

- [1] Гужев С.Н., Левин В.М., Маев Р.Г., Котелянский И.М. - ЖТФ, 1984, Т. 54. В. 7. С. 1402-1404.
- [2] Гужев С.Н., Левин В.М. - Акуст. журн., 1987, Т. 33. №4. С. 606-617.
- [3] Strick E., Ginzburg A.S. - Bull. Seism. Soc. Amer., 1956. V. 46. P. 60-67.
- [4] Ansell J.H. - Pure and Appl. Geophys., 1972. V. 94. N 2. P. 172-188.
- [5] Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке. М.: ИЛ, 1952.

Институт химической физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
22 мая 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 17

12 сентября 1990 г.

О5.1

© 1990

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДСОРБЦИОННЫХ СПОСОБНОСТЕЙ СТРУКТУРНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ КРИСТАЛЛОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ТОЧЕЧНЫМ ДЕФЕКТАМ

Ю.В. Трушин, А.Л. Суворов,
Д.Е. Долин, Ю.Н. Елдышев

Эксплуатационные свойства и параметры материалов, работающих в условиях интенсивного облучения, определяются взаимодействием точечных радиационных дефектов как со структурными несовершенствами этих материалов, так и с формирующейся под облучением специфической дефектной структурой. Основными характеристиками этих взаимодействий являются адсорбционные способности структурных несовершенств. Их определение представляет собой довольно сложную проблему, которую до недавнего времени решали путем косвенной обработки экспериментальных данных по радиационному набуханию конструкционных материалов. Однако такой метод получения физических данных о поглощении точечных дефектов стоками (дислокациями, порами, преципитатами и т.д.) оказывается некорректным, поскольку он основан на модельных представлениях о физической природе изменений рассматриваемых макроскопических свойств.

В настоящей статье сообщается о предложенном авторами прямом способе определения скоростей и эффективностей поглощения точечных радиационных дефектов различными структурными стоками.

Экспериментальная часть способа реализуется с помощью автоионного микроскопа [1] следующим образом. Изготовленные металлические образцы стандартной формы — микроострия с радиусами кривизны вершины порядка 10–50 нм помещаются в автоионный микроскоп, где путем десорбции и испарения полем формируется их атомно-гладкая и атомно-числая поверхность, а также по микроскопическим изображениям оценивается исходная степень совершенства кристаллической структуры. Затем образцы облучаются какими-либо ионами непосредственно в микроскопе, либо во внешнем облучательном устройстве. Тип и энергии ионов могут варьироваться; их выбор определяется конкретными задачами и условиями эксперимента. Так, например, при необходимости проанализировать взаимодействие точечных дефектов с обедненными зонами облучение должно приводить к развитию в материале образцов каскадов атомных смещений. Если предполагается проанализировать способность дефектов поглощать межузельные атомы при относительно высоких температурах (существенно превышающих температуру начала дальней миграции, даже для тугоплавких металлов составляющей всего несколько десятков градусов Кельвина [2]) — облучают сплавы, имеющие в своем составе компонент, стабилизирующий межузельные атомы; как один из вариантов таким компонентом могут быть бомбардирующие ионы.

После облучения каждый из образцов снова анализируется в автоионном микроскопе. При этом осуществляется его изохронный отжиг (т.е. нагрев с температурой, возрастающей по линейному закону), а на экране микроскопа наблюдается и непрерывно фиксируется по изображению одной и той же поверхности образца приток к ней единичных точечных дефектов. Непосредственно измеряемой величиной является приращение выходящих на поверхность точечных дефектов ΔN за один и тот же промежуток времени, т.е. фактически определение функции $\Delta N(t)$ или, что тоже, $\Delta N(T)$.

