

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ГАЗОВЫМИ КЛАСТЕРНЫМИ ИОНАМИ

А.В. Назаров¹⁾, В.С. Черныш²⁾, А.Е. Иешкин²⁾, Д.С. Киреев²⁾

¹⁾Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
Ленинские горы 1/2, Москва 119991, ГСП-1, Россия, av.nazarov@physics.msu.ru

²⁾Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1/2, Москва 119991, ГСП-1, Россия,
chernysh@phys.msu.ru, a.e.ieshkin@gmail.com, dmtr.kireeff6497@yandex.ru

Газовые кластерные ионы являются инструментом, который находит применение в задачах обработки поверхностей твердотельных мишеней для нужд электроники, оптики, сенсорики и др., а также в различных аналитических методиках. Основным явлением, лежащим в основе этих практических применений, является распыление под действием кластерного облучения. В работе изучены угловые и энергетические распределения атомов, распылённых с однокомпонентных металлических поверхностей кластерными ионами различных инертных газов при различных значениях средней энергии, приходящейся на один атом кластера (E/n). Также изучен процесс передачи энергии кластера атомам мишени для различных масс атомов кластера и мишени. Выявлены различия в механизмах взаимодействия кластера с поверхностью в различных диапазонах E/n , обсуждается применимость модели тепловых пиков для описания энергетических распределений распылённых атомов.

Ключевые слова: газовые кластерные ионы; распыление; молекулярная динамика.

THE DIFFERENTIAL QUANTITIES OF METAL SURFACES SPUTTERING BY GAS CLUSTER IONS

Anton Nazarov¹⁾, Vladimir Chernysh²⁾, Alexey Ieshkin²⁾, Dmitrii Kireev²⁾

¹⁾Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
1/2, Leninskie gory, 119991 Moscow, GSP-1, Russia, av.nazarov@physics.msu.ru

²⁾Lomonosov Moscow State University, 1/2 Leninskie gory, 119991 Moscow, GSP-1, Russia,
chernysh@phys.msu.ru, a.e.ieshkin@gmail.com, dmtr.kireeff6497@yandex.ru

Gas cluster ion beams (GCIB) have become a widely used instrument for surface treatment such as surface cleaning, sub nanometer smoothing, planarization of surface structures for the integrated circuit production. Surface nanostructures for sensing applications can also be created under the GCIB irradiation. Moreover, GCIB is used in the analytical methods such as secondary ion mass-spectrometry (SIMS) or X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The sputtering phenomenon under GCIB irradiation plays the key role in the mentioned practical applications. The studies of the differential quantities of sputtering are important both for development of practical methods and for the fundamental understanding of cluster-surface interaction mechanisms. Particularly, GCIB is well-known for the so-called “lateral” sputtering with the maximum of the angular distribution of sputtered atoms at 50-70 degrees from the surface normal.

In this work the angular and energy distributions of atoms sputtered from Cu, Mo and W surfaces by Ar, Kr and Xe cluster ions are studied both experimentally and with MD simulations. It was experimentally found that the angular distributions can differ from the “lateral” shape by the increased yield in the direction of surface normal. The strong angular distribution dependence on the E/n value has been found by the MD simulations in the range between several tens of eV and 1 keV per cluster atom. This dependence is explained by the difference in the sputtering mechanisms at low and high E/n . The energy distributions were calculated with the MD simulations. The applicability of the thermal spike model to the GCIB sputtering is discussed.

Keywords: gas cluster ion beam; sputtering; molecular dynamics.

Введение

Газовые кластерные ионы в последние

десятилетия стали широко используемым инструментом в задачах обработки

поверхности твёрдого тела, а также в различных аналитических методиках. Основным явлением, обуславливающим эти практические применения, является распыление.

Изучение дифференциальных характеристик распыления, таких как угловые и энергетические распределения распылённых атомов, важно как для понимания механизмов распыления, так и в практическом плане. Отличительной особенностью облучения газовыми кластерными ионами является т.н. «латеральное» распыление (1,2), то есть угловые распределения распыленных атомов с максимумом при больших углах (50-70 градусов) от нормали к поверхности мишени.

Другой дифференциальной характеристикой распыления является энергетическое распределение распылённых атомов. Для случая распыления атомарными ионами, эти распределения хорошо изучены для различных механизмов распыления (3,4).

В данной работе представлены результаты экспериментального измерения угловых распределений меди и вольфрама пучком газовых кластерных ионов аргона, криптона и ксенона. Для объяснения полученных зависимостей было проведено компьютерное моделирование распыления методом молекулярной динамики (МД). Также с помощью МД моделирования был проведён расчёт энергетических распределений атомов, распылённых газовыми кластерными ионами.

