

10; 11; 12

© 1991

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ СПЕКТРОСКОПИИ
УПРУГОГО ОТРАЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С МОНОКРИСТАЛЛАМИ

В.В. Макаров, С.И. Игонин

Исследовалась ориентационная анизотропия упругого отражения (УО) электронов с энергией $E_p \approx 20$ кэВ от монокристаллов SiC . Регистрировались электроны, рассеянные на заданный угол (140°); разрешение энергоанализатора составляло ~ 0.5 эВ, что позволяло разделять пики в энергетических спектрах, связанные с упругим рассеянием на атомах Si и C . Возможность таких измерений обусловлена зависимостью энергии отдачи E_R , получаемой атомом, от его массы [1, 2], вследствие чего соответствующие пики УО сдвинуты на разные расстояния $\Delta E = E_R$ относительно E_p (рис. 1, $E_R^{Si} = 1.1$ эВ, $E_R^C = 2.6$ эВ при $E_p = 16$ кэВ). Так как интенсивности I_{Si} , I_C этих пиков пропорциональны плотности электронного волнового поля $|\psi|^2$ на узлах решетки, усредненной по глубине порядка длины пробега λ относительно неупругого соударения (а также дифференциальным сечениям σ_{Si} , σ_C рассеяния на угол 140°), то измерения I_{Si} , I_C при определенных ориентациях дают информацию о соотношении величин $|\psi|^2$ на Si - и C -подрешетках кристалла.

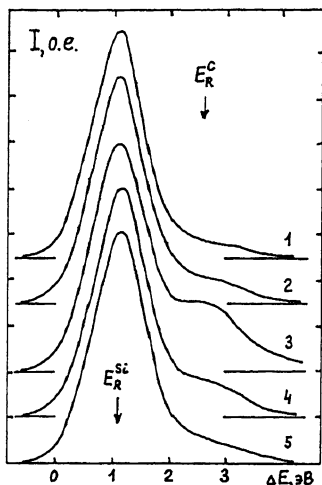
Экспериментальные данные рис. 1, 2, а получены вблизи брэгговских углов дифракции электронов на системе плоскостей $\{0001\}$, образованной чередующимися слоями атомов Si и C . Как видно из этих рисунков, соотношение I_{Si} и I_C изменяется в несколько раз при изменении угла падения пучка θ всего на $\approx 2^\circ$, что связано с изменением положения максимумов $|\psi|^2$ относительно кремниевых и углеродных плоскостей; при этом ход зависимостей $I(\theta)$ хорошо согласуется с результатами расчета в двухволновом приближении динамической теории дифракции (рис. 2, б):

$$|\psi|_{Si}^2 \sim I_{Si} \sim 1 + \frac{W \pm af_B/f_A}{[1+(f_B/f_A)^2]^{1/2}(1+W)^2}, \quad (1)$$

$$|\psi|_C^2 \sim \frac{\sigma_{Si}}{\sigma_C} I_C \sim 1 + \frac{W \mp af_A/f_B}{[1+(f_A/f_B)^2]^{1/2}(1+W)^2}, \quad (2)$$

где $a \approx \xi g / \pi \lambda$, ξg - экстинкционная длина, W - параметр отклонения от условия Брэгга, f_A , f_B - амплитуды упругого

Рис. 1. Нормированные на амплитуду пика кремния энергетические спектры упругого отражения электронов с $E_p = 16$ кэВ от монокристалла SiC при различных углах падения θ вблизи брэгговского угла дифракции на плоскостях $\{0001\}$. θ , град: 1 - 0, 2 - 1, 3 - 2, 4 - 3.5, 5 - 6.



рассеяния электронов атомами кремния и углерода на брэгговский угол.

Обращает на себя внимание сильная асимметрия кривых относительно $\theta = 0$, связанная с нецентросимметричностью кристалла и определяемая порядком следования слоев Si и C (в зависимости от которого в приведенных формулах берутся верхние или нижние знаки); при повороте кристалла на 180° вокруг нормали к поверхности кривые зеркально отражаются относительно $\theta = 0$.

