Uzbek Journal of Physics
Vol.21(№5) 2019 PP.325-328

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА НА ВЫХОД МНОГОАТОМНЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ МЕТАЛЛОВ ИОНАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Р. Курбанов[1], З.А. Исаханов[2], И.О. Косимов[3], А.С. Халматов[2]

[1]Ташкентский архитектурно-строительный институт, Ташкент, Узбекистан
[2]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан
za.isakhanov@gmail.com
[3]Ташкентский государственный технический университет, Университетская 2, Узбекистан
(Получена 13.06.2019)

Металл сиртини тезлаштирилган ионлар билан чанглантирилганда, M_1^+ атомларнинг, ҳамда кўп атомли M_n^+ нанозаррачаларнинг чиқиши сиртга тушаётган ионлар ток зичлигига боғлиқлиги ўрганилган.

Исследованы выход атомов M_1^+, а также многоатомных наночастиц типа M_n^+ в зависимости от плотности тока распыленных ускоренных ионов поверхностью металлов.

The yield of M_1^+ atoms and M_n^+ type nanoparticles as a function of current density during the sputtering of the surface of metals by accelerated ions was investigated.

Введение. Распыление твердых тел при бомбардировке ускоренными ионами используется для решения ряда практических задач, в частности, для целенаправленного изменения поверхностных и объёмных свойств твердого тела, для анализа веществ на атомно-молекулярном уровне, а также для решения проблем, связанных с созданием и эксплуатацией термоядерных реакторов.

Образованные при ионной бомбардировке на поверхности металлов заряженные наночастицы типа M_n^+ (M – символ химического элемента, $n \leq 10$ – количество атомов в наночастице) можно рассматривать как один из компонентов продукта распыления твёрдых тел. Поэтому эмиссию заряженных наночастиц целесообразно изучать в сопоставлении с эмиссией атомов. Такое сопоставление удобно начать со сравнения закономерностей выхода атомов M_1^+ и многоатомных наночастиц типа M_n^+ от плотности тока бомбардирующих ионов. Экспериментально [1] было установлено, что вероятность эмиссии наночастиц типа M_n^+ во многом определяется присутствием на поверхности разного рода загрязнений. Влияние загрязнений можно свести к минимуму при выборе плотности тока выше определенного значения j_0, когда поверхность можно считать чистой по отношению к вторичной ионной эмиссии. Для этого можно воспользоваться методикой, основанной на исследовании зависимости выхода ионов M_1^+ от j_0, когда должна наблюдаться линейная зависимость функции $M_1^+ = f(j_0)$.

Методика эксперимента. Исследования проводили на установке ВИМС с электромагнитом секторного типа. Первичные ионы направляли на поверхность образца под углом 50° относительно нормали к поверхности. Энергию первичных

ионов E_0 варьировали в интервале 5–10 кэВ. Вакуум в рабочей камере составлял ~5×10^{-7} Па. Распыленные атомы M_1^+ и многоатомные наночастицы M_n^+ вытягивали к входу масс-спектрометра по нормали на поверхность образца. Ионы на выходе масс-спектрометра регистрировали счетчиком ионов типа СИ-04. Мы использовали методику, основанную на исследовании линейной зависимости функции выхода ионов $M_1^+ = f(j_0)$.

Представленная работа посвящена влиянию плотности тока первичных ионов на выход атомных M_1^+ и многоатомных наночастиц M_n^+ при распылении поверхности металлов ускоренными ионами инертных газов.

Обсуждение полученных результатов. Изучены зависимости выхода атомов M_1^+и многоатомных наночастиц типа M_n^+, распыляемых с поверхности Cu, Ni и Ag, от плотности тока бомбардирующих ионов Xe^+ с энергией 6 кэВ. Перед опытами поверхность мишени очищали нагревом до температуры 1200 К при одновременной ионной бомбардировке с плотностью тока 2.5×10^{-3} А/см^2.

Полученные зависимости токов ионов M_1^+ и M_n^+ (температура мишени ~1200 К) от плотности тока бомбардирующих ионов Xe^+ представлены на рис. 1. Как видно, линейная зависимость выхода распыленных ионов M_1^+ от j_0 наблюдается, начиная с $j_0=1.3\times10^{-4}$ А/см^2, т.е. чистота поверхности мишени по отношению к ионной эмиссии наблюдается, когда $j_0 \geq 1.3\times10^{-4}$ А/см^2. В связи с этим сравнение закономерностей выхода ионов M_1^+ и M_n^+ проводили для j_0, превыщающих это значение.