После прохождения заданного интервала температуры (точнее, после того, как ΔN снижается почти до нулевого значения) нагрев образца прекращается и производится стандартный автоионномикроскопический анализ его структуры. При этом электрическим полем последовательно испаряются многие десятки атомных слоев, микроскопическое изображение каждого из которых предварительно фиксируется и изучается. Таким образом, выявляется факт отсутствия или наличия в объеме образца на пути мигрирующих к поверхности точечных дефектов какого-либо структурного несовершенства, способного поглощать (адсорбировать) точечные дефекты. При обнаружении указанного несовершенства определяются его параметры. Окончательная информация, извлеченная из эксперимента — набор зависимостей $N(t)$ для образцов из одного и того же материала, облученных одними и теми же ионами в идентичных условиях, часть из которых содержала на пути точечных дефектов несовершенства (стоки) с установленными параметрами.

Ясно, что количественной мерой адсорбционной способности служит разность величин $N_1(t)$ и $N_2(t)$, соответствующих образцу без стока и содержащего какой-либо сток.

Воспользуемся довольно простым уравнением для средних пересыщений C_j по точечным дефектам j , не учитывающим рекомбинации вакансий ($j=V$) и межузельных атомов ($j=i$), реакций с примесями, диссоциации комплексов точечных дефектов

$$\frac{dC_j(t)}{dt} = -D_j C_j(t) k_j^2, \quad (1)$$

где D_j - коэффициент диффузии дефектов типа j , а k_j^2 - сумма сил S_q^j стоков q для дефектов j , и будем полагать, что в острие имеется только два стока - внешняя поверхность (ей соответствует S_S^j) и внутренние стоки одного типа $q=Q(S_Q^j)$. Тогда с помощью этого уравнения можно показать, что

$$S_Q^j = \frac{N_1(t) - N_2(t)}{N_1(t) D_j (t - t_0)} \ln \left[1 - \frac{3 N_1(t)}{2 \pi R_0^3 C_j^0} \right], \quad (2)$$

где $N_1(t)$ и $N_2(t)$ - число точечных дефектов, вышедших на поверхность острия к моменту времени t в образце без стока и содержащем сток Q соответственно, R_0 - средний радиус вершины острия (определяется по микроскопическому изображению), $C_j^0 = C_j(t_0)$ - начальное пересыщение точечными дефектами, достигнутое при облучении.

Сила стока поверхности острия \tilde{S}_S^j может быть оценена из данных для острия без внутренних стоков:

$$\tilde{S}_S^j = - \left\{ D_j (t - t_0)^{-1} \ln \left[1 - \frac{3 N_1(t)}{2 \pi R_0^3 C_j^0} \right] \right\}. \quad (3)$$

Воспользовавшись другим упрощенным уравнением для сферических и плоских стоков q размером R_q для количества дефектов, уходящих на стоки q в единицу времени, среднюю скорость поглощения дефектов j стоком q размера R_q можно выразить

$$\bar{I}_q^j(t) = \frac{3}{2 \pi R_0^3 C_q} \left(\frac{dN_1(t)}{dt} - \frac{dN_2(t)}{dt} \right). \quad (4)$$

Т.е., зная из эксперимента функции $N_1(t)$ и $N_2(t)$, можно проследить за кинетикой изменения $\bar{I}_q^j(t)$.

Учитывая, что аналитические расчеты дают для скорости поглощения $I_q^j(R_q)$ следующее выражение [3-6]

$$I_q^j(R_q) \approx \alpha_q^j D_j R_q (C_j^0 + \varkappa_q^j) \quad (5)$$

(α_q^j - предпочтительный множитель для дефектов j на стоках q , \varkappa_q^j - определяется распределением точечных дефектов j вблизи стока типа q - см., например [5, 7, 8]) и измеряя, помимо $N_1(t)$ и $N_2(t)$ величину $\bar{R}_q(t)$ в разных исследуемых образцах, можно

