

ЭФФЕКТИВНАЯ ИОННАЯ ОЧИСТКА В РАЗРЯДЕ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОНА СО СТРУКТУРОЙ ПОЛОГО КАТОДА

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнетронное распыление является одним из наиболее часто используемых методов для осаждения тонких пленок и ионного травления [1-7]. Магнетронные системы имеют различные преимущества, включая генерацию "чистой" плазмы (отсутствие микрочастиц) и достаточно высокие скорости осаждения (порядка 0,1 мкм/мин) при относительно низких температурах подложки (порядка 500 К).

Магнетронный разряд является существенно тлеющим разрядом, который поддерживается вторичной электронной эмиссией с поверхности катода, который подвергается бомбардировке ионами высоких энергий. Отличительной чертой магнетронного разряда является использование магнитного поля, форма которого существенно влияет на структуру разряда и силу разрядного тока [8]. Обычно слабое магнитное поле (порядка 10^{-3} - 10^{-1} Т) не может повлиять на движение ионов ("замагнитить"), поэтому только электроны рассматриваются как "замагнитенная" составляющая. В условиях ограниченной подвижности поперек магнитного поля каждая линия магнитного поля рассматривается как приблизительно эквипотенциаль электрического поля. Вследствие этого происходит существенное изменение электрического потенциала в плазме и существование достаточно сильных электрических полей, которые могут быть использованы для ускорения ионов в направлении перпендикулярно магнитному полю [9-12]. Магнитное поле, перпендикулярное электрическому полю, увеличивает полный пробег электронов и обеспечивает высокую скорость ионизации. Ограничение подвижности вторичных электронов магнитным полем возле катода (закрытый дрейф) также создает высокую плотность плазмы.

Как правило, магнетронные распылительные устройства используются в качестве источника плазмы и паров материала катода, которые затем транспортируются к подложке, где необходимо произвести травление или осаждение покрытия. Ранее было показано, что катод планарного магнетрона сам по себе может быть использован как подложка для немагнитных деталей, которые можно эффективно разогреть для последующего осаждения покрытия с высокой адгезией [10]. Однако широкое применение магнетрона как устройства для эффективной очистки, а не просто разогрева, сдерживается существенной неоднородностью распределения ионного тока вдоль

поверхности катода. Вследствие этого распылению подвергается относительно небольшая площадь поверхности катода. Для устранения этого недостатка и более равномерного распыления поверхности катода применяют различные методы, например, взаимное перемещение магнитного поля и катода или использование несбалансированных магнетронов, когда внутренние и внешние магниты создают неодинаковую индукцию магнитного поля (сильный периферический и слабый центральный постоянные магниты) [7].

В данной работе показано, что использование соленоида, установленного под катодом со структурой полого катода, позволяет получить устройство для более равномерного распыления поверхности катода. Получены распределения плотности ионного тока вдоль поверхности катода в зависимости от давления рабочего газа и индукции приложенного магнитного поля, которые позволяют сделать вывод о том, что устройство может быть использовано для эффективной ионной очистки неферромагнитных деталей перед последующим осаждением покрытия.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка показана схематически на рис. 1. Соленоид (4100 витков) цилиндрической формы диаметром 150 мм и высотой 106 мм (внутренний диаметр 45 мм) был установлен в цилиндрической вакуумной камере (500×500 мм) под подложкой-катодом.

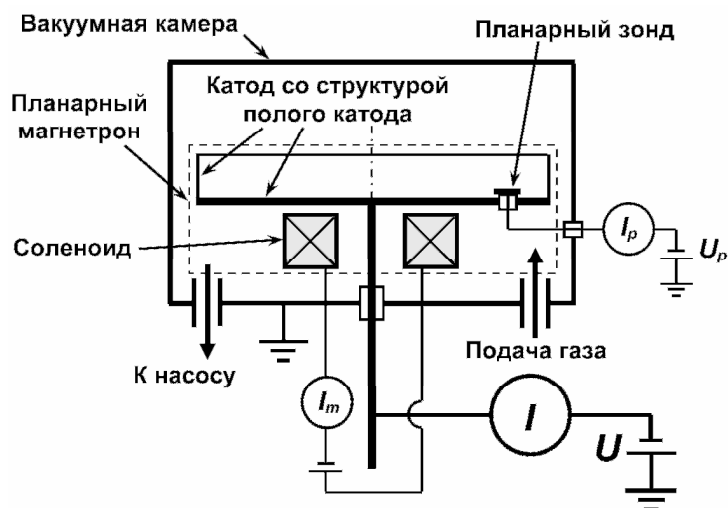


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Катод состоял из диска из полированной нержавеющей стали диаметром 400 мм и толщиной 8 мм с установленной на него кольцевой структурой, изготовленной из ленты полированной нержавеющей стали шириной 84 мм и толщиной 2 мм. В результате этого катод имел структуру полого катода. Таким образом, обеспечивались замыкание силовых линий на поверхности катода и замкнутый дрейф электронов,

т.е., устройство представляло собой планарный магнетрон со структурой полого катода.