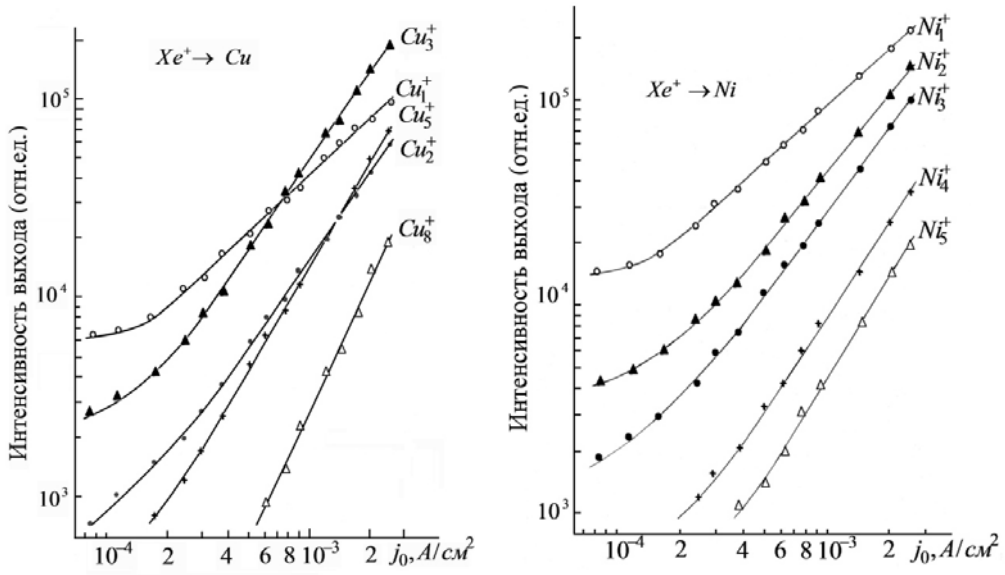


Рис. 1. Токовая зависимость одноатомных M_1^+и многоатомных ионов M_n^+ (слева для Cu, справа для Ni) от плотности тока бомбардирующих ионов Xe^+ с энергией $E_0 = 6$ кэВ.

При рассмотрении рисунков можно выделить важную функциональную зависимость выхода атомов M_1^+ и многоатомных частиц типа M_n^+ от плотности тока бомбардирующих ионов, а именно: зависимости выхода ионов Cu_1^+ и Ni_1^+ от j_0 имеют одинаковый характер. Выход многоатомных ионов M_n^+ при малых плотностях тока имеет нелинейную зависимость $I(M_n^+) \approx f(j_0^m)$. Показатель степени

больше единицы $m > 1$ и зависит от числа атомов n в ионе M_n^+. Например, для Cu_2^+ и Cu_3^+ значения составляют $m \approx 1.3\pm0.1$, а для ионов Cu_4^+-Cu_7^+ значения m колеблятся в пределах $m\approx1.5-1.6$. Наиболее высокие значения $m \approx 1.8\pm0.1$ наблюдаются для наночастиц типа Cu_8^+ и Cu_9^+.

Аналогичные токовые зависимости обнаруживаются в выходах наночастиц никеля Ni_n^+, где значения $m\approx(1.35-1.6)\pm0.1$ для ионов с n=2–6. Для крупных ионов Ni_n^+ ($n \geq 7$), определение показателя m было затруднено из-за быстрого уменьшения их выхода при уменьшении j_0. Для выхода ионов серебра Ag_n^+ (n = 7–10) степень показателя функции $I(M_n^+) \approx f(j_0^m)$ достигает значений $m \approx 1.5-2.2$.

Интересным результатом является также то, что относительная доля многоатомных ионов M_n^+ ($n \leq 9$) в общем потоке распыленных частиц увеличивается от 34% до 95% при увеличении плотности тока от 3.5×10^{-4} А/см^2 до 2.5×10^{-3} А/см^2. Отметим, что подобная закономерность была обнаружена нами при увеличении массы бомбардирующих ионов (от $He^+\rightarrow Xe^+$) при неизменном значении j_0 [2].

Также были проанализированы возможные причины нелинейной зависимости выхода заряженных наночастиц типа M_n^+ от плотности тока первичных ионов j_0.

Тепловой разогрев локального микроучастка мишени (диаметр пучка не превышал 10 мкм) при увеличении j_0 может стимулировать испарение вещества в виде частиц M_n с последующей их ионизацией. Однако этот эффект не может быть ответственен за увеличение эмиссии многоатомных наночастиц M_n^+, так как из-за высокой теплопроводности металла тепловая энергия быстро рассеивается из области ионного удара. Кроме того, эмиттированные ионы имеют кинетическую энергию на 2–3 порядка больше, чем тепловая энергия, получаемая за счет испарения [3].

Если каскады столкновений обладают очень высокой плотностью, то может происходить как перекрытие ветвей одного каскада, так и смешивание различных каскадов. Это обстоятельство может привести к нелинейным эффектам, и, как результат, к нелинейному росту выхода наночастиц. Однако, согласно расчетам, приведенным в [2], даже при плотностях тока $j_0 = 10^{-2}$ А/см^2 среднее расстояние между центрами, где развиваются каскады, составляет ~2000 Å. В нашем случае плотность тока на два порядка меньше. Поэтому можно считать, что исключается возможность перекрытия каскадов атомных столкновений.

Заключение. Таким образом, представленные выше результаты свидетельствуют о различии в закономерностях выхода атомов M_1^+ и многоатомных наночастиц M_n^+ от плотности тока бомбардирующих ионов.

Линейная зависимость выхода атомов M_1^+ от j_0 свидетельствует об отсутствии пространственного заряда, наличие которого могло бы привести к изменению траекторий вторичных ионов (особенно многоатомных наночастиц из-за меньшей их кинетической энергии по сравнению с атомами) и, как следствие, к отклонению от линейной зависимости их выхода от j_0.

Следует отметить, что наблюдаемый нелинейный рост выхода многоатомных наночастиц от j_0 не обусловлен приборными эффектами, поскольку условия транспортировки первичного пучка и условия формирования вторичного пучка поддерживались постоянными при изменении j_0.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Т. Черепин. Ионный микрозонд (Киев, Наукова думка, 1994)**.**
2. Р. Курбанов. Диссертация на соискание ученой степени к. ф.-м. н. (Ташкент, 1984).
3. Н.Х. Джемилев, Поверхность. Рентг., синхрот. и нейтрон. исследования, №8, 28, 2012.