

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

НАУЧНЫЙ ПРОЕКТ УНИВЕРСИАДЫ
Коэффициенты распыления кластерными ионами

Выполнил студент
423 группы
Пушко Павел Александрович

Научный руководитель
с. н. с., к.ф.-м.н. Иешкин А. Е.

Москва
2021 г.

Введение

Кластерные ионы являются относительно новым проявлением методики воздействия на поверхность твёрдого тела бомбардировкой заряженными частицами. В случае кластеров это воздействие характеризуется рядом свойств, принципиально отличающихся от аналогичных для атомарных ионов. Большинство из них, такие как глубина проникновения, коэффициенты распыления, глубина выхода частиц мишени, обусловлены взаимным расположением падающих частиц и их удельной энергией. Ансамбль частиц, размером от единиц до нескольких тысяч атомов, взаимодействует одновременно по крайней мере с таким же количеством атомов мишени. Каждый отдельный атом кластера, имеющего кинетическую энергию порядка десятков кЭв, обладает энергией заметно меньшей. Эти особенности обуславливают новые явления при взаимодействии бомбардирующих частиц с поверхностью, такие, как образование нанорельефа или, наоборот, сглаживание рельефа поверхности, образование большого давления и ударных волн в приповерхностном слое. Актуальность, цели и задачи работы будут обозначены в следующих пунктах введения.

Краткий литературный обзор

Во второй половине 20-го века П. Зигмундом были разработаны две теоретические модели процесса распыления вещества атомарными ионами: модель на основе линейных каскадов атомных столкновений [1] и нелинейная модель [2], в которой процесс распыления приближается процессом сублимации вещества мишени. Обе они имеют области применимости, в рамках которых они дают удовлетворительные результаты. Для кластеров механизм распыления остаётся до сих пор не до конца понятен. В настоящий момент проводится масса исследований в данном направлении. Так, в статье лаборатории Киото [3] показывается различие механизмов химического и физического распыления на примере угловых зависимостей выхода распыления тяжёлыми кластерами этанола образцов кремния и золота. В работе Н. Г. Коробейщикова и др. [4] показывается сильная зависимость выходов распыления от углов падения кластеров, их размеров (1) и энергий (Пара $Ar \rightarrow SiO_2$) (Рис. 1) Внимание зависимости величины выхода от удельной энергии налетающих атомов кластера (2) уделено в статье Р. J. Cumpson [5] (Рис. 2). Об актуальности подобного рода исследований свидетельствует наличие неопределённости в получаемых результатах, в частности, различия в итогах исследований Коробейщикова [4] и Yamada [6].

$$Y(n) = n \frac{(E/(An))^q}{1 + (E/(An))^{q-1}}, \quad (1)$$

$$Y(\epsilon_0) = n \epsilon_0 A \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\epsilon_0 - U}{s} \right) \right], \quad (2)$$

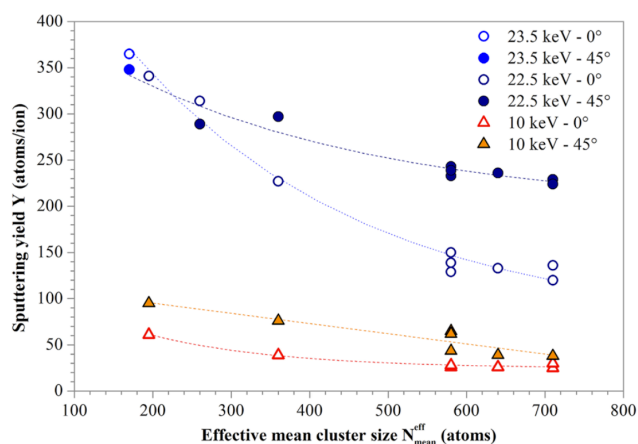


Рис.1 Зависимость выхода распыления SiO_2 от размеров кластеров. (Линии в качестве иллюстрации)

Так, в работе новосибирской лаборатории, хотя и были проведены измерения только для двух углов падения, показано, что для большего угла падения выход больше (при различных условиях), в то время как Yamada и др. получили максимальный выход при нормальном падении кластеров. (Рис.3)

