

11;12

Наблюдение тепловых пиков при распылении тантала кластерными ионами золота

© С.Н. Морозов, У.Х. Расулев

Институт электроники им. У.А. Арифова АН РУ, Ташкент, Узбекистан
E-mail: ariel@uzsci.net

Поступило в Редакцию 15 июля 2002 г.

Экспериментально исследована эмиссия атомарных и кластерных ионов при распылении танталовой мишени кластерными ионами золота в диапазоне энергий бомбардирующих ионов 6–21 keV. Обнаружен эффект существенного увеличения выхода атомарных ионов тантала, имеющих квазитепловые энергии, с ростом количества атомов в бомбардирующих кластерных ионах золота. Полученные результаты являются экспериментальным доказательством наличия тепловых пиков при кластерной бомбардировке и их вклада в эмиссию атомарных ионов.

При взаимодействии тяжелых кластерных ионов с твердым телом в результате одновременного столкновения нескольких атомов первичного иона с малым участком поверхности резко возрастает локальное энерговыделение, что приводит к развитию нелинейных каскадов высокой плотности. При этом наблюдаемый рост коэффициентов распыления и выхода вторичных кластерных ионов существенно непропорционален количеству атомов в бомбардирующем ионе, и соответствующий фактор неаддитивности (молекулярный эффект) весьма значителен [1–3]. Долгое время дискутируется вопрос о существовании „тепловых пиков“, связанных с нелинейными каскадами, и о влиянии их на различные эмиссионные явления [4,5]. Предполагается, что это относительно долгоживущие (до 10^{-11} s) высокотемпературные области, примыкающие к поверхности, из которых может происходить тепловое испарение атомов и ионов, дающее дополнительный вклад в распыление и ионную эмиссию. Имеются многочисленные экспериментальные данные [5], свидетельствующие о существенном превышении коэффициентов распыления над расчетными по линейной теории Зигмунда [6] в

случае применения тяжелых первичных ионов, особенно молекулярных, и мишеней из тяжелых металлов, когда наблюдается высокая плотность выделения энергии при торможении иона вблизи поверхности мишени. Однако эти данные не позволяют напрямую связать наблюдаемое приращение коэффициентов распыления и эмиссии вторичных ионов с наличием „тепловых пиков“.

В настоящей работе при исследовании эмиссии атомарных и кластерных ионов Ta_n^+ , распыленных из танталовой мишени кластерными ионами Au_m^- ($m = 1-9$) в диапазоне энергий $E_0 = 6-21$ keV, получены экспериментальные результаты, свидетельствующие о присутствии „тепловых пиков“ при бомбардировке кластерными ионами.

Использовалась экспериментальная установка, описанная в [2], содержащая источник отрицательных кластерных ионов золота распылительного типа, магнитный сепаратор первичных ионов, распыляемую поликристаллическую танталовую мишень и магнитный анализатор вторичных ионов на базе масс-спектрометра МИ 1201. Установка была существенно модернизирована с целью расширения диапазона масс и корректного измерения тока первичных кластерных ионов [3]. Бомбардировка танталовой мишени кластерными ионами золота производилась под углом 45° , а сбор вторичных ионов осуществлялся по нормали к поверхности, при этом на мишень подавался положительный потенциал 2000 V. Токи первичных ионов Au_1^- , Au_2^- , Au_3^- , Au_5^- , Au_7^- , Au_9^- , измеренные с помощью цилиндра Фарадея, составляли 1:0.22:0.35:0.035:0.012:0.005 nA соответственно. Плотность тока первичных ионов Au_m^- на мишени составляла для разных m от 0.3 до 50 nA · cm⁻². На стадии измерений откачка производилась только ионно-сублимационными насосами, при этом вакуум был не хуже $3 \cdot 10^{-6}$ Pa. Частота поверхности мишени достигалась использованием высокой базовой рабочей температуры 2300 K во время измерений и контролировалась по присутствию ионов Ta_nO^+ , содержание которых не превышало 0.5% от общего потока вторичных кластерных ионов тантала. Температурная зависимость выхода вторичных ионов измерялась путем настройки на соответствующий массовый пик и быстрого сканирования температуры мишени относительно базовой за время не более 2–3 s. При этом поверхность не успевала сколько-нибудь существенно загрязняться.

