

СИЛЬНОТОЧНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД С МАГНИТОИЗОЛИРОВАННЫМ АНОДОМ

А.А. Бизюков¹, К.Н. Середа¹, В.В. Слепцов²

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина;

²Российский государственный технический университет им. К.Э. Циолковского

(МАТИ), Москва, Россия

E-mail: bizyukov@mail.ru

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 путем применения импульсных и ВЧ-источников питания. В работе исследуется 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.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных отраслях науки и техники широко используются вакуумно-плазменные технологии получения покрытий на поверхности материалов. В вакуумно-плазменных технологических процессах осаждения тонких плёнок 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, происходит переход из тлеющего разряда в поперечном магнитном поле (магнетронного) в дуговой, и процесс эрозии мишени изменяет свой характер. Характерной особенностью дугового разряда является наличие на катодной поверхности МРС быстро перемещающихся катодных пятен [2]. Эрозия поверхности катода вакуумной дуги под воздействием катодного пятна обуславливает генерацию “катодного факела” – сверхзвуковой струи частично ионизированного материала катода в парообразном и капельном состоянии 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 и более ампер), 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 к поверхности, 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 путем 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.

2. 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, 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: 1) интенсивное ионное распыление катода МРС, приводящее к росту на распыляемой поверхности микровыступов и их нагреву [9]; 2) высокая плотность плазмы у поверхности катода, которая растет с ростом разрядного тока; 3) 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 растет с ростом разрядного тока, т.е. создаются условия для перехода разряда в МРС из тлеющего в дуговой [11].

При этом существенно изменяются характеристики разряда. Сопротивление разряда резко уменьшается в сотни раз, резко возрастает ток разряда и уменьшается разрядное напряжение. На катоде возникают быстро движущиеся катодные пятна, которые и являются центрами разряда и рождают 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 шнуровидную. 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, 10, 11].

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 в результате собственного магнитного поля дрейфового электронного тока разряда при его увеличении, при котором она теряет удерживающие свойства [12]. 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 катодом 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.

С целью 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 “шнуровании” 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:

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

где d – расстояние катод–анод МРС; v_0 – скорость движения катодного пятна; t – время; n_0 – начальная плотность частиц у анода. Откуда видно, что со временем плотность частиц у анода быстро спадает, 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.

3. 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 располагался непосредственно перед распыляемой мишенью МРС и ориентировался 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. Неэкранированные участки поверхности цилиндрического анода длиной 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 8 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.

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.

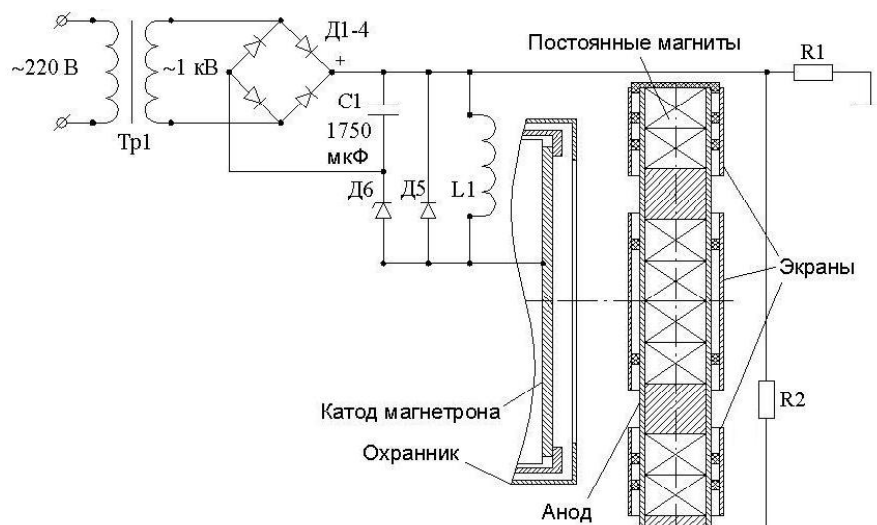


Рис.1. Схема питания катодного и анодного блоков магнетронной распылительной системы