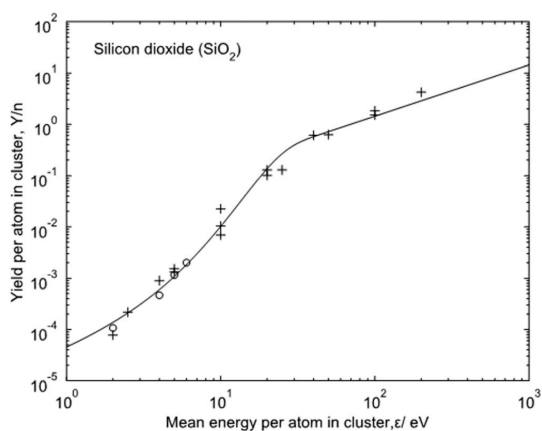


Рис.2 Зависимость выхода распыления SiO_2 от энергии кластера в расчёте на один атом.

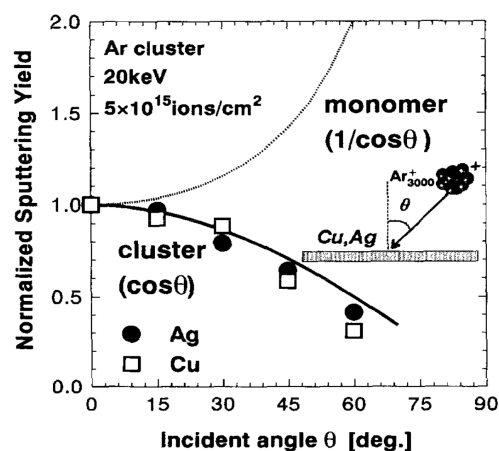


Рис.3 Зависимость выхода распыления (мономерами и кластерами) от угла падения. (Cu и Ag)

Существует также масса работ, посвященных компьютерному моделированию данного процесса. Например, в статье Jiting Tian [7] выполнено моделирование распыления фуллереном (C_{60}) серебряной мишени методом молекулярной динамики, а также, следуя гидродинамическому подходу, были учтены неупругие потери, что приблизило результаты их моделирования к экспериментальным. Ранее же, работы, использующие молекулярную динамику, давали значения, превышающие экспериментальные.

Эксперимент характеризуется не только выбором препаратов исследования и измеряемых величин, но и методом получения этих величин. Для измерения коэффициента распыления требуется найти количество распыленных с поверхности частиц. В упомянутой работе Cumpson [5] даны краткие описания доступных методов. Среди них: определение массы распыленного вещества, путем измерения размеров оставшегося от бомбардировки кратера методами СЗМ или оптического профилирования, и метод кварцевого микробаланса, Последний основан на измерении резонансной частоты кварцевого резонатора, которая зависит от массы абсорбированного на его поверхности вещества. Подробный анализ последней методики дан в обзоре того же автора [8].

Цели и задачи

Для реализации собственного эксперимента в этой области, требуется выбрать комбинацию препаратов и соответствующие методы получения интересующих величин. В качестве источника кластеров будет использоваться аргон, мишень - медь. Этот выбор обусловлен свойствами данных веществ (аргон - инертный газ, медь также проявляет слабую химическую активность), которые позволяют не учитывать вклад химического распыления. Из методов измерения коэффициентов распыления был выбран метод кварцевого

микробаланса. Он представляется наиболее перспективным, поскольку упомянутые методики, связанные с измерением массы распыленного вещества по объему кратера, требуют больших доз облучения, для его ярко выраженного проявления. Также не всегда удается сохранить топографию поверхности образца при его перемещении из камеры ускорителя к микроскопу или интерферометру. Метод кварцевого микробаланса не обладает этими недостатками. Распыленная масса измеряется в режиме реального времени в течение эксперимента, образец не требует извлечения из камеры ускорителя, и получать значения выхода можно и для малых доз.

