

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],

магнетронных распылительных системах [2], электрических ракетных двигателях (ЭРД) [3] и других газоразрядных приборах. В некоторых приборах это явление является полезным. Например, в магнетронных распылительных системах благодаря ионному распылению технологические ионные источники и ускорители для ионно-лучевой обработки удаляют с поверхности изделий загрязнения и слои материала, а в магнетронных распылительных системах осуществляется распыление материала мишени. Но в ряде случаев ионное распыление имеет негативное значение, например распыление полюсов технологических ионных источников приводит к загрязнению поверхности подложек, а распыление элементов ионно-оптической системы ЭРД ограничивает их ресурс. При проектировании газоразрядных устройств необходимо оперативно определять профили распыления обрабатываемой поверхности и элементов самого устройства.

При отработке конструкции ускорителя возникает необходимость быстрой экспериментальной оценки места, формы и скорости распыления элементов ускорителя. При размерной ионно-лучевой обработке важно знать истинные распределения плотности ионного пучка и получаемые выработки поверхности с учетом всех неравномерностей по глубине и в плоскости обработки.

Для исследования топологии поверхности оптических деталей обычно используются интерферометрические методы измерения. Наиболее распространены приборы на основе интерферометра Физо [4]. В этом приборе интерференционная картина формируется в результате интерференции лучей, отраженных от исследуемой и эталонной поверхности. В качестве эталонной поверхности используется оптический клин, в результате интерференционная картина представляет собой набор чередующихся темных и светлых полос, по форме которых вычисляется топология поверхности. Реализация этого метода требует оптически гладкой и близкой к плоскости поверхности деталей, что затруднительно при работе с изделиями сложной формы и элементами конструкций газоразрядных устройств.

Особенно актуальна возможность быстрого определения профиля эрозии элементов ионно-оптической системы электрических ракетных двигателей, так как в настоящее время такие измерения проводятся напрямую после нескольких сотен часов работы. Особенно это важно при проектировании электрических ракетных двигателей, работающих на нетрадиционных рабочих веществах, таких как заборный воздух [5].

В данной работе рассматривается метод определения скорости распыления и профиля эрозионной выработки для экспресс-диагностики технологических ионных источников и настройки ионных пучков при размерной ионно-лучевой обработке. Метод основан на распылении предварительно нанесенного на исследуемую поверхность многослойного покрытия, состоящего из оптически контрастных материалов.

Если нанести на поверхность многослойное покрытие, состоящее из оптически контрастных материалов, например медь и алюминий, то полученная при распылении выработка будет визуализироваться в виде разноцветных полос. При этом границы между полосами будут изолиниями, соответствующими равной глубине выработки.

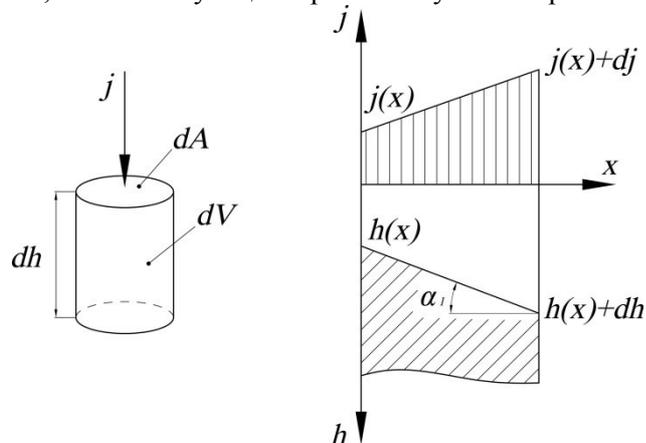


Рис. 1. Схема определения профиля распыления.

При ионном распылении с поверхности dA уносится масса вещества dm , и объемом dV (рис.1):

$$dm = \rho dV = \rho dh dA \quad (1)$$

где ρ - плотность распыляемого вещества.

