

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P14-86-189

С.А.Карамян

НЕОБРАТИМЫЙ ПЕРЕХОД ОТ ЭФФЕКТА ТЕНЕЙ
К КАНАЛИРОВАНИЮ ДЛЯ ИОНОВ,
РАССЕЯННЫХ НА МОНОКРИСТАЛЛЕ Ge

Направлено в журнал "Известия АН СССР,
серия физическая"

1986

Прохождение заряженных частиц в монокристаллах регулируется эффектами теней и каналирования, открытыми более 20-ти лет назад ^{1-3/}. После выяснения основных характеристик этих эффектов на пучках протонов и α -частиц с энергией (0,1-1) МэВ/нуклон ^{4/} работы продолжались по линии исследования более тонких особенностей, а также постановки опытов с отрицательно заряженными частицами, релятивистскими частицами, малоэнергичными атомами и тяжелыми ионами.

Исследование эффекта теней при взаимодействии ускоренных тяжелых ионов в области энергии (0,6-8) МэВ/нуклон с монокристаллами металлов и полупроводников проводится в ЛЯР ОИЯИ, начиная с 1970 г. Согласно существующим представлениям ^{5/} регистрация продуктов ядерных реакций на монокристаллической мишени в геометрии рассеяния на большой угол должна приводить к наблюдению эффекта теней, что и фиксировалось практически во всех экспериментах. Максимумы каналирования для частиц, выходящих из кристалла, должны наблюдаться только при прохождении изотропного потока частиц сквозь тонкую мишень, например, при нанесении радиоизотопного источника α -частиц на одну сторону кристалла и регистрации углового распределения частиц с другой стороны ^{6/}. В настоящей работе сообщается о наблюдении максимумов каналирования в угловом распределении ионов, рассеянных на большой угол, при облучении монокристалла Ge пучками ионов ^{20}Ne (104 МэВ) и ^{40}Ar (205 МэВ).

Монокристаллическая мишень представляла собой отполированную пластину толщиной 0,5 мм детекторного германия ориентации (100). Используются пучки циклотрона У-300, имевшие после прохождения коллиматора диаметр 1 мм, интенсивность не более 10^{10} с^{-1} и угловой разброс $< \pm 1^\circ$. Ионы, рассеянные на мишени в геометрии на отражение, регистрировались в области углов $\theta_L = 32-80^\circ$ стеклянным трековым детектором (^{40}Ar) или полиэтилентерефталатом, закрытым 6-мкм Al-фольгой (^{20}Ne). В эксперименте с ионами ^{40}Ar стеклянный детектор регистрирует не только рассеянные ионы, но также ядра отдачи рассеяния (Ge) и продукты неупругих столкновений. Угловое распределение зарегистрированных в этом случае частиц представлено на рис. 1. Видно, что наблюдается подъем выхода к малым углам и максимум в районе $\theta_L = 65-75^\circ$. В случае, если стекло закрыто 6-мкм Al-фольгой, ядра отдачи

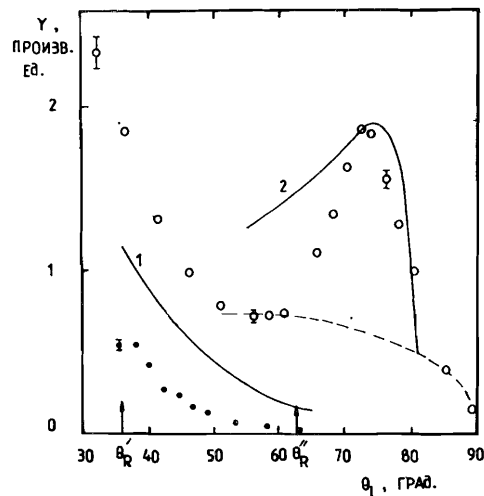


Рис. 2

Схематическое изображение пространственного распределения продуктов реакции, зафиксированных стеклянным детектором (а), и результаты сканирования кристаллографических направлений: (III) при $\theta_L = 35^\circ$ (б); $\langle III \rangle$, 58° (в); (OII), 72° (г). Обозначения на рис. 2а следующие: заштрихована область детектора, закрытая фольгой; жирная линия — хорошо выраженные плоскостные тени; тонкая — слабые тени; двойная — максимумы каналирования; штриховая — изолинии угла θ_L ; стрелками даны направления сканирования.