Большое количество работ в данной области, разнообразие используемых подходов и условий, реализуемых в работах экспериментаторов, приближает исследователей к более глубокому пониманию механизмов распыления. В этом же представляется цель и настоящей работы, в которой предлагается получить коэффициент распыления медной мишени кластерами аргона, методом кварцевого микробаланса. Для этого потребуется реализовать устройство, позволяющее измерять резонансную частоту кварцевой пластины, выбрать, каким образом вещество-мишень будет размещено на микровесах, получить зависимость резонансной частоты схемы от распыленной массы меди, найти способ измерять количество упавших на образец частиц.

Методика эксперимента

Ускоритель кластерных ионов

Главным инструментом экспериментаторов в исследованиях, посвященных взаимодействию кластеров с веществом, очевидно, является ускоритель кластерных ионов (Рис. 4). Он представляет собой систему соединенных вакуумных камер, через которые проходят атомы аргона, используемого в нашем эксперименте. Требуемые значения давления обеспечиваются тремя форвакуумными насосами, диффузионным и турбомолекулярным насосом.

Образование кластеров происходит в первой камере ускорителя. Из системы газонапуска под давлением от 1 до 6 бар рабочий газ поступает в сверхзвуковое сопло. На выходе из сопла газ адиабатически расширяясь, охлаждается, и меньшая тепловая скорость атомов позволяет им «склеиваться». Для предотвращения рассеяния пучка и ослабления ударными волнами, камера заканчивается скиммером.

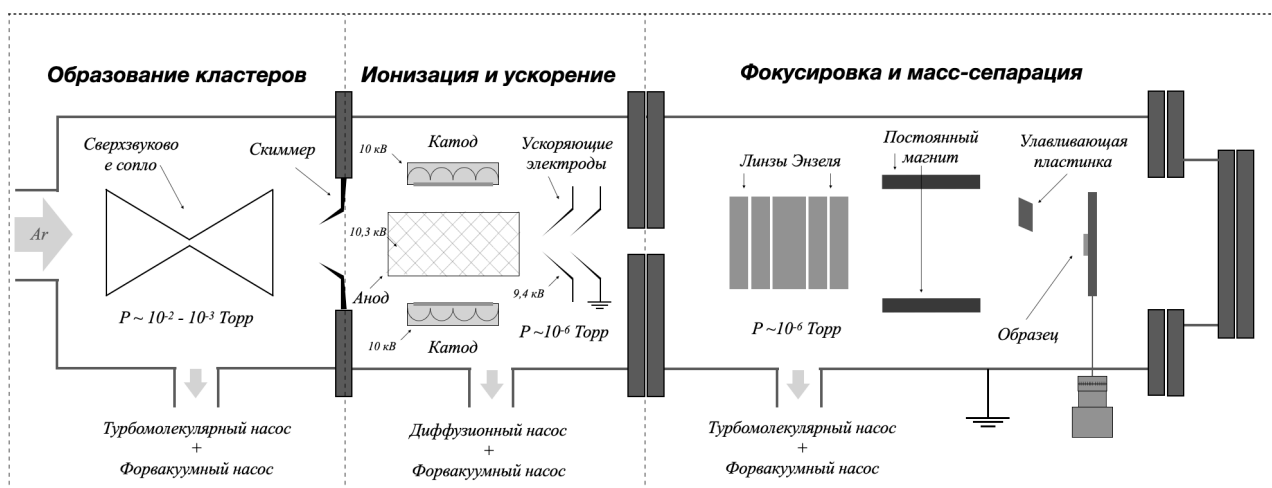


Рис.4 Ускоритель кластерных ионов

Поток сформированных кластеров далее попадает в следующую камеру, где находится система ионизации (см. Рис. 4). Катод состоит из молибденовой трубки, заполненной керамическим теплопроводящим порошком, отделяющим трубку от нагревательной вольфрамовой нити. Электронная эмиссия происходит с платинобариевого сплава на поверхности молибденовой трубки. Он обладает меньшей работой выхода, чем вольфрам или молибден, что позволяет работать при меньших температурах. Цилиндрическая сетка с положительным относительно катода потенциалом в 300 В играет роль анода. Данное распределение потенциала на элементах конструкции создаёт ускоряющее напряжение величиной 10кВ. Фокусировка пучка заряженных частиц происходит с помощью линзы Энзеля. Фокусирующее действие линзы реализуется за счёт особой конфигурации электрического поля, через которое проходят заряженные частицы. Для фильтрации легких частиц используется система из двух магнитов. Положительно заряженные частицы в постоянном магнитном поле двигаются по окружности, причем, по тем большего радиуса, чем больше их масса. Легкие частицы ($n < 100$), отклоненные магнитным полем попадают в собирающую пластинку и не достигают мишени. Таким образом удаётся рассматривать только "явно выраженные" кластеры.

