

щаются, а потенциал поля U_0 растет по мере увеличения скорости движения пучка v_0 . Учитывая также выражение для энергии системы W , можно показать, что за счет изменения параметров волновода, например при увеличении диэлектрической проницаемости ϵ , тоже возможна трансформация сгустка, в результате которой пучок тормозится и сжимается, а амплитуда U_0 растет. Таким образом можно сжать пучок в несколько раз, уменьшая его длину до размеров порядка нескольких радиусов волновода с длительностью до долей наносекунды. Как отмечалось, подобные пучки особенно важны для различных экспериментов с импульсным воздействием.

Заметим, что изложенный метод можно использовать для анализа уединенных решений и в других системах, например в волноводе, заполненном плазмой (по существу все соотношения остаются в силе после замены $v^2 \rightarrow \omega p^2 / v_0^2 \gamma_0^2 - \mu_1^2 / R^2$, $\epsilon \rightarrow 1$), однако достижимые значения потенциала U_0 здесь сильно ограничены эффектом захвата частиц плазмы.

Авторы выражают благодарность А. А. Коломенскому и К. А. Решетниковой за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Рухадзе А. А., Богданкевич Л. С. и др. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1980. [2] Гришин В. К., Шапошников Е. Н. Физика плазмы, 1982, 8, № 2, с. 287. [3] Кадомцев Б. Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976.

Поступила в редакцию
14.01.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, т. 23, № 6

УДК 539.292:669.295.24

ДИФФУЗНОЕ РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В СПЛАВЕ $Ti_{50}Ni_{46}Nb_4$ НА СТАДИИ ПРЕДВЫДЕЛЕНИЯ X-ФАЗЫ

А. Г. Хунджуа, М. И. Захарова

(кафедра физики твердого тела)

В мононикелиде титана $NiTi$ и твердых растворах на его основе высокотемпературная $B2$ -фаза, упорядоченная по типу $CsCl$, претерпевает при понижении температуры термоупругое мартенситное превращение с образованием моноклинной $B19'$ - или триклинной $B19''$ -фазы [1]. Термическая и механическая обработка сплавов влияют на характеристики термоупругого мартенситного превращения, прежде всего на температуру начала и конца мартенситного перехода. Изотермический отпуск в области температур $500-700^\circ C$ приводит к эвтектоидному распаду $NiTi \rightarrow Ti_2Ni + Ni_3Ti$ [2] или к выделению избыточной фазы $Ni_{58}Ti_{42}$ [3]. При температуре $450^\circ C$ в соединении $NiTi$ обнаружено формирование X -фазы с ГЦК решеткой и стойкой $a_X = 15,8 \text{ \AA}$; по мнению авторов, образование X -фазы происходит вследствие установления дальнего порядка в распределении вакансий по узлам решетки ОЦК $B2$ -матрицы. Ближний порядок в распределении вакансий имеет место в закаленном сплаве и обуславливает интенсивное диффузное рассеяние электронов [4].

Трудности в изучении процесса формирования X -фазы в двухкомпонентных сплавах $Ni-Ti$ при проведении рентгеновских и электрон-

но-микроскопических исследований структуры при комнатной температуре обусловлены предмартенситными явлениями, искажающими дифракционные картины. К таким предмартенситным явлениям относится развитие неустойчивости решетки ОЦК $B2$ -матрицы при приближении температуры к M_s , с которым связано интенсивное диффузное рассеяние, а также формирование сверхструктуры, приводящее к появле-

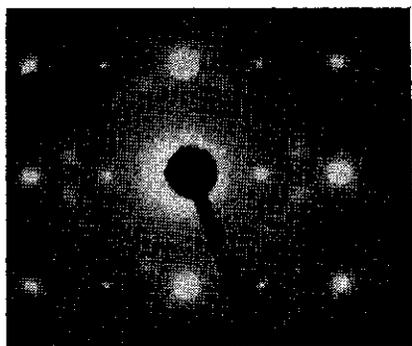
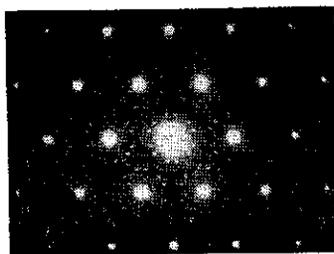


Рис. 1. Диффузное рассеяние электронов в закаленном сплаве. Зона $(110)_{B2}$.



