

ECR-plasma sources based on coaxial resonators with helical wave structure

A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov
People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

The coaxial resonators with helical wave structure of inner electrode are used to form plasma flow (CERA-RHI), as well as dissociated molecular flow (CERA-RHD). It has been found experimentally that total ion current in CERA-RHI could reach 60 mA under 50 W microwave power (2.47 GHz) and that density of hydrogen atomic flow in CERA-RHD was about $10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. We suppose that these types of sources can be used to scientific investigations, to discharge ion thruster for small satellite propulsion system and to negative ions as well as multicharge ions sources.

PACS: 52.80.Pi

УДК 533.9

Увеличение предельного тока магнетронного разряда с помощью магнитоизоляции секционированного анода

A. A. Бизюков, К. Н. Серeda
Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

В. В. Слепцов
Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ),
Москва, Россия

В магнетронном разряде при токах выше критического, величина которого лежит в пределах 15—30 А, происходит переход из тлеющего разряда в поперечном магнитном поле в дуговой. В настоящее время проблема дугогашения решается за счет применения импульсных и ВЧ-источников питания. В настоящей работе предложен альтернативный метод увеличения предельного тока магнетронного разряда за счет увеличения сопротивления разрядного промежутка с помощью дополнительного прианодного поперечного магнитного поля и прерывания тока дуги с использованием секционирования токоприемной поверхности анода.

PACS: 52.80.-s

Введение

В различных отраслях науки и техники широко используются вакуумно-плазменные технологии получения покрытий на поверхности материалов. В вакуумно-плазменных технологических процессах осаждения тонких пленок наряду с другими методами широко применяется метод магнетронного распыления [1]. Максимальная производительность такого метода пропорциональна максимальному току магнетронного разряда. Вместе с тем в магнетронных распылительных системах (МРС) с разрядом на постоянном токе при токах выше некоторого критического значения происходит переход из тлеющего разряда в поперечном

магнитном поле (магнетронного) в дуговой, и процесс эрозии мишени изменяет свой характер.

Характерная особенность дугового разряда — наличие на катодной поверхности МРС быстропереключающихся катодных пятен [2]. Эрозия поверхности катода вакуумной дуги под воздействием катодного пятна обуславливает генерацию “катодного факела” — сверхзвуковой струи частично ионизированного материала катода в паробразном и капельном состояниях с высокой проводимостью [3—5], которая “закорачивает” разрядный промежуток. Так как блоки электропитания МРС постоянного тока не предназначены для поддержания дугового режима разряда (разрядных токов 100 А и более), то это приводит к их

выходу из строя или срабатыванию систем защиты. Кроме того, наличие макрочастиц материала катода в плазме газового разряда при переходе в дуговой режим ограничивает применимость данного метода нанесения покрытий в таких областях, как оптика, микроэлектроника, точная механика, медицина, поскольку такие характеристики, как адгезия покрытия с поверхностью, пористость, шероховатость поверхности покрытия оказываются неудовлетворительными для решения целого спектра технологических задач.

В настоящее время в МРС применяются блоки питания постоянного тока с резистивным ограничением разрядного тока до величины меньше критического тока дугообразования или электронным отключением напряжения питания разряда на время гашения дугового разряда [6]. В последнее время интенсивно исследуются импульсные режимы работы МРС, в которых проблема дугогашения решается за счет применения импульсных и ВЧ-источников питания [7, 8].

В настоящей работе исследуется возможность альтернативного метода увеличения предельного тока магнетронного разряда за счет увеличения сопротивления разрядного промежутка с помощью прианодного поперечного магнитного поля и прерывания разрядного тока дуги с использованием секционированного анода.

Постановка задачи

При решении задачи увеличения предельного тока разряда в МРС без перехода в дуговой режим горения принималось во внимание, что при токах выше некоторого критического значения, величина которого определяется в основном плотностью ионного тока на катоде, материалом катода и лежит в пределах 10—30 А, происходит переход из тлеющего разряда в поперечном магнитном поле в дуговой (явление “пробоев”). Этому способствует несколько физических явлений, характерных для магнетронного разряда:

- интенсивное ионное распыление катода МРС, приводящее к росту на распыляемой поверхности микровыступов и их нагреву [9];
- высокая плотность плазмы у поверхности катода, которая растет с ростом разрядного тока;
- сравнительно высокое напряжение на магнетронном разряде, падение которого сосредоточено у поверхности катода МРС.

Все эти явления приводят к появлению у поверхности катода сильного электрического поля, величина которого увеличивается с ростом разрядного тока, т. е. создаются условия для перехода разряда в МРС из тлеющего в дуговой [10].

При этом существенно изменяются характеристики разряда. Сопротивление разряда резко умень-

шается в сотни раз, возрастает ток разряда и уменьшается разрядное напряжение. На катоде возникают быстро движущиеся катодные пятна, которые и являются центрами разряда и рожают каналы прохождения тока от катода к аноду в виде плотных плазменных струй материала катода (“катодный факел”).

Форма прохождения тока из диффузионной, распределенной по зоне эрозии, переходит в шнуруобразную. Плотность плазменной струи уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от поверхности катода и в пространстве распределена по закону косинуса. Катодные пятна движутся вдоль зоны эрозии в поперечном магнитном поле магнетрона со скоростью $(7—10) \cdot 10^3$ см/с. К сожалению, точные экспериментальные данные о процессах в катодном пятне и катодном факеле дуги, а также приемлемые теоретические модели в настоящее время отсутствуют [2, 11, 12].

Неустойчивость планарной МРС относительно перехода из магнетронного режима в дуговой при небольших величинах критического тока может быть связана с несколькими обстоятельствами: это изменение конфигурации магнитного поля МРС за счет собственного магнитного поля дрейфового электронного тока разряда при его увеличении, при котором она теряет удерживающие свойства. Так как распределение поперечного магнитного поля с максимумом напряженности на поверхности катода совпадает по характеру с распределением плотности в катодном факеле, то параметр Холла в области прохождения тока дуги становится малым, и магнитное поле перестает ограничивать ток электронов на катод. Так как в МРС анод геометрически охватывает область эрозии на катоде и располагается над последним в области магнитной ловушки, то прерывание дугового разряда за счет увеличения длины токового шнура между катодом и анодом при движении катодного пятна (при этом растет напряжение разряда) также не происходит.

Таким образом, в МРС для дугогашения (предотвращения образования или подавления катодных пятен) необходимо использовать эффекты увеличения сопротивления разрядного промежутка и прерывания разрядного тока.

В целях достижения максимальной величины сопротивления разрядного промежутка целесообразно создавать дополнительное магнитное поле с максимальной напряженностью вблизи анода МРС в области минимальной плотности плазменной струи катодного пятна. Суммарный магнитный поток катодного и анодного магнитных полей оптимально должен соответствовать минимальному напряжению горения магнетронного разряда.

Для периодического прерывания разрядного тока, при образовании катодных пятен и “шнуро-

вании” тока разряда целесообразно использовать эффект движения катодных пятен в поперечном магнитном поле вдоль зоны эрозии с помощью секционированного анода, в котором вдоль направления движения токового шнура токоприемная поверхность анода чередуется с гальванически изолированной. Так как плотность плазменной струи уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от поверхности катода и в пространстве распределена по закону косинуса, то при движении катодного пятна изменение плотности частиц у поверхности анода со временем можно оценить по формуле

$$n = n_0 \left(1 + \left(\frac{v_0 t}{d} \right)^2 \right)^{-3/2},$$

где d — расстояние катод—анод МРС;

v_0 — скорость движения катодного пятна;

t — время;

n_0 — начальная плотность частиц у анода.

Видно, что со временем плотность частиц у анода быстро падает и магнитная изоляция анода, если она была нарушена, восстанавливается.

Для экспериментальной проверки этой методики увеличения предельного тока магнетронного разряда были разработаны и исследованы анодные блоки стационарных и импульсных МРС.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Эксперименты проводились с использованием планарной МРС с диаметром распыляемой мишени 110 мм. Магнитное поле арочной конфигурации над поверхностью мишени создавалось системой постоянных магнитов, расположенных под мишенью. Максимальная напряженность арочного магнитного поля на поверхности мишени составляла 300 Э. Диаметр зоны с максимальной напряженностью арочного магнитного поля составлял 70 мм. Катодный блок МРС был помещен в экран, находящийся под плавающим потенциалом. Для МРС был рассчитан, сконструирован и изготовлен анодный блок с электромагнитной системой дугогашения. Анодный блок располагали непосредственно перед распыляемой мишенью МРС и ориентировали параллельно ее диаметру. Расстояние катод—анод могло изменяться в пределах 15—150 мм. Схема питания катодного и анодного блоков магнетронной распылительной системы приведена на рис. 1.

Анодный блок включает в себя цилиндрический анодный электрод диаметром 28 мм, магнитную систему и систему электрически изолированных экранов диаметром 37 мм. Незранированные участки поверхности цилиндрического анода дли-

ной 15 мм играли роль токоприемников электронного тока магнетронного разряда и геометрически располагались над зоной эрозии МРС. Остальная поверхность анода находилась под электрически изолированными экранами. Магнитная система анодного блока состояла из восьми цилиндрических постоянных магнитов и создавала в областях токоприемной поверхности анода аксиально-симметричное магнитное поле арочной конфигурации с максимальной напряженностью на поверхности анода 200 Э. Напряженность магнитного поля экспоненциально уменьшалась от поверхности анода на расстоянии 2 см. Анодный электрод ориентировался параллельно распыляемой мишени по диаметру таким образом, чтобы направления магнитных полей магнетрона и анодного блока совпадали.

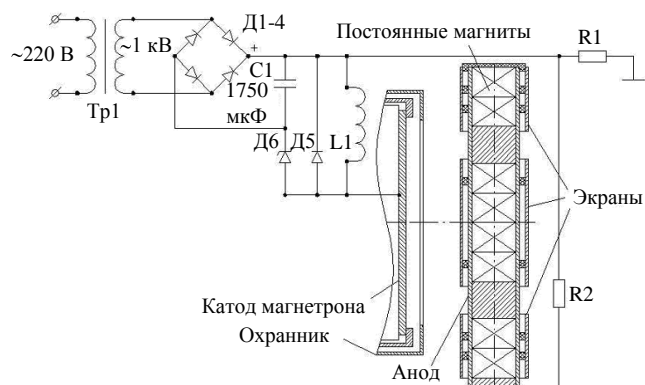


Рис. 1. Схема питания катодного и анодного блоков магнетронной распылительной системы

Таким образом, возможному образованию катодных пятен на поверхности распыляемой мишени МРС и переходу разряда в дуговой режим препятствует как дополнительная магнитоизоляция токоприемной поверхности анода, так и увеличение длины токового дугового шнура при движении катодных пятен в зоне эрозии мишени МРС в азимутальном направлении под действием магнитного поля.

Для исследования разработанной системы в магнетронном режиме (при разрядных напряжениях ~1000 В) с большими токами (~100 А) был изготовлен квазистационарный импульсный блок питания (см. рис. 1) емкостного типа С1 с тиристорным коммутатором Д6 с запасом энергии 900 Дж. Индуктивность L1 служила для устойчивого запуска коммутатора и регулирования длительности импульса напряжения “холостого хода”, который в наших экспериментах составлял 10^{-2} с. Учитывая, что время установления стационарного разряда в магнетроне составляет 10^{-5} с, можно считать, что разряд в МРС при данных параметрах импульса напряжения практически стационарен.

Для отсечки второго полупериода напряжения блока питания при переходе разряда в дуговой режим в схему питания включался диод Д5. В цепь питания МРС также включался резистор R2 = 5—30 Ом, ограничивающий разрядный ток магнетрона. Резистор R1 ≈ 200 Ом служил для инициации тока срабатывания тиристора. В процессе экспериментов измеряли напряжение на разряде (с помощью высокоомного делителя напряжения) и ток разряда (с помощью пояса Роговского) в широком диапазоне давлений рабочего газа (аргон) $p = 8 \times 10^{-4}—5 \cdot 10^{-2}$ Торр.

Исследования показали, что в зависимости от расстояния между катодом и анодом и величины рабочего давления в камере происходит изменение режима горения разряда в МРС.

При давлениях в камере $p = 8 \cdot 10^{-4}—6 \cdot 10^{-3}$ Торр и расстояниях катод—анод МРС более 25 мм наблюдается магнетронный режим горения разряда. На рис. 2, а и б показаны вид свечения сильноточного магнетронного разряда и осциллограммы напряжения и тока разряда.

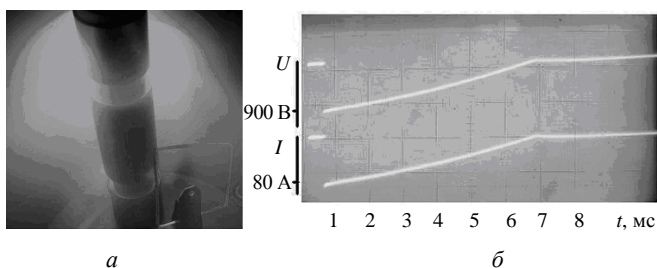


Рис. 2. Магнетронный режим горения разряда:
а — вид свечения сильноточного магнетронного разряда;
б — осциллограммы напряжения и тока разряда

Отсутствие видимых катодных пятен на поверхности катода и дуговых шнуров между катодом и анодом, а также высокое напряжение при протекании разряда (в среднем 400 В) при больших токах (40—80 А), свидетельствуют о том, что МРС работает в магнетронном режиме, т.е. переход в дуговой режим в этой области параметров разряда подавляется.

При давлении рабочего газа в камере $p > 6 \cdot 10^{-3}$ Торр и уменьшении расстояния катод—анод до 15—20 мм наблюдается переход разряда в дуговой режим. На рис. 3, а и б показаны вид свечения сильноточного низковольтного дугового разряда и типичные осциллограммы напряжения и тока разряда.

На осциллограммах напряжения и тока разряда видно, что в начальный момент подачи напряжения на разрядный промежуток в МРС зажигается высоковольтный сильноточный магнетронный разряд с параметрами $U \approx 900$ В, $I \approx 70—80$ А. Однако высокое напряжение сохраняется только в

течение короткого промежутка времени с момента зажигания разряда ($\approx 0,1$ мс), после чего следуют срыв напряжения до нескольких десятков вольт и резкое возрастание тока до величины 120—180 А, ограниченной величиной резистора R2. При этом на поверхности катода МРС визуально наблюдаются яркосветящиеся движущиеся по азимуту катодные пятна и токовые шнуры между катодом и токоприемными поверхностями анода.

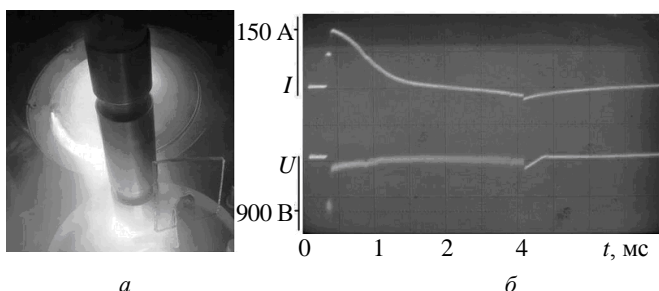


Рис. 3. Переход разряда в дуговой режим:
а — вид свечения сильноточного низковольтного дугового разряда; б — осциллограммы напряжения и тока разряда

Эксперименты в стационарных условиях электропитания проводились с продольной МРС с размерами алюминиевой мишени 350×100 мм, для которой были разработаны анодные блоки с дополнительной магнитоизоляцией анодов и системой экранов. Анодные блоки устанавливали только по узким торцам продольной МРС, что препятствовало дугообразованию на продольных длинных участках распыляемой мишени МРС (рис. 4).

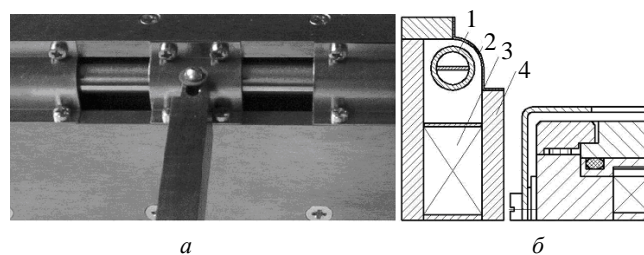


Рис. 4. Анодный блок продольной МРС:
а — внешний вид; б — профильный разрез

Внешний вид анодного блока представлен на рис. 4, а, на рис. 4, б — профильный разрез анодного блока. Цилиндрический водоохлаждаемый анод 1 помещался внутри кожуха из массивных полос магнитомягкой стали 4, которые служили не только анодными экранами, но и магнитопроводом для магнитной системы на основе постоянных магнитов 3.

На рис. 5, а приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) МРС. Кривая 1 (см. рис. 5, а) соответствует случаю, когда кожух анодного бло-

ка электрически соединялся с анодом, т. е. весь анодный блок служил токоприемной анодной поверхностью (анодом). При превышении током разряда значения 23 А на поверхности катода МРС наблюдались постоянные дуговые пробои, сопровождающиеся резким увеличением тока разряда и срабатыванием электронной схемы дугогашения блока питания. Кривая 2 (см. рис. 5, а) представляет собой ВАХ разряда в МРС с двумя расположенными по торцам анодными блоками с дополнительной магнитоизоляцией. Видно, что напряжение горения разряда увеличивается на величину около 50 В, однако в этом случае перехода магнетронного разряда в дуговой режим не происходит даже при существенно больших токах, максимальная величина которых является предельной для данного источника питания. Можно предположить, что система не только предотвращает превращение катодных пятен первого рода (“искрение” на поверхности катода МРС) в катодные пятна второго рода (образование токового плазменного шнура), но и существенно уменьшает их время жизни.

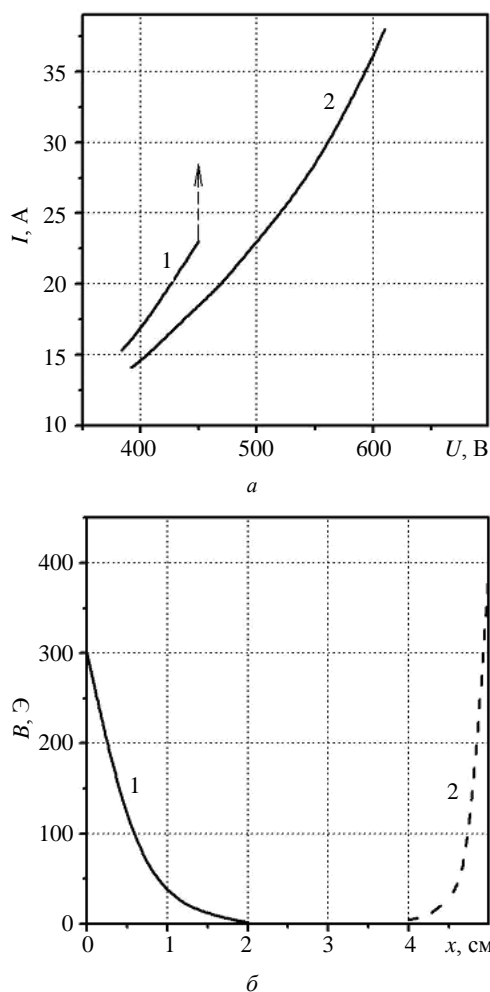


Рис. 5. Магнитная система продольной МРС: а — ВАХ; б — распределение поперечной составляющей напряженности магнитного поля между катодом и анодом

Распределение поперечной составляющей напряженности магнитного поля между катодом и анодом показано на рис. 5, б. Магнитная система создавала у анода поперечное магнитное поле с напряженностью на поверхности анода около 400 Э. Направление дополнительного магнитного поля вблизи поверхности анода (см. рис. 5, б, кривая 2) совпадало с направлением арочного магнитного поля над мишенью МРС (рис. 5, б, кривая 1). Кожух анодного блока изолировался от элементов оснастки вакуумной камеры и находился под плавающим потенциалом. Система дополнительных экранов 2 (см. рис. 4) из немагнитной нержавеющей стали обеспечивала секционированность анода. Электропитание МРС осуществлялось от источника питания постоянного тока без внутреннего заземления с регулировкой тока. Источник питания обеспечивал подачу на МРС напряжения холостого хода 1200 В при максимальном токе до 40 А.