Кварцевый микробаланс

В данном эксперименте для измерения коэффициента распыления будет использован метод кварцевого микробаланса. Данный метод основан на измерении сдвига резонансной частоты кварцевого резонатора (Рис. 5), зависящей от массы адсорбированного на его поверхности вещества.

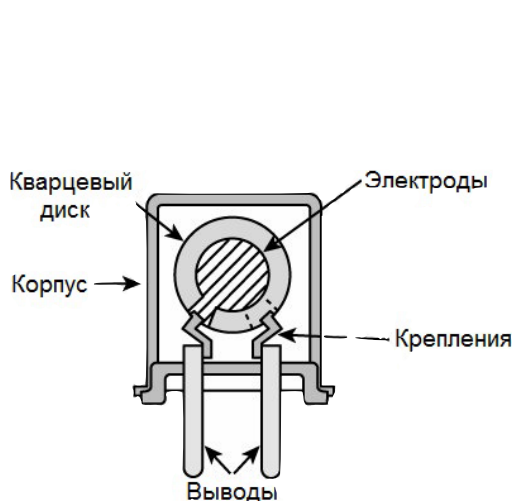


Рис.5 Кварцевый резонатор

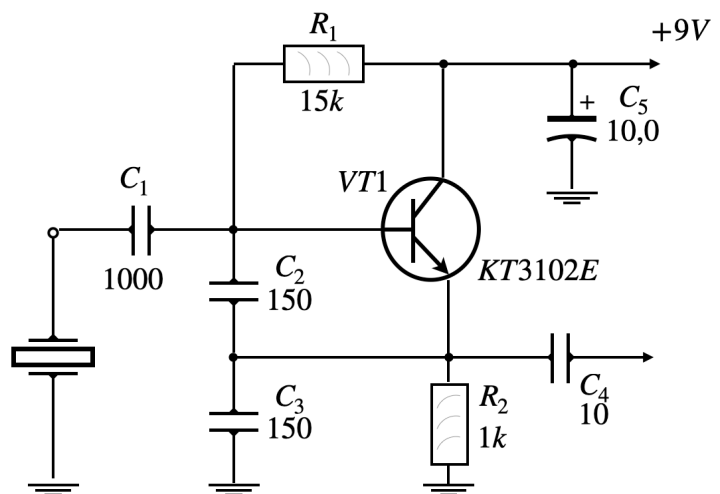


Рис.6 Электрическая схема кварцевого резонатора

Электрическая схема

Кварцевые резонаторы широко используются в электронике, являются основой работы микроконтроллеров и других устройств, в которых требуется стабильный, не зависящий температурных условий, источник гармонических колебаний. Эквивалентной схемой кварцевого резонатора является обычная RLC-цепь, но в отличие от неё, подобный

резонатор обладает заметно большей добротностью ($10^4 - 10^7$ у кварцевого элемента против ~ 100 обычных колебательных контуров). Для проверки работы кварцевого резонатора обычно собирают схему - тестер (Рис. 6). Если подключить элемент между землей и базой транзистора через защитную емкость $C1$, то на эмиттере транзистора можно регистрировать переменное напряжение на частоте резонанса.

Применение

В интересах эксперимента была собрана данная цепь с кварцевым резонатором частотой 4,8 МГц. Полученное устройство имеет вывод для питания 9 В и вывод для коаксиального кабеля частотомера. Сама пластина помещена в рабочую камеру ускорителя и соединена со схемой с помощью электрических вакуумных выводов. Такая конфигурация измерительного модуля, хотя и продиктована конструктивными особенностями экспериментальной установки, оказывается выгодной, поскольку сама электрическая схема не подвержена воздействию электромагнитного поля внутри камер ускорителя.