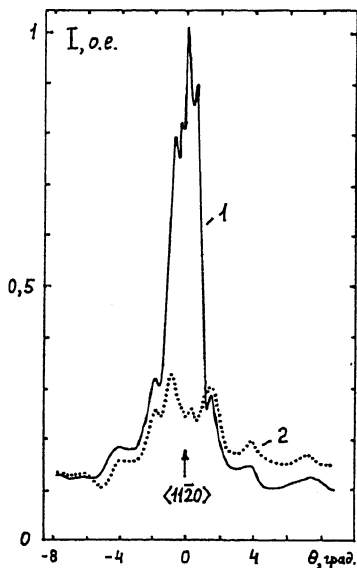
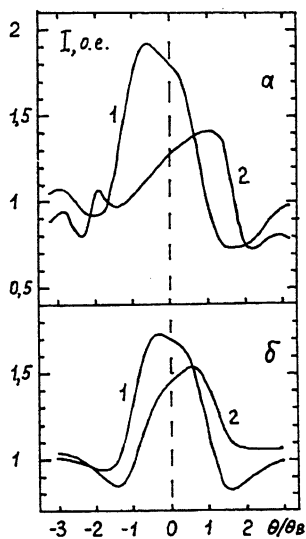


Рис. 2. Ориентационные зависимости интенсивности упругого отражения электронов от атомов кремния I_{Si} (1) и углерода $k \cdot I_C$ (2). $k = \sigma_{Si} / \sigma_C = 6$ [4], $\theta_B = 1.08^\circ$ - угол Брэгга для плоскостей $\{0001\}$ при $E_p = 16$ кэВ. а - эксперимент, б - расчет.

Рис. 3. Ориентационные зависимости I_{Si} (1) и $k \cdot I_C$ (2) вблизи кристаллографического направления $\langle 11\bar{2}0 \rangle$.

Следует отметить, что асимметрия ориентационной анизотропии УО существенно больше, чем обнаруженная в [3] по картинам каналирования для неупругого отражения. Так, относительная величина определяющего эту асимметрию слагаемого в (1, 2) для атомов Si в 5, а для атомов C - в 10 раз превышает соответствующую величину в выражениях [3] для асимметрии коэффициента неупругого отражения электронов.

На рис. 3 приведены ориентационные зависимости интенсивности УО, полученные при бомбардировке кристалла SiC вблизи направления $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ (изменение угла θ в плоскости $10\bar{1}0$). В этом случае при осевом каналировании ($\theta \sim 0$) в отличие от плоскостного (рис. 2) наблюдается преимущественная локализация волнового поля на кремниевой подрешетке. Теоретический расчет $|\psi|^2$ для этой ориентации сопряжен с большими вычислительными трудностями и пока еще не выполнен.

Обнаруженные в данной работе эффекты могут быть использованы для неразрушающего определения направления полярной оси в нецентросимметричных кристаллах, раздельного определения дефектности каждой из подрешеток, например в ионно-имплантационных образцах, выявления антиструктурных дефектов, а также для экспериментальной проверки теоретических расчетов локализации дифракционного волнового поля электронов в монокристаллах.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] В о е r s c h H., W o l t e r R. und S c h o e n e b e c k H. // Zeitschrift fur Physik, 1967. В. 199. N 1. S. 124-134.
- [2] И г о н и н С.И., М а к а р о в В.В. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 17. С. 1043-1047.
- [3] М а к а р о в В.В., П о д с в и р о в О.А. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 8. С. 501-505.
- [4] R i l e y M.E., M a s C a l l u m C.J., B i g g s F. // Atomic data and nuclear data tables. 1975. V. 15. N 5. P. 443-476.

Ленинградский
государственный
технический
университет

Поступило в Редакцию
22 января 1991 г.