



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001–22
ОП,ОКУ

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. Чесноков
ИФВЭ, Протвино, Россия

Ю.М. Иванов
ПИАФ, Санкт-Петербург, Россия

В. Гвиди, Г. Мартинелли, М. Стефанчик, Д. Винченци
Университет Феррара, Италия

Д. Трбоевич
БНЛ, США

В. Скандале
ЦЕРН, Швейцария

М.Б.Х. Бриз
Университет Суррей, Великобритания

**ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИИ
ВЫВОДА ПУЧКА ПРОТОНОВ ИЗ У-70
С ПОМОЩЬЮ ИЗОГНУТЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ**

Направлено в "Письма в ЖЭТФ"

Протвино 2001

Аннотация

Афонин А.Г. и др. Прогресс в исследовании вывода пучка протонов из У-70 с помощью изогнутых монокристаллов: Препринт ИФВЭ 2001–22. – Протвино, 2001. – 7 с., 4 рис., 1 табл., библиогр.: 11.

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.

Abstract

Afonin A.G. et al Progress in the Studies of Proton Beam Extraction from U-70 by Means of Bent Monocrystals: IHEP Preprint 2001–22. – Protvino, 2001. – p. 7, figs. 4, tables 1, refs.: 11.

A radical increase in the efficiency of beam extraction from accelerator is reached by use of short, down to 1.8 mm, crystals bent a small angle ~ 1 mrad, due to an increase in the average number of particle encounters with crystal. A record extraction efficiency of over 80% at 70 GeV is experimentally achieved, in agreement with theory predictions. The feasibility of efficient work of a crystal at the injection energy, 1.3 GeV is also demonstrated.

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 доля 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 начинает 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%. При этом были использованы короткие кристаллы кремния длиной 7 и 5 мм и углами изгиба 1.7 и 1.5 мрад соответственно, изготовленные по двум разным технологиям: в виде полоски и O-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 табл. 1. Кристаллы в виде полосок (П-тип) имеют ориентацию Si(111), O-кристаллы (O-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].

Таблица 1. Характеристики установленных кристаллов

№ кристалла	Место расп., № магн. блока	Тип	Угол, мрад	Длина × высота × толщина, мм ³	Эф-ть, %	Примечания
№ 1	106	П	1.0	2.0×35×0.5	85	схема вывода: 106-24-26 схема вывода: 106-20-22
					80	
№ 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 ~ 2 × 10 ²⁰ /см ²
№ 6	84	П	0.8	1.8×27×0.5	85 20	
№ 7	84	О	1.7	2.5×5.0×0.5	60	1.3 ГэВ
№ 8	86	П	1.4	4.0×45×0.5	65	

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

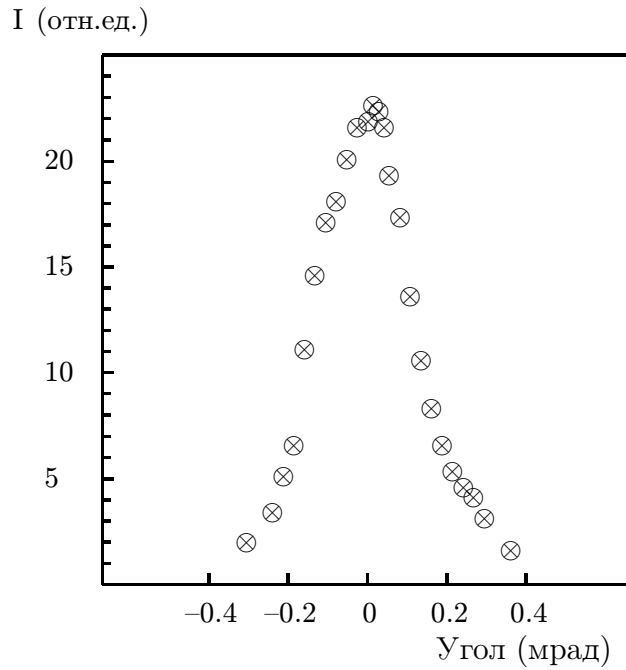


Рис. 1. (а) Зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла № 1.

