

05;10;12

## **Влияние облучения тяжелыми ионами высоких энергий на распыление никеля**

© А.Ю. Дидык, В.К. Семина, А. Халил, Н.А. Васильев,  
А.Э. Степанов, А.Л. Суворов, Ю.Н. Чеблуков

Объединенный институт ядерных исследований,  
Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Дубна  
ГНЦ РФ Институт экспериментальной и теоретической физики, Москва

*Поступило в Редакцию 18 сентября 1999 г.*

Выполнен короткий обзор существующих экспериментальных данных по распылению крупнозернистых металлов быстрыми тяжелыми ионами. Отмечено, что неупругие потери энергии ионов влияют на коэффициент распыления металлов, но несущественно.

Экспериментально показано, что за счет накопления радиационных дефектов кристаллической решетки никеля в процессе облучения коэффициент распыления металла на поверхности зерна увеличивается и становится сравнимым с коэффициентом распыления с границы между зернами. Отмечается важность подобных экспериментов для техники ускорения тяжелых ионов и при использовании быстрых тяжелых ионов для имплантации глубоко лежащих слоев.

Распыление металлов ионами в низкоэнергетической области, где преобладают упругие потери энергии ионов, хорошо изучено. Процесс распыления в этом случае хорошо описывается каскадным механизмом [1].

Исследование распыления крупнозернистых металлов тяжелыми ионами в неупругой области потерь энергии было начато только лишь в последнее десятилетие в связи с потребностями ускорения и накопления высокоинтенсивных тяжелоионных пучков в кольцевых машинах (тяже-

Значения экспериментально измеренных коэффициентов распыления  $S_{\text{exp}}$  кристаллических металлов тяжелыми ионами в неупругой области потерь энергии

Ион/мишень	Энергия, MeV	Коэффициент распыления		Энергопотери ионов, keV/Å
		эксперимент $S_3$	каскадная теория $S_{\text{кт}}$	
$^{238}\text{U}/^{196}\text{Au}$	1400	$12 \pm 2$	$\sim 1$	9.9
$^{196}\text{Au}/^{48}\text{Ti}$	230	$3.3 \pm 0.5$	$\sim 0.2$	2.7
$^{196}\text{Au}/^{196}\text{Au}$	230	$9.3 \pm 0.9$	$\sim 3$	5.4
$^{196}\text{Au}/^{91}\text{Zr}$	230	$1.7 \pm 0.2$	1.07	2.9
$^{84}\text{Kr}/^{196}\text{Au}$	200	$1.0 \pm 0.2$	$\leq 1$	3.0

лоионных драйверах) [2]. Были экспериментально измерены коэффициенты распыления крупнозернистого золота высокоэнергетичными ионами  $^{238}\text{U}$  и  $^{84}\text{Kr}$  [3,4]. Недавно получены экспериментальные результаты по распылению Au, Zr, Ti быстрыми ионами Au [5]. Отмечено [5], что интерес к распылению в неупругой области потерь энергии вырос в связи с использованием быстрых ионов для имплантации глубоколежащих слоев. Результаты экспериментов [3–5] приведены в таблице. Во всех экспериментах использовались кристаллические мишени.

В основном (см. таблицу) коэффициент распыления превышает рассчитанный согласно каскадному механизму, но незначительно. Малый коэффициент распыления говорит о том, что в кристалле при прохождении быстрого тяжелого иона не образуется горячего трека и не происходит испарения материала. Возможный механизм передачи энергии от возбужденной в результате прохождения быстрого тяжелого иона электронной подсистемы кристаллического металла поверхностным атомам и их распыления рассмотрен в [6].

