

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОМУ ВЫВОДУ ПРОТОНОВ ИЗ У-70 С ПОМОЩЬЮ МОНОКРИСТАЛЛА

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.Н.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, Россия

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

Поступила в редакцию 13 апреля 1998 г.

Благодаря применению короткого кристалла длиной 7 мм, изогнутого на небольшой угол 1.7 мрад, достигнуто радикальное увеличение эффективности вывода пучка из ускорителя, связанное с ростом кратности прохождения частиц через кристалл. Экспериментально достигнута эффективность вывода частиц $\sim 20\%$, согласующаяся с предсказанием теории. Получена рекордная величина интенсивности выведенного пучка $1.9 \cdot 10^{11}$ протонов за цикл, что на 4 порядка выше ранее достигнутых результатов.

PACS: 29.27.Ac

Изогнутые монокристаллы уже достаточно давно и успешно применяются для вывода пучка из ускорителей, в том числе из крупных современных ускорителей-коллайдеров [1–3]. В ИФВЭ использование монокристаллов для вывода части протонного пучка энергией 70 ГэВ в каналы отрицательных частиц стало обычной практикой [4, 5]. Накопленные экспериментальные данные и теоретический анализ [6] показывают, что решающим фактором, определяющим эффективность вывода, является многократность прохождения пучка через кристалл. Это происходит из-за того, что при медленном наведении пучка глубина заброса частиц на первом обороте мала и составляет доли микрона, в то время как разрушенный при обработке приповерхностный слой равен нескольким микронам [7]. Чтобы преодолеть неэффективный для каналирования слой и радикально увеличить эффективность вывода, необходимо обеспечить возрастание кратности прохождения частиц через кристалл [8, 9]. Для исследования такого режима вывода на ускорителе ИФВЭ был использован короткий кристалл кремния длиной 7 мм и углом изгиба 1.7 мрад. Ниже приводятся первые результаты выполненных экспериментов.

Изгиб кристалла малой длины с выполнением ряда условий, связанных с его установкой в ускоритель, представляет собой определенную проблему. Мы использовали кристалл Si(111) в виде пластины размерами $0.5 \times 40 \times 7$ мм (толщина, высота, длина вдоль пучка). Кристалл изгибался с помощью металлического держателя, имеющего прорезь в центральной части размером 20 мм для прохождения пучка (рис.1а). Для уменьшения неизбежной в этой конструкции угловой деформации

¹⁾ e-mail: chesnokov@mx.inep.su

(твиста) по высоте использовался поперечный изгиб пластины, создаваемый имеющим форму параболического гипербоида кристаллодержателем. Изогнутый таким образом кристалл предварительно тестировался на выведенном пучке протонов энергией 70 ГэВ. Величина твиста, измеренная в экспериментах, выражается формулой: $\alpha(\text{мкрад}) = 5y^2(\text{мм})$ (где y – расстояние от центра кристалла по высоте), и была использована в расчетах эффективности вывода пучка из ускорителя У-70.