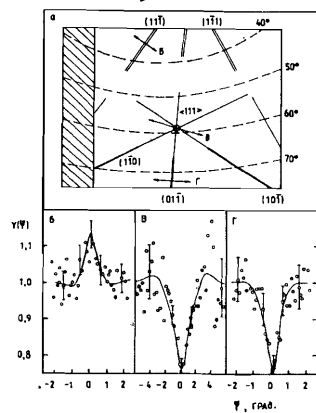


Рис. 1
Зависимость выхода от угла, измеренная стеклянным детектором, закрытым 6-мкм Al-фольгой (темные точки), и стеклом без фольги (светлые точки). Сплошные линии: 1 — вычисленный выход резерфордовского рассеяния ^{40}Ag при регистрации детектором с фольгой, 2 — выход ядер отдачи Ge при резерфордовском рассеянии (детектор без фольги).

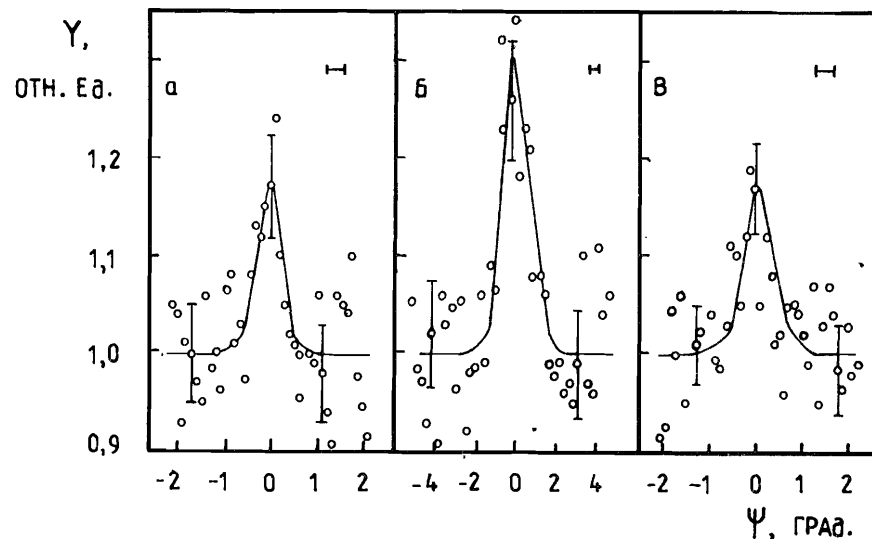


Рис. 3. Профиль максимумов каналирования в угловом распределении ионов ^{20}Ne , рассеянных на монокристалле Ge, для следующих кристаллографических направлений: (III) при $\theta_L = 52^\circ$ (а); $\langle III \rangle$, 58° (б); (OII), 55° (в). Горизонтальным отрезком показано угловое разрешение.

упругого и неупругого взаимодействия не попадают на детектор и остается только компонент распределения, монотонно убывающий с ростом угла. Этот факт, а также сравнение результатов измерений с рассчитанным выходом (на толстой мишени) продуктов упругого рассеяния доказывают, что в области углов $\theta_L < 50^\circ$ главный вклад дают упруго-и неупругорассеянные ионы ^{40}Ag , а в области максимума в основном фиксируются тяжелые продукты реакции.

Рассмотрим теперь структуру углового распределения, связанную с кристаллографическими направлениями. Эта структура в виде сетки кристаллографических плоскостей наблюдается на детекторе визуально, так как большая плотность треков частиц делает поверхность стекла матовой. В области углов регистрации $75 > \theta_L > 65^\circ$ видна достаточно контрастная структура теневых минимумов, в интервале $\theta_L = 60-50^\circ$ тени становятся слабовыраженными, затем они исчезают, а при углах $\theta_L < 42^\circ$

изображение кристаллической структуры инвертируется, минимумы сменяются максимумами каналирования. Структура распределения схематически показана на рис. 2а. Количественные результаты сканирования плоскостных и осевых структур приведены на рис. 2б-г. Видно, что ось $\langle III \rangle$, ориентированная под углом 58° к пучку, дает теневой минимум, не более глубокий, чем плоскостной минимум $(OI\bar{I})$ при $\theta_L = 72^\circ$. Это подтверждает ослабление эффекта теней при уменьшении угла. Для плоскости (III) при $\theta_L = 35^\circ$ выявляется очевидный максимум каналирования.

