

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЭФФЕКТА ОБЪЕМНОГО ЗАХВАТА В РЕЖИМ КАНАЛИРОВАНИЯ ИЗОГНУТЫМ МОНОКРИСТАЛЛОМ

*В.А. Андреев, В.В. Баублис, Е.А. Дамаскинский, А.Г. Крившич,
Л.Г. Кудин, В.В. Марченков, В.Ф. Морозов, В.В. Нелюбин,
Е.М. Оришин, Г.Е. Петров, Г.А. Рябов, В.М. Самсонов,
Л.Э. Самсонов, Э.М. Спириденков, В.В. Сулимов,
О.И. Сумбаев, В.А. Щегельский*

Впервые показано, что изогнутый монокристалл обладает способностью захватывать частицы в режим каналирования в интервале углов много больших, чем угол Линдхарда. Протоны с энергией 1 ГэВ захватывались в процесс каналирования (111), (110)-плоскостями и $\langle 110 \rangle$ -осью по всей длине 1 см изогнутого по радиусу 46 см монокристалла кремния в суммарном угловом интервале до 20 мрад.

В недавно выполненных работах ^{1,2} экспериментально показано, что деформированные монокристаллы могут быть использованы для управления траекториями каналирующих протонов высоких энергий.

Одним из авторов этой статьи по аналогии с так называемым эффектом упругой квазимозаичности для рентгеновского излучения, дифрагирующего в изогнутом монокристалле ³, была высказана гипотеза о возможности существенного увеличения угла захвата частиц в режим каналирования в изогнутых кристаллах. Суть этого эффекта, названного "объемным захватом", состоит в том, что условия захвата в режим каналирования возникают внутри объема кристалла, в области, где траектория частицы совпадает с касательной к изогнутой кристалло-графической плоскости. Таким образом, захват возможен для частиц падающего пучка внутри всего угла, между касательными к изогнутым плоскостям в пределах кристалла. После захвата частицы двигаются вдоль изогнутых плоскостей и могут образовывать повернутый пучок с узким угловым распределением. Возможность такого захвата не очевидна, однако кажущееся нарушение второго начала (уменьшение энтропии) снимается диссипативностью системы.

Целью настоящего эксперимента являлась проверка этой гипотезы. Эксперимент выполнен на синхроциклотроне ЛИЯФ. Пучок протонов с энергией 1 ГэВ имел специально сформированную большую угловую расходимость $\sigma_x = 1$ мрад и $\sigma_y = 0,4$ мрад¹). Схема опыта изображена на рис. 1. Пропорциональные камеры ПК1, ПК2, ПК3 (шаг нитей 1 мм по осям X и по Y) предназначены для определения траектории частиц до попадания в изогнутый кристалл C и после выхода из кристалла. Сцинтилляционные счетчики S1, S2 и камеры ПК1, ПК2 служили для выделения протонов, попадающих в кристалл. Счетчик S1, имеющий щель $0,4 \times 10$ мм², включен на антисовпадение. Расстояние между камерами ПК1 – ПК2 – 5,4 м, между камерами ПК2 – ПК3 – 2,4 м.

На изогнутом монокристалле, изготовленном из полупроводникового кремния, реализовано три детектирующие структуры (ПД1, ПД2, ПД3), что позволяет проследить за движением частиц в кристалле на всех стадиях: захват, каналирование, деканалирование. Методика и технология изготовления таких детекторов описана в ⁴. Энергетическое разрешение каждой детектирующей зоны не хуже 30 – 35 кэВ при 300 К. Исследования проводились при интенсивности $\approx 10^3$ частиц в секунду. Толщина пластины 0,4 мм, длина по пучку 10 мм, высота чувствительных зон 10 мм, ширина по пучку 1,5 мм, расстояния между ними 1,5 мм. Кристалл поворачивался относительно прямого пучка по углу φ (см. рис. 1) с точностью

¹) Величина угла Линдхарда для протонов 1 ГэВ и плоскости (111) составляет $\approx 0,12$ мрад.

до 0,01 мрад и перемещался поперек пучка с точностью 10 мкм. Установка работала в линию с ЭВМ PDP11/40 и ЕС-1030.

