

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Б44

P1-87-653

Л.И.Бельзер¹, В.А.Бодягин¹, И.Н.Варданян¹,
А.М.Грибушин¹, А.А.Ершов¹, Н.А.Жарков²,
А.Д.Кириллов, Л.Н.Комолов, О.Л.Кодолова¹,
П.А.Рукояткин, Л.И.Сарычева¹, А.Л.Светов,
И.Н.Семенюшкин, Н.Б.Синев¹

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ИЗОГНУТОГО МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ
ДЛЯ ОТКЛОНЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА
ПРОТОНОВ С ИМПУЛЬСОМ 8,9 ГэВ/с

Направлено в "Журнал технической физики"

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики
МГУ, Москва

² Научно-исследовательский институт "Вента", Вильнюс

1987

Введение

Эффект поворота пучка частиц за счет каналирования в изогнутом монокристалле был теоретически предсказан Э.Н.Цыгановым в 1976 году [1]. Позже, когда этот а priori неочевидный факт был доказан экспериментально [2], наряду с идеей практического использования этого эффекта сами процессы взаимодействия частиц высоких энергий с кристаллами привлекают все большее внимание физиков. Например, группой ИИЯФ АН СССР обнаружен эффект объемного захвата протонов в режим плоскостного каналирования, при этом было показано, что за счет диссипации энергии поперечного движения пучковых частиц имеет место угловая фокусировка [3].

В 1984 году была дана экспериментальная иллюстрация возможности вывода ускоренных частиц при помощи кристалла [4]. Во FNAL (США) с целью формирования пучка протоны с импульсом 800 ГэВ/с были отклонены с помощью кристалла кремния на угол $3,6 \cdot 10^{-3}$ рад [5], что дает надежду на использование кристаллов в области энергий в несколько ТэВ. В работе [6] сообщалось о наибольшем до сих пор угле поворота пучка на угол $52 \cdot 10^{-3}$ рад.

В настоящее время делаются первые попытки практического использования кристаллов для формирования пучков на действующих ускорителях, а их использование в недалеком будущем активно обсуждается в литературе [7].

Однако к настоящему времени накоплен сравнительно малый опыт как в конструировании изгибающих устройств и получении монокристаллов, способных отклонять на разные углы частицы высоких энергий, так и в использовании монокристаллов для формирования пучков ускоренных частиц.

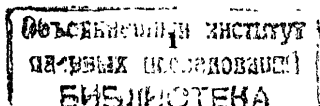
В настоящей работе представлены результаты опыта по изучению отклоняющих свойств изогнутого монокристалла кремния и формированию пучка протонов с импульсом $P_0 = 8,9$ ГэВ/с.

Эксперимент

Опыт по изучению отклоняющих свойств монокристалла кремния в плоскостном режиме каналирования проводился на синхрофазотроне ЛВФ ОИЯИ.

Пучок ускоренных протонов с импульсом $P_0 = 8,9$ ГэВ/с и интенсивностью $1 \cdot 10^5$ частиц/цикл выводился в канал 4В за время 0,3 с.

Для регистрации падающих на кристалл и отклоненных частиц использовался одноплечевой сцинтилляционный магнитный спектрометр (СМС) НИИЯФ МГУ. Схема расположения детекторов приведена на рис. I. Установка включала в себя сцинтилляционные счетчики: L, K, A; H - твер-



дотельный черенковский счетчик с отверстием; сцинтилляционные годоскопы: $F_x, F_y, B_x, B_y, T_x, T_y, S_x, S_y, P_x$; анализирующий магнит M и гониометр G с изогнутым монокристаллом Si . Координатными детекторами служили сцинтилляционные годоскопы, составленные из тонких сцинтилляторов с поперечным сечением 4×4 мм каждый [8].

Исследуемый кристалл имел вид пластины размерами $20 \times 10 \times 0,28$ мм, вырезанной из слитка кремния высокой чистоты с удельным сопротивлением $\rho \approx 10$ ком·см и плотностью дислокаций $\sim 10^2 \text{ см}^{-2}$. Пластина была вырезана так, чтобы её большая грань была параллельна кристаллографической плоскости с индексами (111). При этом параллельность грани и плоскости была не хуже $2'$. Грани пластины были отшлифованы, а большие грани отполированы и после обработки представляли собой зеркальные поверхности. Далее, одной из больших граней кристалла наклеивался на деформирующую оправку из алюминия с нужным радиусом кривизны (рис.2). Изготовленный таким образом кристалл должен

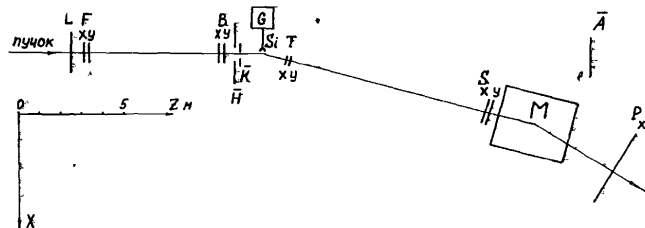


Рис.1.

