а на основе формулы Аррениуса — кривой 3. Расчеты для ударных волн в данной работе дают картину поведения констант элементарных реакций, качественно согласующуюся с результатами [15, 16].

Список литературы

[1] *Gmuresyk A. S.*, *Tarczynski M.*, *Walenta Z. A.* // Rarefied Gas Dynamics. New York: Pergamon Press, 1979. Vol. 1. P. 333—341.
[2] *Takahashi N.*, *Moriga T.*, *Teshima K.* // Rarefied Gas Dynamics. New York: Pergamon Press, 1986. Vol. 1. P. 939—950.
[3] *Mitra N. K.*, *Fiebig M.* // Rarefied Gas Dynamics. Tokyo, 1984. Vol. 2. P. 655—664.
[4] *Grad H.* // Rarefied Gas Dynamics. New York: Pergamon Press, 1960. Vol. 3. P. 100—138.
[5] *Johnson E. A.* // Transport theory and statistical physics. 1975. Vol. 4. N 1—4. P. 37—48.
[6] *Галкин В. С.*, *Коган М. Н.*, *Макашев Н. К.* // ДАН СССР. 1975. Т. 220. № 2. С. 304—307.
[7] *Hamel B. B.* // Progress in Astronautics and Aeronautics. Philadelphia: Drexel University, 1977. Vol. 51. Pt 1. P. 171—195.
[8] *Жданов В. М.* Явления переноса в многокомпонентной плазме. М.: Энергоиздат, 1982. 176 с.
[9] *Великодный В. Ю.*, *Маркеев Б. М.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 1. С. 192—196.
[10] *Жданов В. М.*, *Скачков П. П.* // МЖГ. 1974. № 4. С. 125—132.
[11] *Бузыкин О. Г.*, *Макашев Н. К.* // ПМТФ. 1981. № 1. С. 87—94.
[12] *Алексеев Б. В.* Математическая кинетика реагирующих газов. М.: Наука, 1982. 420 с.
[13] *Ферцигер Дж.*, *Капер Г.* Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976. 554 с.
[14] *Burgers J. M.* Flow Equations for Composite Gases. New York, 1969. 332 p.
[15] *Генич А. П.*, *Каспаров Г. Г.*, *Манелис Г. В.*, *Панов Н. В.* // Молекулярная газодинамика. Новосибирск, 1980. С. 11—21.
[16] *Bird G. A.* // Rarefied Gas Dynamics. Tokyo, 1984. Vol. 1. P. 175—182.

Московский физико-технический институт
Долгопрудный Московской обл.

Поступило в Редакцию
1 сентября 1988 г.
В окончательной редакции
5 апреля 1989 г.

01; 10 *Журнал технической физики, т. 59, в. 12, 1989*

АСИММЕТРИЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОСКОКАНАЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ МэВ-НЫХ ЭНЕРГИЙ

С. Б. Дабагов

В работах, посвященных исследованию ориентационных эффектов, сопровождающих плоскостное каналирование легких заряженных частиц, обычно ограничиваются рассмотрением угловых распределений пролетающих частиц в направлении, перпендикулярном атомной плоскости кристалла. Не менее интересным, однако, является вопрос о полном угловом распределении частиц с глубиной проникновения в кристалл и о соотношении между распределениями частиц в параллельной и поперечной плоскостях (по отношению к плоскости каналирования).

Рассмотрим моноэнергетический пучок электронов с определенной начальной расходимостью $\Delta\varphi < \varphi_p$ (φ_p — критический угол плоскостного каналирования), падающий на кристалл параллельно кристаллографической плоскости. Выберем декартову систему координат с началом в точке вхождения частиц в кристалл. Ось t направим вдоль первоначального направления движения пучка, плоскость ty расположим параллельно атомной плоскости, углы рассеяния частицы в параллельной ty и поперечной tx плоскостях обозначим соответственно $\theta_\parallel$ и $\theta_\perp$.

При плоскостном каналировании функцию поперечного углового распределения электронов (перпендикулярно плоскости каналирования) можно определить следующим образом:

$$F(\theta_\perp, t) = \sum_n \Pi_n(t) \, |\psi_n(k\theta_\perp)|^2 k, \qquad (1)$$

где $\psi_n(k\theta_\perp) = \int dx \psi_n(x) \exp(-ik\theta_\perp x)$ — волновая функция n-го состояния в импульсном представлении, $\mathbf{k}$ — импульс пролетающей частицы; суммирование ведется по всем состояниям подбарьерного движения.