Заключение

Исследована возможность увеличения предельного тока магнетронного разряда за счет увеличения сопротивления разрядного промежутка с помощью прианодного поперечного магнитного поля. Для периодического прерывания разрядного тока, при образовании катодных пятен и предотвращения “шнурования” тока разряда использован эффект движения катодных пятен в поперечном магнитном поле вдоль зоны эрозии с помощью секционированного анода, в котором вдоль направления движения токового шнура токоприемная поверхность анода чередуется с гальванически изолированной. Предполагается, что это связано с тем, что предложенная конструкция анодной системы МРС не только предотвращает превращение катодных пятен первого рода (“искрение” на поверхности катода МРС) в катодные пятна второго рода (образование токового плазменного шнура), но и существенно уменьшает их время жизни.

Литература

1. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Кобайн Дж., Эккер Г., Фаррелл Дж., Гринвуд А., Харрис Л. Вакуумные дуги: Пер. с англ./ Под ред. Дж. Лафферти. — М.: Мир, 1982.
3. Kimblin C. W.// J. Appl. Phys. 1973. V. 44. №. 7. P. 3074.
4. Daalder J. E.// J. Phys. D: Appl. Phys. 1976. V. 9. № 11. P. 2379.
5. Daalder J. E.// Ibid. 1975. V. 8. № 14. P. 1647.
6. Арсланов И. Р., Подковыров В. Г., Сочугов Н. С.: Докл. VI конф. “Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц”, 2002. С. 186.
7. Awazu K., Sakudo N., Yasui H., Saji E., Okazaki K., Hasegawa Y., Ikenaga N., Sato T., Nambo Y., Saitoh K.// AIP Conference Proceedings. 2001. V. 576. Issue 1. P. 955.

8. Sanner, Mark A., Park Jin Y. // Rev. Sci. Instr. 1997. V. 68. Issue 3. P. 1575.

9. Берии Р. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. — М.: Мир, 1984.

10. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука, 2000.

11. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М. Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005.

12. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005.

Статья поступила в редакцию 22 июля 2008 г.

Limiting current of magnetron discharge increasing using magnetic insulation of sectioned anode

O. A. Bizyukov, K. N. Sereda

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

V. V. Sleptsov

K. E. Tsiolkovsky Russian State Technical University (MADI), Moscow, Russia

In magnetron discharge at currents higher than critical which magnitude is in the range of 15—30 A the transition from glow discharge in transverse magnetic field to arc discharge occurs. In the present time the problem of arc blowout is solved at the expense of pulse and HF power supply applying. In this paper the alternative method of limiting current of magnetron discharge increasing at the expense of increasing of discharge gap resistance by means of additional anode layer transverse magnetic field and arc current interruption by sectioning of current collector of anode surface is carrying out.

PACS: 52.80.-s

УДК 539.216.2: 621.793.18

Получение наноструктурных пленок низкотемпературной плазмой

А. Р. Галяутдинов, Р. Т. Галяутдинов, Н. Ф. Кашапов

ГОУ «ВПО "Казанский государственный технологический университет"», г. Казань, Россия

Методом магнетронного распыления получены пленки оксида титана TiO_x ($1 < x < 2$) с регулируемым показателем поглощения. Измерены спектральные характеристики полученных тонких пленок. Спектрофотометрическим методом определены толщины и комплексные показатели преломления. Методом электронного парамагнитного резонанса обнаружены парамагнитные ионы Ti^{3+} в исследуемых покрытиях. Установлена структура пленок.

PACS: 81.07.-b

Введение

Среди различных методов формирования покрытий плазменные методы напыления являются универсальными и технологичными. Преимущество плазменных магнетронных систем заключается в том, что использование скрещенных электрических и магнитных полей приводит к увеличению скорости распыления материала мишени в 50—100 раз. Изменяя параметры технологического процесса, такие как напряжение на катоде, давле-

ние и состав рабочего газа, индукция магнитного поля, можно наносить покрытия с различной адгезией и комплексным показателем преломления [1]. В оптике тонкослойных покрытий при синтезе интерференционных систем существует проблема подбора оптимального соотношения толщин и показателей преломления пленкообразующих материалов [2].

Получение покрытий с заданными оптическими характеристиками требует знания и контроля