МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 67.05

Исследование распределения толщины покрытия и углового распределения испаренного материала вакуумно-дугового испарителя с алюминиевым катодом

Клюева В. А., студент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Плазменные энергетические установки»

Научный руководитель: Духопельников Д.В., к.т.н, доцент Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана duh@power.bmstu.ru

Введение

Метод вакуумно-дугового испарения широко используется для нанесения упрочняющих, защитных, жаропрочных и декоративных покрытий. С помощью вакуумно-дугового испарения осуществляется нанесение покрытия при высоких скоростях осаждения покрытия и низкой энергоемкости [1]. В вакуумно-дуговых испарителях используется дуговой разряд с холодным катодом в вакууме. На катоде разряд локализуется в виде хаотически движущихся по поверхности сильно разогретых катодных пятен. В катодных пятнах происходит генерация сильно ионизованного вещества катода, необходимого для поддержания тока в межэлектродном промежутке [2]. Для повышения эффективности использования материала катода применяют как аксиальное, так и арочное магнитное поле [3,4,5]. Чистота получаемых покрытий обеспечивается низким остаточным давлением в камере и высокой скоростью осаждения покрытия. Хорошая адгезия обеспечивается предварительной обработкой поверхности ионным пучком [6].

Для разработки технологических процессов нанесения покрытий важно знать распределение потоков испаряемого материала и профиль толщины покрытия на плоской подложке при различных режимах работы. Так как вакуумно-дуговое испарение является термическим методом, то следует ожидать, что распределение испаряемого материала с торцевого катода вакуумно-дугового испарителя будет подчиняться косинусоидальному закону Ламберта-Кнудсена [3]. Данный факт проверялся экспериментально на кремниевом катоде [4]. Однако на различных материалах меняется характер движения

http://sntbul.bmstu.ru/doc/723174.html

катодного пятна, что может привести к различию в угловом распределении потоков испаренного материала. При выработке катода диаграмма распределения потока материала может меняться за счет изменения формы катода.

Целью данной работы было определение распределения толщины алюминиевого покрытия на плоской подложке полученного торцевым вакуумно-дуговым испарителем и определение углового распределения потоков испаренного алюминия.

Экспериментальное оборудование

Испытания проводились на автоматизированном вакуумном экспериментальном стенде, предназначенном для испытаний ионно-плазменных технологических устройств (рис.1). Установка имеет камеру диаметром 700 мм и длиной 500 мм и оснащена форвакуумным роторно-пластинчатым насосом Oerlikon Leybold TRIVAC D 65B производительностью 18 л/с и турбомолекулярным насосом Oerlikon Leybold TURBOVAC TW 2401 производительностью 2,4 м³ л/с. Установка обеспечивает предельный остаточный вакуум 1х10⁻⁴ Па. Система управления выполнена на базе промышленного компьютера. Установка снабжена всеми необходимыми системами питания плазменных устройств. Газоподача осуществлялась регулятором массового расхода газа Mass Flow Controller 2179А. Измерения вакуума производились вакуумным датчиком Vacuum Transducer 972 DualMag в камере и вакуумным датчиком 925 MicroPirani Vacuum Transducer на вакуумной магистрали.

Исследования потоков испаренного материала проводились на вакуумно-дуговом испарителе, разработанном в НОЦ «Ионно-плазменные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Вакуумно-дуговой испаритель имеет диаметр катода 100 мм и выполнен по схеме с торцевым охлаждаемым катодом с фиксацией катодного пятна электростатическим экраном и осесимметричным расходящимся магнитным полем для обеспечения равномерности выработки катода. В качестве источника питания использовался сварочный выпрямитель EWM TETRIX 270 DC с блоком управления дуговым испарителем, обеспечивающим питание магнитной системы, защиту блока питания, зажигание и гашение разряда. Зажигание разряда осуществлялась инжекцией плазы в разрядный промежуток.

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038, ISSN 2307-0609



Рис. 1. Автоматизированный вакуумный экспериментальный стенд, предназначенный для испытаний ионно-плазменных технологических устройств

Измерение толщины покрытия на поверхности образцов проводилось методом ступеньки [5] на контактном профилометре завода «Калибр» модель 170622 с механотронным преобразователем. Скорость движения алмазной иглы составляла 0,2 мм/с, длина прохода – 10 мм. Ступенька формировалась на покрытии наложением маски из тонких стальных сменных пластинок, которые прижимались к стеклу пружиной.

Эксперимент

Дуговой испаритель располагался на торцевом фланце вакуумной камеры. Подложка устанавливалась напротив дугового испарителя перпендикулярно его оси на расстоянии 140 мм от катода. Подложка, на которой проводилось напыление, представляла собой отрезок флоат-стекла М1 толщиной 3 мм, шириной 100 мм и высотой 600 мм. К подложке была прикреплена маска, в роли которой выступали тонкие стальные пластины. Со стороны ступеньки на пластинах была снята фаска, обеспечивающая более резкие очертания ступеньки. Напряжение разряда составляло 18,5 В ток разряда - 100 А, давление в камере - 1х10⁻⁴ Па.



Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – катод дугового испарителя, 2 – дуговой разряд, 3 – подложка, 4 – поток испаренного материала, 5 – вакуумная камера

Исследования проводились на практически не выработанном катоде. Перед нанесением покрытия новый катод прорабатывался в течении 30 минут. Покрытие наносилось 4 минуты.

