

УДК 539.1.07

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗОГНУТОГО МОНОКРИСТАЛЛА КРЕМНИЯ ДЛЯ ОТКЛОНЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА ПРОТОНОВ С ИМПУЛЬСОМ 8.9 ГэВ/с

Л. И. Бельзер¹, В. А. Бодягин,¹ И. Н. Варданян,¹
А. М. Грибушин,¹ А. А. Ершов,¹ Н. А. Жарков,²
А. Д. Кириллов, Л. Н. Кожолов, О. Л. Кодолова,¹
П. А. Рукояткин, Л. И. Сарычева,¹ А. Л. Светов,
И. Н. Семенюшкин, Н. Б. Синев¹

С помощью одноплечевого магнитного спектрометра изучены отклоняющие свойства изогнутого монокристалла кремния за счет эффекта плоскостного каналирования. Кристаллы использовались для формирования пучка протонов с импульсом 8.9 ГэВ/с.

Введение

Эффект поворота пучка частиц за счет каналирования в изогнутом монокристалле был теоретически предсказан Цыгановым в [1]. Позднее, когда 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 ЛИЯФ 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 г. была дана экспериментальная иллюстрация возможности вывода ускоренных частиц при помощи кристалла [4]. Во ФНАЛ (США) с целью формирования пучка протонов 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 с области энергий в несколько ГэВ. В работе [6] сообщалось о наибольшем до сих пор угле поворота пучка — $52 \cdot 10^{-3}$ 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 относительно 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.

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва.

² Научно-исследовательский институт «Вента», Вильнюс.

Опыт по изучению отклоняющих свойств монокристалла кремния в плоском режиме канализирования проводился на синхрофазотроне ЛВЭ 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.

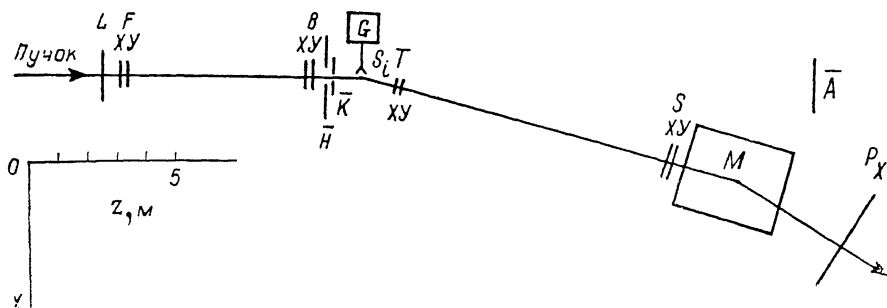


Рис. 1. Расположение детекторов сцинтилляционного магнитного спектрометра на канале 4В синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Вид сверху.

Для регистрации падающих на кристалл и отклоненных частиц использовался одноплечевой сцинтилляционный магнитный спектрометр СМС НИИЯФ МГУ [8]. Схема расположения детекторов приведена на рис. 1. Установка включала в себя сцинтилляционные счетчики L , \bar{K} , \bar{A} ; \bar{H} — твердотельный 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 сцинтилляционных слоев с поперечным сечением 4×4 мм² каждый.

Исследуемый кристалл имел вид пластины размерами $20 \times 10 \times 0.28$ мм³, вырезанной из слитка кремния высокой чистоты с удельным сопротивлением $\rho \approx 10$ кОм·см и плотностью дислокаций $\sim 10^2$ см⁻². Пластина вырезалась так, чтобы ее большая грань была параллельна кристаллографической плоскости с индексами (111). При этом параллельность грани и плоскости оказывались не хуже $2'$. Грани пластины были отшлифованы, а большие грани отполированы и после обработки представляли собой зеркальные поверхности. Далее, одной из больших граней кристалл наклеивался на деформирующую оправку из алюминия с нужным радиусом кривизны (рис. 2). Изготовленный таким образом кристалл должен 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 см². 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 рассеяния и импульс вторичной частицы определялись по откликам детекторов $T_{x,y}$, $S_{x,y}$, P_x .

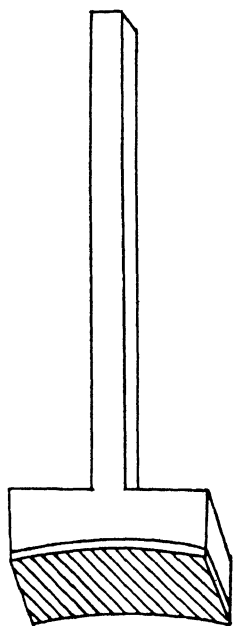


Рис. 2. Оправка с изогнутым монокристаллом кремния.