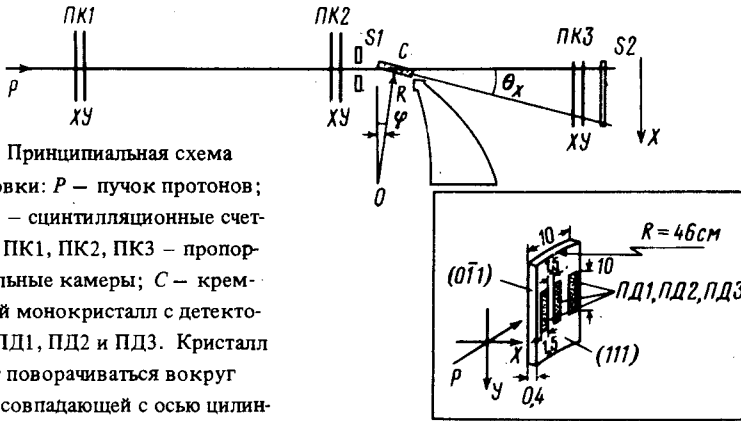


Рис. 1. Принципиальная схема установки: P — пучок протонов; $S1, S2$ — сцинтилляционные счетчики; $PK1, PK2, PK3$ — пропорциональные камеры; C — кремниевый монокристалл с детекторами ПД1, ПД2 и ПД3. Кристалл может поворачиваться вокруг оси O , совпадающей с осью цилиндра, по которому он изогнут

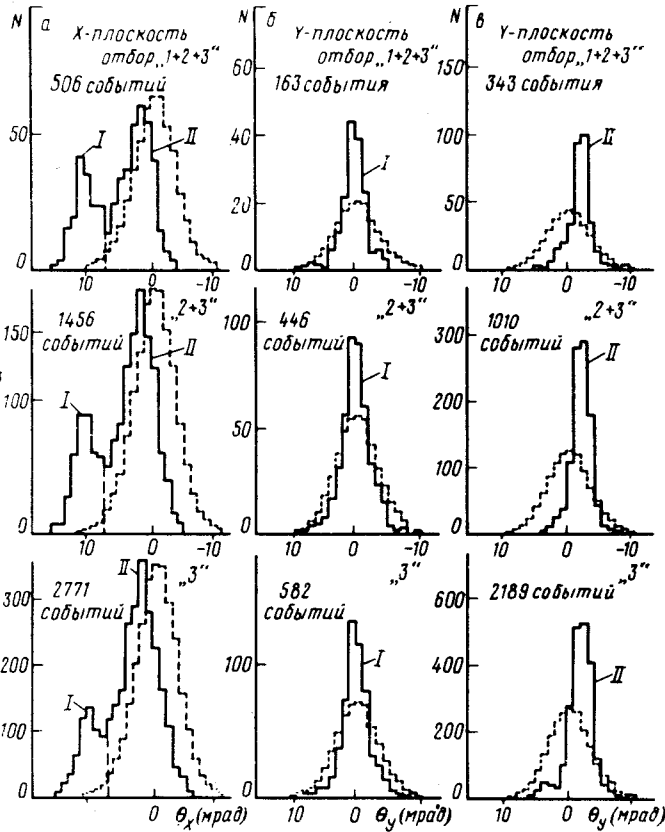


Рис. 2. Угловые распределения частиц, прошедших кристалл, с отбором по критерию малой амплитуды: "1 + 2 + 3" — во всех трех детекторах, "2 + 3" — во втором и третьем ПД, "3" — ПД3. Кристалл повернут на угол $\varphi = 8$ мрад. Пунктиром показан "прямой пучок" — нормированный на полное число событий каналированных частиц

Каналированными считались частицы, имеющие anomalно малые удельные ионизационные потери в детекторах. Дополнительным критерием каналирования частиц с малыми удельными потерями служил поворот пучка при выходе из кристалла и сужение его угловой ширины за счет уменьшения многократного рассеяния.

На рис. 2 представлены угловые распределения частиц, выходящих из кристалла, при включении в отбор частиц, имеющих амплитуды меньше 0,74 от наиболее вероятной для "прямого пучка" во всех трех ПД — "1 + 2 + 3"; в двух — "2 + 3" и в последнем "3". Отчетливо вид-

ны (рис. 2, а) сдвинутые пучки: I — обусловленный каналированием на плоскости (111) и оси $\langle 110 \rangle$, II — обусловленный косыми плоскостями (в основном $(1\bar{1}\bar{1})$, (110), (001)). Косые плоскости имеют изгиб и могут смещать пучок как в горизонтальной (X), так и в вертикальной (Y) плоскости (рис. 2, в). Наблюдается существенное в два — три раза уменьшение угловой расходимости каналированных I и II пучков по сравнению с "прямым пучком", соответствующим нормальным ионизационным потерям и углу φ вне области каналирования. На рис. 3 представлены спектры ионизационных потерь частиц, образующих отклоненные пучки I и II (с отбором "3") в ПД1 и ПД2, т. е. соответственно, на различных участках их траекторий в кристалле. Характерным признаком каналирования является появление пика в области $\approx 0,5$ наиболее вероятной амплитуды от нормальных (неканалирующих) частиц. Отметим, что ширина этого пика в $3 \div 4$ раза меньше, чем для распределения от неканалирующих частиц и определяется разрешением детектора.