Наблюдаемую структуру рефлексов кристаллографических направлений (рис. 2) можно объяснить с учетом результатов рис. 1 следующим образом. Фиксируемые в интервале $\theta_L = 75-65^\circ$ ядра отдачи выходят из поверхностных слоев кристалла (в связи с небольшим пробегом) и показывают хорошо выраженный эффект теней. Рассеянные ионы, напротив, имеют довольно большой пробег и выходят, главным образом, из глубины кристалла в связи с ростом сечения рассеяния при торможении падающей частицы. Для ионов, вышедших из глубины кристалла, характер рефлексов определяется эффектом каналирования, что и наблюдается в интервале $\theta_L = 32-42^\circ$. В промежуточной области углов $\theta_L = 42-65^\circ$ структура слабо выражена в результате суперпозиции выходов ядер отдачи и рассеянных ионов.

Наблюдение максимумов каналирования для частиц, рассеянных в монокристаллической мишени, представляет собой неожиданный результат. Для проверки был сделан подобный эксперимент с ионами ^{20}Ne . В этом случае частицы фиксировались пластиком, закрытым фольгой, которая задерживает тяжелые продукты реакции. В результате угловое распределение зарегистрированных частиц содержит только монотонно убывающий с ростом угла компонент, т. е. фиксируются упруго- и неупругорассеянные ионы. Кристаллографические направления проявляют себя в виде максимумов каналирования в интервале углов регистрации $\theta_L = 46-65^\circ$. Детектор перекрывал область θ_L от 46 до 74° , при $\theta_L > 65^\circ$ плотность треков зарегистрированных частиц была недостаточна для наблюдения структуры углового распределения. Результаты сканирования кристаллографических направлений даны на рис. 3, видны хорошо выраженные максимумы. Таким образом, однозначно доказано, что ионы ^{20}Ne и ^{40}Ar , рассеянные в глубине монокристалла Ge, на выходе из него приобретают структурные особенности распределения, связанные с эффектом каналирования.

Ионы, рассеянные в глубине кристалла, имеют исходное угловое распределение, определяемое эффектом теней, за счет деканалирования оно сменяется равномерным распределением по мере прохождения через кристалл, а затем в приповерхностной области частицы захватываются

в режим каналирования и выходят с соответствующим распределением. Захват способствует увеличению критического угла каналирования ψ_c при торможении частиц. Можно думать, что эффект каналирования является конечной стадией движения частиц вблизи кристаллографических направлений, независимо от их предьстории попадания и движения в монокристаллической среде. Бесструктурное распределение, как в аморфной среде, в монокристалле достигается, видимо, только на переходной ступени от преобладания эффекта теней к преобладанию каналирования. Если имеется равномерное распределение потока по пространственным координатам и углам в пределах элементарной ячейки, то каналирование будет преобладать над эффектом теней в связи с большим фазовым объемом по пространственным координатам. Наблюдаемый переход от теней к каналированию означает, что для частиц, прошедших слой монокристалла немалой толщины, правило обратимости Линдхарда существенно нарушено. Выход в теневом минимуме χ в геометрии прямой тени с ростом толщины слоя стремится к значению $\chi_{lim} > 1$, а выход каналирования в геометрии обратной тени - к $\chi_{lim} < 1$.

Результаты настоящих экспериментов кроме качественных выводов позволяют оценить длину деканалирования и сделать некоторые заключения о механизме этого процесса. Действительно, трансформация эффекта теней в каналирование происходит после прохождения рассеянной частицей (^{40}Ar) слоя $t \leq 15$ мкм Ge. Следовательно, уже после прохождения слоя 5-10 мкм исходное теневое распределение полностью разрушено процессами перерассеяния (деканалирования). Отсюда можно получить, что сечение деканалирования ^{40}Ar в Ge составляет $\sigma_d \approx 3 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ на атом при средней энергии ионов (50-100) МэВ (с учетом потерь энергии). Значение σ_d того же порядка величины, что и сечение рассеяния на углах $\theta > \psi_c$. Если за деканалирование ответственно рассеяние на ядрах, то приходим к выводу, что все 100% атомов в решетке занимают смещенное положение и дают вклад в деканалирование. Так как это нереально, то главным источником деканалирования следует признать взаимодействие с электронами. Для электронных процессов сечение деканалирования $\sigma_d \approx 10^{-21} \text{ см}^2$ на электрон довольно мало, а угол отклонения частицы $\theta > \psi_c$ относительно велик. Поэтому основное значение имеют, по-видимому, процессы многократного рассеяния на электронах и коллективного возбуждения атомов решетки.