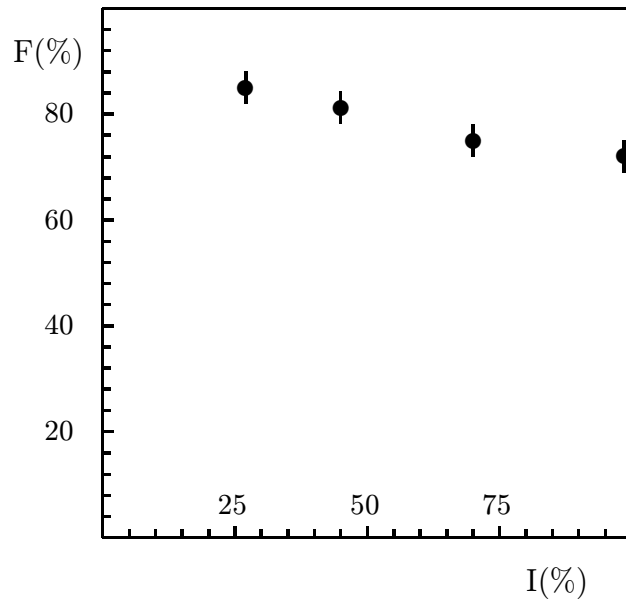


Рис. 1. (б) Зависимость эффективности вывода пучка F кристаллом № 1 от интенсивности пучка I , наведенного на кристалл (в процентах от пучка, циркулирующего в У-70).

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 (2а), как и ожидалось, параметры заброса частиц очень малы, сосредоточены вблизи края, это уменьшает эффективность коллимации.

Случай (2b) соответствует разориентированному кристаллу, (2c) — ориентированному, когда большая часть частиц падает в глубь коллиматора. График (2d) отражает ситуацию, когда пучок забрасывается на коллиматор быстрым кикер-магнитом. Заброс кикер-магнитом использовался для калибровки измерений доли отклоненного кристаллом пучка.

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

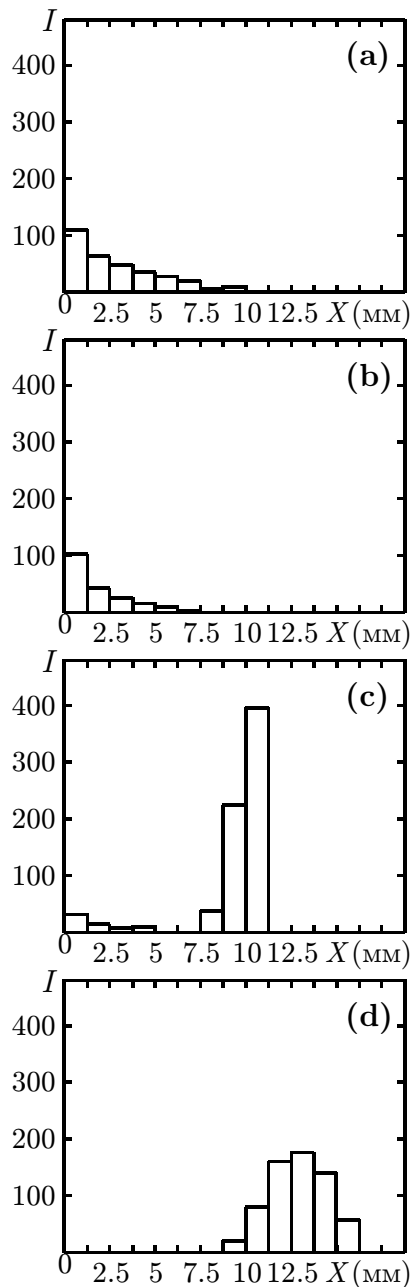


Рис. 2. Профили пучка, измеренные на торце коллиматора: (a) кристалла нет, наведение прямо на коллиматор; (b) кристалл в пучке, разориентирован; (c) кристалл в пучке, ориентирован; (d) кристалла нет, пучок забрасывается кикер-магнитом.