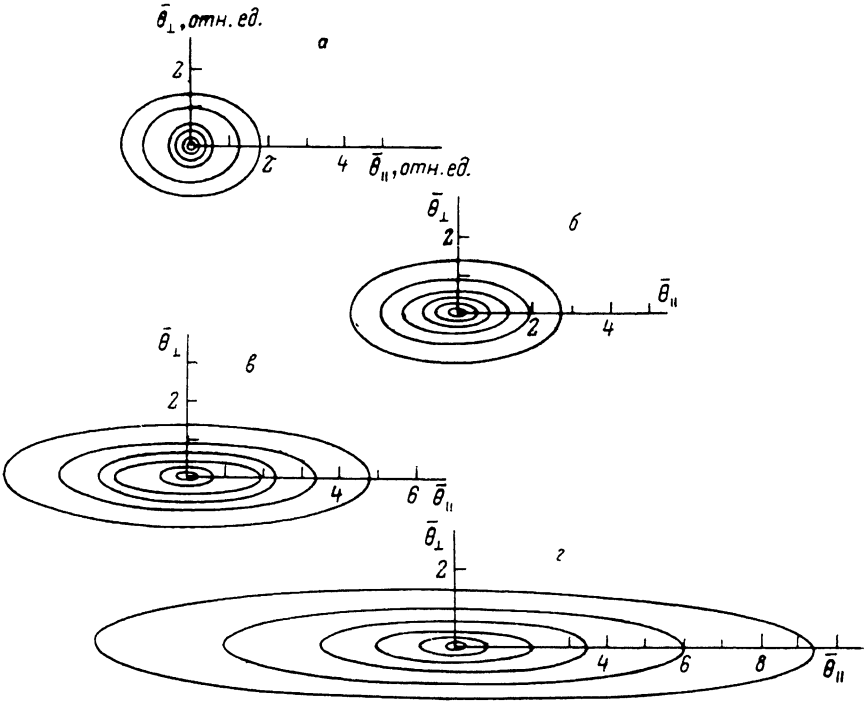
Волновую функцию $\psi_n(x)$ и заселенность $\Pi_n(t)$ на глубине t n-го квантового уровня находим из решения нестационарного уравнения Шредингера методом прямого численного интегрирования [1]. Угловое распределение каналированных электронов в плоскости каналирования определяется суммой угловых распределений частиц в различных состояниях поперечного движения

$$\Phi(\theta_\parallel, t) = \Sigma_n \Phi_n(\theta_\parallel, t), \tag{2}$$

где функция распределения частиц по углам в n-м квантовом состоянии представляется в виде

$$\Phi_n(\theta_\parallel, t) = \Pi_n(t) P_n(\theta_\parallel, t). \tag{3}$$

В случае, когда пучок движется в направлении, далеком от направлений главных кристаллографических осей в плоскости каналирования, можно принять, что рассеяние в плоско-



Характер расплывания углового распределения электронов в плоскостном канале.

а — 1, *б* — 5, *в* — 10, *г* — 30 мкм; $e^-=4$ МэВ, Si (110), $\varphi=0$.

сти происходит на хаотически расположенных атомах кристалла (подобно аморфной мишени). Тогда можно полагать, что функция $\Phi_n(\theta_\parallel, t)$ — гауссова [2], т. е.

$$P_n(\theta_\parallel, t) = [2\pi\bar{\theta}^2_{\parallel n}(t)]^{-1/2} \exp\left[-\frac{\theta^2_\parallel}{2\bar{\theta}^2_{\parallel n}(t)}\right]. \tag{4}$$

Входящую в эту формулу полуширину $\bar{\theta}_{\parallel n}(t)$ распределения можно рассчитать следующим образом:

$$\bar{\theta}^2_{\parallel n}(t) = \frac{1}{2}\bar{\theta}^2_a(t)\,\sigma_n, \tag{5}$$

где

$$\bar{\theta}^2_a(t) = \left(\frac{17}{E}\right)^2 \frac{t}{R}\left(1 + \frac{1}{9}\lg\frac{t}{R}\right) \tag{6}$$

— среднеквадратичный угол многократного рассеяния в аморфном веществе [3], E — энергия падающих частиц, R — радиационная длина;

$$\sigma_n = (2\pi u_\perp^2)^{-1/2}\int dx\,|\psi_n(x)|^2 \exp\left(-\frac{x^2}{2u_\perp^2}\right) \tag{7}$$

— вероятность близкого взаимодействия электрона в n-м состоянии с атомами кристалла, $u_\perp$ — среднеквадратичная амплитуда тепловых колебаний атомов.