Получены масс-спектры вторичных кластерных ионов Ta_n^+ ($n = 1-11$) при различных энергиях бомбардирующих ионов Au_m^- . На-

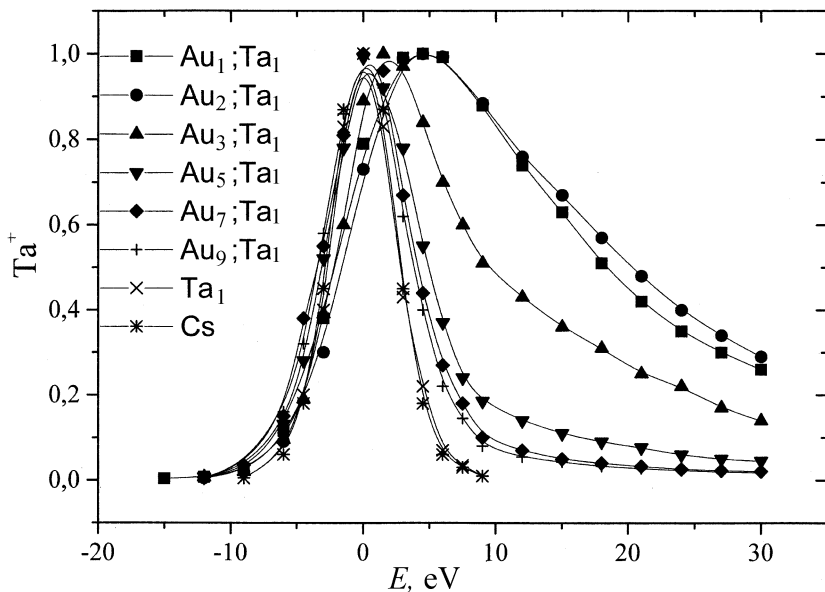


Рис. 1. Относительные распределения по энергиям атомарных ионов Ta^+ , распыленных при бомбардировке кластерными ионами золота, а также испаренных ионов Ta^+ и Cs^+ .

бюдалось существенное неаддитивное увеличение выхода вторичных ионов Ta_n^+ с ростом числа атомов в первичном и вторичном кластере — m , n . Определяемый стандартным образом фактор неаддитивности [2] достигал величин 50–100 при $n = 8–11$, $m = 3–5$. Обнаружен эффект резкого увеличения выхода атомарных ионов Ta^+ с ростом количества атомов в бомбардирующем ионе Au_m^+ начиная с $m = 3$. Измерение относительных распределений по кинетическим энергиям вторичных ионов показало, что увеличение выхода Ta^+ с ростом m происходит за счет ионов с энергиями, близкими к тепловым. На рис. 1 представлены относительные распределения по кинетическим энергиям (контуры массовых линий) атомарных ионов тантала, распыленных при бомбардировке различными кластерными ионами золота. Там же для сравнения приведены контуры поверхностно-ионизационного пика Cs^+ и испаренного пика Ta^+ , измеренные в отсутствие ионной

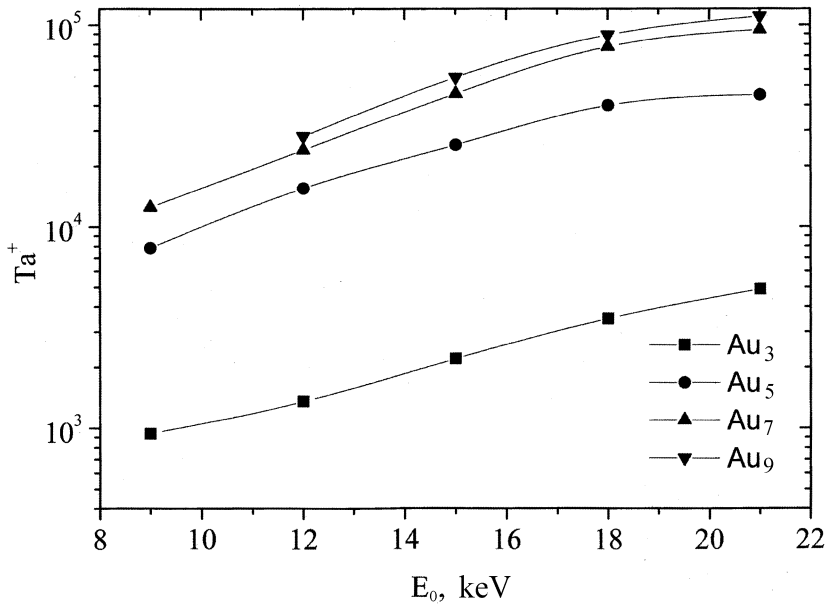


Рис. 2. Зависимость выхода квазитепловых атомарных ионов Ta^+ от энергии и типа бомбардирующих ионов Au_m^- .

