*Краткие сообщения по физике № 11-1985 г.*

УДК 548.74

# О ПРОЦЕССАХ ДИФФУЗИИ В ОБЛУЧАЕМЫХ МЕТАЛЛАХ ПРИ ДОМИНИРОВАНИИ ПОСТОЯННЫХ СТОКОВ

В.Г. Жарков, И.И. Новиков, Г.Ф. Жарков

*Рассмотрена эволюция концентрации радиационных точечных дефектов в тонких фольгах. Предложен метод экспериментального определения сил стоков дефектных структур.*

Важнейшими параметрами, описывающими отклик материала на радиационное воздействие, являются скорость R генерации пар Френкеля, коэффициент A объемной рекомбинации точечных дефектов (межузельных атомов (МА) и вакансий (В)), силы $C_K$ стока различных дефектных структур (поверхности образца $C_s$, дислокаций $C_d$, дислокационных петель $C_L$ и т. п.). Эти параметры могут быть количественно определены только при известном законе эволюции концентраций МА и В. Задача описания этих концентраций в условиях изменяющейся при облучении дефектной структуры исключительно сложна и требует принятия ряда предположений о взаимодействии точечных дефектов со структурой образца (т. е. о величинах $C_K$).

Как будет показано ниже, можно получить аналитическое описание концентраций МА и В, если они определяются постоянной во времени исходной дефектной структурой (поверхностью, дислокациями, границами зерен). Используя в качестве индикатора этих концентраций растущие дислокационные петли или поры (небольшой плотности по сравнению с плотностью постоянной структуры), можно экспериментально определять параметры R, A, $C_K$ с помощью, например, высоковольтного микроскопа.

**1. Концентрация точечных дефектов в фольге при высоких температурах облучения.** Для описания пространственной и временной зависимостей концентрации МА и В использовалась система уравнений:

$$\partial i/\partial t = R + D_i\nabla^2 i - A iv, \quad \partial v/\partial t = R + D_v\nabla^2 v - A iv, \tag{1}$$

где i, v – концентрации соответственно МА и В; D – коэффициент диффузии. В условиях высокой температуры (или высокой подвижности МА и В) и достаточной близости поверхностного стока рекомбинационным членом в системе (1) пренебрегали.

Рассматривался случай облучаемой фольги толщиной $2l$. Начало координат ($x = 0$, $X$ – ось, перпендикулярная поверхности фольги) помещалось в центр фольги. Решение системы (1) с граничными и начальными условиями

$$c(x,0) = 0, \quad \partial c(0,t)/\partial x = 0, \quad \partial c(l,t)/\partial x = \beta c(l,t) \tag{2}$$

($c \equiv i,v$; $\beta$ – коэффициент, характеризующий "пропускающую способность" поверхности), полученное методом интегрального преобразования Лапласа, имеет вид:

$$c(x,t) = (R/2D)[l^2(1 - 2/\beta l) - x^2] - (2Rl^2/D) \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin\mu_n \cos(\mu_n x/l)}{(\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n)\mu_n^2} \exp\left(-\frac{\mu_n^2 D}{l^2}\right), \tag{3}$$

где $c$ – концентрация точечных дефектов, имеющих коэффициент диффузии $D$; $\mu_n$ – корни уравнения $\mathrm{ctg}\,\mu = -\mu/(\beta l)$. Решение (3) правильно описывает реальные $i(x,t)$ и $v(x,t)$ при условии $l \ll (9D_i D_v/(AR))^{1/4} \equiv l_{cr}$. Для фольги Zr, облучаемой с интенсивностью повреждения $10^{-4}$ смещ./ат·с при T = 300 и 700 К, величина $l_{cr}$ равна соответственно 10 и 3300 Å.

2. **Малые дозы облучения и низкие температуры.** Как показано в работе /1/, концентрации МА и В в случае толстых фольг (или при низких температурах) практически не зависят от координаты $x$. При этом пренебрегают пространственной зависимостью $i$ и $v$ и систему (1) записывают в "скоростной" форме:

$$di/dt = R - Aiv - Ii, \quad dv/dt = R - Aiv - Vv. \tag{4}$$

Здесь I, V – эффективности стоков различных дефектных структур, причем, $I = D_i C_K$, $V = D_v C_K$ /2/.

