

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

05

Журнал технической физики, т. 61, в. 1, 1991

© 1991 г.

УСКОРЕНИЕ ДИФФУЗИИ  
ИОННОИМПЛАНТИРОВАННОЙ ПРИМЕСИ ПРИ БОЛЬШИХ ДОЗАХ

Ю. В. Мартыненко, П. Г. Московкин

В настоящее время ведутся интенсивные исследования ионной имплантации различных материалов. При этом во многих случаях наблюдается аномально глубокое проникновение примесных атомов в глубь образца. Предложены различные механизмы радиационно-стимулированной диффузии. В данной работе обсуждается механизм ускоренной диффузии, возможный при большой плотности тока. В этом случае достигается такая концентрация примесей, что необходимо учитывать взаимодействие между ними. Это взаимодействие приводит к «выталкиванию» примеси из имплантированного слоя в глубь образца.

Энергия взаимодействия двух примесных атомов, представляющих собой жесткие включения в материал, равна [1]

$$\Phi \cong 2\beta E_g \left( \frac{R}{r} \right)^6, \quad (1)$$

где  $E_g$  — энергия внедрения атома примеси в решетку,  $R$  — его радиус,  $r$  — расстояние между ними,  $\beta = 7.5(1 - \sigma)/(4 - 5\sigma)$ ,  $\sigma$  — коэффициент Пуассона среды.

Это взаимодействие изменяет химический потенциал  $\mu$  системы примесей. Согласно [2], добавка к химическому потенциалу равна

$$\Delta\mu = \frac{4}{3} \pi \sqrt{\pi} R^3 c \sqrt{2\beta E_g T}, \quad (2)$$

где  $c$  — концентрация примесей.

Градиент химического потенциала обуславливает силу, действующую на примесь  $F = -(\Delta\mu/dx)$ . В результате дополнительный поток примесей, направленный в сторону убывания их концентрации, равен

$$\nu F c = -B c \frac{\partial c}{\partial x},$$

где  $\nu = D/T$  — подвижность примесей, температура  $T$  выражена в энергетических единицах

$$B = \nu \frac{4\pi R^3}{3} \sqrt{2\pi\beta E_g T}.$$

Тогда уравнение диффузии примесей принимает вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + B \frac{\partial}{\partial x} \left( c \frac{\partial c}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$D$  — коэффициент диффузии примесей.

Второй член в уравнении преобладает при  $Bc \gg D$  или при

$$\frac{4\pi}{3} R^3 c \gg \left( \frac{T}{2\beta\pi E_g} \right)^{0.5}. \quad (4)$$

В этом случае уравнение (3) сводится к уравнению нелинейной диффузии

$$\frac{\partial c}{\partial t} = B \frac{\partial}{\partial x} \left( c \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (5)$$

с граничным условием

$$Bc \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = -j. \quad (6)$$

Это уравнение имеет автомодельное решение вида

$$c = \left( \frac{j^2 t}{B} \right)^{1/2} f \left( \frac{x}{x_\phi} \right), \quad x_\phi = (Bjt^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Полученная численно функция  $f(\xi)$  хорошо аппроксимируется зависимостью

$$f(\xi) = 0.9(1.5 - \xi). \quad (8)$$

Вблизи  $x = x_\phi$  условие (4) не выполняется. Здесь следует сшить решение линейного уравнения диффузии и полученное выше решение.

Следует отметить, что при дозе  $jt \cong BN_0^3/2j$  концентрация примесей вблизи поверхности становится сравнима с концентрацией атомов мишени  $N_0$ . Но уже при этой дозе отношение глубин проникновения при нелинейной и линейной диффузиях равно

$$\alpha = \left( \frac{BN_0}{D} \right)^{1/2} = \left( \frac{1.6\pi^3 E_g}{T} \right)^{1/4}. \quad (9)$$

При  $E_g/T = 50$ ,  $j = 10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $D = 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $jt = BN_0^3/2j \cong 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$   $\alpha = 6$ . При дозах  $jt > BN_0^3/2j$ , когда концентрация примесей вблизи поверхности сравнима с концентрацией собственных атомов мишени, нельзя говорить о диффузии. В этом слое примесь либо выпадает в осадок, либо образует химическое соединение с атомами мишени. Но на больших глубинах, где  $c < N_0$ , можно решать диффузионную задачу с граничным условием

$$c(0) = N_0. \quad (10)$$

Уравнение (5) с граничным условием (10) имеет автомодельное решение, которое хорошо аппроксимируется функцией

$$c = N_0 \left( 1 - \frac{x}{(2BN_0 t)^{1/2}} \right). \quad (11)$$

Глубина проникновения примеси превышает в этом случае глубину проникновения при обычной диффузии в  $\alpha = (BN_0 t/D)^{1/2}$  раз, что для характерных параметров составляет  $\alpha = 6-9$ .

Таким образом, при облучении интенсивными пучками, когда расстояние между примесями становится достаточно малым и надо учитывать их взаимодействие, глубина проникновения примеси в глубь имплантируемого материала значительно увеличивается.

#### Список литературы

- [1] Теодосиу К. Упругие модели дефектов в кристаллах. М.: Мир, 1985. 352 с.  
 [2] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Ч. 1. М., 1976. 548 с.

Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова  
 Москва

Поступило в Редакцию  
 19 сентября 1989 г.  
 В окончательной редакции  
 3 марта 1990 г.