Тогда глубина эрозии составит dh :

$$dh = \frac{dm}{\rho dA} \quad (2)$$

Масса вещества dm распыленного за время dt может быть определена как:

$$dm = \frac{M_a S(\varepsilon_i)}{q} dJ dt = \frac{M_a S(\varepsilon_i)}{q} j dA dt \quad (3)$$

где M_a - масса атома распыляемого вещества;

S - коэффициент распыления, зависящий от энергии ионов ε_i ;

j – плотность ионного тока;

q – заряд иона.

Тогда глубина выработки h за время t составит:

$$h = \frac{M_a S(\varepsilon_i)}{q \rho} j t \quad (4)$$

При неоднородном распределении плотности ионного тока глубина выработки будет изменяться по поверхности. Если считать энергию ионов ε_i постоянной (коэффициент распыления S постоянный) то при изменении плотности тока по поверхности dj/dx , поверхность будет выработываться под углом α (рис. 2а):

$$\alpha = \frac{dh}{dx} = \frac{M_a S t}{q \rho} \frac{dj}{dx} \quad (5)$$

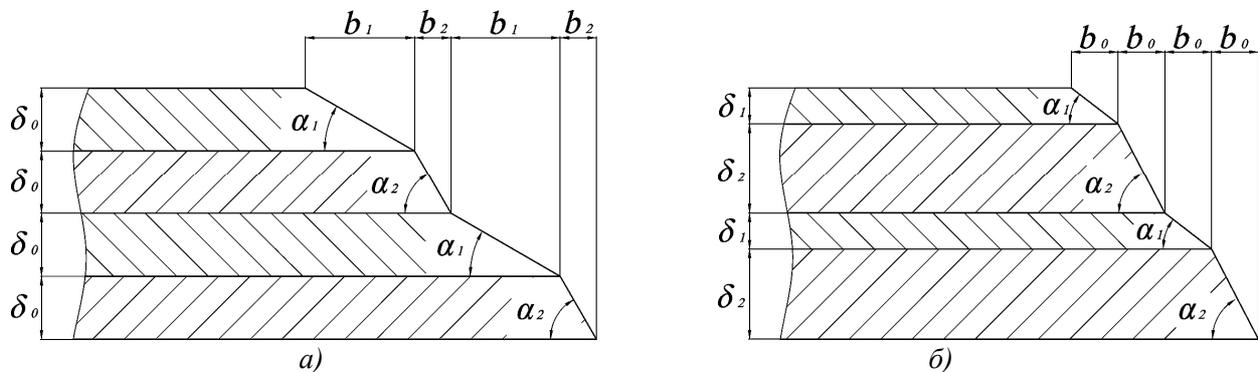


Рис.2. Профиль распыления многослойного покрытия:
(а) – с равной толщиной слоев; (б) – с равной шириной полос.

При травлении поверхности с многослойным покрытием видимая ширина b_i полосы соответствующей слою i толщиной δ_i будет определяться как:

$$b_i = \frac{\delta_i}{\alpha_i} \quad (6)$$

Если покрытие состоит из слоев одинаковой толщины $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$ с разными коэффициентами распыления $S_1 < S_2$ то углы α_i и видимая ширина полос b_i будет разной при одном градиенте плотности ионного тока (рис. 2б) $\alpha_1 < \alpha_2$, $b_1 > b_2$.

Если для толщин слоев из разных материалов выполняется соотношение:

$$\frac{\delta_1}{(M_{a1} S_1 / \rho_1)} = \frac{\delta_2}{(M_{a2} S_2 / \rho_2)} = C \quad (7)$$

где M_{at} - масса атома распыляемого вещества;
 S_i - коэффициент распыления;
 ρ_i - плотность распыляемого вещества;
 C – константа.

