

- [6] F e c h t i g H., G r u n e E., K i s s e l J.
In: Cosmic Dust, ed. by J.A.M. Mc. Donnell, N.Y.,
J. Wiley, 1978. 480 p.
- [7] K n a b e W., K f u e g e r F.R. // Z. Natur-
forsch. 1982. V. 37a. P. 1335-1340.
- [8] K i s s e l J., S a g d e e v R.Z., B e r t a -
u x J.L. et al. // Nature. 1986. V. 321. N 6067.
P. 280-282.
- [9] А н и с и м о в С.И., Б у ш м а н А.В., К а н е л ь Г.И.
и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39. № 1. С. 9-12.
- [10] А н и с и м о в С.И., Д е м и д о в Б.А., Р у д а -
к о в Л.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. В. 11.
С. 455-457.
- [11] А г у р е й к и н В.А., А н и с и м о в С.И., Б у ш -
м а н А.В. и др. // Теплофиз. высоких темп. 1984. Т. 22.
№ 5. С. 964-983.
- [12] А н и с и м о в С.И., К а р я к и н В.П., К у д р я -
ш о в В.А., О с и п ь я н Ю.А. и др. // Письма в ЖЭТФ.
Т. 44. № 10. С. 477-480.

Поступило в Редакцию
21 января 1991 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 5

12 марта 1991 г.

05.1; 11

© 1991

АНОМАЛЬНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА В РАСПЫЛЯЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

А.А. К о с я ч к о в, В.Т. Ч е р е п и н,
С.М. Ч и ч к а н ь

Распыление многокомпонентных материалов ускоренными ионами приводит к изменению концентрации элементов в поверхности по сравнению с объемной концентрацией. Согласно общепринятым представлениям [1], поверхность должна обедняться компонентной, атомы которой обладают меньшей массой и меньшей энергией связи с поверхностью. Это положение является, по-видимому, справедливым и для твердых растворов, в частности, твердых растворов водорода в металлах. Можно ожидать, что поверхностная концентрация водорода - самого легкого из элементов должна уменьшаться в процессе ионной бомбардировки, тем более, что энергия связи атомов водорода с поверхностью металлов [2] меньше энергии

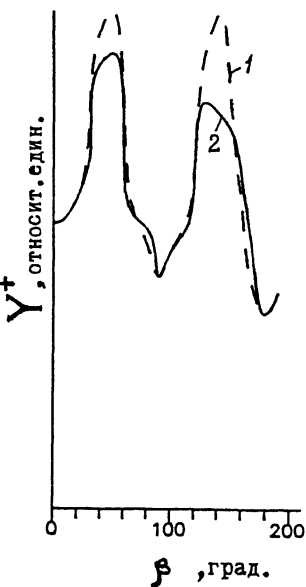


Рис. 1. Зависимость выходов ПРВ (---) и ВИН (—) от азимутального угла скольжения ионов аргона с энергией 5 кэВ относительно грани ниобия (100) при полярных углах скольжения и рассеяния, соответственно, 30° и 65° .

связи металлов, характеризующих их энергиями сублимации [3].

Насколько нам известно, экспериментальная проверка этого положения для водородсодержащих материалов ранее не производилась, по-видимому, в связи со значительными трудностями, возникающими при детектировании водорода в самых верхних монослоях поверхности. Одним из наиболее перспективных в этом отношении методов, развитых до возможности аналитического применения лишь в последнее десятилетие, является измерение выхода нейтральных или ионизированных атомов прямой отдачи водорода (прямых рекойлов водорода-ПРВ), распыляемых в процессе однократного бинарного столкновения бомбардирующего иона и атома поверхностного водорода [4, 5].

Используя этот метод в сочетании с методом вторично-ионной масс-спектрометрии [6], мы пришли к поразительному, на первый взгляд, заключению, что в процессе динамического распыления водородсодержащих материалов их поверхности не обедняются, а наоборот, обогащаются водородом. Накопление водорода, например, на грани (100) монокристалла ниобия, распыляемой ионами аргона, можно наблюдать на рис. 1 по увеличению отношения выхода ионизированных атомов прямой отдачи водорода к выходу вторичных ионов ниобия (ВИН). Дело в том, что в условиях динамического равновесия состава распыляемой поверхности, оба сигнала пропорциональны скорости распыления ниобиевой матрицы [6]. Однако выход ПРВ пропорционален также поверхностной концентрации водорода [4, 5]. Поэтому отношение сигналов ПРВ/ВИН является чувствительным индикатором изменения концентрации водорода в распыляемой поверхности.

Из рис. 1 видно, что при азимутальных углах бомбардировки 45° и 135° , не благоприятных для каналирования ионов аргона в решетке монокристалла ниобия [6], выход ВИН имеет максимальные значения, и это соответствует максимальной скорости распыления поверхности ниобия. Увеличение скорости распыления матрицы приводит к увеличению отношения сигналов ПРВ/ВИН или, другими словами, к увеличению концентрации водорода в поверхности ниобия. Особо отметим, что речь идет о водороде объемного происхождения, который накапливается в поверхности непосредственно

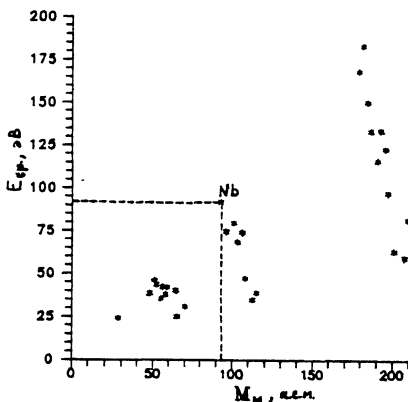


Рис. 2. Условие $E_{ср} < E_{св}(M_M + 1)^2 / 4M_M$ в зависимости от массы атомов водородосодержащей матрицы.

в процессе ионного травления последней. Это подтверждается результатами выполненного нами специального исследования вклада адсорбции водорода в сигнал ПРВ, моделируемого с помощью напуска водорода и дейтерия в сверхвысоковакуумную камеру используемого спектрометра [7] до различных парциальных давлений.

Усиления выхода ПРВ из поверхности водородосодержащего никеля отмечалось и в работе [5], как следствие увеличения дозы бомбардирующих ионов неона. Однако авторы этой работы не сделали каких-либо выводов относительно природы наблюдаемого эффекта. В наших экспериментах подтверждение увеличения поверхностной концентрации водорода при послойном анализе распыляемых гомогенных водородосодержащих пленок из оксида вольфрама получено и другим независимым методом — электронно-стимулированной десорбции ионов водорода.

Наблюдаемую экспериментально аномалию можно объяснить на основании каскадной теории распыления Зигмунда-Томпсона, согласно которой энергия бомбардирующих ионов передается атомам поверхности через каскады последовательных соударений атомов мишени. Элементарный акт распыления возможен, если энергия, переданная в каскаде столкновений атому поверхности, превышает его энергию связи с поверхностью [1]. Покажем, что последнее условие может оказаться невыполнимым для примесных атомов водорода. За счет сильного различия масс атомов водорода и атомов матрицы, $M_B = 1$ а.е.м. и $M_B \ll M_M$, коэффициент передачи энергии $4M_B M_M / (M_B + M_M)^2$ мал даже при лобовом столкновении частиц. Поэтому энергия, передаваемая атому водорода атомом матрицы, движущимся в каскаде атомных столкновений со средней энергией $E_{ср}$, может также оказаться малой, меньше, чем энергия связи атома водорода с поверхностью матрицы $E_{св}$, т.е. $4M_M E_{ср} / (M_M + 1)^2 < E_{св}$.

Последнее условие, решенное относительно величины E_{cp} , графически представлено на рис. 2 для матриц с известными значениями $E_{св}$ атомов водорода [2]. Например, в случае матрицы из ниобия каскадное распыление водорода является проблематичным, если $E_{cp} < 92$ эВ. Величина E_{cp} обычно составляет 10–100 эВ и изменяется в этих пределах в зависимости от материала матрицы, а также от сорта, энергии и других параметров бомбардирующих ионов [8]. Таким образом, каскадный механизм распыления приводит к избирательному распылению компонентов: эффективному для матричных атомов ниобия и неэффективному для примесных атомов водорода. В этих условиях распыление водорода осуществляется преимущественно в виде ПРВ за счет прямого выбивания атомов водорода бомбардирующими ионами. Однако, насколько можно судить по ограниченным литературным данным [4], сечение прямого выбивания атомов отдачи на порядок меньше, чем сечение каскадного распыления. Поэтому атомы примесного водорода накапливаются в распыляемой поверхности матрицы до равновесных концентраций, определяемых соотношением между сечениями всех возможных механизмов распыления матрицы и примеси.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] З и г м у н д П. В кн.: Распыление твердых тел ионной бомбардировкой, ч. 1 / Под ред. Р. Бериша, М.: Мир, 1984. 336 с.
- [2] F r e s e K.W. // Surface Sci. 1987. V. 182. N 1-2. P. 85-89.
- [3] Физико-химические свойства элементов. ч. 1 / Под ред. Самсонова Г.В., М.: Металлургия, 1976. 599 с.
- [4] E s k s t e i n W. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1987. V. B27. N 1. P. 78-93.
- [5] S c h n e i d e r P.J., E s k s t e i n W., V e r b e e k H. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1983. V. 218. N 1-3. P. 713-718.
- [6] Ч е р е п и н В.Т. Ионный зонд. К.: Наукова думка, 1981. 327 с.
- [7] Ч е р е п и н В.Т., К о с я ч к о в А.А., Д у б и н с к и й И.Н., И с њ я н о в В.Э. // ПТЭ. 1986. № 1. С. 155-157.
- [8] П л е ш и в ц е в Н.В. Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968. 312 с.

Институт металлофизики
АН Украинской ССР

Поступило в Редакцию
21 января 1990 г.