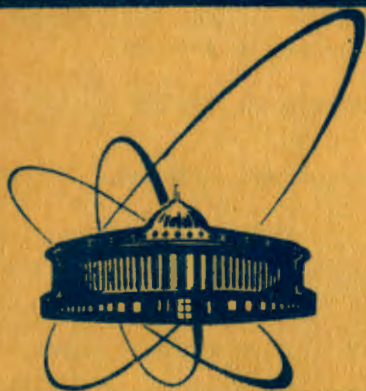


9/1-84



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

250/84

1-83-726

ОСЕВОЕ КАНАЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ
В ПРЯМЫХ И ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛАХ
КРЕМНИЯ

1983

Н.К.Булгаков, А.С.Водопьянов, И.Войтковска, В.М.Головатюк,
З.Гузик, Н.И.Зимин, Р.Б.Кадыров, Т.С.Нигманов, В.Д.Рябцов,
А.Б.Садовский, И.А.Тяпкин, Н.А.Филатова, А.Форыцки,
Э.Н.Цыганов, М.Д.Шафранов
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Р.Карриган, Т.Туиг
Национальная ускорительная лаборатория им. Э.Ферми,
Батавия, США

У.Гибсон, Ч.Сан, И.Дж.Ким
Университет штата Нью-Йорк, Олбани, США

М.Д.Бавижев
Филиал Ставропольского политехнического института, Черкесск



В 1979 году на синхрофазотроне ОИЯИ был проведен эксперимент/1/, в котором был открыт эффект отклонения заряженных частиц изогнутыми кристаллами, предсказанный ранее в работе/2/.

Входные и выходные углы каждой частицы, прошедшей через кристалл, определялись при помощи системы дрейфовых камер, расположенных до и после кристалла. Важной характеристикой эффекта каналирования является критический угол. Для протонов с энергией 8,4 ГэВ, падающих на кристалл кремния, ориентированный осью <110> параллельно оси пучка, критический угол составляет 160 мкрад, а в случае каналирования плоскостью /111/ - 60 мкрад. Эти углы в основном определяли требование к точности измерения входных и выходных углов. В указанном эксперименте входные углы измерялись с точностью 80 мкрад, а выходные - 10 мкрад /стандартное отклонение/. Подробно экспериментальная установка описана в работе/3/. Позднее аналогичные по методике эксперименты, проведенные в ЦЕРНе/4/ и ЛИЯФ/5/, подтвердили существование эффекта отклонения заряженных частиц изогнутыми кристаллами.

В сообщении/1/ приводились результаты эксперимента по изучению возможности отклонения протонов, захваченных в режим каналирования плоскостью /111/, на различные углы вплоть до 25,7 мрад. В том же эксперименте была набрана статистика по прохождению протонов с энергией 8,4 ГэВ через прямой и изогнутый под углами 1,6 и 4,7 мрад кристалл кремния в режиме осевого каналирования. В данной работе приводятся результаты, полученные при обработке этого материала.

ОСЕВОЕ КАНАЛИРОВАНИЕ В ПРЯМОМ КРИСТАЛЛЕ

Перед тем как проводить исследования с изогнутым кристаллом, изучалась возможность прохождения протонов с энергией 8,4 ГэВ через прямые образцы толщиной 2 см в режиме осевого и плоскостного каналирования. На рис.1а и 1б приведены распределения по входным и выходным углам протонов, прошедших кристалл кремния, ориентированный осью <110> вдоль оси пучка. На рис.1в показано распределение по выходным углам протонов, прошедших разориентированный кристалл. Приведенные распределения нормировались следующим образом:

$$2\pi \int_0^{\psi_1} \chi(\zeta) \zeta d\zeta = 1, \quad \zeta = \frac{\psi}{\psi_1},$$