то при постоянном градиенте плотности ионного тока ширина полос будет одинаковой:

$$b_1 = b_2 = \frac{\delta_i}{\alpha_i} = \frac{C}{t} \frac{1}{dj/dx} \quad (8)$$

Для определения профиля травления поверхности под действием ионной бомбардировки на нее наносились многослойные покрытия, состоящие из слоев меди и алюминия. Покрытия наносились в ионно-плазменной установке БЭТА-500 производства компании «ООО «НПП УВН» [6] при помощи магнетронных распылительных систем MPC-105 [7]. В качестве подложек использовались стеклянные пластинки размерами 20x50x2 мм (для верификации предлагаемой методики) и 50x50x3 (для исследования профиля распыления скорости травления при ионно-лучевой обработке) мм, установленные на вращающемся подложкодержателе. Скорость роста покрытий определялась по образцам-свидетелям методом ступеньки при помощи стилусного профилометра 17622, производства завода «Калибр», который также использовался для верификации результатов определения профиля травления по картинам распыления.

Исследование профиля поверхности по визуальным картинам эрозии производилось при помощи микроскопа CarlZeissAxioImagerZ2m. Для получения профиля поверхности на микрофотографиях измерялись расстояния между границами полос, образованных медным и алюминиевым слоями. Глубина травления вычислялась по суммарной толщине всех вышележащих слоев.

Для верификации предлагаемой методики нанесения покрытия на образцы 20x50x2 мм наносились два типа покрытий:

- 8 чередующихся слоев меди и алюминия толщиной 130 нм;

- 8 чередующихся слоев меди и алюминия, толщина медных слоев составляла 340 нм, алюминиевых – 130 нм.

После нанесения покрытий они распылялись в ионном пучке ускорителя с анодным слоем УАС-200 [8]. При этом образцы устанавливались поперек ионного пучка на расстоянии 10 мм от среза ускорительного канала. Ускоритель работал на аргоне при напряжении разряда 3000 В и токе разряда 75 мА.

На рис. 3 показаны профили эрозии образцов с многослойными покрытиями обоих рассматриваемых типов. Видно, что профили эрозии, определенные по картинам распыления хорошо согласуются с результатами, полученными при помощи прямых измерений стилусным профилометром.

Покрытие для исследования профиля распыления поверхности при помощи источника ионов для ионно-лучевого формообразования наносилось на подложки размерами 50x50x3 мм и состояло из 10 чередующихся слоев меди и алюминия толщиной 100 нм каждый. Распыление покрытия производилось при помощи ионного источника ИИ-100К, ионный пучок которого имеет гауссово распределение плотности ионного тока по радиусу на расстоянии 400 мм от среза ускорительного канала. Держатель с образцом устанавливался на расстоянии 400 мм от ускорителя. Обработка образца производилась через отверстие в держателе диаметром 44 мм. Ионный источник работал на аргоне, напряжение разряда составляло 3000 В, ток – 110 мА. Обработка образца производилась до сквозного распыления покрытия в точке с максимальным ионным пучком.

На рис. 4а показана фотография образца с распыленным покрытием, а на рис. 4б – профиль выработки поверхности, полученный по изображению и график зависимости плотности ионного тока от радиуса ионного пучка. Видно, что профиль выработки поверхности уже, чем профиль плотности ионного пучка. Это объясняется тем, что ионы с низкими энергиями сильнее отклоняются магнитным полем в ускорительном канале и попадают в периферийные области ионного пучка. Также в этой области оказываются ионы перезарядки.