Автоматическая система подачи газа поддерживала давление азота в пределах от 0,01 до 10 Па. Давление измерялось с помощью термпарного и ионизационного датчиков. На катод подавался отрицательный потенциал по отношению к заземленным стенкам вакуумной камеры.

Эксперименты проводились в таких условиях. Ток соленоида изменялся в диапазоне от 1,6 до 2,2 А. Давление рабочего газа изменялось в диапазоне от 1,1 до 1,7 Па при постоянной величине индукции магнитного поля. На катод подавалось отрицательное напряжение смещения в диапазоне от 250 до 1300 В. В этих условиях возникал самоподдерживающийся магнетронный разряд, и измерялись распределения плотности ионного тока вдоль поверхности катода (вдоль поверхности дисковой и боковой частью) для разрядных токов 5, 10 и 15 А.

Планарный зонд использовался для измерения распределения плотности осевого ионного тока как функции положения зонда вдоль поверхности подложки. Зонд представлял собой подвижную (20×20×0,5 мм) токопроводящую пластину, изготовленную из полированной немагнитной нержавеющей стали. Он устанавливался на подложке и изолировался от нее с помощью высокотемпературного изолятора. Зонд подсоединялся к источнику питания через отдельный амперметр. При включении разряда падение напряжения между зондом и анодом составляло не менее 250 В; таким образом зонд принимал ионный ток насыщения [14]. Длительность каждого цикла измерения составляла 2 с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Разряд возникал в форме яркого светящегося плазменного тора, заполняющего объем катода за исключением центральной области; фотография разряда показана на рис. 2. При увеличении тока, визуально наблюдаемые размеры разряда увеличивались, затем оставались практически постоянными в широком диапазоне токов, при этом увеличивалась только яркость разряда. Ионы, возникающие в этой зоне, ускоряются по направлению к катоду, вызывая его эрозию в области, называемой зоной распыления.

Яркость разряда и ионный ток показали сильную зависимость от давления рабочего газа и приложенного магнитного поля. Более высокие значения давления и магнитного поля позволяли получить более высокий ток при меньших напряжениях.



Рисунок 2 – Фото разряда

Измеренные распределения плотности ионного тока вдоль поверхности катода при различных токах разряда, давлениях рабочего газа и приложенных магнитных полях показаны на рис. 3 и 4. Вертикальная пунктирная линия ($h = 0$) на всех рисунках отделяет часть распределения, измеренную вдоль дисковой части катода (соответствует координате r на рисунках), от распределения, измеренного на боковой части (соответствует координате h).

Полученные распределения имеют схожую форму и позволяют сделать предположение, что в предложенных диапазонах величина индукции магнитного поля и давления рабочего газа оказывают слабое влияние на форму распределения. Для всех режимов характерно наличие максимума при радиусе $r = 110$ мм, причем плотность ионного тока быстро растет от центра подложки, пока не достигает максимума. Затем плотность снижается до величины порядка 65 % максимального значения ($r \approx 140$ мм), после чего плотность ионного тока остается практически неизменной либо понижается незначительно до радиуса $r \approx 180$ мм. В областях $r \in [185...190]$ мм, $h \in [0...5]$ мм распыление очень слабое. Численные оценки позволяют сделать предположение о влиянии ленгмюровского слоя, препятствующего диффузии ионов в эту область.

Боковая часть поверхности катода показывает более равномерное распределение со значительно более пологим максимумом, который соответствует координате $h \approx 25$ мм.