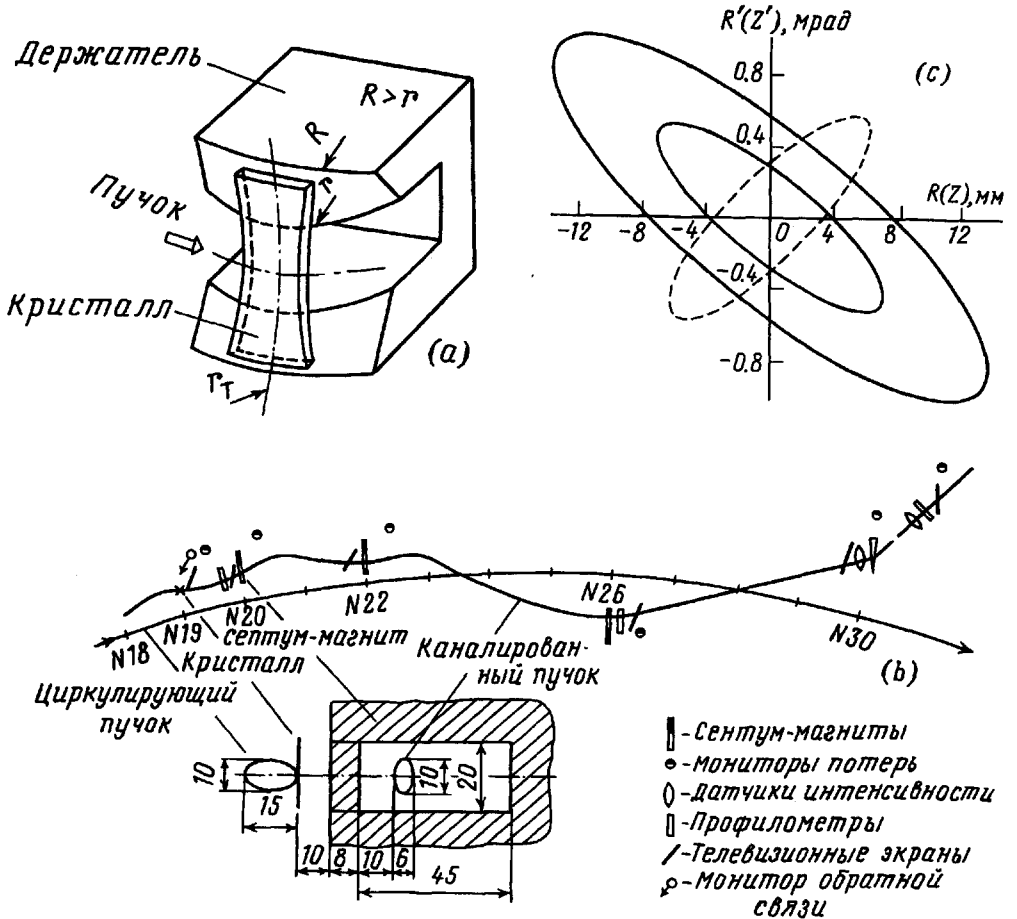


Рис.1. а – Схема изгиба кристалла, б – схема эксперимента. Размеры даны в мм. с – фазовый портрет циркулирующего пучка в У-70 в месте расположения кристалла: две сплошные кривые (обозначающие ядро и гало) – в горизонтальной плоскости, штриховая кривая – в вертикальной плоскости

Схема вывода пучка кристаллом представлена на рис.1б. При планировании эксперимента мы исходили из того, что угол изгиба 1.7 мрад недостаточен для прямого вывода пучка из ускорителя. Поэтому было решено опробовать кристалл в существующей схеме медленного вывода. Станция кристаллического дефлектора размещается в свободном прямолинейном промежутке №19 ускорителя У-70 между тонким магнитом и септум-магнитом ОМ-20 медленного вывода, толщина перегородки которого равна ~ 8 мм (см. рис.1б). Специально создаваемое локальное искажение орбиты обеспечивает подведение пучка к кристаллу, который находится в рабочем положении

нии на расстоянии 60 – 65 мм от равновесной орбиты, и в то же время удерживает подводимый к кристаллу пучок на достаточном удалении от обоих септум-магнитов.

Станция кристаллического сплиттера имеет механизмы горизонтального и углового перемещения. Точность установки кристалла на заданную координату составляет 0.1 мм, точность установки по углу 45 мкрад. Заброс пучка в апертуру ОМ-20 и его проводка по трассе вывода, контролировались с помощью комплексной системы диагностики пучка, включающей в себя телевизионную систему наблюдения, мониторы потерь, профилометры, измерители интенсивности. Все приборы диагностики предварительно тестировались в режиме быстрого вывода и калибровались в широком диапазоне интенсивности. Для получения равномерного наведения пучка на кристалл в режиме обратной связи использовался монитор обратной связи на основе ФЭУ-93 с сцинтиллятором. Монитор располагался на уровне орбиты пучка на расстоянии ~ 10 м за кристаллом. Общая полоса частот всей трассы обратной связи составляла ~ 10 кГц.

Интенсивность ускорителя за время проведения эксперимента менялась в диапазоне от $1 \cdot 10^{12}$ до $1.5 \cdot 10^{12}$ протонов в цикле. Величина интенсивности, сбрасываемой на кристалл, варьировалась в процессе эксперимента от 20 до 100%. Прежде всего было измерено распределение интенсивности в пучке по радиусу, около 90% всей интенсивности находилось в ядре размером ~ 15 мм. Плотное ядро окружено гало, в котором интенсивность медленно спадает. На рис.1с показаны фазовые эллипсы пучка на входе в кристалл, построенные по результатам измерения размеров пучка.

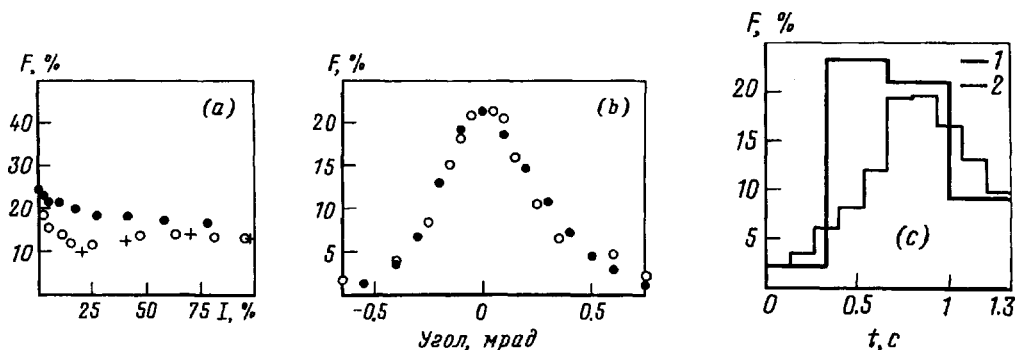


Рис.2. а – Измеренная зависимость (+) эффективности вывода пучка F кристаллом от интенсивности пучка I , наведенного на кристалл (в процентах от пучка, циркулирующего в У-70). Показаны также результаты моделирования без учета гало (●) и с учетом гало 10% (○). б – Зависимость эффективности вывода пучка F кристаллом от ориентации кристалла: теория (●) и эксперимент (○). в – кривая 1 – измеренная зависимость эффективности вывода от времени при наведении пучка, 2 – смоделированная зависимость эффективности вывода от времени, полученная в предположении постоянной скорости наведения

Прямым доказательством того, что выводимый пучок является каналированным, служит так называемая ориентационная кривая – зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла по углу. На рис.2б она представлена в сравнении с результатами моделирования.