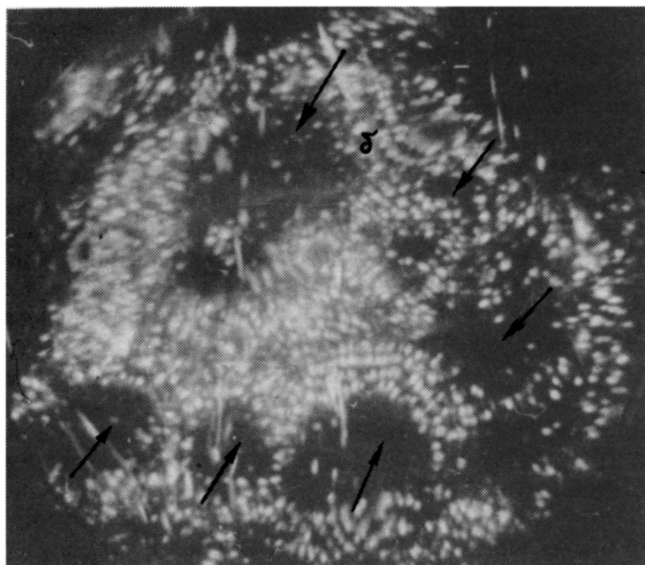
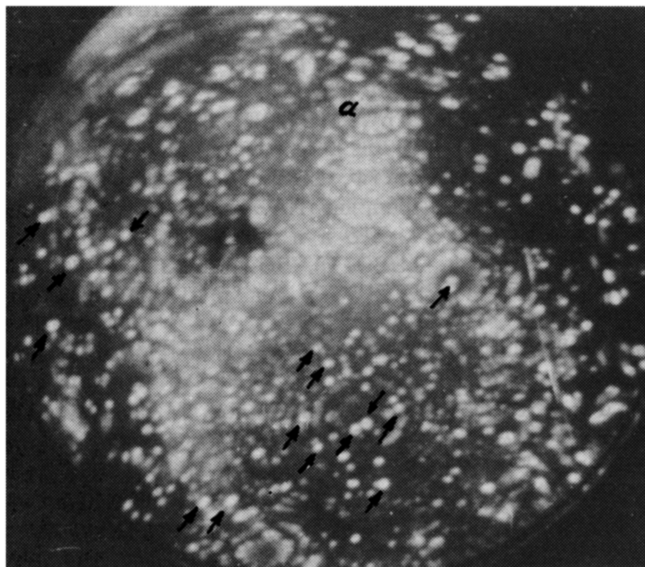
экспериментально проверить достоверность принятых теоретических зависимостей (в частности – приведенной зависимости (5)).

Говоря о практической реализации рассмотренной методики следует указать два обстоятельства. Во-первых, в условиях реального автоионномикроскопического эксперимента действительно удается построить зависимости $N(t)$ при изохронном отжиге облученных образцов. Однако, при работе в области средних и высоких температур нагрев приходится осуществлять ступенчато, специально отслеживая и учитывая при этом адсорбцию и десорбцию атомов и молекул остаточных и изображающего газов на поверхности острия [9], а также термополевую перестройку вершины острия [10]. Во-вторых, в экспериментах авторам удалось наблюдать и установить существенное различие в интегральных величинах $N_1(t)$ и $N_2(t)$ для двух типов несовершенств – стоков межузельных атомов: границы зерен и обедненных зон. В обоих случаях несовершенства были обнаружены вблизи исходной поверхности образцов после изохронного отжига. Наглядный пример одного из случаев иллюстрируют автоионномикроскопические изображения, приведенные на рисунке. Первое из них соответствует исходной поверхности образца из сплава $W - 5 \text{ ат.}\% \text{ Re}$, облученного ионами La^+ с энергией 40 кэВ флюенсом $\sim 5 \cdot 10^{19}$ ион/м². Указанные стрелками точки повышенной яркости соответствуют вышедшим на поверхность межузельным атомам. Второе изображение получено после испарения полем порядка 15 атомных слоев. На нем стрелками указаны обедненные зоны, возникшие, по-видимому, в результате развития субкаскадов в структуре одного каскада атомных смещений. По сравнению с образцом, облученным в идентичных условиях, но не содержащем на пути мигрирующих к его поверхности межузельных атомов иных несовершенств кристаллического строения, величина $\int N_2(t)$ не превышала $\sim 15\%$ от $\int N_1(t)$. Здесь уместно указать на трудность набора большой статистики, связанную со случайным характером присутствия того или иного несовершенства на пути мигрирующих к поверхности образца точечных дефектов.