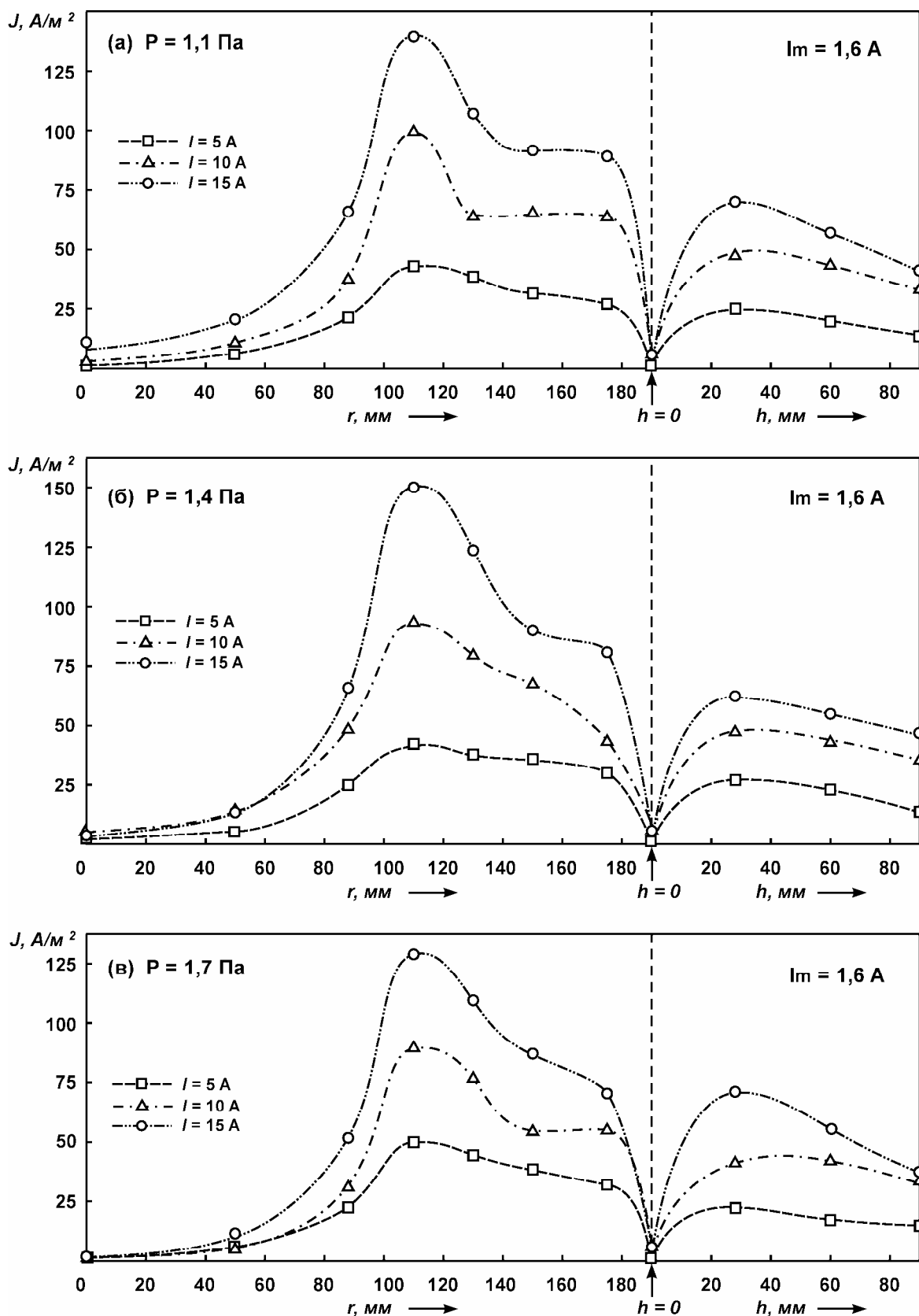


Рисунок 3 – Распределение плотности ионного тока вдоль подложки; ток соленоида ($I_m = 1,6 \text{ А}$), разрядный ток ($I = 5; 10; 15 \text{ А}$) и давление реактивного газа рассматриваются как параметры:
 а – $P = 1,1 \text{ Па}$; б – $P = 1,4 \text{ Па}$; в – $P = 1,7 \text{ Па}$