нию на дифракционных картинах рефлексов типа «1/3» [5]. В работе [6] показано, что легирование NiTi d -переходными элементами вызывает понижение температуры M_s ; следовательно, в таких сплавах возможно изучение процесса формирования X -фазы без наложения предмартенситных изменений структуры. Настоящая работа является продолжением цикла работ по изучению структурных превращений в сплавах на основе NiTi. Ее цель — исследование структурных изменений в процессе изотермического отпуска. В предыдущих работах исследованы бездиффузионные структурные превращения, в настоящей работе — превращения, в которых диффузия играет определяющую роль. В качестве объекта исследования выбран сплав $Ti_{50}Ni_{46}Nb_4$ с точкой M_s ниже 100 К [6].

По данным рентгеновского анализа и электронной микроскопии сплав $Ti_{50}Ni_{46}Nb_4$, закаленный от температуры 1100°C, является однофазным твердым раствором с упорядоченной по типу CsCl ОЦК $B2$ -структурой и постоянной решетки $a=3,00$ Å. На микроэлектронogramмах зон (110) , (012) , (113) , (115) $B2$ -матрицы закаленного сплава видны интенсивные эффекты диффузного рассеяния (рис. 1). При понижении температуры фольги до $-180^\circ C$ картина диффузного рассеяния не меняется. После отпуска сплава при $550^\circ C$ в течение 90 мин диффузные эффекты на микроэлектронogramмах исчезают и появляется система рефлексов X -фазы.

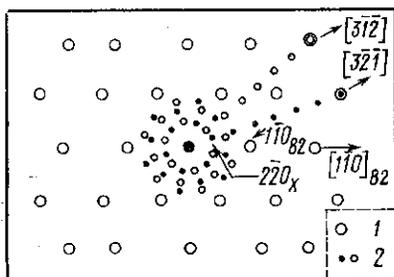


Рис. 2. $(111)_{B2}$ микроэлектронogramма сплава $Ti_{50}Ni_{46}Nb_4$ после 90 мин отпуска при $550^\circ C$ с рефлексами $B2$ -матрицы (1) и X -фазы (2) и схема расположения рефлексов с двумя вариантами ориентационного соотношения

Из рис. 2 видно, что кристаллические решетки $B2$ - и X -фаз взаимно ориентированы так, что $\{111\} \langle 321 \rangle_{B2} \parallel \{111\} \langle 110 \rangle_X$, при этом рефлекс $\{3, \bar{1}, \bar{2}\}_{B2}$ совпадает с рефлексом $\{14, \bar{14}, 0\}_X$. Отсюда $a_X = 2\sqrt{7}a_{B2} = 15,8 \text{ \AA}$. Ориентационное соотношение предполагает 8 эквивалентных вариантов взаимной ориентации решеток $B2$ - и X -фаз. Расчет показал, что матрица соответствия A (столбцы матрицы — проекции базисных векторов X -фазы на базис $B2$ -структуры) имеет вид:

$$A = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_3 & a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 & a_1 \end{vmatrix},$$

где $a_1 = \sqrt{7} + 5$, $a_2 = \sqrt{7} - 4$, $a_3 = \sqrt{7} - 1$ для 1-го и $a_1 = \sqrt{7} + 4$, $a_2 = \sqrt{7} - 5$, $a_3 = \sqrt{7} + 1$ для 2-го вариантов ориентационного соотношения (показаны на рис. 2).

Остальные 6 матриц соответствия можно получить умножением матриц $A_{1,2}$ на операторы Z, Z^2, Z^3 , где Z — оператор поворота на 90° вокруг направления $[001]_{B2}$ имеет вид:

$$\hat{Z} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Пользуясь матрицами соответствия, легко построить теоретические микроэлектроннограммы различных зон $B2$ -матрицы с рефлексами X -фазы. Расчет показывает, что для идентификации X -фазы наиболее удобны микроэлектроннограммы зон $(111)_{B2}$ и $(115)_{B2}$.

При увеличении времени отпуска при 550°C до 2 и 6 ч интенсивность рефлексов X -фазы практически не меняется. X -фаза является, по-видимому, метастабильной, на что указывает ее исчезновение после 100 ч отпуска при 550°C . Однако не исключается также возможность превращения областей $B2$ -матрицы с X -фазой в θ' -мартенсит. Мартенсит тонких фольг θ' с тетрагональной структурой, обнаруженный ранее в сплавах NiTi с V , Zr и Al [6], в сплаве $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{46}\text{Nb}_4$ отсутствует после закалки и после отпуска при 550°C в течение 0,5; 1,5 и 6 ч и появляется только после 100 ч отпуска.

