

6. Вольпян О.Д., Обод Ю.А., Яковлев П.П. Получение оптических пленок оксида цинка магнетронным распылением на постоянном и переменном токе// Прикладная физика. 2010. № 3.- С. 24-30.
7. Гусейнов Ф.Г., Мамедяров О.С. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики. М.: Энергоатомиздат, -1988. -150 С.

Распыление титана, нитрида титана, молибдена и меди ионами азота и кислорода

Д.В. Духопельников, В.А. Рязанов, С.О. Шилов, Д.К. Алексеев
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-ая Бауманская, д.5, 105005, rzn@bmstu.ru

В работе представлены экспериментальные данные результатов воздействия ионов реактивных газов на конструкционные материалы (титан, нитрид титана, молибден и медь). Обосновано использование магнетронной распылительной системы для исследования стойкости материалов в ионных пучках азота и кислорода. Приведены эффективные коэффициенты распыления титана, нитрида титана, молибдена и меди.

Sputtering of Titanium, Titanium Nitride, Molybdenum and Copper Induced By Ions of Nitrogen and Oxygen. D.V.Dukhopelnikov, V.A.Riazanov, S.O.Shilov, D.K.Alekseev. The work presents experimental data on the effects of reactive gas ions on structural materials (titanium, titanium nitride, molybdenum and copper). The usage of magnetron sputtering system to study the durability of materials in ion beams of nitrogen and oxygen is justified. The effective sputtering yields of titanium, titanium nitride, molybdenum and copper are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Титан, медь и молибден используются в качестве конструкционных материалов и покрытий в авиации, микроэлектронике, ракетостроении и многих других областях. В качестве функциональных материалов они встречаются в системах диагностики плазмы. В устройствах, где ионные потоки взаимодействуют с поверхностью, основным критерием, определяющим стойкость материала, является коэффициент распыления. Однако воздействие ионных потоков реактивных газов на исследуемые материалы изучено слабо [1]. При этом для диапазона энергий ионов от 300 до 800 эВ экспериментальные данные по коэффициентам распыления исследуемых материалов азотом и кислородом отсутствуют.

Возможность применения исследуемых материалов в качестве конструкционных для элементов электрических ракетных двигательных установок, работающих на заборном воздухе [2, 3], и как материалов многослойных покрытий, применяемых в методике ускоренных эрозионных испытаний [4], определяется их устойчивостью в ионных потоках реактивных газов.

Целью работы являлась определение эффективных коэффициентов распыления титана, нитрида титана, молибдена и меди ионами азота и смеси азота и кислорода в соотношении 2 к 1.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве моделирующего устройства была выбрана магнетронная распылительная система (МРС), так как процессы, протекающие на поверхности катода МРС, схожи с взаимодействием ионных потоков с элементами технологических холловских ускорителей ионов и электростатических ракетных двигателей. Возможность работы с различными материалами мишени и различными газами в широком диапазоне плотности ионного тока позволяют с легкостью использовать МРС для исследования воздействия ионных потоков на поверхность материалов.

Для немонотонного энергетического пучка ионов эффективный коэффициент распыления $S_{эф}$ и средняя энергия ионов $\langle e \rangle$ могут быть определены как:

$$S_{эф} = \int f(\varepsilon)S(\varepsilon)d\varepsilon, \quad (1)$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \int f(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon, \quad (2)$$

где $f(\varepsilon)$ – функция распределения ионов по энергиям,
 $s(\varepsilon)$ – коэффициент распыления в моноэнергетическом пучке ионов с энергией ε .

Анализ работ [5, 6] позволяет сделать вывод о том, что форма функции распределения ионов по энергиям на поверхности катода в МРС слабо зависит от материала катода, давления и рода плазмообразующего газа и индукции магнитного поля на поверхности катода. Это позволяет ввести функциональную зависимость коэффициента распыления от средней энергии ионов:

$$S_{эф}(\langle \varepsilon \rangle) = k \cdot S(\langle \varepsilon \rangle), \quad (3)$$

где k – константа,

$s(\langle \varepsilon \rangle)$ – коэффициент распыления в моноэнергетичном пучке ионов, при энергии ионов равной средней энергии ионов в МРС.

При этом средняя энергия ионов в МРС может быть оценена как:

$$\langle \varepsilon \rangle = \int_0^{eU_p} f(\varepsilon)d\varepsilon = 0,8 \cdot eU_p, \quad (4)$$

где U_p – напряжение разряда.

Исследования проводились на катодах из титана, молибдена и меди диаметром 50 мм и 105мм, установленных в соответствующие МРС. Для исследования распыления нитрида титана, на титановый катод наносилось покрытие нитрида титана TiN вакуумно-дуговым методом. При этом толщина наносимого покрытия выбиралась исходя из условия существенного изменения массы катода в результате распыления, при не полной проработке покрытия.