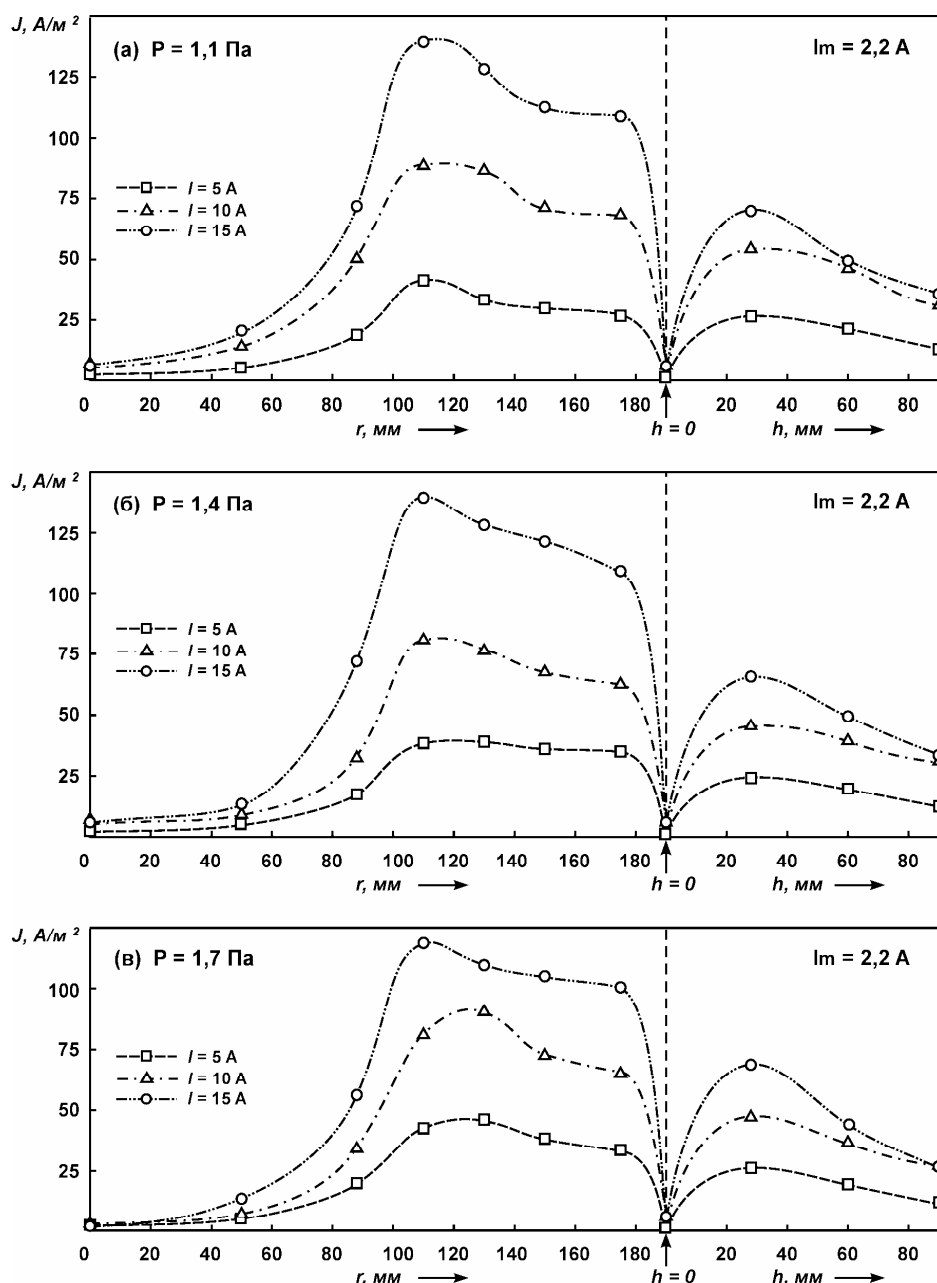


Рисунок 4 – Распределение плотности ионного тока вдоль подложки; ток соленоида ($I_m = 2,2$ A), разрядный ток ($I = 5; 10; 15$ A) и давление реактивного газа рассматриваются как параметры: а – $P = 1,1$ Па; б – $P = 1,4$ Па; в – $P = 1,7$ Па

Плотность ионного тока достаточно быстро растет до этого максимума, затем полого спадает, также достигая на краю ($h = 84$ мм) величины порядка 65 % максимального значения (для $h \approx 25$ мм).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные измерения позволяют сделать такие предположения о влиянии конфигурации магнитного поля на распределение плотности ионного тока вдоль подложки. Предложенная схема позволяет замкнуть силовые линии магнитного поля на катод, когда эти линии пересекают его поверхность на выходе и входе, что обеспечивает замкнутый дрейф электронов и условия поддержания магнетронного разряда. В то же время радиус кривизны силовых линий над поверхностью катода

значительно больше, чем для сбалансированного магнетрона [7,8]. Поскольку ширина зоны распыления прямо пропорциональна квадратному корню из радиуса кривизны силовых линий, подобная конфигурация приводит к существенному росту ширины зоны распыления [8]. При рассматриваемых относительных размерах соленоида и катода ширина зоны распыления практически ограничена боковой поверхностью.