ψ_1 - критический угол, $\chi(\zeta)$ - число частиц в элементе телесного

ПРОХОЖДЕНИЕ ПРОТОНОВ ЧЕРЕЗ ИЗОГНУТЫЙ КРИСТАЛЛ В РЕЖИМЕ ОСЕВОГО И ПЛОСКОСТНОГО КАНАЛИРОВАНИЯ

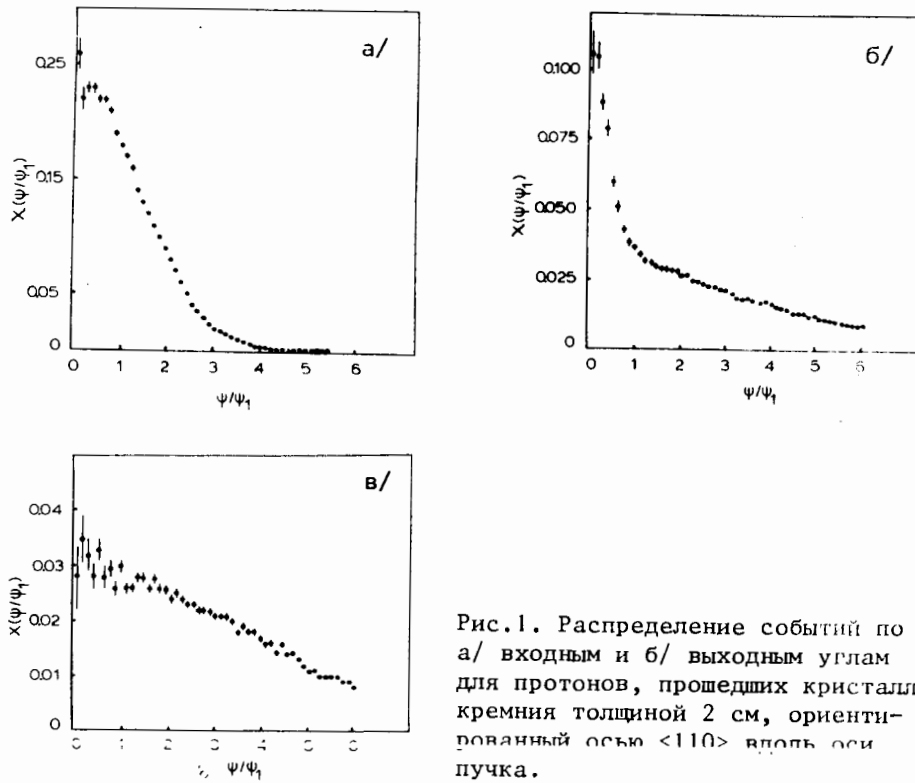


Рис.1. Распределение событий по а/ входным и б/ выходным углам для протонов, прошедших кристалл кремния толщиной 2 см, ориентированный осью $\langle 110 \rangle$ вдоль оси пучка.

угла. В связи с тем, что угол ψ мал, использовалось следующее приближение: $2\pi \sin\psi d\psi \approx 2\pi\psi d\psi$. Распределение на рис.1а приведено с учетом разрешения установки по входным углам, которое определялось в основном рассеянием в блоке камер, установленном непосредственно перед кристаллом.

Из представленных рисунков следует, что частицы, падающие на кристалл под углами меньше критического, испытывают меньшее многократное рассеяние. Доля частиц, прошедших кристалл в режиме осевого каналирования, будет определяться шириной углового распределения входного пучка, критическим углом ψ_1 , а также интенсивностью процесса деканалирования. Из анализа распределений событий по выходным углам для частиц из пика минимальной ионизации, вошедших в кристалл под углами меньше $\psi_1/2$, была сделана оценка длины деканалирования /длины, на которой число каналированных частиц уменьшается в два раза/, которая составляет $x_{1/2} = 1,2_{\pm 0,3}$ см. Приведенная ошибка включает как статистическую ошибку, так и систематическую, связанную с вычитанием фона от деканалированных частиц.

Исследование осевого каналирования в изогнутых кристаллах для отклонения пучков заряженных частиц вызывает интерес в связи с тем, что критический угол осевого каналирования в 3-4 раза больше плоскостного, а также в связи с большей длиной деканалирования по сравнению с каналированием плоскостями. Однако величина потенциального барьера, удерживающего частицы в осевом каналировании, имеет минимальные значения в направлениях низкоиндексных кристаллографических плоскостей. Поэтому при попадании в изогнутую часть кристалла вследствие действия центробежной силы будет происходить выбывание частиц из осевого канала в плоскостные в направлениях, противоположных изгибу. Интенсивность этого процесса определяется углом между кристаллографической плоскостью и направлением изгиба кристалла.