Расположение детекторов сцинтилляционного магнитного спектрометра на канале 4В синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Вид сверху.

был обеспечить поворот пучка протонов на угол $65 \cdot 10^{-3}$ рад.

Управляемый дистанционно гониометр имел одну степень свободы при вращении вокруг вертикальной оси с минимальным шагом $25 \cdot 10^{-6}$ рад. При этом само устройство могло перемещаться вдоль оси X, а точность позиционирования составляла 0,5 мм.

Падающий на кристалл пучок выделялся включением откликов годоскопов F_x, F_y, B_x, B_y в совпадения, а откликов счетчиков \bar{K}, \bar{H} - в антисовпадения. Также требовалось, чтобы в годоскопах срабатывало только по одному каналу. Счетчик \bar{K} выделял вблизи кристалла окно размерами 1×1 см. Счетчик \bar{A} использовался для подавления временных наложений срабатываний детекторов $F_{x,y}, B_{x,y}, T_{x,y}$ от пучковых частиц со срабатываниями годоскопов $S_{x,y}, P_x$ от гало пучка. Угол рас-

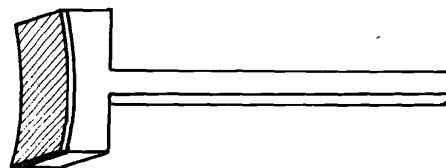


Рис.2.

Оправка с изогнутым монокристаллом кремния.

сеяния и импульс вторичной частицы определялись по откликам детекторов $T_{x,y}, S_{x,y}, P_x$.

Спектрометрирующее плечо с годоскопами $T_{x,y}, S_{x,y}, P_x$ и анализирующим магнитом было отведено от направления прямого пучка на угол $\sim 65 \cdot 10^{-3}$ рад, при котором ожидался эффект. Для обнаружения эффекта быстрой логической электроникой отбирались события, давшие совпадения откликов в T_y, S_x и P_x с откликом плеча, выделяющего пучок. При выведенной из пучка оправки с кристаллом частота фоновых срабатываний составляла менее $0,3 \cdot 10^{-6}$ на пучковую частицу. В ходе экспозиции проявление эффекта идентифицировалось как наличие перемещающегося в зависимости от вращения кристалла узкого пика в распределениях откликов каналов в S_x и P_x - годоскопах.

При обработке данных использовались следующие критерии отбора событий:

- эффективное срабатывание всех годоскопов;
- хорошее сшивание трека частицы из пучка с треком частицы, вышедшей из кристалла;
- Z -координата точки рассеяния частицы должна была находиться вблизи Σ -координаты места расположения кристалла.

Результаты

На рис.3а,б приведены аппаратные функции спектрометра по углу рассеяния в плоскости XZ и углу поворота в анализирующем магните для первичных частиц с импульсом $P_0 = 8,9$ ГэВ/с.

На рис.4а представлены распределения откликов каналов в S_x -годоскопе в зависимости от ориентации кристалла по отношению к падающему пучку. Отчетливо видна зависимость узкого пика в распределениях от положения кристалла.

Как известно, при плоскостном каналировании угол между вектором импульса частицы и каналирующей плоскостью не превышает критического угла:

$$(1) \quad \gamma = \sqrt{\frac{2U}{\rho v}} \quad [9], \text{ где } U - \text{глубина межплоскостного потенциала, } \rho \text{ и } v - \text{соответственно импульс и скорость частицы.}$$

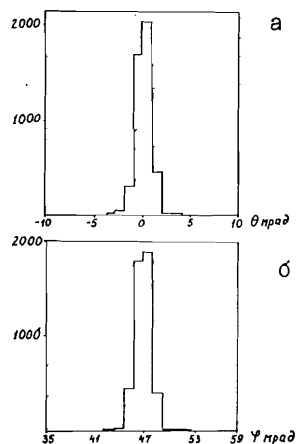


Рис.3.

- а) Аппаратурная функция спектрометра по углу рассеяния в плоскости XZ .
- б) Аппаратурная функция спектрометра по углу поворота в анализирующем магните.

