

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ АТОМОВ НА РАССЕЯНИЕ РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ

Б.Р.Мещеров, В.И.Туманов

Экспериментально исследовано изменение интенсивности многократного рассеяния, обусловленного колебаниями атомов, в зависимости от направления движения релятивистских электронов по отношению к кристаллографической оси.

Рассеяние является одним из наиболее важных вопросов в физике ориентационных явлений, поскольку именно оно определяет характер и скорость перераспределения частиц между состояниями движения по мере их проникновения вглубь кристалла. Этим объясняется постоянное внимание, которое уделяют исследованию рассеяния, главным образом электронов, различные группы теоретиков и экспериментаторов (см., например, ^{1–6}).

Несмотря на то, что кристалл имеет в среднем Периодическую структуру, существуют взаимодействия, приводящие к стохастизации движения электронов — это рассеяние на цепочках (см. ⁶ и цитированную там литературу) и на нарушениях периодичности, связанных с колебаниями атомов. Целью данного эксперимента было исследовать, изменяется ли интенсивность многократного рассеяния, обусловленного колебаниями атомов, в зависимости от угла влета релятивистских электронов по отношению к одному из главных направлений в кристалле (в нашем случае — кристаллографической оси). Нетривиальность задачи и, как следствие, отсутствие заметного продвижения в экспериментальном изучении этого вопроса, связаны с тем, что при указанных условиях действуют одновременно несколько механизмов рассеяния, затрудняющая интерпретацию данных, получаемых прямым методом, — по измерениям угловых распределений пучка частиц до и после кристалла. В самом деле: при движении вблизи кристаллографической оси, либо плоскости, отклонение электрона от первоначального направления может быть вызвано совокупным действием большой группы атомов (непрерывный потенциал Линдхарда), многократным рассеянием на отдельных атомах (обусловленным как их колебаниями, так и просто дискретностью расположения — "модуляцией" непрерывного потенциала) и, наконец, многократным рассеянием на группах атомов, — цепочках (в аксиальном случае). Таким образом, извлечь данные о том рассеянии, которое связано

с колебаниями атомов и является основным механизмом перераспределения частиц по состояниям движения внутри канала, из измерений угловых распределений не представляется возможным.

Тем не менее, как следует из результатов работ ⁴ и ⁷, существует достаточно простая экспериментальная процедура, — измерение выхода жесткого тормозного излучения, — которая дает возможность определения среднеквадратичного угла многократного рассеяния электронов. Действительно, формулы, полученные в ⁷, позволяют представить спектральную плотность интенсивности жесткого некогерентного тормозного излучения с единицы длины в виде:

$$\frac{d^2W}{d\omega dz} = C \langle \theta^2 \rangle_a, \text{ где } \langle \theta^2 \rangle_a \text{ — средний квадрат угла рассеяния, вызванного колебаниями}$$

атомов, а C — константа, не зависящая от пространственного распределения рассеивателей.

Следовательно, проведя измерения интенсивности неколлимированного тормозного излучения из кристаллической мишени для различных ориентаций, — когда пучок электронов проходит вдали от какого-либо из главных направлений (рассеяние происходит как в аморфной мишени) и вблизи него, — можно получить величину относительного изменения $\langle \theta^2 \rangle_a$. Именно такая процедура и была нами осуществлена.

При проведении измерений использовался пучок линейного электронного ускорителя "Факел" (ИАЭ им. И.В.Курчатова) с энергией ~ 47 МэВ и расходностью $\sim 4 \cdot 10^{-4}$. Радиатором служил совершенный монокристалл кремния толщиной ~ 10 мкм, вырезанный перпендикулярно оси $\langle 100 \rangle$ с точностью до $0,5^\circ$. Излучение регистрировалось сцинтилляционным детектором на основе кристалла CsJ(Tl) диаметром 60 мм и толщиной 40 мм, обеспечивающим практически полное поглощение. Перед детектором помещался слой графита толщиной ~ 40 мм для поглощения мягкой части излучения (примерно до 300 кэВ). Угол коллимации регистрируемых фотонов ψ_c был порядка $\gamma^{-1} \approx 10^{-2}$ (γ — лоренц-фактор), т.е. задомо выполнялось полученное в ⁸ условие $\psi_c \gtrsim \psi_m \sim (3 \div 5) \cdot 10^{-3}$. Таким образом, можно считать, что колимация излучения отсутствовала.