Область применимости формулы (3) ограничена условием $Aiv \ll Ii, Vv$. Теперь рассмотрим решение системы (4) при $Aiv \gg Ii$, используя методы теории возмущений. В качестве нулевого приближения $C_0$ используем решение системы (4) при $I, V \to 0$, а полное решение ищем в виде $i = c_0 + i_1$, $v = c_0 + v_1$ при $i,v \ll c_0$ ($c_0 = \sqrt{R/A}\,\mathrm{th}\,x$, $x = \sqrt{AR}\,t$). Оно записывается следующим образом:

$$i = c_0 - [(I - V)/2A] \ln \operatorname{ch} x + [(I + V)/4A \operatorname{ch}^2 x] - \sqrt{R/A} \ln \operatorname{ch} x +$$

$$+ [2x - 2 \operatorname{ch} 2x + 3 \ln(1 + e^{-2x}) + \ln(1 + e^{2x}) + 2 - 4 \ln 2] , \qquad (5)$$

$$v = c_0 + v_1 = i + [(I - V)/A] \ln \operatorname{ch} x.$$

Решение (5) справедливо при $\sqrt{AR}/(I - V) \gg 1$. Предельное время, при котором применимо решение (5), равно $t_1 = (I - V)/2$. При этом $i(t_1) = 0{,}75\sqrt{R/A}$, $v(t_1) = 1{,}25\sqrt{R/A}$. Координаты точки максимума зависимости $i(t)$ записываются в виде $t_{max} = (2\sqrt{AR})^{-1} \ln[8\sqrt{AR}/(I - V)]$, $i_{max} = \sqrt{R/A}$. Для Zr при $l = 1$ мкм, $T = 100$ K получаем $t_{max} = 5{,}6$ c, $t_1 = 5 \cdot 10^5$ c.

**3. Средние и большие дозы облучения.** Для исследования $i(t)$ и $v(t)$ при таких дозах систему (4) переписываем в виде

$$i d^2 i/dt^2 - (di/dt)^2 + (di/dt)(R + Ai^2 + Vi) + (AIi^3 + IVi^2 - RVi) = 0, \quad (6)$$

$$v = (R - Ai - di/dt)/(Ai). \qquad (7)$$

В асимптотическом приближении (при пренебрежении величинами $i d^2 i/dt^2$ и $(di/dt)^2$ по сравнению с членами $(di/dt)(R + Ai^2 + Vi)$) решение системы (6) запишется в виде

$$t = \frac{I + V}{2S} \ln\left(\frac{-2AIi - IV + S}{2AIi + IV + S}\right) + \frac{I + V}{2IV} \ln(AIi^2 + IVi - RV) - \frac{\ln i}{V}, \qquad (7)$$

где $S = \sqrt{I^2V^2 + 4ARIV}$. Решение (7) применимо при временах $t > t_2 = 3(3/2\sqrt{ARI})^{2/3}$. Для облучения Zr при $T = 300$ K получаем $t_2 = 1{,}3 \cdot 10^{-2}$ c (в данном случае области применимости формул (7) и (5) непрерывно переходят одна в другую, т. е. описывается весь диапазон времен облучения).

**4. Экспериментальное определение R, A, $C_K$.** Учитывая, что рост внедренной петли радиуса r со скоростью $\dot{r}$ осуществляется за счет поглощения ею потоков МА и В, можно написать /2/:

$$\hat{C}_L(r) = 2\pi a r \dot{r}/\Omega n[D_i Z_i i(t) - D_v v(t)], \qquad (8)$$

где $\hat{C}_L$ – сила стока одной петли; $\Omega$ – атомный объем; n – плотность атомов; $a \sim \Omega^{1/3}$; $Z_i$ – параметр преференса. В общем виде имеем: $F(D_i, D_v, Z_i, C_L, C_d, C_s, A, R) = 0$, где F – известная функция 8 неизвестных параметров. Последние могут быть найдены из результатов 8 экспериментов с разными зачениями R и I, причем необходимо знать только отношение интенсивностей облучения в разных экспериментах, но не сами значения R.

Таким образом, на основе полученных аналитических выражений для концентраций МА и В предложен метод экспериментального определения параметров R, A и $C_K$. Этот метод не связан с дополнительными предположениями о характере взаимодействия петель с МА и В. Полученные выражения позволяют описывать эволюцию структуры при временах облучения, меньших времени выхода концентрации точечных дефектов на стационарный уровень. Последнее особенно важно при рассмотрении зарождения и роста дислокационных петель и других процессов, происходящих при сравнительно небольших дозах облучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Urban K., Wilkens M. Phys. stat. sol. (a) 6, 173 (1971).
2. Жарков В.Г., Новиков И.И., Жарков Г.Ф. Препринт ФИАН № 140, М., 1985.

Поступила в редакцию 26 сентября 1985 г.