

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОГО ВЫВОДА ПРОТОНОВ КРИСТАЛЛОМ ИЗ 70 ГэВ УСКОРИТЕЛЯ ИФВЭ

А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин, В.Н.Гресь, Б.А.Зеленов,
В.И.Котов, В.А.Маишеев, А.В.Минченко, В.И.Терехов, Е.Ф.Троянов,
Ю.А.Чесноков¹⁾, М.Г.Гордеева⁺, А.С.Денисов⁺, Ю.М.Иванов⁺,
А.А.Петрунин⁺, В.В.Скоробогатов⁺, Б.А.Чунин⁺

Институт физики высоких энергий РАН
142284 Протвино, Московская обл., Россия

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

Поступила в редакцию 2 сентября 1998 г.

Благодаря применению короткого кристалла длиной 5 мм, изогнутого на угол 1,5 мрад, достигнута рекордная эффективность вывода частиц свыше 40%, согласующаяся с предсказаниями теории. Получена интенсивность выведенного пучка $\sim 6 \cdot 10^{11}$ протонов за цикл, что на 5–6 порядков выше ранее достигнутых результатов.

PACS: 29.27.Ac

Полученные на ускорителях экспериментальные данные по выводу ускоренного пучка с помощью изогнутых кристаллов [1–5] и их теоретический анализ [6] показали, что существенного повышения эффективности вывода можно достигнуть, используя, например, режим многократного прохождения частиц через кристалл. Дело в том, что при медленном выводе глубина заброса частиц в кристалл на первом обороте мала и составляет доли микрона, в то время как разрушенный при обработке кристалла приповерхностный слой может достигнуть величины от нескольких микрон до десятков микрон [7]. Режим многократного прохождения частиц через кристалл как раз позволяет преодолеть этот неэффективный для каналирования слой [8,9]. Для осуществления такого режима вывода на ускорителе ИФВЭ были использованы короткие кристаллы кремния длиной 7 и 5 мм и углами изгиба 1.7 и 1.5 мрад, соответственно. При таких параметрах, выбранных на основе проведенных расчетов, среднее число $\langle N \rangle$ прохождений через кристалл проканалировавших частиц будет равно ~ 12 , в то время как среднее число прохождений для ядерного взаимодействия частиц в кристалле равно ~ 60 .

Изгиб кристалла малой длины с выполнением ряда условий, связанных с его установкой в ускорителе, представляет собой определенную проблему. Первый кристалл Si (111) был выполнен в виде короткой пластины большой высоты размерами $0.5 \times 40 \times 7$ мм (толщина, высота, длина вдоль пучка). Он изгибался в поперечном направлении с помощью металлического держателя, имеющего прорезь в центральной части размером 20 мм для прохождения пучка. Несмотря на присутствие неравномерностей изгиба (твист), при использовании этого кристалла были получены обнадеживающие результаты: эффективность вывода $\sim 20\%$ и интенсивность выведенного пучка $\sim 1.9 \cdot 10^{11}$ [10]. Для дальнейшего повышения эффективности вывода

¹⁾ e-mail: chesnokov@MX.IHEP.SU

в ПИЯФ был изготовлен кристалл без "твиста" из монолитного куска Si в виде буквы "О", схематически представленный на рис.1а. Размеры рабочей зоны кристалла, имеющей ориентацию Si (110), равны $0.6 \times 5 \times 5$ мм (толщина, высота, длина по пучку). Необходимый изгиб кристалла на угол 1.5 мрад создавался путем его сжатия в центральной части. При этом изогнутая часть составляла 3 мм, а прямые концы – по 1 мм каждый.