Исследование тонкой кристаллической структуры методом диффузного рассеяния электронов установило, что уже в закаленном состоянии в $B2$ -матрице имеются локальные области со статическими смещениями атомов; расположение смещенных атомов близко по структуре к X -фазе. Такое структурное состояние можно рассматривать как стадию предвыделения X -фазы. В процессе изотермического отпуска при 550°C атомно-кристаллическая структура областей со смещенными атомами становится более совершенной, а сами области увеличиваются в размерах, вследствие чего на дифракционных картинах исчезают эффекты диффузного рассеяния и появляются четкие отражения X -фазы.

Таким образом, легирование NiTi ниобием позволило значительно понизить точку M_s , подавить предмартенситные структурные состояния и выявить картину диффузного рассеяния, связанную только со стадией предвыделения X -фазы.

Доказательствами связи диффузного рассеяния в закаленном сплаве $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{46}\text{Nb}_4$ с последующим формированием X -фазы при изотермическом отпуске служат:

а) неизменность интенсивности и конфигурации диффузного рассеяния в широком интервале температур 100—300 К;

б) близость расположения максимумов интенсивности диффузного рассеяния к положению рефлексов X-фазы;

в) исчезновение эффектов диффузного рассеяния после выделения X-фазы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Монасевич Л. А., Паскаль Ю. И. Физ. мет. и металловедение, 1980, 49, с. 813. [2] Gupta S. P., Mikhherjee K., Johnson A. A. Mat. Sci. and Engineering, 1973, 11, p. 283. [3] Wasilewski R. J., Butler S. R. et al. Metall. Trans., 1971, 2, p. 229. [4] Kolomytsev V. I., Lobodyuk V. A., Khandos L. G. Phys. Stat. Solidi (a), 1978, 50, p. K 127. [5] Sandrock G. D., Perkins A. J., Hehemann R. F. Metall. Trans., 1971, 2, p. 2769. [6] Хунджа А. Г., Захарова М. И. Физ. мет. и металловедение, 1981, 51, с. 1116.

Поступила в редакцию
18.01.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1982, т. 23, № 6

УДК 533.925

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ-ВОЛНЫ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ С ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ВНУТРИ ВОЛНОВОДА

П. С. Булкин, С. А. Двинин, Г. С. Солнцев

(кафедра электроники)

В работе исследуются особенности взаимодействия СВЧ-поля с созданной посторонним источником ограниченной плазмой с высокой концентрацией электронов n_e при низком давлении газа. При таких условиях возникает резонансное усиление поля в участках плазмы, где концентрация n_e близка к критической концентрации $n_{кр} = m\omega^2/4\pi e^2$ (ω — частота поля), что вызывает перераспределение его вдоль силовых линий.

Плазма создавалась мощным СВЧ-импульсом ($f_1 = 2,8$ ГГц, $\tau_1 = 3$ мкс, частота повторения 400 Гц) в трубке с водородом ($p = 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.) радиусом $R = 1$ см и высотой $b = 3,4$ см, установленной в волноводе размерами 34×72 мм перпендикулярно его широким стенкам. Нагревающий СВЧ-импульс ($f_2 = 3$ ГГц, $\tau_2 = 1,2$ мкс, длительность переднего фронта менее 0,1 мкс) позволяет получать поля E_0 в волноводе до 10^3 В/см. Он мог быть задержан относительно импульса τ_1 на произвольное время θ и таким образом воздействовать на плазму послесвечения с различной концентрацией n_e , определяемой моментом распада.

Диагностика плазмы производилась с помощью СВЧ-интерферометра ($\lambda = 8$ мм), который измерял усредненную по диаметру концентрацию n_e в среднем по высоте сечении трубки. Проводилось также измерение коэффициентов поглощения η и отражения ρ СВЧ-волны (по мощности).

Поглощение СВЧ-волны плазмой носит резко выраженный пороговый характер. Если импульс τ_2 действует в момент времени, когда $n_e < n_{кр}$, то $\eta \leq 2\%$. Если же нагревается плазма с высокой концентрацией n_e ($n_e > n_{кр}$), то η возрастает до 30—40%. При этом, в отличие от ρ , коэффициент поглощения η изменяется немонокотонно, достигая максимума при некоторой n_e (рис. 1, 2).

Расчет η и ρ , а также распределения поля вдоль оси разряда проведен в квазистационарном приближении в предположении однородно-