl. Instr. and Meth.* **B53**, 202 (1991).

7. A. M. Taratin, S. A. Vorobiev, M. D. Bavizhev et al., *Nucl. Instr. and Meth.* **B58**, 103 (1991).

8. A. G. Afonin, V. N. Gres, and V. I. Terekhov, *Proc. of EPAC*, Stockholm, 1998.

9. V. Biryukov, *Phys. Rev.* **E51**, 3522 (1995).

10. M. Breese, *Nucl. Instr. and Meth.* **B132**, 540 (1997).

11. V. I. Kotov, A. G. Afonin, V. M. Biryukov et al., *Proc. of EPAC*, Vienna, 2000, p. 364.