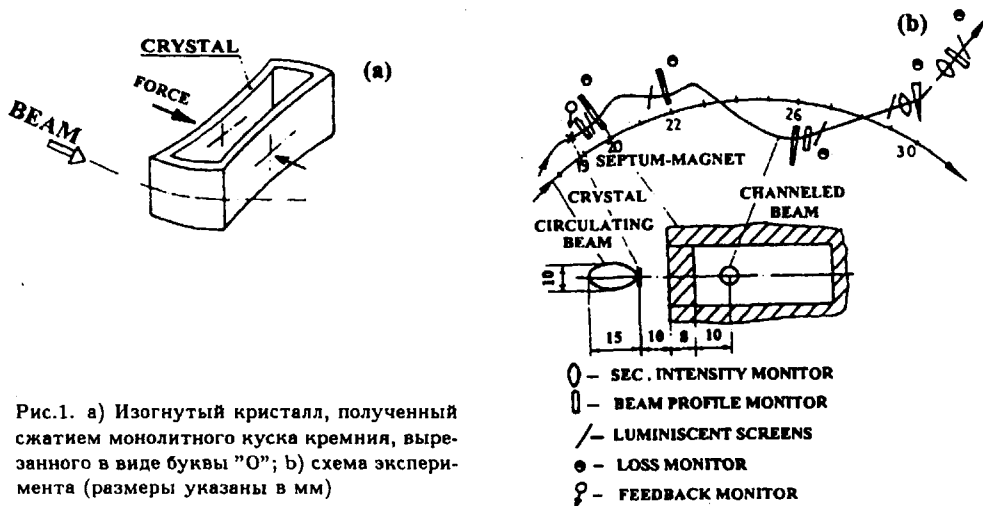


Рис.1. а) Изогнутый кристалл, полученный сжатием монолитного куска кремния, вырезанного в виде буквы "О"; б) схема эксперимента (размеры указаны в мм)

Ниже мы рассмотрим результаты исследований, полученные при использовании этого кристалла.

Схема вывода пучка протонов кристаллом представлена на рис.1б. При планировании эксперимента мы исходили из того, что малые углы изгиба кристаллов недостаточны для прямого вывода пучка из ускорителя. Поэтому было решено опробовать кристалл в существующей схеме медленного вывода в качестве первого элемента. Кристалл был размещен в прямолинейном промежутке 19 ускорителя перед септум-магнитом ОМ-20 системы медленного вывода; толщина перегородки ОМ-20 составляет 8 мм (см. рис.1б). Кристалл устанавливался на расстоянии 60–65 мм от равновесной орбиты. Точность горизонтального и углового перемещений кристалла обеспечивалась на уровне 0.1мм и 13 мкрад, соответственно. Наведение ускоренного пучка на кристалл осуществлялось с помощью локального медленно нарастающего бампа. При этом форма бампа подбиралась такой, при которой циркулирующий пучок проходил на достаточном удалении от магнита ОМ-20. Взаимное положение циркулирующего и каналированного пучков по отношению к магниту ОМ-20 указано на рис.1б.

Режим каналирования и характеристики выведенного пучка существенно зависят от параметров ускоренного пучка, которые были измерены в горизонтальной плоскости в месте расположения кристалла. Эмиттанс ускоренного пучка E и его угловая расходимость X_{max}^1 определяются выражениями

$$E = \pi X_{max}^2 / \beta, \quad X_{max}^1 = X_{max} (1 + \alpha^2)^{1/2} / \beta,$$

где α и β – структурные функции ускорителя, X_{max} – максимальные размеры пучка. Структурные функции известны, и в месте расположения кристалла в горизонтальной плоскости $\alpha = 1.87$ и $\beta = 25$ м. Таким образом, весь процесс измерения параметров ускоренного пучка сводится к нахождению X_{max} . В нашем случае X_{max} оказался равным ~ 7.2 мм. При этом значении X_{max} , как следует из выше приведенных формул, эмиттанс пучка в горизонтальной плоскости составляет величину 2 мм·мрад, а его угловая расходимость в месте расположения кристалла ~ 0.6 мрад. Аналогичным образом полученный эмиттанс пучка в вертикальной плоскости не превышает его эмиттанса в горизонтальной плоскости.

