

ЭФФЕКТ МАССЫ БОМБАРДИРУЮЩИХ ИОНОВ В РАСПЫЛЕНИИ СПЛАВОВ

*В.С.Тубольцев¹⁾, В.С.Черныш¹⁾, В.С.Куликаускас*¹⁾*

*Физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

**Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ им.М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 7 марта 1996 г.

Экспериментально установлено, что изменение массы бомбардирующих ионов от $^{40}\text{Ar}^+$ до $^4\text{He}^+$ оказывает сильное влияние на пространственные распределения компонентов, распыленных из сплава NiMoRe. Для описания преимущественной эмиссии легкого компонента по нормали к поверхности образца, наблюдавшейся в случае бомбардировки ионами $^4\text{He}^+$, предложен механизм распыления обратнорассеянными ионами.

PACS: 34.50.Dy

Главной особенностью распыления мишеней сложного состава является преимущественная эмиссия атомов одного из компонентов. Такая селективность приводит к тому, что при малых флуенсах ионного облучения состав распыленного вещества не соответствует составу мишени. Это, в свою очередь, инициирует формирование приповерхностного измененного слоя, состав которого отличается от объемного. С увеличением флуенса облучения в силу закона сохранения вещества устанавливается соответствие состава распыленного потока объемному составу мишени. Однако это не означает, что при любом угле эмиссии распыление стехиометрично.

В первых же экспериментах по изучению пространственных распределений частиц, эмитированных из поликристаллических сплавов под действием ионной бомбардировки, был обнаружен эффект нестехиометрического распыления компонентов по углам выхода. В припороговой области энергий бомбардирующих ионов ($E \approx 100$ эВ), когда распыление происходит в результате небольшого числа атомных столкновений, преимущественное распыление легкого компонента по нормали к поверхности объяснялось рассеянием поверхностных атомов легкого компонента на низлежащих тяжелых атомах [1]. При распылении в режиме линейных каскадов ($E \geq$ нескольких кэВ) характер пространственных распределений компонентов существенно изменяется. Исследования показали, что в этом случае тяжелый компонент распыляется преимущественно по нормали к поверхности, а при больших углах эмиссии распыленный поток обогащен легким компонентом [2-4]. Для объяснения этого эффекта были предложены модели, основанные на влиянии радиационно-стимулированной сегрегации [5,6] и несимметричном рассеянии атомов компонентов в поверхностном слое мишени [7]. Несмотря на существенные различия, оба подхода предполагают возникновение в процессе распыления градиента концентраций компонентов, как минимум, в слое, ответственном за эмиссию распыленных частиц.

¹⁾ V.S.Tubolt'sev, V.S.Chernysh, V.S.Kulikauskas.

Необходимо отметить, что до сих пор эксперименты были сконцентрированы на изучении эффекта массы с точки зрения распыляемой мишени, то есть исследовалось влияние на угловые распределения соотношения атомных масс компонентов мишени. При этом в качестве бомбардирующих частиц, как правило, использовались ионы Ar^+ .

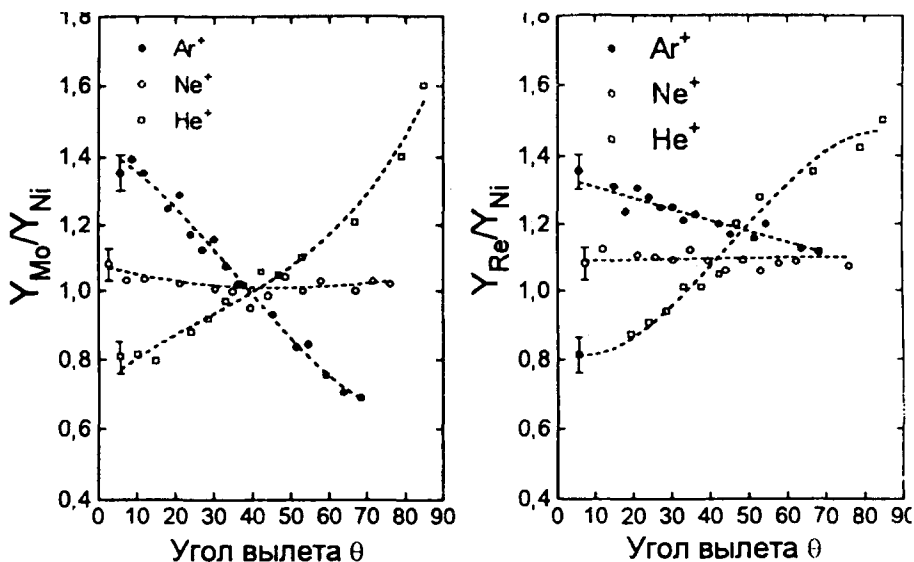
В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение влияния массы бомбардирующих ионов на пространственные распределения компонентов, распыленных из поликристаллических мишеней.