На рис. 3 представлены обобщенные экспериментальные результаты измерений эффективности вывода пучка кристаллами разной длины (табл. 1) в сравнении с результатами моделирования, учитывающего транспортировку частиц в кристалле (программа SATCH [9]) и многооборотное движение в ускорителе. Как видно из этого рисунка, экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

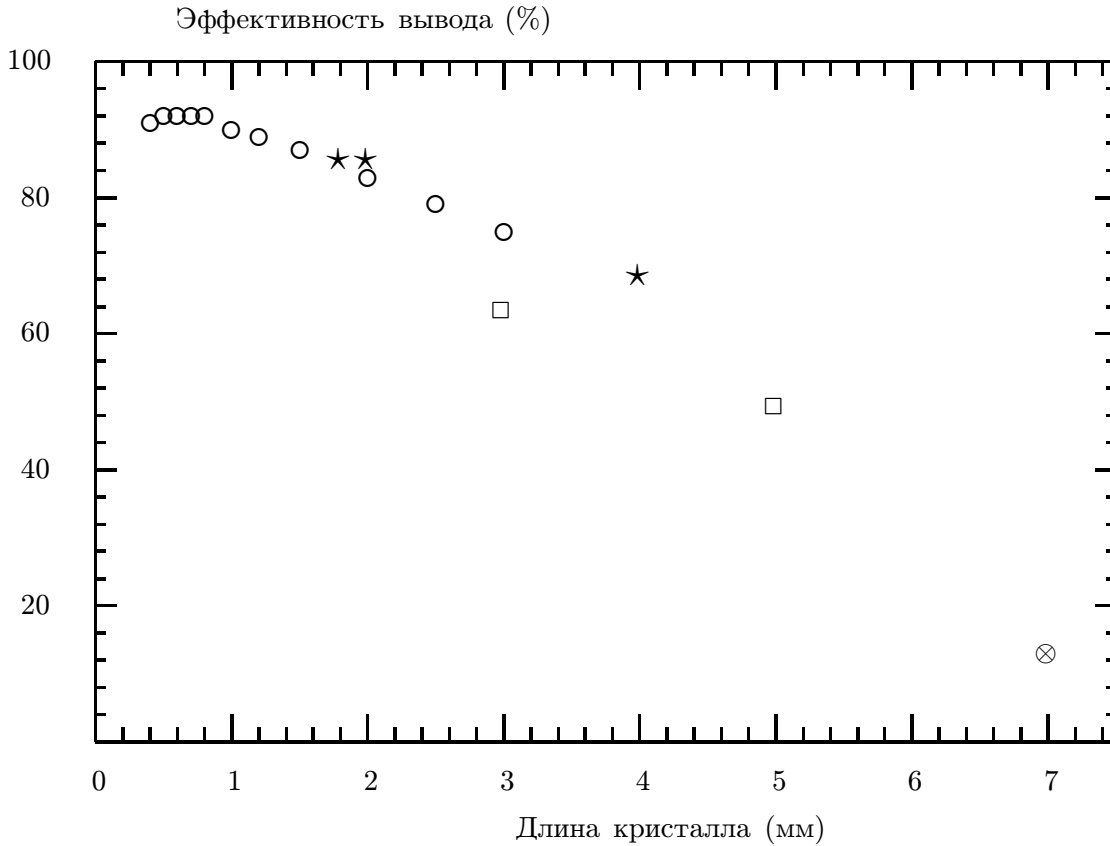


Рис. 3. Эффективность вывода пучка протонов кристаллом, измеренная при энергии 70 ГэВ: (★) — результаты 2000 г., (□) — 1999-2000 г.г., (⊗) — 1997 г., (o) — теоретически предсказанная (EPAC'2000 [11]) эффективность вывода для дефлектора с идеальным изгибом на 0.9 мрад.

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 инжекции синхротрона У-70). Полученный в этих условиях профиль отклоненного кристаллом № 6 пучка показан на рис. 4. Спецификой этого случая является значительное кулоновское рассеяние частиц на кристалле. Среднеквадратичный угол рассеяния ~ 1 мрад сравним с углом изгиба кристалла. Однако и здесь каналированные частицы составляют 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.