Изгибающее устройство с тремя роликами не обеспечивало постоянного радиуса кривизны. В связи с этим по мере продвижения к середине изогнутой части кристалла, где радиус кривизны минимальный, будет возрастать влияние центробежной силы на переход из осевого в плоскостное каналирование. Представленные ниже экспериментальные данные подтверждают переход частиц из осевого канала в плоскостные, составляющие небольшие углы с направлением изгиба кристалла. Кристаллографическая плоскость $/111/$ и лежащая в ней ось $\langle 110 \rangle$ подвергались контролируемому изгибу. На рис.2 и 3 представлены распределения выходных углов частиц, прошедших кристалл, изогнутый под углами 1,6 и 4,7 мрад соответственно. На приведенных рисунках отчетливо различаются события, в которых частицы не попали в режим каналирования или деканалировали в прямой части кристалла /широкое пятно под нулевыми углами/, а также частицы, отклоненные деформированными плоскостями $/111/$ и $/110/$ и осью $\langle 110 \rangle$.

При изгибе кристалла под углом 4,7 мрад доля частиц, отклоненных осью $\langle 110 \rangle$, заметно меньше, чем в случае изгиба на 1,6 мрад. Это особенно заметно на проекциях распределений частиц, отклоненных на максимальный угол /рис.4,5/. При изгибе под углом 1,6 мрад /рис.4/ на фоне широкого распределения, обусловленного каналированными и отклоненными плоскостями $/111/$ частицами, виден узкий пик от частиц, прошедших кристалл в режиме осевого каналирования. Ширина на полувысоте этого пика составляет около 160 мкрад для X- и Y-проекций. Полная ширина распределения в X-проекции соответствует ширине входного пучка. На рис.5 приведено аналогичное распределение для угла изгиба 4,7 мрад. На месте расположения оси на этом распределении наблюдается провал шириной около 400 мкрад. Два относительно широких пика обусловлены частицами, каналированными плоскостью $/111/$. Полная ширина распределения сравнима с шириной входного пучка в этой проекции. Таким образом, при увеличении угла изгиба кри-

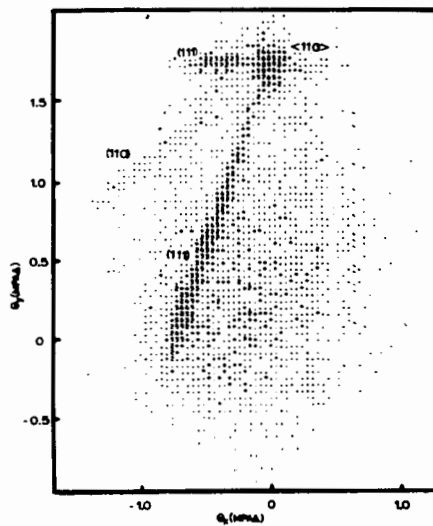


Рис.2. Распределение событий по выходным углам для протонов, прошедших кристалл кремния, изогнутый на угол 1,6 мрад. Прямая часть кристалла ориентирована осью <110> параллельно оси пучка.

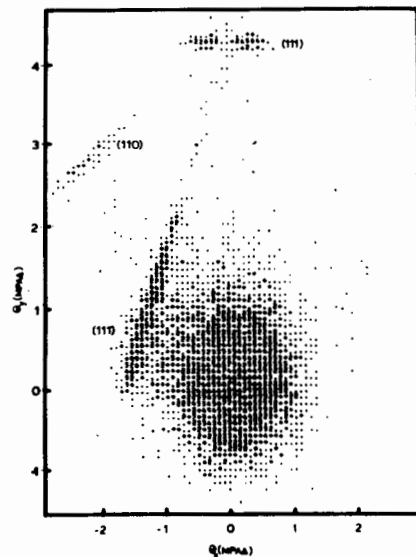


Рис.3. То же, что на рис.2, для угла отклонения 4,7 мрад.