В процессе работы тяжелоионного драйвера на конструкционные металлические элементы линейного ускорителя и боковых стенок накопительных колец будут выпадать значительные потоки выбывших из ускорительного процесса ионов. В этом случае физика распыления вещества может резко измениться. В результате бомбардировки быстрыми тяжелыми ионами в металлических конструктивных элементах будут накапливаться дефекты кристаллической структуры. В местах скопления дефектов горячая в результате прохождения быстрого тяжелого иона электронная подсистема будет эффективно передавать энергию атомам

вещества, что может приводить к локальному разогреву атомов и образованию треков с высокой температурой [7], и, как отмечено в [8], может включиться испарительный механизм распыления и коэффициент распыления металлов может достигнуть значительной величины. В настоящей работе представлены результаты по исследованию распыления никеля ионами  $^{86}\text{Kr}$  с энергией  $E = 245 \text{ MeV}$  и  $E = 305 \text{ MeV}$ , с большим флюенсом  $F \cdot t > 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ , где  $F$  — плотность ионного тока,  $t$  — время облучения. В процессе облучения плотность ионного тока составляла  $F \approx (1 \dots 2) \cdot 10^{11} \text{ ion/cm}^2 \cdot \text{s}$ . Флюенсы и плотности ионного тока измерены с точностью  $\pm 5\%$ . Для достижения хорошего качества поверхности образцы никеля перед облучением электрически полировались. После этого образцы отжигались в вакууме  $10^{-3} \text{ Pa}$  при температуре  $700^\circ\text{C}$  в течение одного часа. До и после облучения образцы изучались на сканирующем электронном микроскопе JSM 840. В процессе облучения образцы удерживались при комнатной температуре в вакууме ( $10^{-4} \text{ Pa}$ ). Охлаждение образцов осуществлялось проточной водой. Все образцы приклеивались к держателям теплопроводящим клеем.

На рис. 1 приведены фотографии структуры поверхности образцов Ni, облученных ионами  $^{86}\text{Kr}$  с энергией  $305 \text{ MeV}$  до флюенса  $F \cdot t \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ ion/cm}^2$  (индекс  $a$  соответствует необлученной поверхности, индекс  $b$  — облученной). Из представленных фотографий видно, что произошло выравнивание неровностей на поверхности и после облучения поверхность практически гладкая. Хорошо видно (рис. 1,  $a$  и  $b$ ) значительно более сильное распыление никеля на границах зерен. Коэффициент распыления на границе достигает величины  $S \geq 2000 \text{ at/ion}$ , что в четыре раза выше значений коэффициента распыления из поверхности зерна (рис. 1). Оценка коэффициента распыления выполнена посредством приближенного определения количества вещества в распыленных неровностях на поверхности. Для более точного определения коэффициента распыления образец никеля, облученный до флюенса  $F \cdot t \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ , был перекрыт диафрагмой на половину облученной части, а затем дополнительно облучен ионами  $^{86}\text{Kr}$  с энергией  $245 \text{ MeV}$  до флюенса  $F \cdot t \approx 10^{15} \text{ ion/cm}^2$ . По высоте ступеньки между однократно и двукратно облученными частями (рис. 2), которая составляла  $h \approx 0.35 \mu\text{m}$ , вычислен коэффициент распыления  $S_{\text{Ni}} \approx 3000 \text{ at/ion}$ . Из полученной величины видно, что при больших флюенсах облучения коэффициент распыления с поверхности зерна



**Рис. 1.** Фотографии структуры поверхности поликристаллического Ni до (a) и после облучения (b) ионами  $^{86}\text{Kr}$  с энергией 305 MeV при флюенсе  $F \cdot t \approx 2 \cdot 10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup>.



**Рис. 2.** Фотографии структуры поверхности поликристаллического Ni, облученного до флюенса  $F \cdot t \approx 2 \cdot 10^{15} + 1 \cdot 10^{15}$  ион/cm<sup>2</sup> ионами <sup>86</sup>Kr с энергиями 305 и 245 MeV соответственно. Видна ступенька, разделяющая эти две области.

никеля близок к коэффициенту распыления с границы зерен, т.е. из области, где нарушена кристаллическая структура металла.