Для исследования разработанной системы в магнетронном режиме (при разрядных напряжениях порядка 1000 В) с большими токами (порядка 100 А) был изготовлен квазистационарный импульсный блок питания (см. Рис.1) емкостного типа (C1) с тиристорным коммутатором (D6) с запасом энергии 900 Дж. Индуктивность L1 служила для устойчивого запуска коммутатора и регулировки 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 D5. В цепь питания МРС также включался резистор $R2=5...30$ Ом, ограничивающий разрядный ток магнетрона. Резистор $R1 \approx 200$ Ом служил для инициации тока срабатывания тиристора. В процессе экспериментов измерялись напряжение на разряде (при помощи высокоомного делителя напряжения) и ток разряда (при помощи пояса Роговского) в широком диапазоне давлений рабочего газа (аргон) $p=8 \cdot 10^{-4}...5 \cdot 10^{-2}$ 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 показаны вид свечения сильноточного магнетронного разряда и 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.

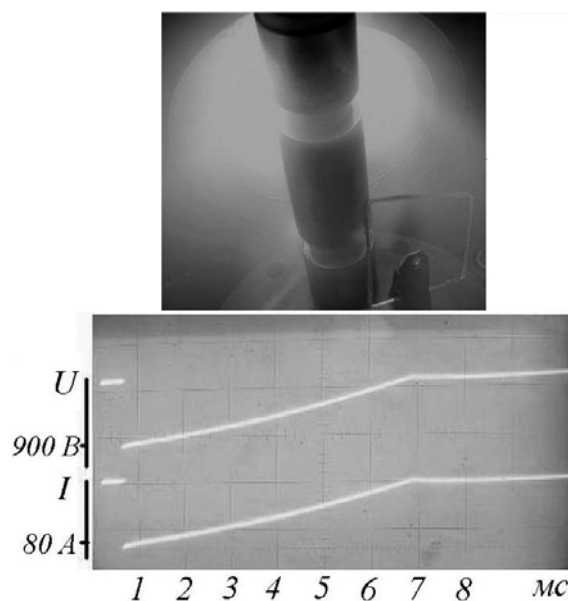


Рис.2. Вид свечения сильноточного магнетронного разряда и осциллограммы напряжения и тока разряда

При давлении рабочего газа в камере $p > 6 \cdot 10^{-4}$ Торр и при уменьшении расстояния катод-анод до значений 15...20 мм наблюдается переход разряда в дуговой режим. На Рис.3 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, $I \approx 70 \dots 80$ А. Однако, высокое напряжение сохраняется только в течение короткого промежутка времени с момента зажигания разряда ($\approx 0,1$ мс), после чего следует срыв напряжения до нескольких десятков вольт и резкое возрастание тока до величины $120 \dots 180$ А, ограниченной величиной резистора R2. При этом на поверхности катода МРС визуально наблюдаются ярко светящиеся движущиеся по азимуту катодные пятна и токовые шнуры между катодом и токоприемными поверхностями анода.