Спектрометрирующее плечо с годоскопами $T_x, \bar{v}, S_x, \gamma, P_x$ и анализирующим магнитом было отведено от направления прямого пучка на угол $65 \cdot 10^{-3}$ рад, при котором ожидался эффект. Для обнаружения эффекта быстрой логической электроникой отбирались события, давшие совпадения откликов в T_x, S_x и P_x с откликом плеча, выделяющего пучок. При выведенной из пучка оправки с кристаллом частота фоновых срабатываний составляла менее 0.3×10^{-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 годоскопах S_x и P_x .

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 Z -координаты места расположения кристалла.

Результаты

На рис. 3, *a, б* приведены аппаратурные 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. 4, *a* 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-импульсом частицы и каналирующей плоскостью не превышает критического угла [9]

$$\psi = \sqrt{\frac{2U}{PV}}, \quad (9)$$

где U — глубина межплоскостного потенциала P и V — соответственно импульс и скорость частицы.

В кремнии для плоскости (111) $U=22.3$ эВ. Следовательно, для протонов с импульсом $P_0=8.9$ ГэВ/с имеем $\psi \approx 0.7 \cdot 10^{-4}$ рад. Ширина углового распределения частиц на выходе из кристалла составляет $2\psi \approx 1.4 \cdot 10^{-4}$ рад. На рис. 4, *б* 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. 4, *в*).

Отсюда следует, что за счет плоскостного каналирования пучок отклоняется на угол 65 ± 1 мрад, 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, так как частицы, имеющие малый прицельный параметр по отношению к ядрам решетки вблизи поверхности

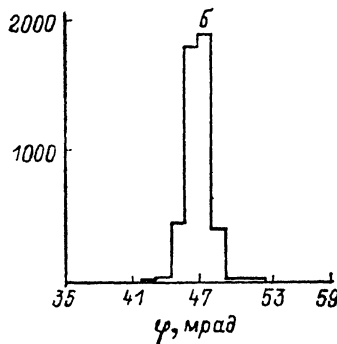
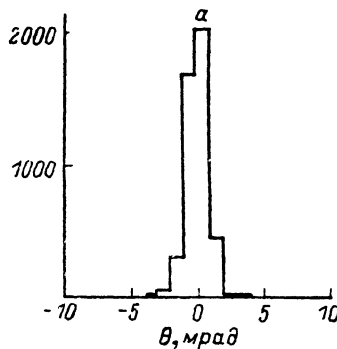


Рис. 3.

кристалла, рассеиваются на большие углы главным образом из-за кулоновского взаимодействия с полями ядер; 4) F_d — фактором деканализирования, который обусловлен как рассеянием каналируемых частиц на электронном газе внутри канала, так и за счет некоторого искажения потенциала, возникающего 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

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

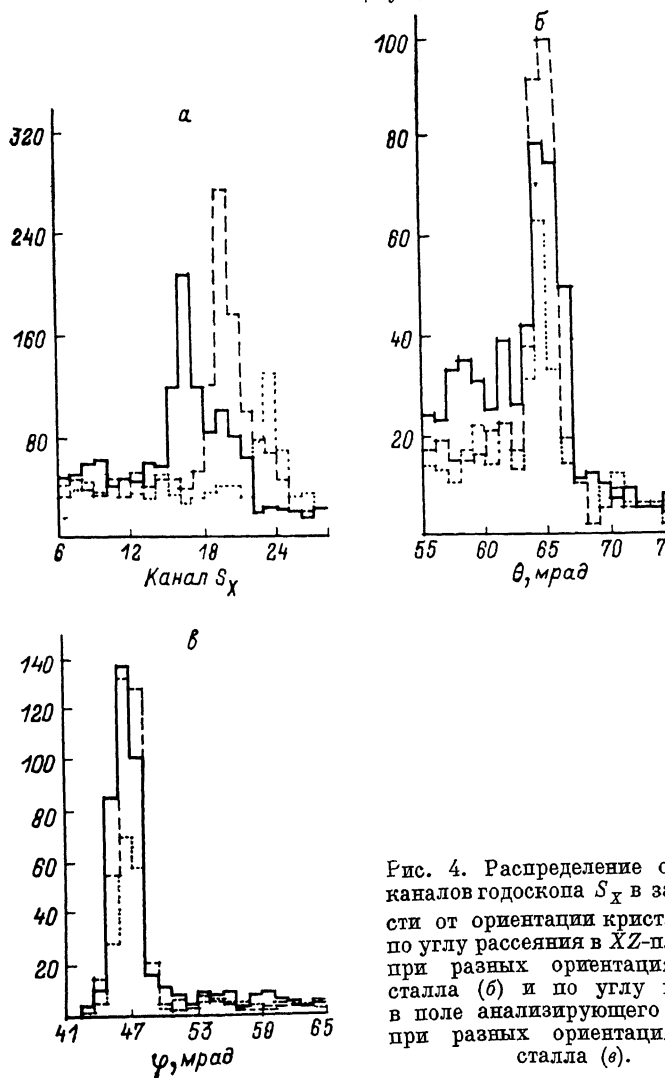


Рис. 4. Распределение откликов каналов годоскопа S_x в зависимости от ориентации кристалла (а), по углу рассеяния в XZ -плоскости при разных ориентациях кристалла (б) и по углу поворота в поле анализирующего магнита при разных ориентациях кристалла (в).