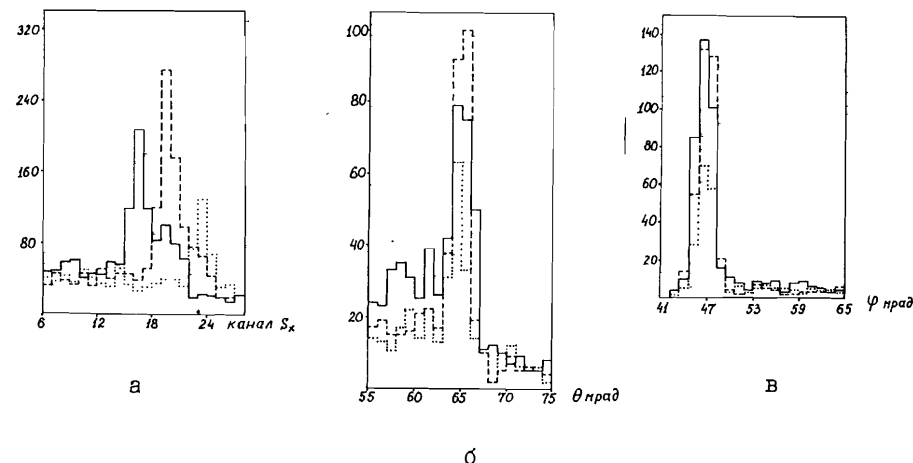


Рис.4.

- а) Распределение откликов каналов годоскопа S_x в зависимости от ориентации кристалла.
- б) Распределение по углу рассеяния в XZ -плоскости при разных ориентациях кристалла.
- в) Распределение по углу поворота в поле анализирующего магнита при разных ориентациях кристалла.

В кремнии для плоскости (III) $U = 22,3$ эВ. Следовательно, для протонов с импульсом $P_0 = 8,9$ ГэВ/с имеем:

$$\psi \approx 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

Ширина углового распределения частиц на выходе из кристалла составляет $2\psi \approx 1,4 \cdot 10^{-4}$ рад. На рис.4б, в приведены распределения по углам рассеяния в XZ -плоскости и углам поворота в магните. Положения пиков совпадают, а их ширина определяется разрешением спектрометра.

Отметим, что угол поворота в поле анализирующего магнита такой же, что и для частиц с импульсом P_0 (рис.4в).

Отсюда следует, что за счет плоскостного каналирования пучок отклоняется на угол (65 ± 1) град, а средний радиус кривизны кристалла составляет $R = (308 \pm 5)$ мм.

Интенсивность эффекта по отношению к падающему пучку определяется следующими факторами:

1. F_ψ - долей частиц пучка, падающих на торцевую поверхность кристалла внутри критического угла;
2. F_g - фактором геометрического перекрытия кристалла с пучком;
3. F_s - множителем, учитывающим, что только часть частиц, падающих внутри критического угла, захватывается в режим каналирования, т.к. частицы, имеющие малый прицельный параметр по отношению к ядрам решетки вблизи поверхности кристалла, рассеиваются на большие углы, главным образом, из-за кулоновского взаимодействия с полями ядер;
4. F_d - фактором деканалирования, который обусловлен как рас-

сеянием каналируемых частиц на электронном газе внутри канала, так и некоторым искажением потенциала, возникающим в результате каналирования частицы в изогнутом кристалле [10].

Когда элемент фазового объема пучка, вырезаемый кристаллом, мал, то можно пренебречь корреляцией между углами и координатами частиц, и полный фактор эффективности кристалла F представляется в виде:

$$(2) \quad F = F_\psi \cdot F_g \cdot F_s \cdot F_d.$$

Непосредственное измерение длины деканалирования λ_e не проводилось. Однако, если учесть, что F , F_ψ , F_g прямо получаются из опыта и воспользоваться значением $F_s \approx 0,6$ [11], то из (2) и определения λ_e имеем:

$$\lambda_e = -\ell / \ln(F/F_\psi \cdot F_g \cdot F_s), \text{ где } \ell - \text{длина кристалла.}$$

С учетом погрешностей при определении факторов F , F_ψ , F_g длина деканалирования составила: $\lambda_e = (9,4 \pm 2)$ мм, что находится в

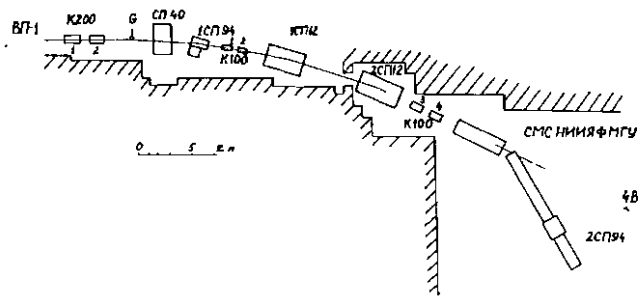


Рис. 5.

Расположение магнитных элементов каналов ВП-I и 4В.

согласии с результатом работ [12]. В позиции, когда кристалл перекрывался с максимумом плотности распределения пучка по углу падения, фактор кристалла F составил $8,2 \cdot 10^{-5}$.

Формирование пучка

С помощью исследованного кристалла был осуществлен вывод пучка протонов из канала ВП-I в канал 4В синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ.