Основной задачей эксперимента было определение эффективности вывода (отношения интенсивности выведенного пучка к величине интенсивности забираемого из ускорителя пучка). Проводились измерения как интегральной эффективности, то

есть за все время вывода, так и дифференциальной – за конкретные промежутки времени вывода. На рис.2а показаны экспериментальные данные измерения эффективности вывода при разной интенсивности наводимого пучка и соответствующие результаты моделирования, с учетом и без учета 10%-ного гало реального пучка. Снижение эффективности для пучка с гало объясняется большим рассогласованием между углом ориентации кристалла и углом падения пучка на кристалл при значительном изменении тока в системе локального искажения орбиты (рис.1с).

Максимальная интегральная эффективность вывода была зафиксирована для доли забираемого из ускорителя пучка 75% и была равна $(14 \pm 1.5)\%$. Дифференциальная эффективность в процессе вывода менялась из-за дрейфа угла падения пучка на кристалл (см. рис.1с), результаты ее измерения за 4 интервала времени показаны на рис.2с. Абсолютный максимум эффективности равен $(23.4 \pm 2.5)\%$ и зарегистрирован в интервале 325 мс при длительности вывода ~ 1.3 с в средней части времени вывода. Асимметрия кривой объясняется распределением интенсивности в пучке. Результаты моделирования подтверждают такой характер временной зависимости.

Максимальная интенсивность пучка, выведенного кристаллом при наведении всего циркулирующего в ускорителе пучка была равна $1.9 \cdot 10^{11}$ протонов/цикл, что на 4 порядка выше полученных ранее результатов [1–5]. Кристалл успешно выдержал радиационные и тепловые нагрузки, нагреваясь, по оценкам, до нескольких сотен градусов.

Компьютерное моделирование эксперимента [10] было проведено заранее с целью выбора оптимального размера кристалла, оценки влияния на эффективность различных параметров, а также проверки теории. Моделирование учитывало реальную геометрию кристалла с продольным и поперечным изгибом, и конструкцию держателя. Решетка кристалла считалась идеальной, однако на поверхности кристалла моделировался аморфный слой в несколько десятков мкм [7]. Начальная глубина заброса < 1 мкм при этом исключала каналирование при первом прохождении частицей кристалла. Моделирование включало в себя эффекты многократного прохождения частиц через кристалл и многооборотного движения в ускорителе [11].

В результате моделирования мы нашли, что среднее число прохождений через кристалл для частиц выведенного пучка значительно больше 1: $\langle N \rangle \simeq 12$, в то время как среднее число прохождений до ядерного взаимодействия ~ 40 . Важность этого фактора в нашем эксперименте можно также охарактеризовать следующим образом. Достиженные значения эффективности вывода пучков кристаллами на крупнейших ускорителях мира на сегодняшний день – одного порядка: около 20% в ЦЕРН'е и ИФ-ВЭ, и около 30% в Фермилабе. Однако в ЦЕРН'е эта эффективность была достигнута при расходимости пучка, падающего на кристалл, меньше угла Линдхарда. В наших условиях расходимость пучка была в ~ 20 раз больше угла Линдхарда ($\simeq 20$ мкрад при 70 ГэВ), поэтому лишь несколько процентов пучка могло быть каналировано при однократном прохождении.

Расчеты показывают, что, используя короткий кристалл без твиста (такая конструкция исследуется), можно получить эффективность вывода до 30%. Практический интерес для У-70 представляет режим одновременной работы кристалла с внутренними мишенями, что также входит в программу наших дальнейших исследований. Полученные нами первые экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теорией из которой следует, что на ускорителях и коллайдерах

более высоких энергий можно достичь эффективности вывода 70- 90% при использовании коротких кристаллов. Такая эффективность делает весьма перспективным их применение для задач коллимирования и вывода пучков.

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 et al., Phys. Lett. **B313**, 491 (1993).
 2. C.T.Murphy et al., Nucl. Instr. And Meth. **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 et al., Nucl. Instr. And Meth. **A309**, 1 (1991).
 5. V.M.Biryukov, V.N.Chepegin, Yu.A.Chesnokov et al., Proc. of Part. Accel. Conf PAC-97, Vancouver, 1997.
 6. V.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, Nucl. Instr. And Meth. **B53**, 202 (1991).
 9. A.M.Taratin et al., Nucl. Instr. And Meth. **B58**, 103 (1991).
 10. V.Biryukov, Invited talk given at the 'Near Beam Physics' Symp/ Fermilab, Batavia, 1997, in press.
 11. V.M.Biryukov, Phys. Rev. **E51**, 3522 (1995); **E52**, 2045 (1995); **E52**, 6818 (1995); Phys. Rev. Lett. **74**, 2471 (1995).