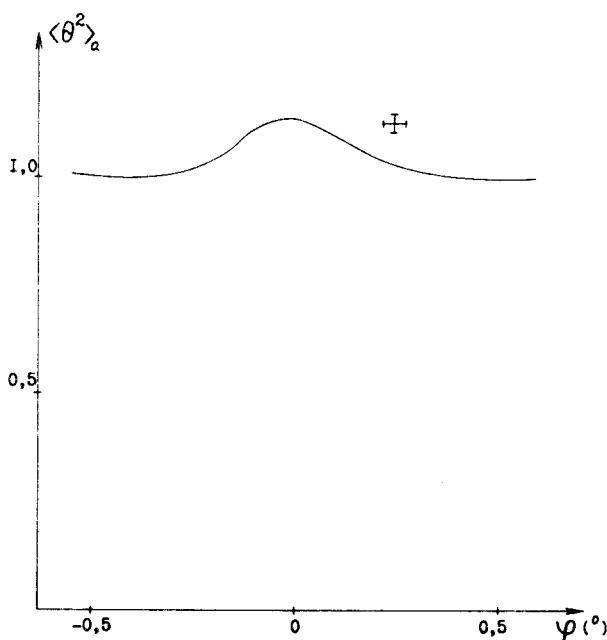


Рис. 1. Зависимость среднего квадрата угла многократного рассеяния $\langle \theta^2 \rangle_a$ от угла влета электронов φ по отношению к кристаллографической оси. Справа вверху указана ошибка измерений; толщина кристалла — 10 мкм.

Кристалл устанавливался на гониометре с двумя угловыми степенями свободы и ориентировался осью $\langle 100 \rangle$ вдоль пучка электронов при помощи детектора мягкого (не более 100 кэВ) излучения. Ориентационная кривая, получаемая с помощью такого детектора на кристалле

кремния толщиной в 10 мкм, имеет контрастность в осевом максимуме ~ 4 ; точность установки монокристалла в заданном положении не хуже $0,2\psi_L$ (угол Линдхарда $\psi_L \approx 2 \cdot 10^{-3}$). Потом кристалл разориентировался по одному из углов и уже с детектором полного поглощения снималась ориентационная зависимость жесткого тормозного излучения.

Полученные описанным методом результаты измерения среднего квадрата угла многократного рассеяния приведены на рис. 1. Видно, что $\langle \theta^2 \rangle_a$ увеличивается при углах влета электронов $\varphi \lesssim \psi_L$ по отношению к кристаллографической оси. Таким образом, во-первых, продемонстрирована возможность изучения многократного рассеяния на отдельных атомах при прохождении электронов через монокристаллы и, во-вторых, экспериментально доказано увеличение внутри канала среднеквадратичного угла многократного рассеяния, обусловленного колебаниями атомов, по сравнению с аморфным веществом.

Авторы благодарны В.А.Базылеву за полезные обсуждения.

Литература

1. Schiebel U. et al. Phys. Lett. A, 1974, 47, 13.
2. Булгаков Н.К. и др. Препринт ОИЯИ 1-83-640, 1983.
3. Авакян А.Р. и др. Письма в ЖТФ, 1985, 11, 641.
4. Базылев В.А. и др. ЖЭТФ, 1986, 91, 25.
5. Авакян Р.О. и др. Препринт ЕФИ-1019(69)-87, 1987.
6. Касилов В.И. и др. ЖЭТФ, 1989, 96, 1927.
7. Базылев В.А. и др. ДАН СССР, 1985, 283, 855.
8. Базылев В.А. и др. ЖЭТФ, 1987, 92, 1946.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
19 апреля 1990 г.