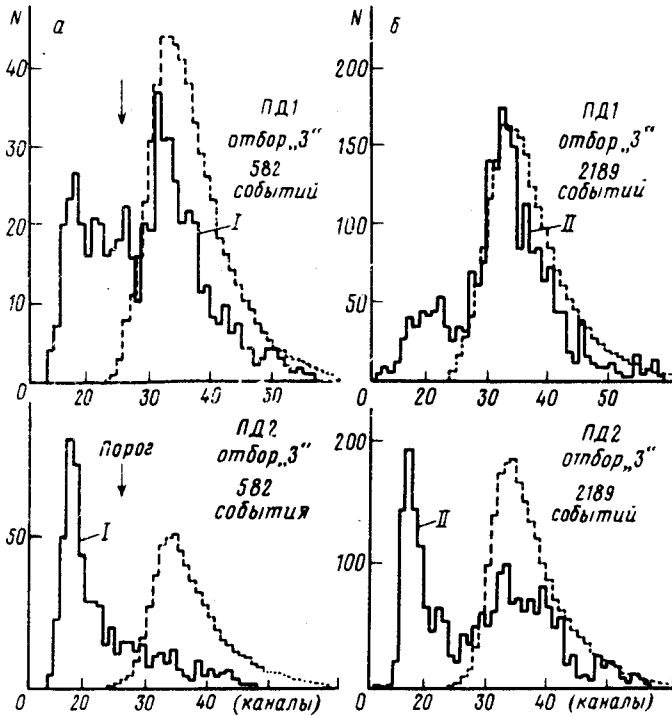


Рис. 3. Амплитудные спектры частиц в ПД1 и ПД2 при $\varphi = 8$ мрад: а — для пучка I, б — для пучка II (рис. 2, а отбор "3"). Пунктир — амплитудный спектр "прямого пучка"

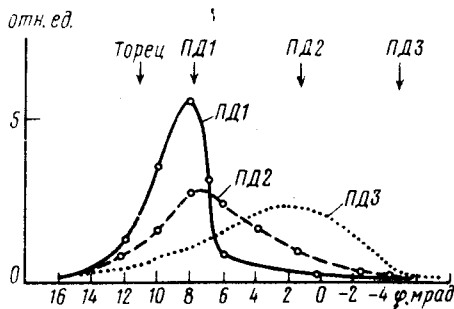


Рис. 4. Зависимость числа частиц с малой амплитудой в ПД1, ПД2 или ПД3 от угла φ поворота кристалла относительно падающего пучка. Порог отбора по амплитуде показан на рис. 3. Нанесены также положения входных торцов кристалла и детекторов ПД1 ÷ 3

На основе приведенных фактов можно однозначно заключить, что выделяемые частицы являются каналирующими. Из этих рисунков также следует существование объемного захвата в режим каналирования. Увеличение интенсивности отклоненных пучков в зависимости от типа отбора "1 + 2 + 3", "2 + 3" и "3" означает, что происходит дополнительная "подпитка" этих пучков за счет частиц, захваченных на участках между первым и вторым, а также вторым и третьим детекторами. Наглядным подтверждением объемного захвата служит так-

же рис. 3, из которого видно, что многие, отклоненные в максимумы I или II частицы, не были каналированными в ПД1 / (имели большие ионизационные потери) и "встали на рельсы" только на больших глубинах в кристалле.

На рис. 4 приведена зависимость числа частиц с малой амплитудой в ПД1, ПД2 и ПД3 от угла φ поворота кристалла. Этот рисунок демонстрирует, что область захвата частиц в режиме каналирования изогнутым кристаллом отнюдь не сосредоточена только вблизи его входного торца, но смещается по объему кристалла. Форма этих кривых определяется также деканалированием.

Новое явление позволяет существенно увеличивать интенсивность пучков каналирующих частиц и использовать пучки с большой угловой расходимостью.

Авторы благодарны А.А.Воробьеву за поддержку работы и полезные обсуждения, сотрудникам службы пучков синхроциклотрона ЛИЯФ за обеспечение эксперимента.

Литература

1. Водопьянов А.С., Головатюк В.М., Елишев А.Ф. Иванченко И.М., Кадыров Р.Б., Карпенко Н.Н., Кореньков В.В., Нигманов Т.С., Рябцов В.Д., Сеннер А.Е. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 474.
2. Bak J., Melchart G., Uggerhoj E. et al. Phys. Lett., 1980, 93B, 505.
3. Сумбаев О.И. ЖЭТФ, 1968, 54, 1362.
4. Андреев В.А., Дамаскинский Е.А., Кадашевич В.И. и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика, выпуск 4, 96, 1981.

Институт ядерной физики
им. Б.П.Константинова
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 сентября 1982 г.