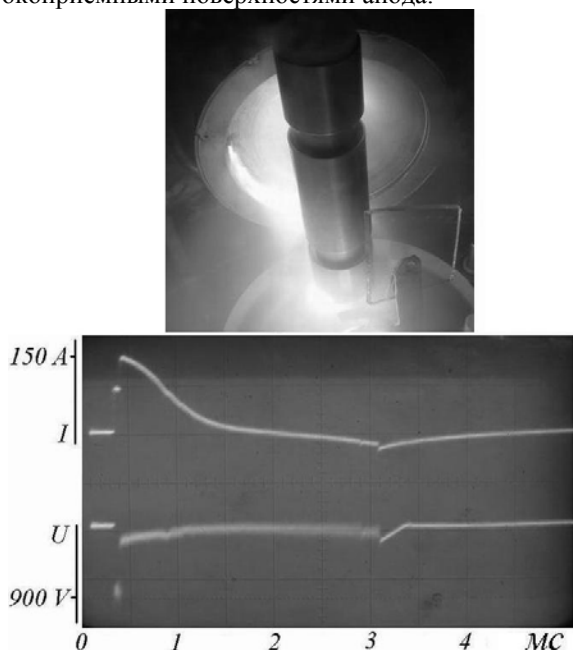


Рис.3. Вид свечения сильноточного низковольтного дугового разряда и осциллограммы напряжения и тока разряда

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

Внешний вид анодного блока и его профильный разрез представлен на Рис.4. Цилиндрический водоохлаждаемый анод (1) помещался внутри кожуха из массивных полос магнитомягкой стали (2), которые служили не только анодными экранами, но и магнитопроводом для магнитной системы на основе постоянных магнитов (3). 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.

Распределение поперечной составляющей напряженности магнитного поля между катодом и анодом показано на Рис.5. Магнитная система создавала у анода поперечное магнитное поле с

напряженностью на поверхности анода около 400 Э. Направление дополнительного магнитного поля вблизи поверхности анода (кривая 2) совпадало с направлением арочного магнитного поля над мишенью МРС (кривая 1).

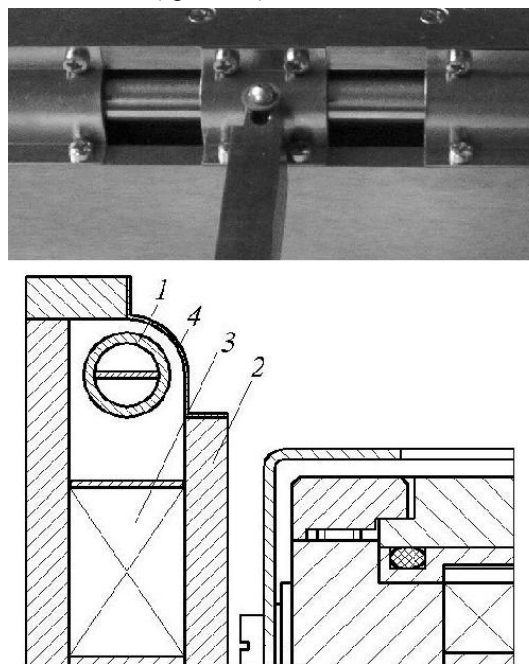


Рис.4. Внешний вид анодного блока продольной МРС и его профильный разрез

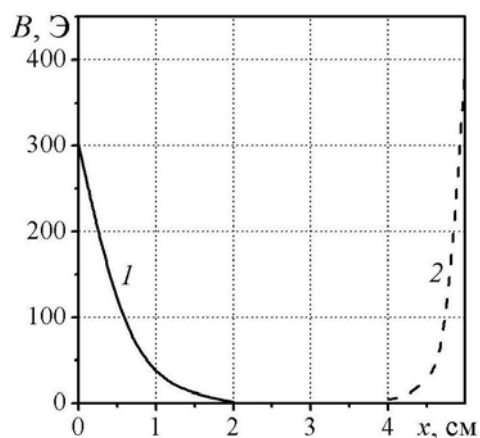


Рис.5. Распределение поперечной составляющей напряженности магнитного поля между катодом и анодом продольной МРС

На Рис.6 приведены вольт-амперные характеристики МРС.

Кривая 1 соответствует случаю, когда кожух анодного блока электрически соединялся с анодом, т.е. сам весь анодный блок служил токоприемной анодной поверхностью (анодом). При превышении тока 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 – вольт-амперная характеристика разряда в МРС с двумя расположенными по торцам анодными блоками с дополнительной магнитоизоляцией.