Наличие боковой части поверхности катода приводит к влиянию на форму распределения плотность ионного тока вдоль дисковой части. Предполагается взаимное наложение гауссова распределения, характерного для сбалансированного магнетрона и обусловленного процессами случайной ионизации рабочего газа высокоэнергетичными вторичными электронами, которые движутся вдоль силовых линий магнитного поля, и распределения вдоль боковой поверхности катода, которое обусловлено, вероятнее всего, движением электронов поперек силовых линий магнитного поля. Для первого распределения важно относительное расположение точки возникновения вторичного электрона и положения над катодом, где силовые линии магнитного поля параллельны поверхности катода и где распределение имеет относительно острый максимум. Второе распределение тесно связано с распределением плотности потерь энергии вторичных электронов на ионизацию при их движении поперек магнитного поля, оно также имеет максимум при энергии электронов порядка 100 эВ, хотя этот максимум значительно более сглажен.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что использование соленоида, размещенного под катодом со структурой полого катода, что совместно образует планарный магнетронный источник плазмы. Это позволяет получить устройство для эффективной ионной очистки ферромагнитных деталей, которые могут быть размещены на подложке-катоде. Отсутствие концентраторов магнитного поля в виде сердечников позволяет значительно увеличить размеры зоны распыления, которая занимает до 93 % поверхности дисковой части катода и практически ограничена боковой частью поверхности катода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Musil J. Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends / J. Musil, P. Baroch, J. Vlceka, K.H. Nam, J.G. Han // Thin Solid Films. – 2005. – V. 475. – P. 208 – 218.
2. Window B. Ion-assisting magnetron sources: principles and uses / B. Window, G.L. Harding // The Journal of Vacuum Science and Technology. – V 8(3). – 1990. – P. 1277 – 1282.

3. Данилин Б.С. Магнетронные распылительные систем / Б.С. Данилин, В.Е. Минайчев, В.К. Сырчин // Электронная промышленность. – 1976. – №5.
4. Физико-химические процессы в технологии РЭА: учеб. для вузов / В.Н. Черняев. – М.: Высш. шк., 1987. – 376 с.
5. Fujita H. Plasma production with dc discharge of planar magnetron device for thin film preparation / H. Fujita, S Yagura, H. Ueno, M. Nagano // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1986. – Vol. 19. – P. 1699 – 1706.
6. Bradley J.W. The plasma properties adjacent to the target in a magnetron sputtering source / J.W. Bradley // Plasma Sources Science and Technology, vol. 6, 622 – 631, 1996.
7. Anders A. (Ed.). Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition / A. Anders (Ed.). – New York: Wiley, 2000.
8. Lieberman M.A. Principles of plasma discharges for materials processing / M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg. – New York: Wiley Interscience.
9. Zhurin V.V. Physics of closed drift thrusters / V.V. Zhurin, H.R. Kaufman, R.S. Robinson // Plasma Sources Science and Technology. – 1999. – Vol. 8. – R1 – R20.
10. Garrigues L. Hybrid and particle-in-cell models of a stationary plasma thruster / L. Garrigues, A. Heron, J.C. Adam, J.P. Boeuf // Plasma Sources Science and Technology. – 2000. – Vol. 9. – P. 219 – 226.
11. Гришин С.Д. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов / С.Д. Гришин, Л.В. Лесков. – М.: Машиностроение, 1989. – 216 с.
12. Белан Н.В. Стационарные плазменные двигатели: учеб. пособие / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов. – Х.: Харьк. авиац. ин-та, 1989.
13. Баранов О.О. Использование планарного магнетрона на этапе очистки при осаждении покрытий методом КИБ / О.О. Баранов, А.А. Бучака, М.С. Романов // Вісті Академії інженерних наук України: Науково-технічний та громадський часопис Президії Академії інженерних наук України. – Вип.3 (33). – К., 2007. – С. 263 – 268.
14. Zarchin O. Interaction of a Vacuum Arc Plasma Beam with an Obstacle Positioned Normal to the Plasma Flow / O. Zarchin, V.N. Zhitomirsky, S. Goldsmith, R.L. Voxman // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2003. – Vol. 36. – P. 2262 – 2268.