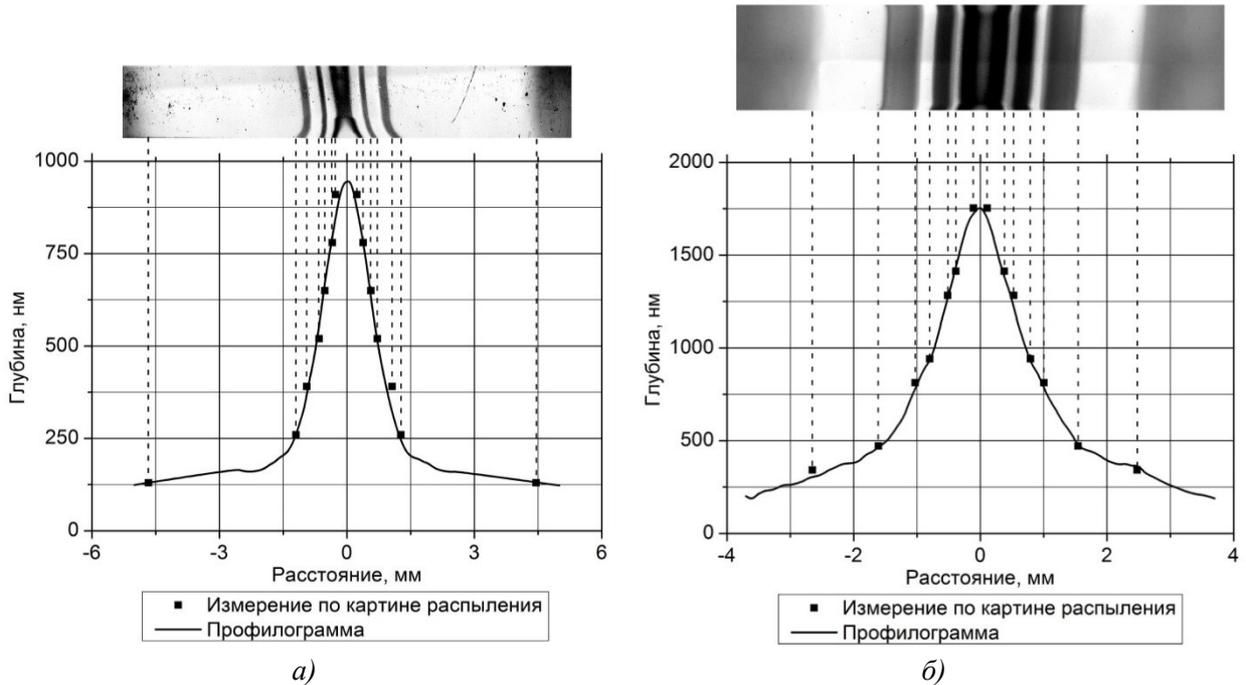


Рис. 3. Сравнение результатов измерения профиля поверхности образца, полученных по картине эрозии и с помощью механического профилометра:
(а) – покрытие состоит из слоев равной толщины; (б) – покрытие состоит из слоев с равным временем нанесения.