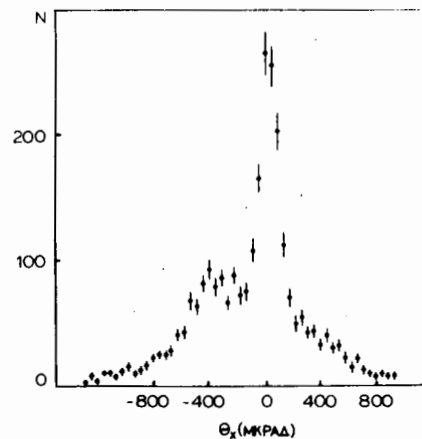
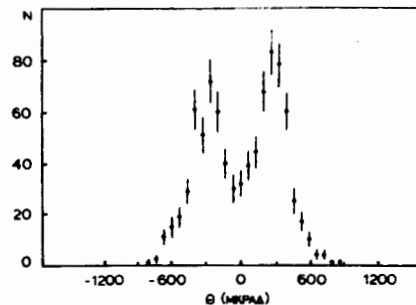


Рис.4. X-проекция распределения частиц, отклоненных осью <110> и плоскостью /111/, перпендикулярной плоскости изгиба кристалла. Максимальный угол отклонения - 1,6 мрад.

Рис.5. То же, что на рис.4. Максимальный угол отклонения - 4,7 мрад.



стала до 4,7 мрад за счет большой величины центробежной силы почти все частицы, захваченные первоначально в режим каналирования осью <110>, деканализовали как за счет обычных механизмов, так и за счет центробежного механизма, причем большинство деканализованных протонов захватилось кристаллографическими плоскостями и отклонилось на меньшие углы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что при прохождении протонов с энергией 8,4 ГэВ через прямой кристалл кремния толщиной 2 см доля каналированных частиц остается существенной. Экспериментальная оценка длины деканализации составляет: $X_{1/2} = 1,2 \pm 0,3$ см.

Отклонение пучка частиц, захваченных в режим осевого каналирования, наблюдается при углах изгиба кристалла 1,6 мрад. При его изгибе под углом 4,7 мрад почти все частицы из режима осевого каналирования перешли в режим каналирования плоскостями, составляющими небольшие углы с плоскостью изгиба кристалла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Elishev A.F. et al. Phys.Lett., 1979, 88В, р.387.
2. Tsyganov E.N. Fermilab, ТМ-682, ТМ-684, Batavia, 1976.
3. Водопьянов А.С. и др. ОИЯИ, Р13-80-225, Дубна, 1980.
4. Bak J. et al. Phys.Lett., 1980, 93В, р.505.
5. Андреев В.А. и др. Препринт ЛИЯФ, № 792, Л., 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 октября 1983 года.

Булгаков Н.К. и др.

1-83-726

Осевое каналирование высокоэнергетических протонов
в прямых и изогнутых кристаллах кремния

Приведены результаты обработки данных, полученных на синхрофазотроне ОИЯИ в 1979 году в эксперименте по отклонению траекторий протонов с энергией 8,4 ГэВ с помощью изогнутых монокристаллов. Показано, что при прохождении прямого кристалла толщиной вдоль пучка 2 см доля частиц, каналированных осью $\langle 110 \rangle$, остается существенной. Экспериментальное значение длины деканалирования /длины, на которой число каналированных частиц уменьшается в два раза/ составляет $X_{1/2} = 1,2$ см. При отклонении на угол 4,7 мрад наблюдается сильное выбывание частиц из режима осевого каналирования, в то время как в случае отклонения плоскостью /111/ такого сильного выбывания не наблюдается.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Bulgakov N.K. et al.

1-83-726

Axis Channeling of High Energy Protons
in Direct and Bent Silicon Crystals

Results are presented of a detailed analysis of the data obtained in 1979 in the experiment on deviation of 8.4 GeV/protons by bent crystals. It is shown that after passing a straight crystal 2 cm thick, a considerable fraction of particles remains in the regime of axial $\langle 110 \rangle$ channeling. The estimate of dechanneling length (length on which the fraction of channeled particles decreases by a factor of two) is $X_{1/2} = 1.2$ cm. Passing the crystal bent by 4.7 mrad, a strong dechanneling is seen for the $\langle 110 \rangle$ axis, while in the case of planar /111/ channeling the dechanneling fraction is much smaller.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой