

ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА В СИСТЕМЕ ДЛЯ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературная плазма широко применяется в современной промышленности для обработки полимеров, металлов, сплавов и полупроводников [1]. Плазма используется при осаждении покрытий, модификации поверхностных слоев, прецизионном травлении, биомедицинской стерилизации и др., в быстро развивающихся отраслях, таких, как создание наноструктур различной размерности [2]. Одним из важнейших требований, предъявляемых к источникам низкотемпературной плазмы, является высокий уровень управляемости распределением плотности ионного тока вдоль подложек значительной протяженности. Особенно это касается возможности получения однородного распределения ионного потока вдоль поверхности подложки с целью равномерной обработки подложки от центра к краям [3].

Наиболее эффективным способом управления распределением плотности ионного тока является использование самосогласованного электрического поля, возникающего вследствие взаимодействия плазмы с внешним магнитным полем [4]. Подобная электромагнитная фокусировка широко используется при транспортировке потока плазмы от катода вакуумно-дугового источника к подложке [5 – 9]. Суть метода заключается в том, что некоторое "фокусирующее" магнитное поле используется для "замагничивания" электронов плазмы, что, в свою очередь, приводит к изменению направления движения ионами плазмы за счет возникшего самосогласованного электрического поля. Следует отметить, что создание подобного фокусирующего магнитного поля в объеме вакуумной камеры является достаточно сложной задачей. С одной стороны, это магнитное поле не должно слишком сильно взаимодействовать с магнитными и электрическими полями источника плазмы во избежание нестабильной работы источника. С другой стороны, это магнитное поле должно быть достаточно сильным, чтобы влиять на движение частиц плазмы непосредственно на выходе из плазмоведа. Поэтому разумным представляется размещение источника (или источников) такого управляющего магнитного поля под подложкой, на которую предполагается воздействовать потоками ионов и плазмы [10, 11, 12].

В работе показано, что использование двух катушек электромагнита и вращающейся подложки является довольно эффективным способом для управления распределением плотности ионного тока и создания усредненного во времени однородного распределения обрабатываемого потока для подложек площадью до

400 см³. Исследованы распределения плотности ионного тока вдоль подложек для различных сочетаний магнитного поля, которые созданы четырьмя катушками (две дополнительные катушки электромагнитов, установленные под подложкой, а также одна стабилизирующая и одна фокусирующая катушки вакуумно-дугового источника плазмы). С помощью этих четырех катушек достигаются различные конфигурации результирующего магнитного поля, включая пробочную конфигурацию и конфигурацию с магнитным каспом, в зависимости от способа запитывания дополнительных катушек электромагнитов [13]. Для всех конфигураций магнитного поля измерялись распределения плотности ионного тока вдоль подложки. В разделе "Обсуждение" предлагается физическая трактовка полученных результатов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка описана ранее [10, 11]. Она включает в себя вакуумно-дуговой источник плазмы, две дополнительные катушки электромагнита с ферромагнитными сердечниками и планарный зонд для измерения радиального распределения осевой составляющей ионного потока. В качестве вакуумно-дугового источника плазмы использовался испаритель с электромагнитной фокусировкой ионного компонента металлической плазмы [10, 11]. Источник плазмы снабжен титановым катодом в форме усеченного конуса и анодом в форме трубы, оба снабжены водяным охлаждением. Катод представлял собой структуру длиной 60 мм, диаметром нижнего основания 60 мм и диаметром верхнего основания 50 мм. Внутренний диаметр анода составлял 210 мм при длине 200 мм. Фокусирующая катушка монтировалась на аноде, так что анод одновременно представлял собой плазмод. Источник плазмы монтировался на фланце вакуумной камеры диаметром 500 мм и длиной также 500 мм.

Дуга инициировалась подачей короткого импульса высокого напряжения между катодом и анодом. Постоянный ток, $I_a = 110$ А, протекал между катодом и заземленным анодом. Фокусирующая и стабилизирующая катушки генерировали осевое магнитное поле в источнике плазмы. Магнитное поле стабилизирующей катушки B_f ($B_f = 0,03$ Т в центре стабилизирующей катушки) использовалось для удержания катодных пятен на поверхности катода. Магнитное поле фокусирующей катушки B_g ($B_g = 0,02$ Т в центре фокусирующей катушки) использовалось для транспортирования плазмы от источника к подложке.

Подложка в форме диска диаметром 400 мм и толщиной 8 мм, изготовленная из немагнитной нержавеющей стали, располагалась на расстоянии 250 мм от торца плазмоды в вакуумной камере, причем оси симметрии подложки и плазмоды совпадали. Две дополнительные катушки электромагнита диаметром 100 мм и высотой 80 мм (2000 витков на ферромагнитном сердечнике диаметром 30 мм) были установлены на держателе под подложкой. Оси симметрии

дополнительных катушек, подложки и плазмоведа были параллельны, расстояние между дополнительными катушками составляло 280 мм. Измеренные на торце сердечников величины магнитного поля, создаваемого дополнительными электромагнитами, показало практически линейную зависимость от величины пропускаемого тока: от 0,05 до 0,19 Т для токов катушек 1 и 4 А, соответственно. На подложку подавался отрицательный потенциал смещения относительно заземленных стенок вакуумной камеры.

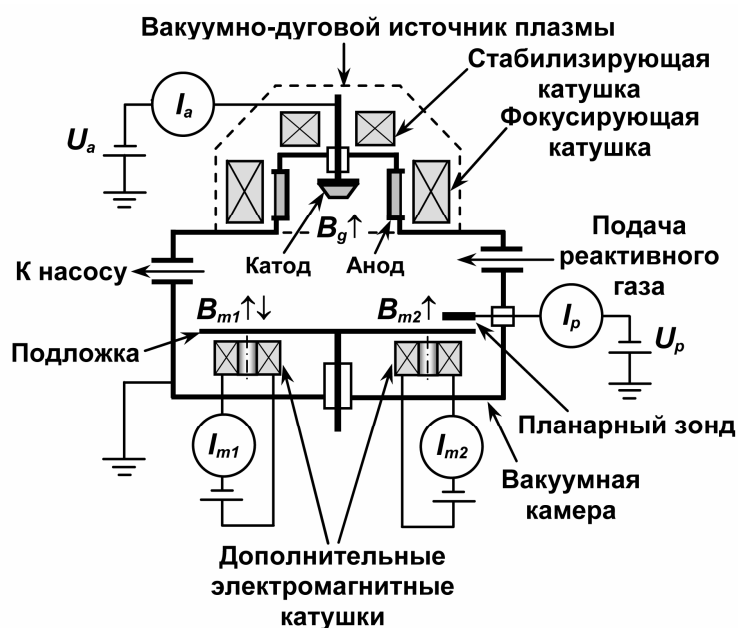


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Откачная система включала в себя один механический форвакуумный насос и один высоковакуумный паромасляный насос с максимальной скоростью откачки 1500 л/с. Автоматическая система напуска газа (в эксперименте использовался азот N_2) обеспечивала давление газа в камере в диапазоне 0,01-10 Па. Автоматическая система подачи газа поддерживала давление реактивного газа в камере, близкое к 0.01 Па. Давление измерялось с помощью термопарного и ионизационных датчиков и поддерживалось автоматически на заданном уровне с помощью электромагнитного клапана. Система подачи питания позволяла изменять напряжение смещения на подложке в диапазоне 0-2 кВ при максимальном токе 20 А.

Планарный зонд использовался для измерения распределения плотности осевого ионного тока как функции положения зонда вдоль поверхности подложки. Зонд представлял собой подвижную (32×31×0,5 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 вакуумно-дугового источника плазмы

падение напряжения между зондом и анодом составляло 200 В; таким образом, зонд собирал ионный ток насыщения [14]. Длительность каждого цикла измерения составляла 2 с.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимость распределения плотности ионного тока вдоль подложки от тока дополнительных управляющих электромагнитов исследовалась при стабильной работе источника плазмы со следующими параметрами: $U_a \approx 30$ В, $B_f = 0,03$ Т и $B_g = 0,02$ Т. На рис. 2 и 3 приведены несколько видов распределений плотности ионного тока, полученных с помощью планарного зонда. Эти распределения отражают основные черты обсуждаемых конфигураций магнитного поля. На рисунках изображены результаты аппроксимации экспериментальных данных при усреднении по 10 измерениям. Центр подложки расположен в точках $x = 0$, $y = 0$ координатной системы, приведенной на рис. 2. Дополнительные управляющие электромагниты расположены под подложкой в точках $x = 0$, $y = \pm 140$ мм. Конфигурация, когда оба дополнительных электромагнита создают магнитное поле, совпадающее по направлению с магнитными полями, создаваемыми стабилизирующей и фокусирующей катушками источника плазмы, обозначена как " $B_{m1} \uparrow B_g \uparrow B_{m2} \uparrow$ ". Конфигурация, когда магнитное поле одного из электромагнитов (B_{m1}) направлено противоположно полям стабилизирующей и фокусирующей катушек, в то время как поле второго электромагнита (B_{m2}) остается неизменным, обозначена как " $B_{m1} \downarrow B_g \uparrow B_{m2} \uparrow$ ".

На рис. 2 а представлены результаты измерений для случая, когда питание обоих дополнительных электромагнитов отключено. Когда питание подается только на один электромагнит (I_{m2}) и катушки дугового источника (стабилизирующую и фокусирующую), максимум распределения плотности ионного тока слегка смещается в сторону запитанного дополнительного электромагнита (примерно на 10 мм), как показано на рис 2, б, в.

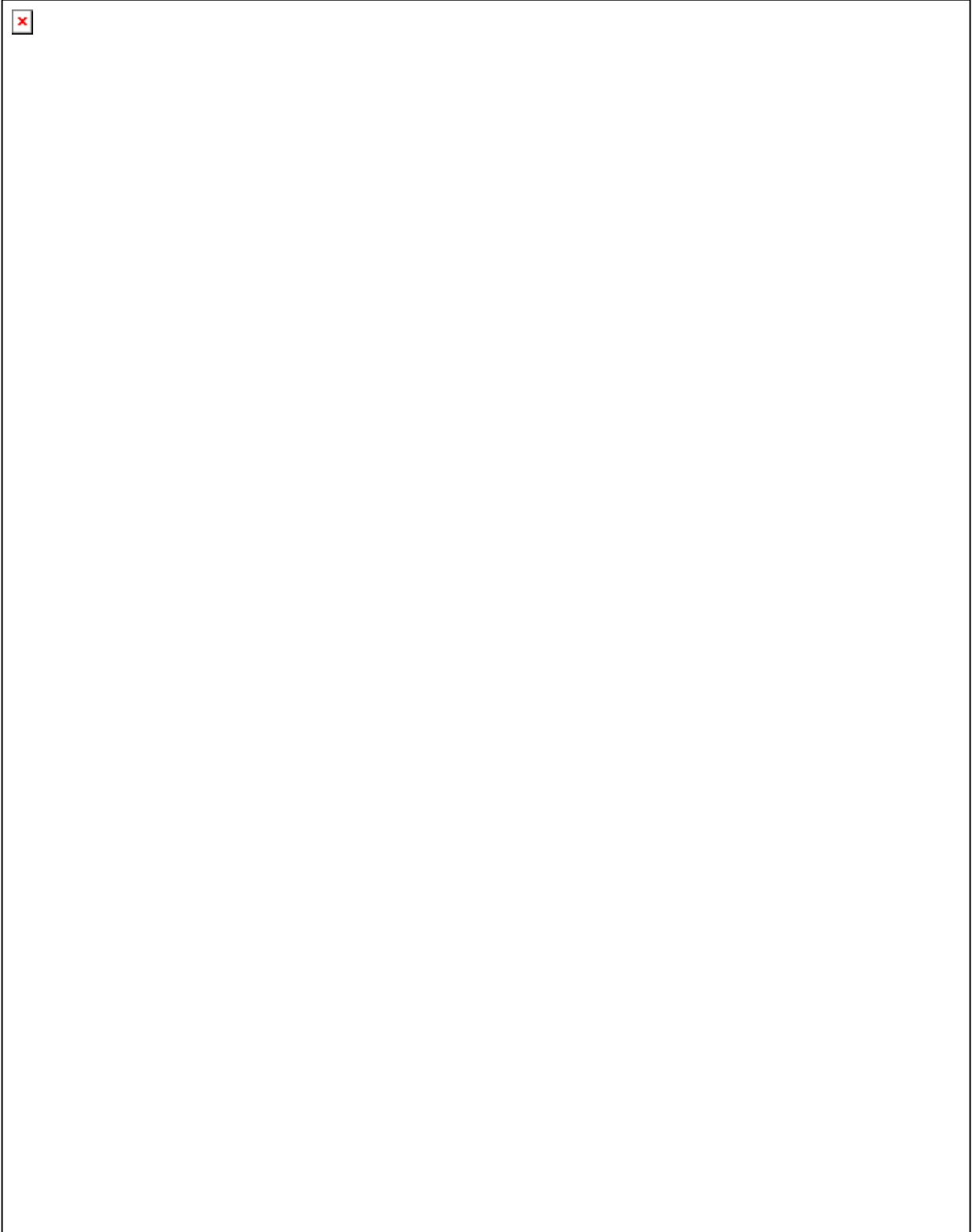


Рисунок 2 – Распределение плотности ионного тока вдоль подложки, ток дополнительных электромагнитов рассматривается как параметр:
а – соответствует исходной конфигурации $B_g \uparrow$, $I_{m1} = I_{m2} = 0$ А (дополнительные электромагниты отключены); б, в - конфигурация $B_g \uparrow B_{m2} \uparrow$, $I_{m1} = 0$ А и $I_{m2} = 2;4$ А (левый электромагнит отключен);
г, д, е – конфигурация $B_{m1} \uparrow B_g \uparrow B_{m2} \uparrow$, $I_{m1} = 2;4$ А и $I_{m2} = 2;4$ А

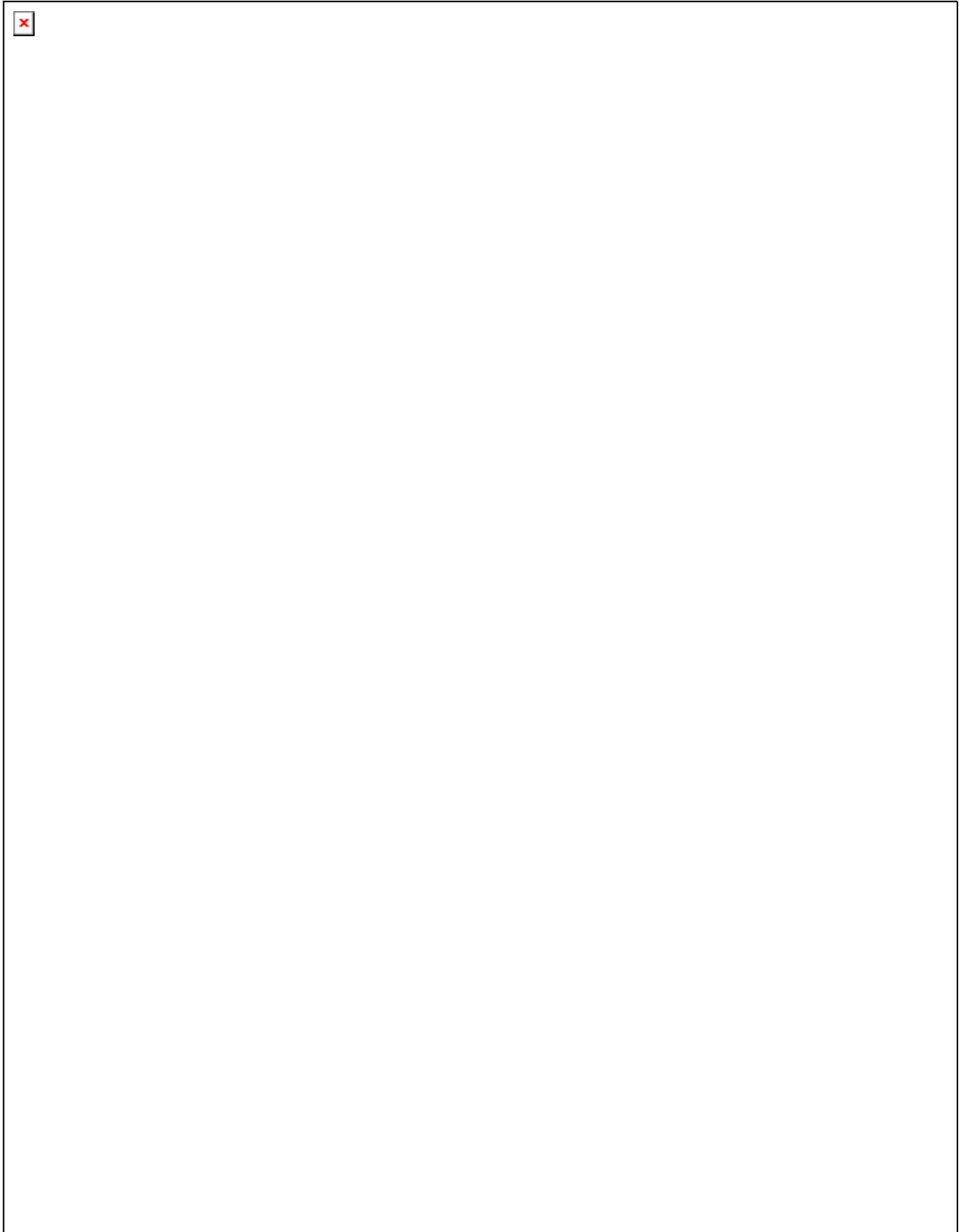


Рисунок 3 – Распределение плотности ионного тока вдоль подложки, ток дополнительных электромагнитов рассматривается как параметр:

а, г - соответствует конфигурации $B_{m1} \downarrow B_g \uparrow$, $I_{m1} = 2;4$ А и $I_{m2} = 0$ А
(правый электромагнит отключен);

б, в, д, е – конфигурация $B_{m1} \downarrow B_g \uparrow B_{m2} \uparrow$, $I_{m1} = 2;4$ А и $I_{m2} = 2;4$ А

Изменение тока электромагнита от 2 до 4 А не изменяет распределение существенно.

В то же время подключение обоих электромагнитов приводит к тому, что, как видно из рис. 3, г, д, е, распределения, соответствующие конфигурации " $B_{m1}\uparrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$ ", имеют максимум в центре подложки ($x = 0$; $y = 0$); более того, распределения слегка вытянуты в сторону управляющих электромагнитов.

На рис. 3, а, г представлены результаты измерений для случая, когда питание подается только на один электромагнит (I_{m1}), включенный встречно катушкам дугового источника, что образует конфигурацию с магнитным каспом. Эта схема достаточно эффективно препятствует проникновению ионов к центру подложки. По максимумам распределений видно, что значительная часть ионного потока "огибает" силовые линии магнитного поля, попадая на подложку либо в районе сердечника запитанного электромагнита, либо в местах, где магнитное поле нормально к поверхности катода.

Распределения, соответствующие противоположно запитанным дополнительным электромагнитам (соответствующие конфигурации " $B_{m1}\downarrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$ "), также могут иметь более одного максимума, смещенных в сторону сердечников дополнительных электромагнитов (приблизительно на 70 мм) (рис. 3, б, в, д), и слабо различимый максимум в центре подложки для некоторых конфигураций (рис. 3, д, е). Видно, что эта схема позволяет достаточно эффективно расфокусировать исходный ионный поток (см. рис. 2, а).

Усредненное во времени распределение плотности ионного тока $\bar{J}(r)$ вдоль подложки радиусом r получено из расчета на основе измеренных распределений $J(r, \varphi)$ для подложки в форме диска, вращающегося относительно оси симметрии на угол $\varphi \in [0 \dots 2\pi]$. При этом плотность ионного тока для данного радиуса $r = \sqrt{x^2 + y^2} = const$ (относительно системы координат, показанной на рис. 3 и 4) вдоль поверхности подложки рассчитывалась по формуле

$$\bar{J}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} J(r, \varphi) d\varphi.$$

Расчеты показали различную форму результирующего осесимметричного распределения плотности ионного тока. На рис. 4 и 5 приведены усредненные во времени распределения, соответствующие конфигурациям " $B_{m1}\uparrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$ " и " $B_{m1}\downarrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$ ", соответственно. Пунктирная линия, показанная для сравнения, представляет результат

расчета распределения плотности ионного тока, когда оба дополнительных электромагнита отключены (соответствует рис. 2, а).

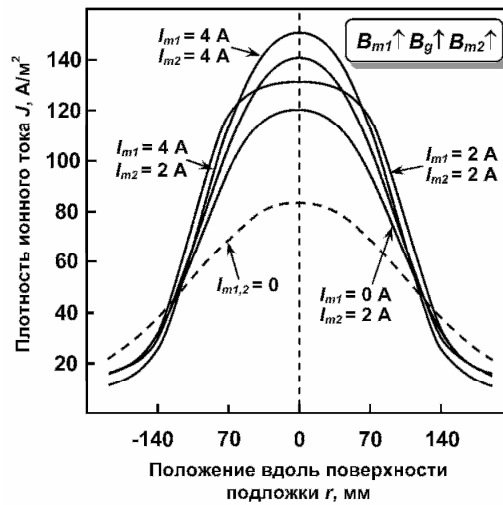


Рисунок 4 – Усредненные во времени распределения плотности ионного тока вдоль вращающейся подложки, ток дополнительных электромагнитов рассматривается как параметр; конфигурация $B_{m1}\uparrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$

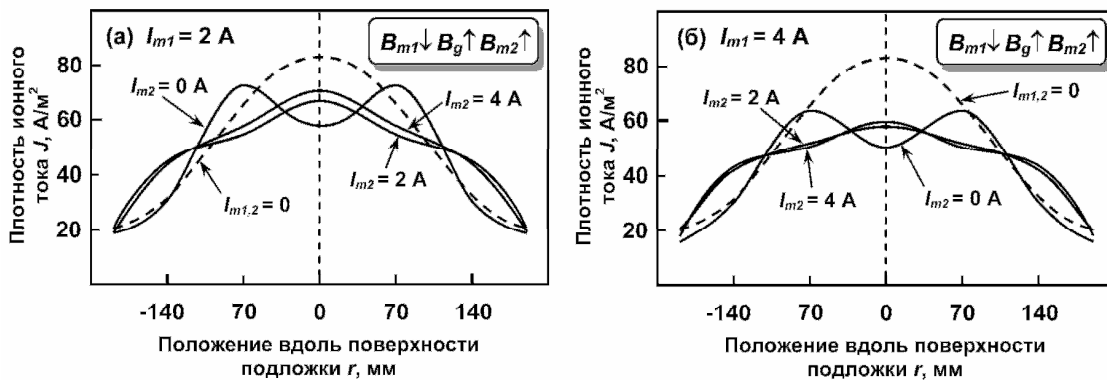


Рисунок 5 – Усредненные во времени распределения плотности ионного тока вдоль вращающейся подложки, ток дополнительных электромагнитов рассматривается как параметр; конфигурация $B_{m1}\downarrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$:
а – $I_{m1} = 2$ А; б – $I_{m1} = 4$ А