Эксперименты проводили на сверхвысоковакуумном сепараторе [8]. Образцы сплава NiMoRe (86-10.5-3.5 ат.%) были вырезаны в виде шайб диаметром 9 мм и толщиной 2 мм. Перед облучением образцы механически полировали и промывали в органических растворителях. Рентгеноструктурный анализ показал отсутствие преимущественной ориентации зерен, размер которых не превышал 20 мкм. Пучок ионов $^4\text{He}^+$, $^{20}\text{Ne}^+$ или $^{40}\text{Ar}^+$, сепарированный по массам, падал по нормали к поверхности образца. При диаметре пучка на мишени 1,5 мм и энергии ионов 4 кэВ ток пучка в зависимости от типа ионов составлял 10–18 мкА. Давление остаточных газов в камере образца составляло $5 \cdot 10^{-7}$ Па. Состав вещества, напыленного на полуцилиндрический алюминиевый (99.99%) коллектор, и состав поверхности образцов после ионного облучения контролировали с помощью обратного резерфордовского рассеяния (ОРР) ионов He^+ с энергией 1.5 МэВ. Диаметр зонда составлял 1 мм, а угол рассеяния – 160° . Количество атомов j -го компонента ($j \rightarrow \text{Ni}, \text{Mo}$ или Re), распыленных под углом θ , определяли из спектров ОРР, записанных в разных точках коллектора, согласно [9]. При этом флуенс выбирали таким образом, чтобы ошибка в определении концентрации компонентов была не более 3%. Разрешение метода по углу эмиссии составляло 4° .

Результаты измерений относительного выхода компонентов при распылении сплава NiMoRe различными ионами в зависимости от угла эмиссии θ представлены на рисунке. Значения относительного выхода компонентов нормированы на состав образца. Как видно из рисунка, наблюдается сильная зависимость нестехиометричности распыления сплава по углу эмиссии от типа бомбардирующих ионов. Так, если при бомбардировке ионами Ar^+ вблизи нормали к поверхности образца преимущественно распыляются более тяжелые компоненты сплава, то с уменьшением массы бомбардирующих ионов при переходе к бомбардировке ионами Ne^+ состав распыленного вещества практически не зависит от θ . При бомбардировке образца ионами He^+ характер относительного выхода компонентов изменяется по сравнению с распылением ионами Ar^+ на противоположный: атомы Ni, наиболее легкого элемента сплава, эмитируются преимущественно вдоль нормали к поверхности. Поскольку в каждом случае флуенс облучения существенно превышал флуенс, необходимый для установления режима стационарного распыления, такое перераспределение распыленного вещества происходит при сохранении соответствия стехиометрии интегрального распыленного потока объемному составу образца.

Изучение состава поверхности сплава NiMoRe после ионного облучения показало, что во всех случаях поверхность мишени обогащалась рением. Поэтому обнаруженный эффект перераспределения компонентов в распыленном потоке не может быть связан с составом измененного слоя.

Преимущественное распыление атомов Mo и Re вблизи нормали к поверхности при распылении сплава ионами Ar^+ подтверждает результаты предыду-



Зависимость относительного выхода компонентов сплава NiMoRe от угла эмиссии

щих исследований [2–4] и согласуется с выводами модели [7]. Однако, ни модель [7], ни модель радиационно-стимулированной сегрегации [5, 6] не могут объяснить изменение типа преимущественно распыляемого вдоль нормали компонента сплава NiMoRe при переходе к распылению более легкими ионами.

Для того, чтобы понять причины такого аномального поведения угловых распределений распыленных компонентов, рассмотрим процесс взаимодействия бомбардирующего иона с многокомпонентной мишенью. Уменьшение массы первичного иона при сохранении начальной энергии приводит к уменьшению сечения рассеяния иона в верхних слоях мишени. Вследствие этого коэффициент распыления мишени сильно уменьшается. Проникая в глубь мишени, первичный ион может рассеяться назад и достичь поверхности. Очевидно, что при движении к поверхности обратнорассеянные ионы теряют тем меньшую энергию, чем меньше вероятность их рассеяния на большой угол. При этом ион будет терять тем меньшую энергию, чем короче его путь к поверхности. Следовательно, вероятность того, что рассеянный первичный ион достигнет поверхности мишени и сохранит энергию, достаточную для распыления атомов самого верхнего слоя, увеличивается с уменьшением угла между направлением движения обратнорассеянного иона и нормалью к поверхности. Энергия E_j , передаваемая такими ионами с массой M_i и энергией E_i атомам поверхности M_j равна [10]

$$E_j = \gamma_{ij} E_i \cos^2 \theta_j, \quad (1)$$

где θ_j – угол отдачи атома M_j , а γ_{ij} – кинематический фактор:

$$\gamma_{ij} = 4 \frac{M_i M_j}{(M_i + M_j)^2}. \quad (2)$$

Если E_j будет превышать энергию связи атомов M_j на поверхности, то такие атомы распылятся. Из выражения (1) видно, что энергия, передаваемая

