

УДК 533.9

## Экспериментальное исследование сильноточного импульсного магнетронного разряда с управляемой конфигурацией внешнего магнитного поля

А.В. Казиев, П.А. Хромов, И.А. Щелканов,  
Г.В. Ходаченко, Т.В. Степанова, А.В. Тумаркин

*Представлены результаты исследования влияния дополнительного магнитного поля, создаваемого специально разработанной системой катушек постоянного тока, на пространственное распределение расплывшего потока в процессе сильноточного импульсного магнетронного разряда (СИМР). Проведены измерения параметров плазмы СИМР как с основной, так и с модифицированной конфигурацией внешнего магнитного поля. Показано, что применение дополнительной магнитной системы слабо влияет на параметры плазмы в разрядной области, однако позволяет заметно повысить скорость нанесения покрытий и эффективность расходования материала катода.*

PACS: 52.80.Sm, 52.75.-d, 52.70.-m, 52.25.Xz, 81.15.Cd

*Ключевые слова:* импульсный разряд, магнетронный разряд, управление расплывшим потоком, скорость осаждения, импульсная зондовая диагностика

### Введение

Магнетронные распылительные системы (МРС) широко используются в задачах получения тонкоплёночных покрытий [1]. Технологии напыления в МРС позволяют создавать металлические плёнки различного назначения. При этом подбором материала распыляемой мишени и рабочего газа можно обеспечить нанесение не только плёнок чистого расплывшего металла, но также оксидов, нитридов и прочих соединений расплывшего компонента с частицами реактивного газа. В одной и той же установке путём оптимизации режимов разряда можно добиваться получения покрытий с различными функциональными параметрами: структурой, плотностью, адгезией, поверхностным рельефом, твёрдостью и т. д.

Особое место в ряду разрядов, используемых в МРС, занимают импульсные формы. К ним относится, в частности, сильноточный импульсный магнетронный разряд (СИМР) — квазистационар-

ный режим, впервые реализованный на кафедре физики плазмы МИФИ. В отличие от активно исследуемых за рубежом импульсных магнетронных разрядов большой мощности (HIPIMS), СИМР характеризуется существенно большей энергией, вкладываемой в отдельный импульс (до 3 кДж) и большей длительностью импульса (до 50 мс). При этом существенно наличие в СИМР продолжительной квазистационарной фазы, в течение которой разрядные параметры (ток и напряжение) практически не изменяются, и устанавливается квазистационарное значение плотности плазмы. Напротив, разряды типа HIPIMS функционируют в режиме резкого пикирования разрядных параметров на относительно малых временах (~100 мкс).

Одним из наиболее существенных отличий СИМР от стационарного магнетронного разряда является высокая степень ионизации расплывшего материала [2]. Эта особенность СИМР, в частности, позволяет создать систему для управления энергией и направлением движения ионов расплывшего материала. Известно, что энергия, угол падения и плотность потока материала на подложку в значительной степени определяют свойства получаемого покрытия [3, 4]. Таким образом, управление параметрами потока падающих на подложку частиц, осуществимое благодаря высокой степени ионизации расплывшего материала в плазме СИМР, позволяет в итоге расширить спектр получаемых в этом разряде покрытий.

Целью настоящей работы является практическая реализация управления параметрами потока ионов из плазмы СИМР.

Казиев Андрей Викторович, аспирант.  
Хромов Павел Александрович, студент.  
Щелканов Иван Анатольевич, инженер.  
Ходаченко Георгий Владимирович, доцент.  
Степанова Татьяна Владимировна, инженер 1 кат.  
Тумаркин Александр Владимирович, аспирант.  
НИЯУ «МИФИ».  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.  
Тел. (495) 788-56-99, доб. 8091.  
E-mail: avkaziev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2013 г.

© Казиев А.В., Хромов П.А., Щелканов И.А., Ходаченко Г.В., Степанова Т.В., Тумаркин А.В., 2013

### Экспериментальная установка и методика измерений

Работа проводилась на экспериментальном стенде ПИНЧ кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки с планарным магнетроном.

Базовая конфигурация магнитной системы, состоящая из постоянного магнита и магнитопровода, является несбалансированной (поток магнитной индукции в центре катода выше, чем во внешней области [5]). Распылённые и ионизованные в разряде атомы металла осаждаются на стенках камеры и на подложке. Повышение эффективности расходования распылённого материала при нанесении тонких плёнок на подложку требует снижения доли потока, попадающей на детали установки, и увеличения потока металла на образец. Для достижения поставленной цели разработана и изготовлена дополнительная магнитная система, позволяющая изменять конфигурацию магнитного поля вблизи поверхности катода магнетрона. Она состоит из двух одинаковых электромагнитных катушек, ось симметрии которых совпадает с осью симметрии основной магнитной системы.

Система электромагнитных катушек рассчитана на стационарную работу при токе  $I_{coil}$  до 10 А и обеспечивает плавную регулировку магнитного поля в области между зоной горения разряда и подложкой. Питание катушек независимое, что позволяет отдельно контролировать поле, создаваемое каждой из них.

Подобная модификация магнитной системы предпринималась при исследовании импульсных магнетронных разрядов большой мощности (HIPIMS) [6]. Однако для квазистационарных форм разряда, к которым относится СИМР, применение таких систем для управления ионным

потокком до настоящего времени не рассматривалось.

В настоящей работе в качестве катодной мишени использовался медный диск диаметром 80 мм. При проведении экспериментов вакуумная камера откачивалась до предельного давления  $10^{-5}$  Торр турбомолекулярным насосом ТМН-500. Давление рабочего газа Ar составляло  $(4-8) \cdot 10^{-3}$  Торр и измерялось датчиком Pfeiffer CMR 364.

Импульс высокого напряжения подавался на разрядный промежуток при коммутации искусственной длинной линии с максимальным общим энергозапасом 6,3 кДж. При этом предварительно промежуток заполнялся плазмой стационарного магнетронного разряда ( $U_{st} \sim 300$  В,  $I_{st} \sim 100$  мА). Типичные значения разрядных параметров СИМР в данной работе составляли  $I_{peak} \sim 40$  А,  $U \sim 1200$  В, длительность  $\tau \sim 20$  мс.

Измерения электронной температуры  $T_e$  и плотности плазмы  $n$  в СИМР проводились с помощью системы одиночных цилиндрических зондов Ленгмюра. Electroды зондов выполнены из вольфрамовой проволоки; площадь открытой поверхности составляла 6 мм<sup>2</sup>. Конструктивное исполнение зондов позволяло проводить измерения в условиях высокоскоростного нанесения проводящих покрытий. Для этого использовался дополнительный диэлектрический экран, защищающий от напыления область контакта электрода зонда и основного керамического изолятора. Постоянство площади собирающей поверхности позволило определять плотность плазмы по измерениям ионного тока насыщения. Напряжение подавалось на зонды с помощью специального генератора развёртки, позволявшего формировать линейный импульс от  $-150$  до  $+150$  В длительностью 100 мкс. При этом генератор срабатывал с установленной задержкой по времени относительно момента за-

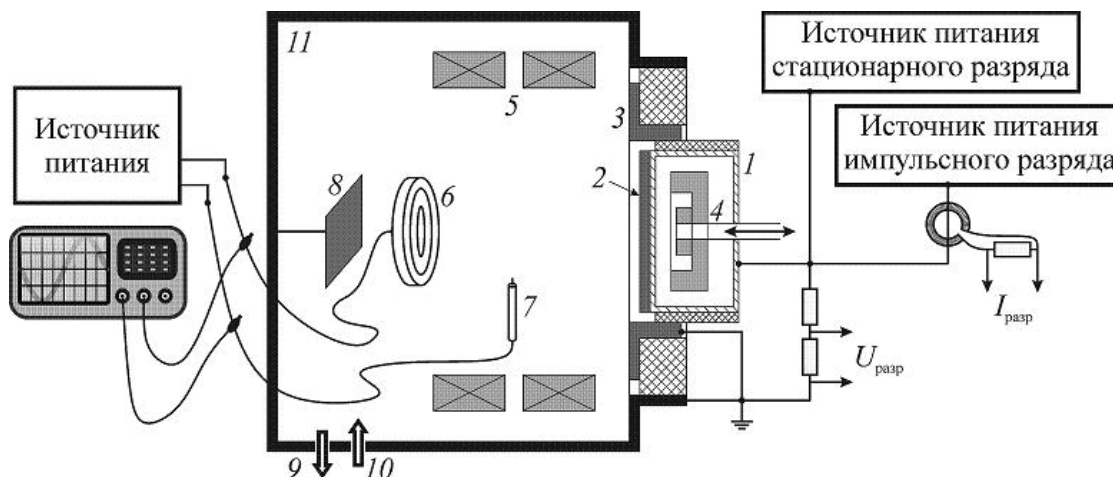


Рис. 1. Схема установки: 1 — катод, 2 — мишень, 3 — анод, 4 — основная магнитная система, 5 — дополнительная магнитная система, 6 — коллектор, 7 — система зондов, 8 — подложка, 9 — система откачки, 10 — система напуска газа, 11 — вакуумная камера

жигания разряда, что обеспечивало получение зондовых характеристик непосредственно во время поддержания квазистационарной формы. Опорным электродом выступал заземлённый анод разрядного устройства. Регистрация зондовых вольт-амперных характеристик проводилась с помощью цифрового четырёхканального запоминающего осциллографа Tektronix TPS 2024.

Зонды для определения температуры электронов и плотности плазмы размещались в нескольких точках. Первая точка располагалась напротив зоны наибольшей эрозии мишени, в области горения разряда. Второе измерение проводилось в точке, где индукция магнитного поля обращается в нуль. Третья позиция отвечала обычному расположению подложки. Четвёртое измерение проводилось на оси симметрии на расстоянии 110 мм от поверхности катода.

Измерение толщины получаемых покрытий проводилось с использованием набора тонких пластин размерами 20×20 мм методом взвешивания. Их масса до и после напыления измерялась на аналитических весах с точностью до 0,2 мг. На рис. 2 показана схема размещения образцов, а также картины силовых линий магнитного поля основной и модифицированной магнитных систем. Образец 1 соответствовал обычному расположению подложки при напылении.

Радиальное распределение потока ионов в области подложки измерялось с помощью специального коллектора. Он содержал четыре изолированных друг от друга концентрические зоны равной площади, на которые подавалось постоянное смещение относительно потенциала земли, соответствовавшее току ионного насыщения. Ионный ток на каждую из зон регистрировался независимо при помощи четырёхканального запоминающего осциллографа Tektronix TDS 2004 В. Коллектор размещался на расстоянии 64 мм от по-

верхности катода, т. е. там, где, как правило, располагается подложка.

## Экспериментальные результаты

### Импульсная зондовая диагностика

Для определения влияния дополнительного магнитного поля на режим горения разряда проведены измерения параметров плазмы СИМР с помощью импульсной зондовой диагностики. Измерения  $T_e$  и  $n$  в четырёх точках проводились для различных значений мощности сильноточного импульсного магнетронного разряда ( $P = 10\text{--}80$  кВт) в диапазоне давлений рабочего газа  $p_{\text{Ar}} = (4\text{--}8) \cdot 10^{-3}$  Торр.

Результаты импульсной зондовой диагностики показали, что при наложении дополнительного магнитного поля значения  $T_e$  и  $n$  практически не изменяются. Их величины составили:  $T_e \sim 10$  эВ,  $n \sim 10^{12}$  см $^{-3}$  в области горения разряда и  $T_e \sim 7$  эВ,  $n \sim 10^{11}$  см $^{-3}$  в области подложки, соответственно. Однако при дальнейшем удалении от поверхности катода (на 110 мм) зарегистрировано повышение плотности плазмы СИМР с дополнительным магнитным полем по сравнению со стандартной магнитной конфигурацией.

### Измерение скорости нанесения покрытия

Эксперименты по определению эффекта, оказываемого дополнительными катушками, на скорость нанесения плёнки, проводились в два этапа: сначала со стандартной магнитной системой разрядного устройства и выключенными дополнительными катушками, а затем с включённым дополнительным магнитным полем (ток в катушках  $I_{\text{coil}} = 5,2$  А). Для зажигания разряда в качестве рабочего газа напускался аргон при давлении  $8 \cdot 10^{-3}$  торр. Нанесение покрытия производилось за 100 импульсов СИМР ( $I_{\text{peak}} \sim 45$  А,  $P \sim 40$  кВт в импульсе). На рис. 3 приведены зависимости средней импульсной скорости напыления от положения образца (см. рис. 2).

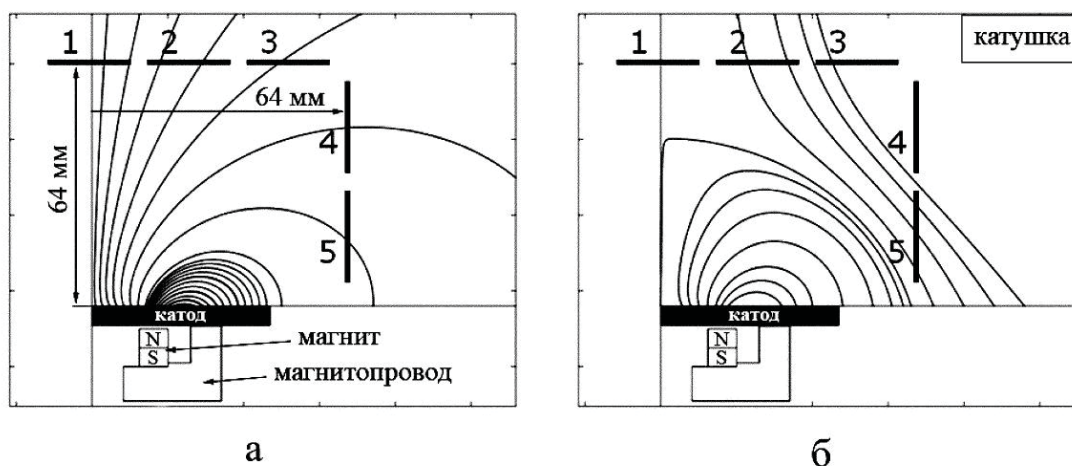


Рис. 2. Схема расположения образцов (1–5) и картины силовых линий магнитного поля стандартной системы (а) и модифицированной конструкции (б) ( $I_{\text{coil}} = 5,2$  А)

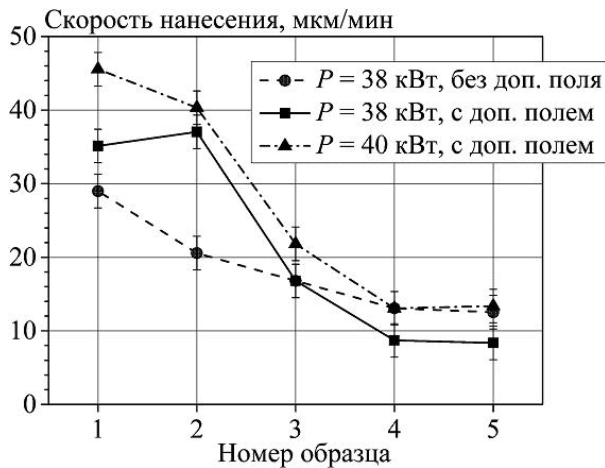


Рис. 3. Пространственное распределение скорости напыления (схему расположения образцов см. на рис. 2)

Из рис. 3 видно, что управление потоком ионов при помощи магнитного поля позволяет повысить эффективность использования материала катодной мишени. Это достигается путём увеличения скорости напыления покрытий в области подложки и снижения общего расхода материала за счёт уменьшения радиального потока ионов расплывлённого металла.

#### Измерение пространственного распределения ионного тока

Эксперименты по определению изменения радиального распределения ионного тока в области расположения подложки при включении дополнительной магнитной системы проводились при  $I_{coil} = 3$  А. При наложении дополнительного магнитного поля ток на наиболее удалённую от центра зону коллектора в пределах погрешности измерений изменился незначительно. Для остальных зон включение дополнительной магнитной системы привело к заметному росту плотности  $\Delta j/j$ , %

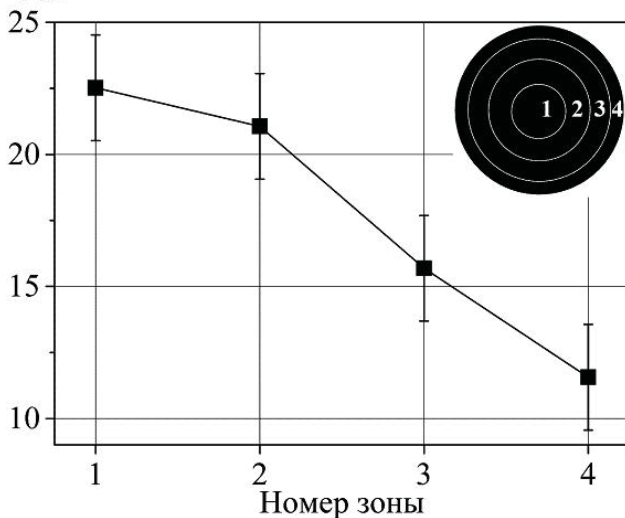


Рис. 4. Изменение плотности ионного тока при наложении дополнительного магнитного поля (схема зон коллектора — в правом верхнем углу) ( $I_{coil} = 3$  А)

тока.

На рис. 4 представлено относительное приращение плотности тока, приходящего на каждую зону коллектора, рассчитанное как  $\Delta j/j = (j_{coil} - j_0)/j_0$ , где  $j_{coil}$  — плотность тока при работе с дополнительным магнитным полем, а  $j_0$  — без него (в правом верхнем углу показана схема расположения зон коллектора).

Наиболее сильно эффект повышения плотности тока выражен в центре подложки, на оси симметрии магнетронной системы, что и приводит к росту скорости напыления покрытий в СИМР с управляемым магнитным полем.

#### Заключение

В результате настоящей работы разработана и создана конструкция магнитной системы для управления потоком ионов расплывлённого материала путём регулировки степени разбалансировки магнетрона. Осуществлён физический пуск установки на базе разрядного устройства с изменённой магнитной системой.

С помощью импульсной зондовой диагностики проведены измерения концентрации плазмы СИМР и температуры электронов как без дополнительного магнитного поля, так и при работе с дополнительным магнитным полем катушек. Сравнение результатов измерений показало, что при наложении дополнительного магнитного поля температура электронов и концентрация плазмы изменяются в разрядной области незначительно.

Экспериментально продемонстрировано существенное увеличение скорости нанесения металлических покрытий (на примере меди) при формировании СИМР с модифицированной магнитной конфигурацией.

В целом, доказана возможность управления потоком ионов плазмы СИМР при помощи внешнего магнитного поля. Разработанная система может быть эффективно использована только для потоков с высокой степенью ионизации расплывлённых атомов металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.A18.21.1174 и ГК № 11.519.11.6009).

#### Литература

1. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. — Киев: Аверс, 2008
2. Мозгрин Д. В., Фетисов И. К., Ходаченко Г. В. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. С. 422
3. Hamaguchi S., Rossnagel S. M. // J. Vac. Sci. Technol. B. 1995. V. 13. P. 183
4. Petrov I., Barna P. B., Hultman L., Greene J. E. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2003. V. 21. P. S117

5. Svadkovski I. V., Golosov D. A., Zavatskiy S. M. // Vacuum. 2003. V. 68. P. 283

6. Bohlmark J., Östbye M., Lattemann M., et al. // Thin Solid Films. 2006. V. 515. P. 1928

## Experimental study of the high-current impulse magnetron discharge with controllable magnetic field configuration

*A.V. Kaziev, P.A. Khromov, I.A. Shchelkanov, G.V. Khodachenko, T.V. Stepanova, and A.V. Tumarkin*

National Research Nuclear University “MEPhI”  
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia  
E-mail: avkaziev@gmail.com

*Experimental results concerning the effect of the additional magnetic field generated by specially designed magnetic coil system on the spatial distribution of sputtered material in high-current impulse magnetron discharge (HCMD) are presented. The parameters of the HCMD plasma have been measured for both basic and modified magnetic field configurations. The results show that the additional magnetic field does not affect the plasma parameters significantly. However, the film deposition rate increases notably as well as the efficiency of the cathode material utilization.*

PACS: 52.80.Sm, 52.75.-d, 52.70.-m, 52.25.Xz, 81.15.Cd

*Keywords:* pulsed discharge, magnetron discharge, control of the sputtered particle flux, deposition rate, pulsed probe diagnostics.

Bibliography – 6 references

*Received February 10, 2013*