Схема расположения магнитных элементов каналов приведена на рис. 5. В канал ВП-I выводился пучок ускоренных протонов с импульсом $P_0 = 8,9$ ГэВ/с и интенсивностью $1 \cdot 10^{10}$ частиц/цикл. Магнит СП-40 и линзы К100, 2к100, 3к100, 4к100 были отключены. Гониометр с кристаллом был установлен в точке G.

Пучок в вертикальной плоскости имел малую $\leq 10^{-3}$ рад угловую расходимость и размер на полувысоте плотности распределения по Y -координате 1 см. В месте установки кристалла в горизонтальной плоскости аналогичные характеристики пучка были следующими:

- угловая расходимость $12 \cdot 10^{-3}$ рад
- размер по $X \approx 3$ см.

Совместным управлением тока в магните СП-94 и проходом гониометра по углу и координате в канал 4В был выведен пучок с интенсивностью $3 \cdot 10^4$ частиц/цикл. При этом отмечалась резкая зависимость интенсивности от комбинации угол-координата. Это обстоятельство позволяет использовать изогнутый монокристалл для измерения плотности распределения частиц в пучке по углу и координате. Кроме того, выбор нужного угла и координаты позволяет сравнительно простыми средствами создавать пучки частиц высоких энергий с исключительно малой угловой расходимостью в широком диапазоне интенсивностей и может оказаться

особенно эффективным для формирования пучков частиц низкой интенсивности.

Выводы

1. С помощью изогнутого вдоль плоскости (111) тонкого монокристалла кремния длиной 20 мм за счет плоскостного каналирования пучок протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с отклонен от прямого направления на угол (65 ± 1) мрад.

2. Согласно с мировыми данными оценка для длины деканалирования $R_e = (9,4 \pm 2)$ мм показывает, что при среднем радиусе изгиба кристалла $R = (308 \pm 5)$ мм отсутствует заметное уменьшение длины деканалирования по сравнению с большими радиусами.

3. С фактором $1 \cdot 10^{-5}$ с помощью кристалла осуществлен вывод пучка протонов из канала ВП-I в канал 4В синхрофазотрона ЛВЭ.

Авторы благодарят Э.Н.Цыганова, В.В.Авдейчикова за консультации, В.П.Григорьеву за изготовление изгибающего устройства с кристаллом и Е.Н.Денисова за помощь при подготовке аппаратуры к измерениям. Авторы благодарны А.И.Демьянову за большой вклад в создание установки СМС-МГУ.

Литература

1. Е.Н.Тягуганов, Fermilab TM-682, TM-684, 1976.
2. А.С.Водошнянов и др. - Письма в ЖЭТФ, 1979, т.30, в.7, с.474.
3. В.А.Андреев и др. - Письма в ЖЭТФ, 1982, т.36, в.9, с.340; В.А.Андреев и др. - Письма в ЖЭТФ, 1984, т.39, в.2, с.58.
4. В.В.Авдейчиков и др. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 1, 84, с.3, Дубна, ОИЯИ, 1984, с.3.
5. S.I. Baker et al. Fermilab - Pub-86/20, 1986.
6. J. Bak et al. Nucl. Phys., 1984, B242, p.1.
7. R.A. Carrigan Jr. Fermilab Conf-86/52-a, 1986.
8. Л.И.Бельзер и др. Сообщения ОИЯИ 13-84-712, Дубна, 1984.
9. S.T. Picraux, J.U. Andersen, - Phys. Rev., 1969, 196, p.267.
10. H. Kudo, - Nucl. Instr. and Meth., 1981, 189, p.609.
11. S. Salzman, Thesis, State University of New York at Albany, 1982.
12. C.R. Sun et al. - Nucl. Instr. and Meth., 1984, B2, p.60.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 августа 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р.55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р.00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р.50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р.30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р.50 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983.	3 р.50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р.75 к.
D11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.00 к.
D13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р.80 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р.75 к.
D3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р.50 к.
-	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/	13 р.50 к.
D1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/	7 р.35 к.
D9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/	13 р.45 к.
D7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р.10 к.
D2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986.	4 р.45 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Бельзер Л.И. и др.

P1-87-653

Использование изогнутого монокристалла кремния для отклонения и формирования пучка протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с

С помощью одноплечевого магнитного спектрометра изучены отклоняющие свойства изогнутого монокристалла кремния за счет эффекта плоскостного каналирования. Кристалл использовался для формирования пучка протонов с импульсом 8,9 ГэВ/с.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод Л.Н. Барабаш

Bel'zer L.I. et al.

P1-87-653

Use of a Bent Silicon Crystal for Deflection and Formation of a Proton Beam with a 8.9 GeV/c Momentum

The deflecting properties of a bent silicon crystal by the planar channeling have been studied with the help of a one-shoulder magnetic spectrometer. The crystal has been used for the formation of a proton beam with a 8.9 GeV/c momentum.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987