бомбардировки при температуре танталовой мишени 2300 К. Максимум энергораспределения ионов Ta^+ при бомбардировке мономерами и димерами сдвинут относительно испаренных пиков на 4–5 eV, что составляет примерно половину от энергии сублимации тантала, а падение интенсивности с энергией относительно медленное. Эти обстоятельства характерны для спектров кинетических энергий ионов, распыленных в результате каскадно-столкновительного механизма [6]. С увеличением количества атомов в бомбардирующих ионах Au_m^- распределения по энергиям вторичных ионов Ta^+ приближаются к тепловым (максвелл-большмановским). По контурам ионных линий надежно выделялась квазитепловая компонента эмиссии атомарных ионов путем вычитания обычной каскадно-столкновительной компоненты, характерной для бомбардировки атомарными ионами. Так, при бомбардировке ионами Au_3^- квазитепловая компонента составляет менее 25%, тогда как при бомбар-

дировке ионами Au_9^- она превышает 90% от суммарного выхода. Выход низкоэнергетичных атомарных ионов, приведенный к току первичных ионов, резко возрастает с ростом энергии бомбардирующих ионов и количества составляющих их атомов. Графики соответствующих зависимостей даны на рис. 2. Фактор неаддитивности увеличения выхода квазитепловых ионов Ta^+ при переходе от Au_3^- к Au_9^- составляет ~ 30 . Данное явление носит резко выраженный пороговый характер и не наблюдается в случае бомбардировки ионами Au_1^- и Au_2^- в исследованном диапазоне энергий. Характерно, что низкоэнергетичная компонента появляется только в спектрах атомарных распыленных ионов. Несмотря на то что выход вторичных кластерных ионов также существенно неаддитивно возрастает с ростом количества атомов в бомбардирующих ионах, форма их энергетических спектров при этом практически не меняется и не наблюдается какой-либо корреляции их выхода с порогом появления квазитепловых атомарных ионов по числу атомов в первичном ионе. Более того, наблюдается монотонное уширение энергоспектров кластерных ионов Ta_n^+ ($n = 2-11$) и обогащение их высокоэнергичными частицами с ростом числа атомов в бомбардирующем кластере. Данные обстоятельства, по-видимому, свидетельствуют о том, что основной механизм формирования распыленных кластерных ионов не связан напрямую с их испарением из „тепловых пиков“. Измерения зависимости выхода атомарных ионов Ta^+ от температуры мишени показали почти синхронный монотонный рост выхода в 1.8–2 раза с увеличением температуры в диапазоне 300–2300 К как для квазитепловой, так и для столкновительной компоненты. При этом соотношения между этими компонентами практически не изменялись. Исходя из экспериментально измеренной относительно слабой зависимости выхода квазитепловых распыленных ионов Ta^+ от температуры мишени и предполагая, что эта температура входит аддитивной добавкой к температуре „тепловых пиков“, можно оценить эффективную температуру в „тепловых пиках“ — T_{eff} . Учитывая известный экспоненциальный характер зависимости выхода испаренных ионов от температуры, на основании наших измерений можно сделать вывод, что температура мишени является малой добавкой к T_{eff} и температура в пиках многократно превышает 2300 К. Полученные результаты являются доказательством наличия „тепловых пиков“ при кластерной бомбардировке и их вклада в эмиссию атомарных ионов.

Список литературы

- [1] *Bounaau S., Brunelle A., Della-Negra S.* et al. // Phys. Rev. B. 2002 (in press).
- [2] *Belykh S.F., Habets B., Rasulev U.Kh.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. 2000. V. 164–165. P. 809.
- [3] *Расулев У.Х., Морозов С.Н.* // Изв. АН. Сер. физ. 2002. Т. 66. № 4. С. 522.
- [4] *Sigmund P., Claussen C.* // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. P. 990.
- [5] *Andersen H.H.* // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1993. V. 43. P. 127.
- [6] *Sigmund P.* // Phys. Rev. 1969. V. 184. P. 383.