Время передачи энергии от возбужденных после прохождения тяжелого иона электронов кристалла атомам решетки составляет  $\tau \approx 10^{-12}$  s, и атомы не успевают нагреться до существенных температур [7]. В случае кристалла с достаточным количеством наведенных дефектов время передачи энергии сократится до  $\tau \approx 10^{-13}$  s, что приведет к значительному нагреву атомов, расплавлению и образованию треков [7]. Конечную температуру на оси трека можно оценить по формуле [7];

$$\Theta(0) = \sqrt{\frac{8\pi}{9} \frac{\hbar S^2}{a} N \sigma_0 \frac{\alpha}{\beta} r_0^2 T_0^{1/2} \left( \left( \frac{T_0}{\varepsilon_F} \right)^{3/2} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $\sigma = 2\pi a_0^2$ ;  $a_0$  — Борковский радиус;  $S$  — скорость звука;  $N$  — плотность атомов мишени;  $r_0$  — начальный радиус области возбу-

жденных электронов;  $T_0$  — первоначальная температура электронов в возбужденной области;  $a$  — постоянная решетки;  $\alpha$ ,  $\beta$  — постоянные, слабо зависящие от вида атомов мишени для  $Z \geq 20$  и равные  $\sim 0.05$  и  $\sim 0.1 \text{ eV}^{-1}$  соответственно.

Экспериментально наблюдаемый большой коэффициент распыления никеля, по всей видимости, объясняется испарением атомов с поверхности трека, разогретого до температуры, гораздо выше температуры плавления. Для никеля  $T_m = 1873 \text{ K}$ , а оценка по формуле (1) дает температуру в треке  $\Theta \approx 3700 \text{ K}$ .

Представленные экспериментальные результаты (рис. 1, 2) показывают, что наличие радиационных дефектов в металле существенно увеличивает роль неупругих потерь энергии быстрых тяжелых ионов на величину коэффициента распыления. Так, коэффициент распыления металлов с малым количеством дефектов кристаллической структуры равен  $1 \dots 10 \text{ at/ion}$  [3–5]. На примере никеля показано, что при накоплении дефектов кристаллической структуры металла величина коэффициента распыления возрастает и становится сравнимой с коэффициентом распыления аморфизированного металла.

Теория трекообразования [7] не противоречит полученным экспериментальным данным. Учитывая важность поднятого в данной работе вопроса для ускорительной техники и имплантации высокоэнергетических тяжелых ионов в вещество, необходимо продолжить экспериментальные и теоретические исследования в данной области. Прежде всего необходимо измерить угловое распределение вылетающих с поверхности мишени атомов и зависимость коэффициента распыления от дозы облучения с одновременным изучением типа и концентрации дефектов кристаллической структуры.

Авторы признательны Селии Эллиот за полезные замечания.

Настоящая работа профинансирована Международным научно-техническим центром (МНТЦ) в рамках выполнения проекта № 467.

## Список литературы

- [1] *Sigmund P.* // Phys. Rev. 1969. V. 184. P. 383–387.
- [2] *Koshkarev D.G.* // Part. Accel. 1984. V. 16. P. 1–4.
- [3] *Cheblukov Yu.N., Koshkarev D.G., Peuto A.R.* et al. // Part. Accel. 1992. V. 37–38. P. 351–353.

- [4] *Акапьев Г.И., Балабаев А.Н., Васильев Н.А.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 1. С. 134–135.
- [5] *Mieskes H.D., Assmann W., Brodale M. et al.* // NIM. В. 1998. V. 146. P. 162–171.
- [6] *Мартыненко Ю.Н., Явлинский Ю.Н.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 6. С. 1164–1167.
- [7] *Yavlinskii Yu.N.* // NIM. В. 1998. V. 146. P. 142–146.
- [8] *Чеблукон Ю.Н.* // Труды Первой Московской Международной школы физики ИТЭФ. 17–26 февраля 1998 г. М.: Редакция журнала УФН, 1999. С. 181.