Полагая отклонения в двух взаимоперпендикулярных направлениях независимыми, число частиц, имеющих на глубине t угловое отклонение с составляющими $(\theta_\perp, d\theta_\perp)$ и $(\theta_\parallel, d\theta_\parallel)$, определяется функцией вида

$$F(\theta_\perp, t)\,\Phi(\theta_\parallel, t)\,d\theta_\perp d\theta_\parallel, \tag{8}$$

Расчеты по представленным формулам проводились для электронов с энергией $E=4$ МэВ, каналированных в кремнии (плоскость (110)). Потенциал выбранной плоскости рассчитывался по Мольеру [4]. Результаты расчета эволюции углового распределения с глубиной проникновения в кристалл представлены на рисунке. Анализ ориентационных зависимостей показывает, что с увеличением глубины проникновения происходит расплывание пучка вдоль плоскости каналирования, угловое распределение каналированных частиц становится резко асимметричным.

Для оценки характера расплывания пучка электронов по углам введем параметр асимметрии углового распределения частиц при плоскостном каналировании

$$\delta(t) = \left[\frac{\bar{\theta}_\parallel^2(t)}{\bar{\theta}_\perp^2(t)}\right]^{1/2}. \tag{9}$$

Средний угол рассеяния в параллельной плоскости на глубине t находим следующим образом:

$$\bar{\theta}_\parallel^2(t) = \int d\theta_\parallel \theta_\parallel^2 \Phi(\theta_\parallel, t) \sim \bar{\theta}_a^2(t)\cdot A(t), \tag{10}$$

где функция $A(t) = \Sigma_n \Pi_n(t)\,\sigma_n$.

Отсюда на глубинах, намного превосходящих эффективную длину деканалирования $t \gg t_{\text{eff}}$, получаем оценку $\bar{\theta}_\parallel^2(t) \sim t^{1/2}$, поскольку результаты работ [5, 6] показывают, что на больших глубинах $\Pi(t) \sim t^{-1/2}$ для суммарной каналированной части пучка. Аналогичный расчет для среднего угла рассеяния в поперечной плоскости показывает, что

$$\bar{\theta}_\perp^2(t) = \int d\theta_\perp \theta_\perp^2 F(\theta_\perp, t) \sim \psi_p^2. \tag{11}$$

Подстановка полученных соотношений в (9) приводит к асимптотической зависимости

$$\delta(t) \sim t^{1/4}. \tag{12}$$

Параметр асимметрии δ углового распределения плоскоканалированных электронов с энергией $E=4$ МэВ в зависимости от глубины проникновения t пучка в кристалл был рассчитан по формулам (9)—(11)

t, мкм	0	5	10	15	20	25	30
δ, отн. ед.	1.00	1.74	2.24	2.63	2.87	3.02	3.11

Сопоставление численных расчетов с оценочной зависимостью (12) дает хорошее согласие.

Список литературы

[1] *Дабагов С. Б., Огнев Л. И.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 2. С. 256—264.
[2] *Буренкова А. Ф., Дудчик Ю. И., Комаров Ф. Ф.* // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 11. С. 2184—2190.
[3] Review of Particles Properties. Geneva : CERN, 1982.
[4] *Appleton B. R., Erqinsy C., Gibson W. M.* // Phys. Rev. 1967. Vol. 161. N 1. P. 330—349.
[5] *Дабагов С. Б.* / Тез. докл. XVII Всесоюз. совещ. по ФВЗЧ с кристаллами. М., 1987. С. 27.
[6] *Andersen J. U., Bonderup E., Laegsgaard E.* // Coherent Radiation Sources / Eds. A. W. Saenz, H. Überall. Springer, 1985. P. 127.

Кабардино-Балкарский
государственный университет
Нальчик

Поступило в Редакцию
26 августа 1988 г.