Измерение коэффициента распыления

Чтобы измерить коэффициент распыления, необходимо найти отношение числа распыленных с поверхности частиц к числу частиц упавших. Число упавших частиц или доза облучения рассчитывается путем интегрирования по времени ионного тока стекающего через медный образец и электрод резонатора на заземление. В данном случае измерение этого тока выполнить легко, поскольку и образец и электрод на кварцевой пластине, к которому подведены контакты, металлические, следовательно не возникает эффекта зарядки поверхности, как при облучении диэлектрических образцов. Для того, чтобы получить число распыленных частиц, на пластину кварцевого резонатора и на образец кремния через диафрагму той же площади будет напылен слой меди. Толщину этих слоёв полагаем одинаковой, ввиду одинаковых условий и времен напыления. Далее с помощью АСМ измеряется толщина слоя меди на кремнии на сколе образца. Таким образом окажется известной масса вещества на поверхности кварцевых микровесов. После распыления эта масса уменьшится на величину $\Delta M = N_{sp} \cdot \frac{\nu_{Cu}}{N_A}$, откуда тривиальным образом получается

число распыленных частиц $N_{sp} = \frac{\Delta M}{\nu_{Cu}/N_A}$. Зависимость изменения частоты от изменения

массы меди на микровесах полагаем $\frac{\Delta M}{M} = K \frac{\Delta f}{f}$, где $K \sim 1$. Тогда $\Delta M \approx M \frac{\Delta f}{f}$,

$$N_{sp} = \frac{M \cdot \Delta f / f}{\nu_{Cu} / N_A}; \quad (1)$$

Тогда коэффициент распыления, выраженный через известные константы и измеренные величины, окончательно запишется в виде:

$$S = \frac{N_{proj} \cdot \nu_{Cu} / N_A}{M \cdot \Delta f / f}. \quad (2)$$

Итоги

В данной работе был дан краткий обзор уже имеющихся исследований, посвященных изучению коэффициентов распыления кластерными ионами. Ввиду относительной новизны рассматриваемых явлений, была поставлена цель провести собственное исследование для пары аргон - медь. Для этого требовалось реализовать одну из методик измерения коэффициента распыления. Был выбран метод кварцевого микробаланса, как гибкий и простой в реализации.

Список используемой литературы

- [1] Sigmund, P. (1969). Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets. *Phys. Rev.*, 184, 383–416.
- [2] P. Sigmund, C. Claussen (1981). Sputtering from elastic-collision spikes in heavy-ion-bombarded metals. *Journal of Applied Physics* 52. 990
- [3] G.H. Takaoka, T. Okada, & M. Kawashita (2008). Angular dependence of sputtering effects by ethanol cluster ion irradiation on solid surfaces. *Vacuum*, 83(3), 459-462.
- [4] Korobeishchikov, N.G., Nikolaev, I.V., Roenko, M.A. *et al.* Precise sputtering of silicon dioxide by argon cluster ion beams. *Appl. Phys. A* 124, 833 (2018).
- [5] Cumpson, P., Portoles, J., Barlow, A., & Sano, N. (2013). Accurate argon cluster-ion sputter yields: Measured yields and effect of the sputter threshold in practical depth-profiling by x-ray photoelectron spectroscopy and secondary ion mass spectrometry. *Journal of Applied Physics*, 114(12), 124313.
- [6] H. Kitani, N. Toyoda, J. Matsuo, & I. Yamada (1997). Incident angle dependence of the sputtering effect of Ar-cluster-ion bombardment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 121(1), 489-492.
- [7] Jiting Tian, Wei Zhou, Qijie Feng, & Jian Zheng (2018). Molecular dynamics simulations with electronic stopping can reproduce experimental sputtering yields of metals impacted by large cluster ions. *Applied Surface Science*, 435, 65-71.
- [8] P J Cumpson and M P Seah (1990). The quartz crystal microbalance; radial/polar dependence of mass sensitivity both on and off the electrodes. *Meas. Sci. Technol.* 1 544-555