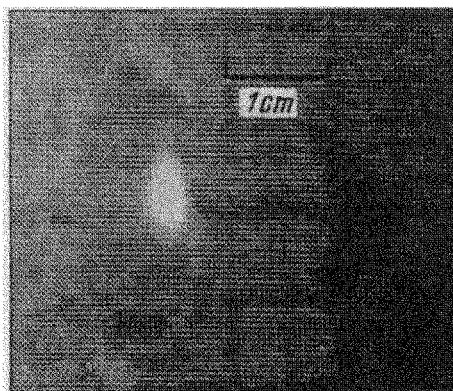


Рис.2. Изображение отклоненного пучка перед магнитом ОМ-20

Отклонение пучка в апертуру ОМ-20 и его проводка по трассе вывода контролировались с помощью комплексной системы диагностики, включающей в себя телевизионную систему наблюдения, мониторы потерь, профилометры, измерители интенсивности [11]. Расположение диагностической аппаратуры вдоль трассы канала вывода указано на рис.1б. Все приборы диагностики предварительно тестировались в режиме быстрого вывода и калибровались с помощью трансформаторов тока. Согласно результатам калибровки абсолютная ошибка измерений не превышала 2% в интересующем нас диапазоне интенсивностей [12]. Фоновые условия периодически измерялись при отсутствии кристалла и наличии его на рабочем месте. Согласно измерениям уровня фона, вместе с шумами аппаратуры он не превышал 3% от величины полезного сигнала. Доля наведенного на кристалл пучка определялась разностью измерений трансформаторами тока интенсивности циркулирующего пучка до и после осуществления вывода с систематической ошибкой $\sim 1\%$ (см., ниже, рис.3). С учетом всех факторов общая систематическая ошибка измерений составляла $\sim 4\%$. Эффективность вывода (отношение интенсивности выведенного пучка к величине интенсивности, наведенной на кристалл) оценивалась 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 фотоумножителя с сцинтиллятором. Монитор обратной связи располагался на уровне орбиты вблизи магнита ОМ-20. Общая полоса частот системы обратной связи составляла ~ 10 кГц.

Интенсивность ускоренного пучка за время проведения эксперимента менялась в диапазоне от $1 \cdot 10^{12}$ до $2.4 \cdot 10^{12}$ протонов в цикле. Величина интенсивности, сбрасываемой на кристалл, варьировалась в процессе эксперимента от 16 до 92%. Изоб-

Amplitudes, rel. units

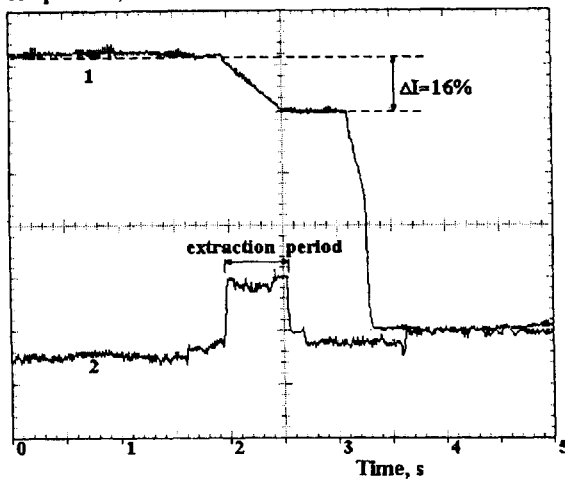


Рис.3. Зависимости от времени интенсивностей циркулирующего (1) и выведенного (2) пучков протонов

ражение отклоненного кристаллом пучка перед магнитом OM-20 показано на рис.2. Временные характеристики процесса вывода представлены на рис.3 (на запоминающий осциллограф выводилась информация об интенсивности циркулирующего пучка 1 и интенсивности выведенного пучка 2). Длительность вывода в режиме обратной связи изменялась от 0.6 до 1.3 с. Плоская вершина магнитного цикла ускорителя ИФВЭ имеет протяженность 2 с, в то время как полный цикл ускорителя равен 9.6 с.