Остаточное давление в вакуумной камере не превышало $5,6 \cdot 10^{-4}$ Па. Давления рабочих газов лежали в диапазоне от $1,5 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^{-1}$ Па. Источник питания МРС работал в режиме постоянного тока заданное время. Величина напряжения стабилизировалась изменением расхода плазмообразующего газа. Катод взвешивался до установки в МРС и после распыления. Взвешивание проводилось на весах с точностью до 0,01 мг. Эффективный коэффициент распыления определялся по полученной разнице масс:

$$S = \frac{e \cdot (m_0 - m_1)}{m_p \cdot M_a \cdot I \cdot t} \quad (5)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ – элементарный электрический заряд, Кл;

$m_p = 1,6 \cdot 10^{-27}$ – масса протона, кг;

m_0, m_1 – массы образца до и после травления соответственно, кг;

M_a – атомная масса исследуемого материала, а.е.м.;

I – ионный ток, А;

t – время работы магнетрона, с.

Полученные экспериментальные зависимости эффективного коэффициента распыления от средней энергии ионов показаны на рис.1.

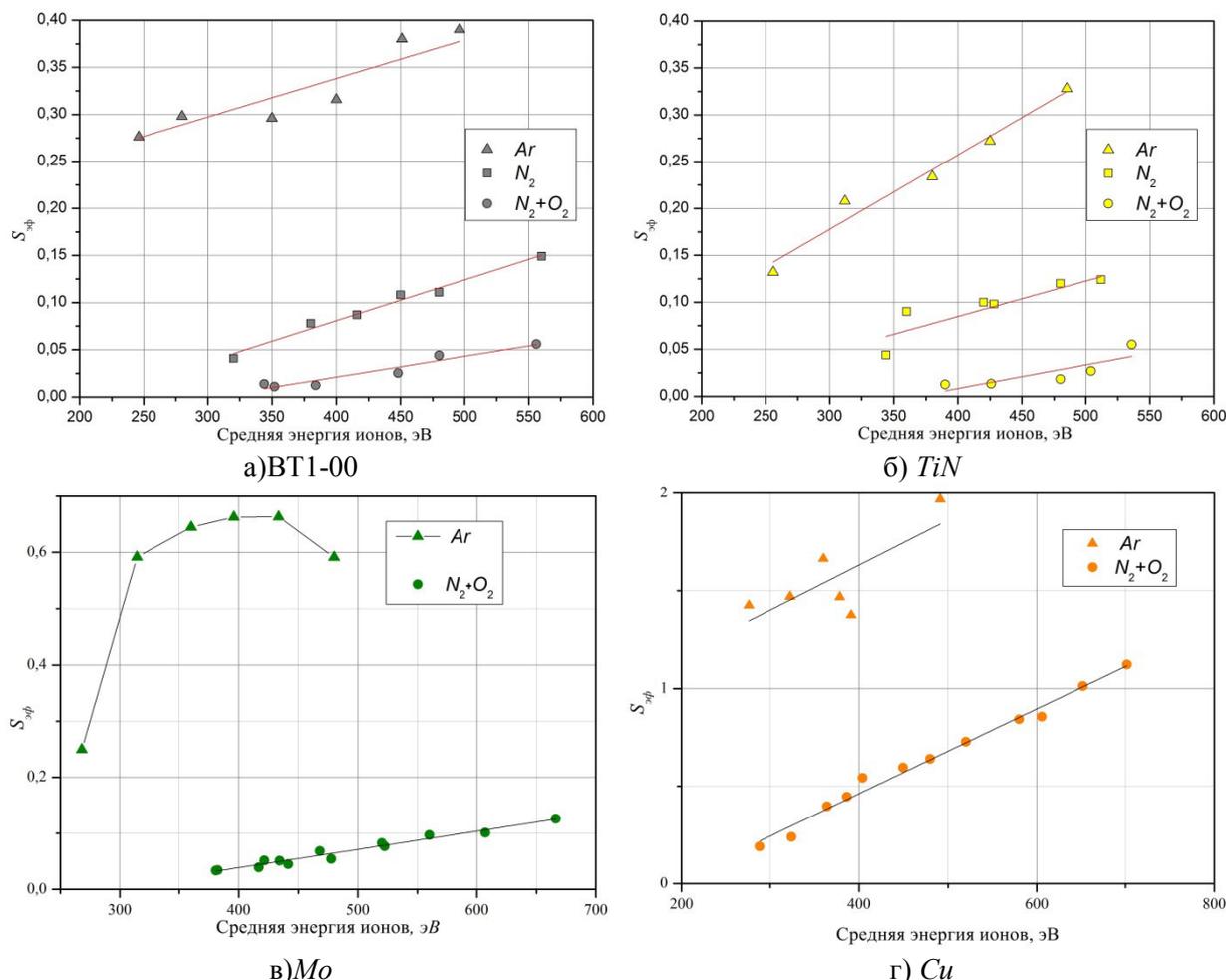


Рис. 1. Экспериментальные значения эффективного коэффициента распыления.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение данных о распылении титана и меди моноэнергетическим пучком ионов аргона [1, 7] с полученными позволяет говорить о справедливости предположения, о том, что эффективный коэффициент распыления может быть оценен как коэффициент распыления моноэнергетическим пучком ионов с энергией равной средней энергии ионов в МРС. При этом константа k в выражении (3) близка к единице. Например, для титана $k = 0,77$.

Анализируя полученные значения эффективных коэффициентов распыления, можно сделать вывод, что стойкость материалов при взаимодействии ионных потоков реактивных газов выше, чем при воздействии ионами инертных газов.

Высокая стойкость материалов при воздействии на них ионами реактивных газов может быть объяснена образованием на поверхности мишени оксидных и нитридных соединений. Эффективные коэффициенты распыления таких соединений меньше, чем у чистых материалов. Это, в свою очередь, объясняется распылением из образующихся пленок атомов не самого материала, а кислорода или азота. Распыленные атомы замещаются новыми из среды плазмообразующего газа. В результате даже после длительного воздействия масса мишени меняется не значительно, по сравнению с работой в среде инертных газов.

ВЫВОДЫ

1. Эффективные коэффициенты распыления титана, нитрида титана, молибдена и меди ионами азота и кислорода значительно ниже, чем коэффициенты распыления ионами аргона;
2. Эффективный коэффициент распыления может быть рассчитан как коэффициент распыления моноэнергетическим ионным потоком с энергией, равной средней энергии ионов в моделирующем устройстве.

Финансовая поддержка

Исследование эффективных коэффициентов распыления молибдена и меди ионами смеси азота и кислорода выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00522мол_а.