Измерение толщины покрытия проводились с помощью профилометра на всей длине подложки с шагом 50 мм, в каждой точке не менее 5 раз. Распределение толщины покрытия полученное экспериментально показано на рисунке 3. Максимум толщины покрытия наблюдается на оси катода. Наибольшая толщина покрытия составила 3,64 мкм. На периферии толщина покрытия резко падает.



Рис. 3. Распределение толщины покрытия по длине подложки

Угловое распределения потока испаренного алюминия

Угловое распределение потока испаренного материала определяется как распределение потока материала $dM(\varphi)/dt$, перенесенного из катода в телесный угол $d\omega$ в направлении угла φ между нормалью к испарителю и направлением потока. Рассмотрим плоскую подложку, расположенную на расстоянии R_0 от катода испарителя. Координате xна подложке будет соответствовать угол φ (рис.4). Расстояние от поверхности катода до площадки подложки с координатой x будет равно $R(\varphi)$. На расстоянии x от оси испарителя толщина покрытия $\delta(\varphi)$, нанесенного на плоскую подложку за время t, может быть определена как:

где: *ds*-элементарная площадка покрытия; р-плотность материала покрытия.

Расстояние от испарителя до точки подложки с координатой *x*, которой соответствует угол ϕ , будет равно:

Из (1), с учетом (2) получаем:

Тогда угловое распределение потока испаренного материала в безразмерном виде может быть определено как:



Рис. 4. Схема распределения испаренного материала по подложке

Угловое распределение потока испаренного из плоского точечного источника вещества подчиняется косинусоидальному закону Ламберта – Кнудсена [3]:

$$\frac{dM(\varphi)}{dt} = \frac{dM_0}{dt} \frac{\cos(\varphi)}{\pi} d\omega$$
(5)

где: $dM(\phi)/dt$ – поток вещества, испаряемый в телесный угол ω в направлении угла ϕ ;

 dM_0/dt – суммарный поток испаренного вещества;

 $d\omega$ - телесный угол, в который испаряется поток $dM(\varphi)$.

Из закона Ламберта-Кнудсена следует, что испарение материала катода преимущественно осуществляется в направлениях, близких к нормали к испаряемой поверхности, так как именно в этих направлениях $\cos(\phi)$ имеет наибольшую величину. Угловое распределение Ламберта-Кнудсена, построенное в полярных координатах представляет собой окружность с диаметром равным $dM(0)/\pi dt$. В безразмерной нормализованной форме закон Ламберта-Кнудсена может быть записан как:



The good in the

attor

di di

(6)

Рис. 5. Угловое распределение потока испаренного материала: 1-поток из дугового испарителя; 2- закон Ламберта-Кнудсена

На рисунке 5 показаны угловые распределения потока испаренного материала соответствующие закону Ламберта-Кнудсена и дуговому испарителю (расчет по выражению (4)).

Из рисунка 5 видно, что угловое распределение потока испаренного материала отклоняется от косинусоидального закона Ламберта-Кнудсена, имеющего вид окружности в полярных координатах. При малых углах ϕ угловая плотность потока превышает кривую Ламберта-Кнудсена. При больших углах ϕ угловая плотность потока меньше, чем ожидаемая.

Сужение графика на больших углах φ можно объяснить влиянием буртика на кромке катоде, который перехватывает часть испаренного вещества. Отклонение от косинусоидального закона при малых углах φ можно объяснить тем, что размеры катода соизмеримы с расстоянием от источника до подложки.

Выводы

1. Проведенный эксперимент показывает реальное распределение толщины напыляемого покрытия по длине плоской подложки, установленной перпендикулярно оси дугового испарителя.

2. Угловое распределение потока испаренного материала, рассчитанное по распределению толщины покрытия на плоской подложке, отклоняется от косинусоидального закона Ламберта-Кнудсена. Причины этого отклонения объясняются наличием буртика на кромке катода и малым расстоянием от катода до подложки.

3. Для получения более точного углового распределения испаренного материала необходимо располагать подложки по окружности, центром которой является катод на расстоянии, значительно превышающем его размеры.

Список литературы

- 1. Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. 236 с.
- Месяц Г.А., Баренгольц С.А. Механизм генерации аномальных ионов вакуумной дуги // УФН. 2002. Т. 172, № 10. С. 1113-1130.
- Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 01. Режим доступа: <u>http://technomag.edu.ru/doc/256359.html</u> (дата обращения 20.05.2014).
- Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя с арочным магнитным полем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012 № 11. Режим доступа: <u>http://technomag.edu.ru/doc/482485.html</u> (дата обращения 20.05.2014).
- 5. Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К. Структура и особенности движения катодного пятна вакуумной дуги на протяженном титановом катоде // Измерительная техника. 2005. № 10. С. 42-44.
- Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Исследование и оптимизация ионного источника ИИ-200 // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10. Режим доступа: <u>http://www.technomag.edu.ru/doc/230165.html</u> (дата обращения 20.05.2014).

- Технология тонких пленок: справочник. Т. 1. Изготовление тонких пленок : пер. с англ. / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. М.: Советское радио, 1977. 664 с.
- Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Мелик-Парсаданян А.К., Пархоменко Ю.Н. Вакуумная дуга с монокристаллическим кремниевым катодом для получения наноструктурированных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 9. С. 22-27.
- 9. Костржицкий А.И., Карпов В.Ф., Кабанченко М.П. Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1991. 176 с.