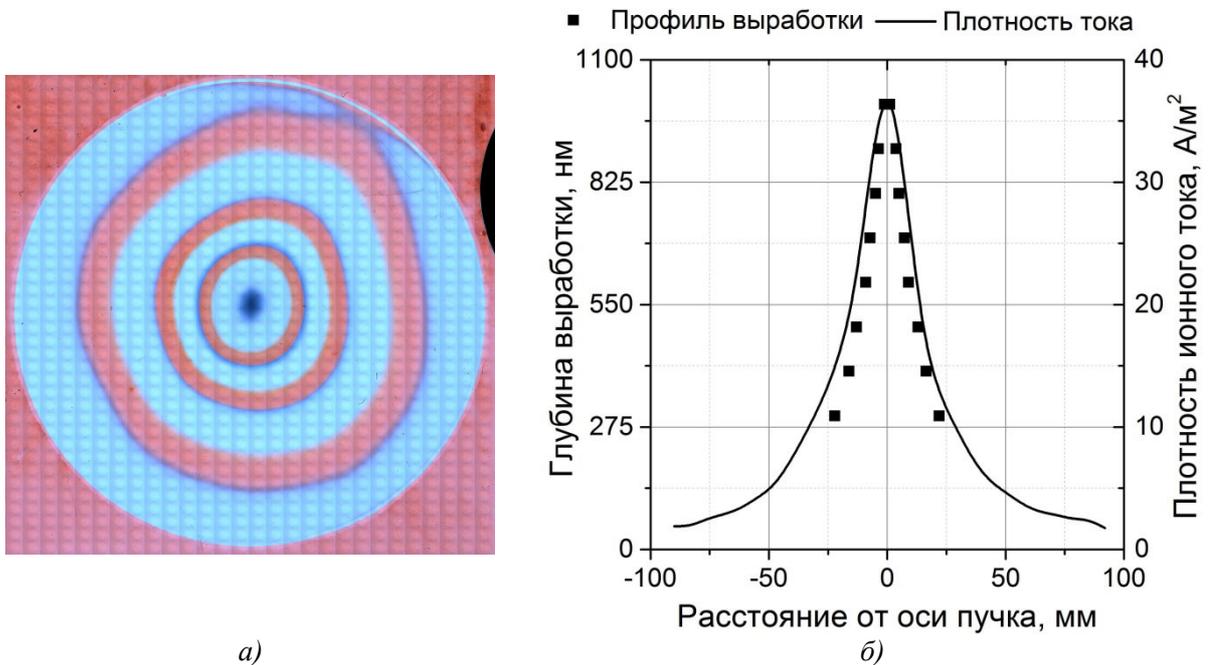


Рис. 4. Изображение поверхности образца с многослойным покрытием после обработки ионным пучком ускорителя для ионно-лучевого формообразования:
(а) – фотография поверхности; (б) – профиль выработки поверхности и зависимость плотности ионного тока от радиуса пучка.

Приведенные результаты показывают, что предлагаемая методика позволяет быстро и с высокой точностью определить профили выработки поверхности под действием ионной бомбардировки. В случае моноэнергетичных пучков (например в сеточных ЭРД), зная

коэффициенты распыления материалов слоев и энергию ионов, по изображениям распыленной поверхности можно определить распределение плотности ионного тока. Предложенная методика также позволяет определять скорости износа элементов самих ионных источников, а также других газоразрядных приборов (например, ускоряющего электрода ионно-оптической системы электростатических ионных двигателей). Для этого многослойные покрытия необходимо наносить на поверхность исследуемых деталей. При этом форма поверхности слабо влияет на точность измерения, которая ограничивается лишь точностью нанесения толщины и количеством слоев в покрытии.

Важное преимущество описанной методики заключается в том, что предварительную оценку профиля эрозии обработанной ионным пучком поверхности можно сделать без использования сложных измерительных приборов. Картины зоны травления видны невооруженным взглядом, либо с использованием простейшей оптики, такой как лупа.

Литература

1. Духопельников, Д.В., Воробьев, Е.В., Ивахненко, С.Г., Кириллов, Д.В. Управление формой пучка технологического ионного источника для высокоточной обработки поверхности // Вестник Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана. Серия: естественные науки. 2017. № 3. С. 24-36.
2. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы. В 2 ч. Ч. 1. Устройство, принципы работы, применение: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 53 с.
3. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. – М.: Изд-во МАИ, 2012. -292 с.: ил.
4. Полещук А. Г., Насыров Р. К., Маточкин А. Е., Черкашин В. В., Хомутов В. Н. Лазерный интерферометр ФТИ-100//Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5. № 3. С. 25-31.
5. 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.
6. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г., Булычев В.С., Рязанов В.А., Афонин О.И. Решения МГТУ им. Н.Э. Баумана и компании «НПП «УВН» для тонкопленочной технологии оптической и электронной промышленности. Материалы XII Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология». Москва, Новелла, 2017.
7. Духопельников Д.В. Измерение индукции магнитного поля и моделирование холловского тока в разряде магнетронной распылительной системы // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 10.
8. Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Исследование и оптимизация характеристик ионного источника ИИ-200 // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10.