Наконец, отметим, что предложенная методика обработки экспериментальных данных может быть проведена для более сложных систем с учетом рекомбинации дефектов, реакций с примесями и т.п.; это требует решения уравнений типа (1) с указанными реакциями на ЭВМ [3, 11–14]. В результате можно будет надеяться в прямом автоионномикроскопическом эксперименте оценить величины сил стоков, средние скорости поглощения для стоков, выявить функциональные зависимости скоростей поглощения от размеров стоков.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Суворов А.Л. Автоионная микроскопия радиационных дефектов в металлах. М.: Энергоиздат, 1982.



Автоионномикроскопические изображения двух сечений острейного образца из сплава $W - 5 \text{ ат. \% Re}$, облученного ионами La^+ с энергией 40 кэВ: а - исходная поверхность, стрелками указаны единичные межузельные атомы, вышедшие на поверхность в процессе изохронного отжига образца; б - полем удалено ~ 15 атомных слоев, стрелками указаны обедненные зоны субкаскадов в структуре одного каскада атомных смещений.

- [2] S e i d m a n D.N. // Surface Science. 1978. V. 70. P. 532.
- [3] H e a l d P.T., S p r e i g h t H.V. // Acta Metal. 1975. V. 29. P. 1389.
- [4] Т р у ш и н Ю.В., О р л о в А.Н. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1302.
- [5] Т р у ш и н Ю.В. // ЖТФ. 1987. Т. 57. С. 226.
- [6] Р я з а н о в А.И. Препринт ИАЭ - 2621, М., 1976.
- [7] О р л о в А.Н., С а м с о н и д з е Г.Г., Т р у ш и н Ю.В. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1311.
- [8] С а м с о н и д з е Г.Г., Т р у ш и н Ю.В. // ЖТФ. 1988. Т. 58. С. 42.
- [9] С у в о р о в А.Л., К у к а в а д з е Г.М. // ФММ. 1970. Т. 30. С. 116.
- [10] Ш р е д н и к В.Н. Рост кристаллов, М.: Наука, 1980, т. XIII, с. 68.
- [11] B r a i l s f o r d A.D., B u l l o u g h R. // Phil. Mag. 1973. V. 27. P. 49.
- [12] B u l l o u g h R., H a y n s M.R. // J. Nucl. Mater. 1975. V. 57. P. 348.
- [13] M a n s u r L.K. // J. Nucl. Mater. 1979. V. 83. P. 109.
- [14] O r l o v A.N., S a m s o n i d z e G.G., T r u s h i n Yu.V. // Rad. Eff. 1986. V. 97. P. 45.

Поступило в Редакцию
18 мая 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 17 12 сентября 1990 г.

05.4

© 1990

СТАБИЛИЗАЦИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТОНКИХ ПЛЕНОК $Y-Ba-Cu-O$ С ПОМОЩЬЮ
ПАССИВИРОВАНИЯ СЕРЕБРОМ

Е.А. П р о т а с о в, И.В. С о б а к и н,
Ю.П. С к о п и н ц е в, А.А. И в а н о в

Изучение стабильности параметров сверхпроводниковых пленок системы $Y-Ba-Cu-O$ показало, что пленки без защитного покрытия с течением времени теряют свои сверхпроводящие свойства.

В этой связи важное значение имеет разработка способов, предохраняющих сверхпроводниковые пленки от разрушающего действия как атмосферы, так и вакуума. Такая задача была поставлена в данной работе.