атому отдачи M_j , тем больше, чем меньше угол отдачи θ_j . Следовательно, вероятность эмиссии атома отдачи M_j увеличивается с уменьшением угла эмиссии θ . Из зависимости кинематического фактора от массы атома отдачи M_j следует, что наибольшую энергию от обратнорассеянных ионов получают в сплаве NiMoRe атомы Ni. Поскольку энергия связи атомов на поверхности составляет несколько эВ, а начальная энергия бомбардирующих ионов – несколько кэВ, очевидно, что описанный механизм распыления может давать вклад в преимущественный выход атомов Ni вдоль нормали к поверхности.

Для оценки вклада распыления обратнорассеянными ионами в поток атомов, распыленных из сплава NiMoRe, сравним значения коэффициентов распыления Y_i и коэффициентов обратного рассеяния R_i первичных ионов i -го типа ($i \rightarrow \text{He}^+, \text{Ne}^+$ или Ar^+). Величина $R_i = N_{scatt}^i/N_0^i$, где N_{scatt}^i – число обратнорассеянных ионов, а N_0^i – число упавших на мишень ионов, вычислялась на ЭВМ по программе TRIM [11] и составляла для ионов Ar^+ – 0.04, Ne^+ – 0.12 и He^+ – 0.27. Поскольку в литературе отсутствуют данные о коэффициентах распыления сплава NiMoRe, Y_i вычисляли интегрированием измеренных в настоящей работе угловых распределений компонентов по углам эмиссии. Значения Y_i составляли: 3.3, 1.2 и 0.2 атом/ион для ионов Ar^+ , Ne^+ и He^+ , соответственно. Из приведенных данных видно, что величина R_i составляет $\approx 1\%$ от значения Y_i для ионов Ar^+ , 10% – для Ne^+ , а для ионов He^+ значения R_i и Y_i совпадают по порядку величины. Таким образом, вследствие уменьшения коэффициента распыления и возрастания коэффициента обратного рассеяния первичных ионов роль механизма распыления обратнорассеянными ионами должна становиться все более заметной. Это и приводит, очевидно, к увеличению преимущественного распыления атомов Ni по нормали к поверхности при переходе от бомбардировки ионами Ar^+ к ионам Ne^+ и далее к ионам He^+ , как и наблюдается в эксперименте.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально обнаружено сильное влияние массы бомбардирующих ионов на характер нестехиометричности распыления компонентов по углу эмиссии: переход от облучения сплава ионами Ar^+ к облучению более легкими ионами сопровождается изменением типа преимущественно распыляемого по нормали к поверхности компонента. Показано, что за такое перераспределение компонентов в распыленном потоке ответствен механизм распыления обратнорассеянными ионами.

-
1. R.R.Olson, M.E.Kang, and G.K.Weher, *J. Appl. Phys.* **50**, 3677 (1979).
 2. H.H.Andersen, J.Chevalier, and V.S.Chernysh, *Nucl. Instr. and Meth.* **191**, 241 (1981).
 3. W.Huang, *Surf. and Interface Analysis* **14**, 469 (1989).
 4. T.Nagatomi, K.Min, and R.Shimizu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 6675 (1994).
 5. H.H.Andersen, V.S.Chernysh, B.Stenum et al., *Surf. Sci.* **123**, 39 (1982).
 6. P.Sigmund, A.Oliva, and G.Falcone, *Nucl. Instr. and Meth.* **194**, 541 (1982).
 7. В.С.Черныш, В.С.Тубольцев, В.С.Куликаускас, *Поверхность* **2**, 89 (1995).
 8. А.А.Андреев, В.И.Бачурин, С.П.Линник, В.С.Черныш, В сб.: *Вторичная ионная и ионно-фотонная эмиссия*, Харьков, 1983, с. 309.
 9. J.W.Mayer and E.Rimini, *Ion beam handbook for material analysis*, New York, London: Acad. Press, 1977.
 10. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, *Механика*, М.: Наука, 1988.
 11. J.P.Biersack and J.F.Zeigler, *TRIM PC version*, 1985.