Основная часть

Измерения угловых распределения атомов меди и вольфрама проводились с помощью коллекторной методики. Показано, что в случае распыления поверхности меди пучков кластерных ионов аргона с энергией 10 кэВ угловое распределение распыленных атомов имеет «латеральный вид» с максимумом при угле эмиссии около 70 градусов. Однако, угловые распределения в случае медной мишени, имеют значения сравнимые с латеральными максимумом в

направлении нормали к поверхности мишени. Аналогичный результат получен для распыления вольфрама кластерными ионами аргона и криптона. В случае распыления вольфрама кластерными ионами ксенона наблюдается максимум в направлении нормали к поверхности мишени, что совпадает с результатами работы (5).

С помощью МД моделирования распыления поверхности меди, молибдена и вольфрама кластерами аргона, криптона и ксенона была выявлена сильная зависимость угловых распределений распылённого материала от средней энергии на один атом кластера E/n в диапазоне от 10 эВ до 1 кэВ. При высоких значениях E/n максимум углового распределения наблюдается в направлении нормали к поверхности мишени. При малых значениях E/n наблюдается латеральное угловое распределение. При этом показано, что в диапазоне больших и малых E/n различается механизм распыления. Также была продемонстрирована сильная зависимость коэффициентов распыления величины E/n . Комбинация этих двух величин и формирует итоговое угловое распределение при распылении кластерным пучком без масс-сепарации.

С помощью МД моделирования было продемонстрировано формирование нанорельефа поверхности мишени в процессе кластерного облучения, а также влияние этого рельефа на угловые распределения распылённых атомов.

Помимо этого, на основе МД расчётов показано, что более тяжёлые кластеры криптона и ксенона передают атомам меди и молибдена больше энергии, чем более лёгкие кластеры аргона. Проективные пробеги атомов кластера криптона и ксенона в медной и молибденовой мишенях выше, чем для атомов кластера аргона. Дифференциальное сечение рассеяния атомов кластера на атомах мишени определяет интенсивность столкновений атомов кластера друг с другом. Различия в переданной энергии исчезают при больших значениях E/n , когда большинство атомов кластера может независимо двигаться в

мишени после разрушения кластера, а также при малых значениях E/n , когда атомы кластера не проникают в мишень. В результате столкновения с поверхностью мишени кластер термализуется. Степень термализации определяется интенсивностью столкновений атомов кластера друг с другом.

С помощью МД моделирования были также рассчитаны энергетические распределения атомов меди и молибдена, распылённых кластерами аргона с E/n в диапазоне от 10 до 100 эВ/атом. Показано, что энергетические распределения атомов, распылённых газовыми кластерными ионами в данном диапазоне E/n , могут быть описаны уравнением теории тепловых пиков Зигмунда-Клауссена. Температура ядра теплового пика линейно растёт с увеличением энергии на один атом кластера в диапазоне от 10 до 100 эВ/атом. Также было показано, что нанорельеф поверхности, формирующийся в процессе облучения пучком газовых кластерных ионов, приводит к увеличению эмиссии атомов низких энергий при малых углах по сравнению с распылением с идеальной поверхности.

Заключение

В работе были экспериментально измерены угловые и энергетические распределения атомов, распылённых с поверхности меди, молибдена и вольфрама пучком кластерных ионов аргона, криптона и ксенона. Показано, что форма угловых распределений может отличаться от «латеральной». С помощью МД моделирования были исследованы механизмы распыления при

различных значениях E/n , а также влияние нанорельефа поверхности на угловые распределения распылённых атомов.

Показаны зависимости проективных пробегов атомов кластера в мишени, доли энергии кластера, переданной мишени, а также степени термализации кластера в результате столкновения от соотношения масс атомов кластера и мишени. Основными механизмами, определяющими эти зависимости, являются эффект «расчистки пути» и эффект атомных столкновений между атомами кластера.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-15-2021-1353.

Библиографические ссылки

1. Toyoda N., Kitani H., Hagiwara N., Aoki T., Matsuo J., Yamada I. Angular distributions of the particles sputtered with Ar cluster ions. *Mater. Chem. Phys.* 1998; 54 (1-3): 262.
2. Insepov Z., Yamada I. Molecular dynamics simulation of cluster ion bombardment of solid surfaces. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 1995; 99(1-4): 248.
3. Behrisch R., Wittmaack K., editors. *Sputtering by Particle Bombardment III*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1991.
4. Sigmund P., Claussen C. Sputtering from elastic-collision spikes in heavy-ion-bombarded metals. *J Appl. Phys.* 1981; 52 (2): 990.
5. Chernysh V.S., Ieshkin A.E., Ermakov Y.A. The new mechanism of sputtering with cluster ion beams. *Appl. Surf. Sci.* 2015; 326: 285.