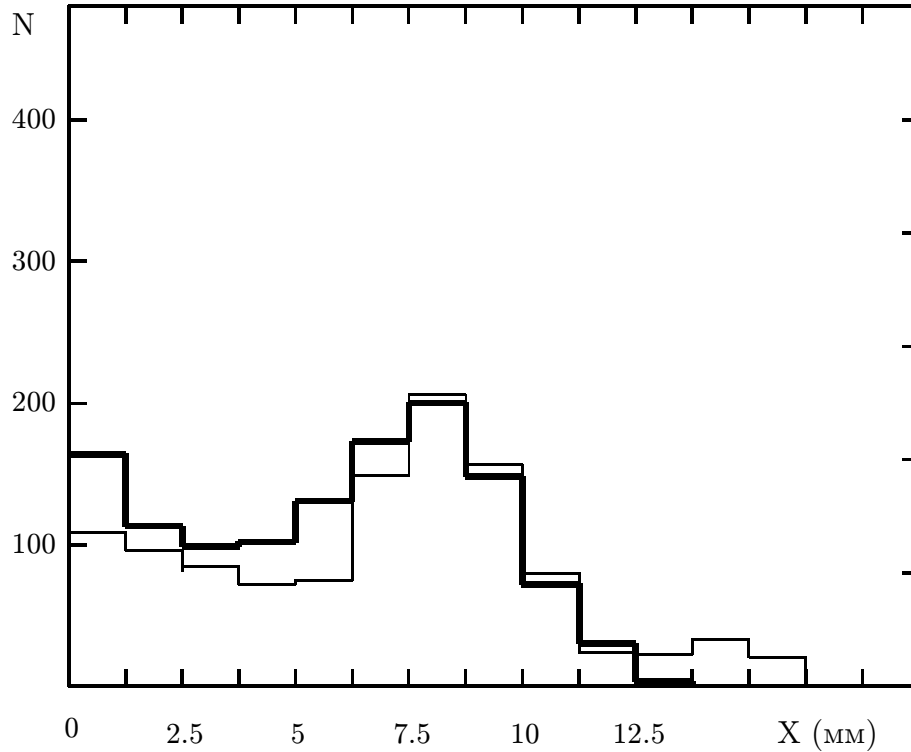


Рис. 4. Профиль пучка протонов 1.3 ГэВ, измеренный на торце коллиматора при применении кристалла № 6. Тонкой линией показан смоделированный профиль частиц, каналированных и рассеянных в кристалле, с учетом вращения частиц в кольце.

Внедрение на ускорителе ИФВЭ вывода пучка кристаллом на установку по изучению редких распадов К-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 РФФИ 01-02-16229 и ИНТАС-ЦЕРН 132-2000.

Список литературы

- [1] H.Akbari, X.Altuna, S.Bardin et al. // *Phys. Lett.* **В 313** (1993), 491.
- [2] C.T.Murphy, R.A.Carrigan, Jr.D.Chen et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* **В 119** (1996), 231.
- [3] А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин и др. // *Письма в ЖЭТФ*, т. **67** (1998), 741.
- [4] A.A.Arhipenko, A.G.Afonin, V.I.Baranov et al. // *Phys. Lett.* **В 435** (1998), 240.

- [5] А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин и др. // Письма в ЖЭТФ, т. **68** (1998), 544.
- [6] V.Biryukov. // *Nucl. Instr. and Meth.* **B53** (1991), 202.
- [7] A.M. Taratin, S.A.Vorobiev, M.D. Bavizhev et al.// *Nucl. Instr. and Meth.* **B 58** (1991), 103.
- [8] A.G.Afonin, V.N.Gres and V.I.Terekhov. // Proc. of EPAC (Stockholm, 1998).
- [9] V.Biryukov // *Phys. Rev.* **E 51** (1995), 3522.
- [10] M.Breese. // *Nucl. Instr. and Meth.* **B 132**, (1997), 540.
- [11] V.I.Kotov, A.G.Afonin, V.M.Biryukov et al. // Proc. of EPAC (Vienna, 2000), p.364.

Рукопись поступила 26 апреля 2001 г.

А.Г. Афонин и др.

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

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L^AT_EX.

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 03.05.2001. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 0,87. Уч.-изд.л. 0,7. Тираж 130. Заказ 82. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