Видно, что конфигурация " $B_{m1}\uparrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$ " приводит к усредненной во времени фокусировке ионного потока, извлекаемого из вакуумно-дугового источника плазмы. Распределения имеют максимум в центре подложки ($r = 0$) для всех режимов. Подобный результат был получен для системы с планарным магнетроном, установленным под подложкой в камере [11]. Интересным является режим с токами $I_{m1} = I_{m2} = 2$ А, где возможно создавать практически однородное распределение на площади радиусом до 70 мм с плотностью ионного тока до 130 A/m^2 , что может быть полезным при осаждении покрытия на относительно небольшие детали или малые партии деталей.

В то же время видно, что конфигурация " $B_{m1}\downarrow B_g\uparrow B_{m2}\uparrow$ " приводит к усредненной во времени расфокусировке ионного потока. Может

создаваться конфигурация с одним максимумом, расположенным в центре подложки ($r = 0$), или двумя максимумами, смещенными на 70 мм в сторону дополнительных электромагнитов, но во всех случаях распределение существенно сглажено по сравнению с исходным, обозначенным пунктирной линией. Для создания распределения с двумя максимумами достаточно запитать катушку электромагнита, создавая магнитное поле, направленное встречно магнитному полю дугового источника плазмы. Добавление второго электромагнита магнитного поля с полем, направленным согласно полю источника, создает распределение с максимумом в центре подложки. Таким образом, чередование этих двух режимов позволяет создавать практически однородное распределение на поверхности подложки площадью до 400 см².

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные измерения позволяют сделать следующие предположения о влиянии конфигурации магнитного поля на распределение плотности ионного тока вдоль подложки. В случае, когда оба дополнительных электромагнита запитаны одинаково, между ними формируется магнитный касп, который остается возле поверхности подложки при включении дугового источника плазмы и наличии магнитных полей стабилизирующей и фокусирующей катушек. Касп расположен непосредственно над центром подложки вдоль оси плазмоведа. Поэтому электроны плазмы направляются к трем основным стокам: двум магнитным зеркалам над центром сердечника каждого электромагнита и магнитному каспу между ними. Усиление результирующего магнитного поля дополнительных электромагнитов приводит к сжатию потока плазмы от дугового источника и фокусировке к зеркалам и каспу. Рассматривая распределения плотности ионного тока вдоль поверхности неподвижной (рис. 2) и вращающейся (рис. 4) подложек, когда магнитные поля обоих управляющих электромагнитов совпадают по направлению с полями дугового источника плазмы, можно сделать вывод о возможности использовать подобную конфигурацию для симуляции простой пробочной конфигурации, которая может быть полезна для сжатия потока плазмы [11].

Когда же дополнительные управляющие электромагниты запитаны противоположно, между ними возле центра подложки формируется пробочная конфигурация магнитного поля. При включении дугового источника результирующая конфигурация магнитного поля препятствует проникновению плазмы от источника к центру подложки. Тогда электроны направляются от дугового источника только к двум основным стокам, которыми являются магнитные зеркала над сердечниками управляющих электромагнитов. Усиление магнитного поля электромагнитов приводит к уменьшению плотности ионного тока в центре подложки и увеличению на ее краях. Усредненные во времени

распределения плотности ионного тока вдоль поверхности вращающейся подложки позволяют сделать вывод о возможности получения практически однородного распределения плотности ионного тока на значительной поверхности подложки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что два дополнительных электромагнита, установленных под подложкой перпендикулярно потоку плазмы, который создается вакуумно-дуговым источником плазмы, существенно влияют на распределение плотности ионного тока вдоль поверхности подложки. В эксперименте осевая плотность ионного тока в центре подложки возрастает от 83 до 150 А/м², когда магнитные поля дополнительных электромагнитов направлены согласно с магнитным полем фокусирующей и стабилизирующей катушек источника плазмы, т.е., в 1,8 раза. Для этой же схемы возможно получение распределения с плотностью ионного тока порядка 130 А/м², практически однородного на площади радиусом до 70 мм.