Вообще говоря, существует возможность объяснять результаты без использования предположения о сильном деканалировании. Если частицы не рассеиваются средой кристалла, а только теряют энергию, то исходное теневое распределение сохраняется на выходе из кристалла. Угловая полуширина теневого минимума будет отвечать энергии частиц в точке

рассеяния $\psi_{1/2} \approx \psi_c(E_1)$. Частицы в угловом интервале $\psi_c(E_1) < \psi < \psi_c(E_2)$ (E_2 — энергия на выходе из кристалла) по мере торможения могут быть захвачены в режим каналирования в результате увеличения критического угла. Таким образом, может сформироваться угловое распределение выходящих частиц, состоящее из узкого теневого минимума, расположенного в центре более широкого максимума каналирования. В эксперименте теневой минимум не выявлен при имеющемся угловом разрешении и набранной статистике. Кроме того, против данного варианта интерпретации говорит также отсутствие широких максимумов в экспериментах по наблюдению эффекта теней при регистрации рассеянных частиц на пучке ионов с энергией 0,6 МэВ/нуклон и осколков деления.

Обнаружение максимумов каналирования для рассеянных ионов в настоящих экспериментах позволяет предложить новую интерпретацию результатов работы ^{17/}, в которой зафиксировано значительное ослабление эффекта теней в области $\theta_L < 60^\circ$ при регистрации стеклянным детектором продуктов ядерного взаимодействия ^{20}Ne (104 МэВ) + Ge. Теперь появляется возможность объяснить это не большим временем протекания реакции, а вкладом рассеянных ионов ^{20}Ne . Регистрация ионов ^{20}Ne стеклом является околороговым процессом и возможна только для ионов небольшой энергии ^{18/}.

Таким образом, при облучении монокристалла Ge пучками ионов с энергией 5 МэВ/нуклон зафиксированы максимумы каналирования в угловом распределении рассеянных частиц, что показывает значительную роль эффекта каналирования для частиц, выходящих из глубины кристалла. Эти факты требуют по-новому взглянуть на сам термин "деканалирование". До сих пор он использовался в традиционном значении, как разупорядочение регулярного, каналированного движения. Результаты измерений, однако, показывают, что в геометрии наблюдения прямой тени "деканалирование" разрушает эффект теней, а каналирование, напротив, создается кристаллом после того, как частица пройдет слой немалой толщины. Поэтому вместо деканалирования лучше употреблять слова "перерассеяние", "угловое разупорядочение".

Автор благодарен группе эксплуатации циклотрона У-300 ЛЯР ОИЯИ за получение пучков ионов, а также участникам научного семинара ЛЯР за полезное обсуждение интерпретации результатов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Robinson M.T., Oen O.S. Phys. Rev., 1963, vol.132, p.2385.
2. Тулинов А.Ф. ДАН СССР, 1965, т.162, с.546.
3. Domeij B., Bjorkqvist K. Phys. Lett., 1965, vol. 14, p.127.
4. Channeling: Theory, Observation and Application. Wiley, N.Y., 1973.
5. Линдхард Й. УФН, 1969, т.99, с.249.

6. Скворцов В.В., Богдановская И.Н. Письма в ЖЭТФ, 1970, т.11, с.3.
7. Карамян С.А. Письма в ЖЭТФ, 1984, т.40, с.196.
8. Флейшер Р.Л., Прайс П.Б., Уокер Р.М. Треки заряженных частиц в твердых телах: принципы и приложения. Энергоиздат, М., 1981, часть I.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 марта 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
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.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 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.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.

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

Карамян С.А. P14-86-189
Необратимый переход от эффекта теней
к каналированию для ионов, рассеянных на монокристалле Ge

При облучении монокристалла Ge пучками ионов ^{20}Ne (104 МэВ) и ^{40}Ar (205 МэВ) в пространственном распределении рассеянных частиц обнаружены максимумы каналирования в направлениях кристаллографических осей и плоскостей. Таким образом, зафиксирована трансформация эффекта теней в каналирование для частиц, выходящих из глубины кристалла. Получена оценка длины деканалирования.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Karamian S.A. P14-86-189
Irreversible Transformation of the Blocking
into Channeling for Ions Scattered on Ge Single Crystal

A monocrystalline Ge target is irradiated by ^{20}Ne (104 MeV) and ^{40}Ar (205 MeV) ion beams, and the channeling maxima at the angular distribution of scattered particles are observed along crystallographic axis and plane directions. Thus, the transformation of the blocking effect into channeling for the particles going out of the depth of the crystal is fixed. Dechanneling length is estimated.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986