Непосредственное измерение длины деканализирования λ_l 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_l имеем

$$\lambda_l = -l / \ln(F / F_\psi F_g F_S),$$

где l — длина кристалла.

С учетом погрешностей при определении факторов F , F_ψ , F_g длина деканализирования составила $\lambda_l = 9.4 \pm 2$ мм, что находится в согласии с результатом работы [12]. В позиции, когда кристалл перекрывался с максимумом плотности распределения пучка по углу падения, фактор кристалла F составил $8.2 \cdot 10^{-5}$.

С помощью исследованного кристалла был осуществлен вывод пучка протонов из канала ВП-1 в канал 4В синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ.

Схема расположения магнитных элементов каналов приведена на рис. 5. В канал ВП-1 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 К 100 (1-4) 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 координате y 1 см. В месте установки кристалла в горизонтальной плоскости аналогичные

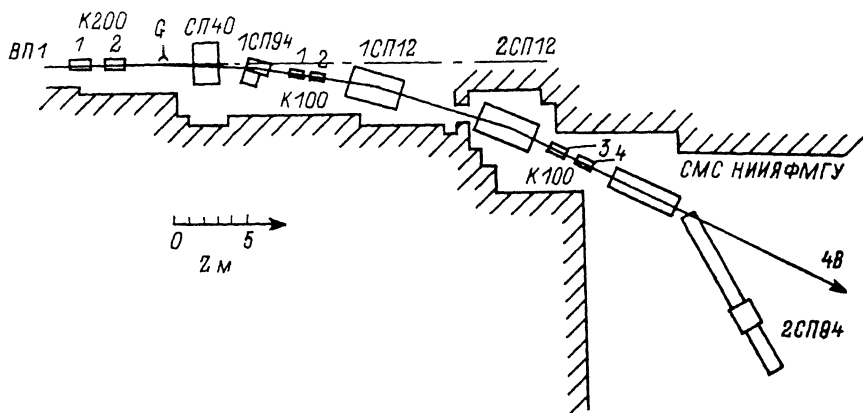


Рис. 5. Расположение магнитных элементов каналов ВП-1 и 4В.

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 была выведена интенсивность $3 \cdot 10^4$ 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 $\lambda_1 = 9.4 \pm 2$ 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-1 в канал 4В синхрофазотрона ЛВЭ.

Авторы благодарят Э. Н. Цыганова, В. В. Авдейчикова за консультации, В. П. Григорьева 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] *Tsyganov E. N.* Fermilab TM-682, TM-684, 1976.
- [2] *Водопьянов А. С., Головатюк В. М., Елишев А. Ф.* и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, № 7, с. 474—478.
- [3] *Андреев В. А., Баублис В. В., Дамаскинский Е. А.* и др. Письма в ЖЭТФ, 1982, т. 36, № 9, с. 340—343. Там же, 1984, т. 39, № 2, с. 58—61.
- [4] *Авдейчиков В. В., Булдаковский В. Н., Бычков А. В.* и др. В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ. Дубна, ОИЯИ, 1984, № 1, с. 3—6.
- [5] *Baker S. I., Carrigan R. A., Jr., Dixon R. L.* et al. Fermilab-Pub-86/20, 1986.
- [6] *Bak J. F., Jensen P. R., Madsböll H.* et al. Nucl. Phys., 1984, N 242, p. 1—30.
- [7] *Carrigan R. A., Jr.* Fermilab Conf-86/52-E, 1986.
- [8] *Бельзер Л. И., Грибушин А. М., Жильцова Л. Я.* и др. Сообщения ОИЯИ, Дубна, 1984.
- [9] *Picraux S. T., Andersen J. U.* Phys. Rev., 1969, N 186, p. 267—272.
- [10] *Kudo H.* Nucl. Instr. and Meth., 1981, N 189, p. 609—614.
- [11] *Salman S.* In: Thesis of State University of New York at Albany, 1982.
- [12] *Sun C. R., Gibson W. M., Kim I. J.* et al. Nucl. Instr. and Meth., 1984, 230, N 2, p. 60—62.

Поступило в Редакцию
18 сентября 1987 г.