Когда один из электромагнитов создает поле, направленное противоположно полю дугового источника, практически однородное распределение плотности ионного тока со средним значением около 55 А/м² может быть получено для поверхности подложки площадью 400 см² сочетанием меняющегося тока электромагнитов и простого вращения подложки.

Полученные результаты объясняются эффектом электромагнитной фокусировки и расфокусировки потока плазмы при действии дополнительных управляющих магнитных полей. В практике вакуумно-дугового осаждения покрытий подобная возможность управлять потоком плазмы может быть рассмотрена при осаждении однородных покрытий равной толщины вдоль значительных поверхностей подложки. Специфические пространственные распределения потоков плазмы, присущие различным типам источников плазмы, могут эффективно изменяться комбинацией простого вращения подложки и динамического управления токами в катушках электромагнитов, размещенных под подложкой. Эта же система позволяет получить узкие потоки плазмы высокой плотности для обработки небольшой площади подложки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Anders A. (Ed.). Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition / A. Anders (Ed.). – New York: Wiley, 2000.
2. Ostrikov K. Colloquium: Reactive plasma as a versatile nanofabrication tool / K. Ostrikov // Reviews of Modern Physics. – Vol. 77. – 2005. – Pp. 489 – 511.

3. Chen F. F., Chang J. P. Lecture Notes on Principles of Plasma Processing / F. F. Chen, J. P. Chang // Plenum/Kluwer Publishers. – 2002.
4. Anders A., Yushkov G. Yu. Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of a magnetic field / A. Anders, G. Yu. Yushkov // Journal of Applied Physics. – Vol. 91. – 2002. – Pp. 4824 – 4833.
5. Boxman R.L. Handbook of Vacuum Arc Science and Technology / R.L.Boxman, P.Martin, D.Sanders; Noyes Publications. – N.J.: Park Ridge, 1995.
6. Zhitomirsky V.N. Transport of a Vacuum-Arc Produced Plasma Beam in a Magnetized Cylindrical Duct / V.N. Zhitomirsky, O. Zarchin, R.L. Boxman, S. Goldsmith // IEEE Transactions on Plasma Science. – Vol. 31. – 2003. – Pp. 977 – 982.
7. Keidar M. 2-D Expansion of the low-density interelectrode vacuum arc plasma jet in an axial magnetic field / M. Keidar, I. Beilis, R. L. Boxman, S. Goldsmith // Journal of Physics D: Applied Physics. – Vol. 29 – 1996. – Pp. 1973 – 1983.
8. Аксенов И.И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И.И. Аксенов. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
9. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
10. Баранов О.О. Ионный ток на подложку в системе для вакуумно-дугового осаждения покрытий / О.О. Баранов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (55). – Х., 2008. – С. 19-22.
11. Баранов О.О. Взаимодействие потока плазмы вакуумно-дугового источника с магнитным полем планарного магнетрона / О.О. Баранов // Вісті Академії інженерних наук України: наук.-техн. та громадський часопис Президії Академії інженерних наук України. – Вип.1 (38). – К., 2009. – С. 233 – 238.
12. 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: наук.-техн. та громадський часопис Президії Академії інженерних наук України. – Вип.3 (33). – К., 2007. – С. 263 – 268.
13. Чен Ф. Введение в физику плазмы: пер. с англ. / Ф. Чен. – М.: Мир, 1987. – 398 с.
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. Boxman // Journal of Physics D: Applied Physics. – Vol. 36. – N.Y., 2003. – Pp. 2262 – 2268.