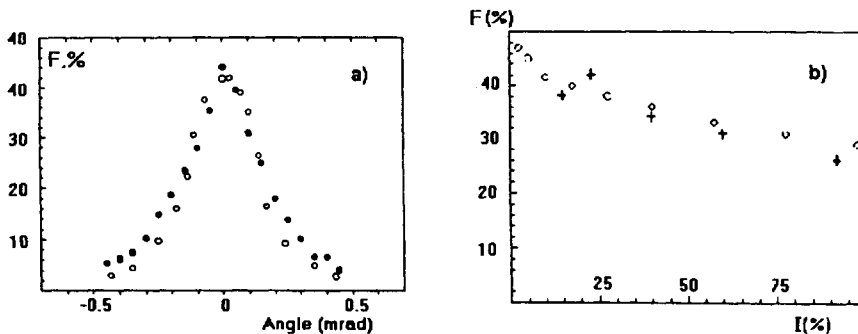


Рис.4. а) Эффективность вывода в зависимости от угла ориентации кристалла (o – эксперимент, ● – компьютерное моделирование); б) эффективность вывода в зависимости от доли падающего на кристалл пучка (+ – эксперимент, o – компьютерное моделирование)

Прямым доказательством того, что выводимый пучок является каналированным, служит так называемая ориентационная кривая – зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла по углу. На рис.4а она представлена в сравнении с результатами компьютерного моделирования [10] при режиме отбора 23% циркулирующего пучка. Как видно из этого рисунка, экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными. Максимальная интегральная эффективность, то есть эффективность за время вывода, в этом случае достигает 42%. С ростом до-

ли пучка, наводимой на кристалл, интегральная эффективность уменьшается из-за дрейфа угла падения частиц на кристалл (до 0.3 мрад при полном наведении ускоренного пучка на кристалл), что подтверждается расчетами (см. рис.4б). Это явление связано с тем, что пучок наводился на кристалл в радиальном направлении при наклоненном фазовом эллипсе. По той же причине во время цикла вывода менялась его эффективность (см. рис.3), особенно при наведении на кристалл большей части ускоренного пучка. Примечательно, что пиковая эффективность вне зависимости от доли забираемого пучка была одинаковой и равной 47%.

Максимальная интенсивность выведенного кристаллом пучка при наведении на него $2.2 \cdot 10^{12}$ протонов в цикле составила величину $6 \cdot 10^{11}$ протонов за цикл, что на 5-6 порядков выше полученных ранее результатов [1-5]. Кристалл работал в напряженном режиме несколько суток, нагреваясь, по оценкам, до нескольких сотен градусов. Выведенный пучок был сформирован с помощью магнитооптического канала на мишень экспериментальной установки, где его размеры составили 4×4 мм² на полувысоте. Была также показана возможность одновременной работы кристалла с одной внутренней мишенью без заметного ухудшения параметров вывода.

В течение всего эксперимента наблюдалась очень хорошая воспроизводимость результатов. Исследования в этом направлении будут нами продолжены с целью выявления предельных возможностей многооборотного вывода.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность А.А.Логуну и Н.Е.Тюрину за поддержку данной работы. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 98-02-16941.

-
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., *NIM*, **B119**, 231 (1996).
 3. G.Arduini, K.Elsener, G.Fidecaro et al., *Proc. of Part Accel. Conf PAC-97*, Vancouver, 1997.
 4. A.A.Asseev, M.D.Bavizhev, A.N.Vasiliev et al., *NIM* **A309**, (1991).
 5. V.M.Biryukov, V.N.Chepegin, Yu.A.Chesnokov et al., *Proc. of Part Accel. Conf PAC-97*, Vancouver, 1997.
 6. V.M.Biryukov and C.T.Murphy, *Fermilab TM-2026*, Batavia, (1997).
 7. V.M.Biryukov, Yu.A.Chesnokov and V.I.Kotov, *Crystal Channeling and its Application at High Energy Accelerators*, Berlin: Springer, 1997.
 8. V.M.Biryukov, *NIM*, **B53**, 202 (1991).
 9. A.M.Taratin, S.A.Vorobiev, M.D.Bavizhev et al., *NIM*, **B58**, 103 (1991).
 10. А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин и др., *Письма в ЖЭТФ*, **67**, 741 (1998).
 11. А.Г.Афонин, В.Н.Горлов, В.В.Гоцев и др., *Труды XV Совещания по ускорителям заряженных частиц*, 286, Протвино 1996.
 12. A.G.Afonin, V.N.Gres and V.I.Terekhov, *Wide range extracted beam intensity measurement at the IHEP, contributed to ERAC*, Stockholm, 1998.