Литература

1. R. Behrisch, W. Eckstein (Eds.): Sputtering by Particle Bombardment, Topics Appl. Physics 110, 33–187 (2007).
2. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Рязанов В.А., Шилов С.О. О возможности использования холловского двигателя на забортном воздухе для удержания космического аппарата на низкой околоземной орбите//Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.2016. №12.С.57-71.
3. Ерофеев А.И., Никифоров А.П., Попов Г.А. и др. Разработка воздушного прямоточного электрореактивного двигателя для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов//Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 3. С.104-110.
4. Д.В. Духопельников, Е.В. Воробьев, С.Г. Ивахненко, Р.В. Ахметжанов, В.А. Обухов, Г.А.Попов, С.А. Хартов. Методика визуализации и определения профиля эрозии поверхности, вызванной ионной бомбардировкой. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.-2016, №1, с. 15-21.
5. Хохлов Ю.А. Плазменные ускорители с азимутальным дрейфом электронов для получения тонких оптических пленок: Дис. канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Баумана, 1987. 254 с.
6. Елистратов Н.Г. Экспериментальное моделирование взаимодействия плазмы изотопов водорода с элементами стенки реактора ИТЭР: Дис.канд. техн. наук. – Москва, 2004. – 192 с.
7. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой: Физ. распыление одноэлементных твёрдых тел. Пер. с англ./ Под ред. Р. Бериша. – М.: Мир, 1984. – 336 с., ил.

Определение профиля эрозии поверхности под действием ионной бомбардировки

Е.В. Воробьев, Д.В. Духопельников, С.О. Шилов
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
E-mail:duh@bmstu.ru

Предложена методика определения профиля распыления поверхности под действием ионной бомбардировки при помощи многослойных покрытий, предварительно нанесенных на исследуемую поверхность. В работе приведено математическое обоснование применимости методики и даны рекомендации по выбору параметров многослойных покрытий. Показано, что результаты измерения профиля травления при помощи описанной методики хорошо согласуются с прямыми измерениями при помощи профилометра.

The determination of the surface erosion profile under the ion bombardment. E.V.Vorobev, D.V.Dukhopelnikov, S.O.Shilov. The new technique to determine the surface sputtering profile under the ion bombardment is offered. The technique is based on sputtering of the multilayer coatings preliminarily applied to the test surface. The mathematical justification of the technique usage and the recommendations for the choice of multilayers coating parameters are presented. It is shown that the results of etching profile measurement obtained with this technique are in good agreement with direct measurements made with the profilometer.

Распыление поверхности твердых тел наблюдается во многих технических устройствах: технологических ионных источниках, ускорителях для ионно-лучевого формообразования [1],