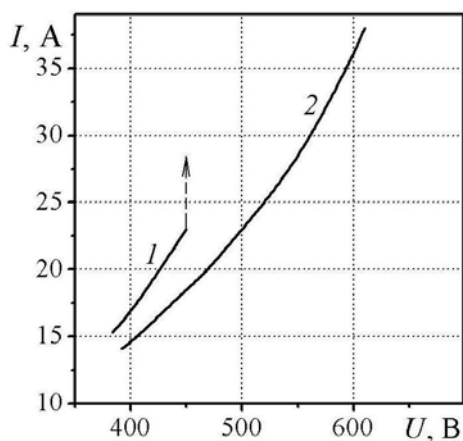


Рис.6. Вольт-амперные характеристики продольной MPC

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 MPC) в катодные пятна второго рода (образование токового плазменного шнура), но и существенно уменьшает их время жизни.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе 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 MPC не только предотвращает превращение катодных пятен первого рода

(“искрение” на поверхности катода MPC) в катодные пятна второго рода (образование токового плазменного шнура), но и существенно уменьшает их время жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.С. Данилин. *Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких плёнок*. М.: «Энергоатомиздат», 1989, с.328.
2. Дж. Кобайн, Г. Эккер, Дж. Фаррелл, А. Гринвуд, Л. Харрис. *Вакуумные дуги* / Пер. с англ. / Под ред. Дж. Лафферти. М.: «Мир», 1982.
3. С.W. Kimblin. Erosion and ionization in the cathode spot region of vacuum arcs // *J. Appl. Phys.* 1973, v.44, №7, p.3074-3081.
4. J.E. Daalder. Components of cathode erosion in vacuum arcs // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1976, v.9, №11, p.2379-2395.
5. J.E. Daalder. Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1975, v.8, N.14, p.1647-1659.
6. И.Р. Арсланов, В.Г. Подковыров, Н.С. Сочугов // *Докл. VI Конф. “Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц”*. 2002, с.186.
7. K. Awazu, N. Sakudo, H. Yasui, E. Saji, K. Okazaki, Y. Hasegawa, N. Ikenaga, T. Sato, Y. Nambo, K. Saitoh. Films formed by hybrid pulse plasma coating (HPPC) system // *AIP Conference Proceedings*. 2001, v.576, issue 1, p.955.
8. Sanner, A. Mark, Jin.Y. Park. Dynamic pulsed plasma reactor for chemical vapor deposition of advanced materials // *Rev. Sci. Instr.* 1997, v.68, issue 3, p.1575.
9. Р. Бериш. *Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой*. М.: «Мир», 1984, с.336.
10. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. *Вакуумно-дуговые устройства и покрытия*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, с.15-18.
11. И.И. Аксенов. *Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005, с.19-37.
12. А.А. Bizyukov, S.N. Abolmasov. On the magnetic field profile in a high-power planar magnetron discharge // *IEEE Trans. Pl. Sci.* 2005, v.33, issue 4, part 2, p.1447-1449.

Статья поступила в редакцию 12.05.2008 г.

HIGH-CURRENT MAGNETRON DISCHARGE WITH MAGNETIC INSULATION OF ANODE

O.A. Bizyukov, K.N. Sereda, V.V. Sleptsov

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.

СИЛЬНОСТРУМОВИЙ МАГНЕТРОННИЙ РОЗРЯД З МАГНІТОІЗОЛЮВАННЯМ АНОДОМ

O.A. Бізюков, К.М. Серєда, В.В. Слєпцов

У магнетронному розряді при струмах, вище критичного, величина якого лежить в діапазоні 15...30 А, відбувається перехід від тліючого розряду в поперечному магнітному полі до дугового. За теперішнього часу проблема дугозагасання вирішується за рахунок застосування імпульсних та ВЧ-джерел живлення. У даній роботі досліджується альтернативний спосіб підвищення граничного струму магнетронного розряду за рахунок підвищення опору розрядного проміжку за допомогою додаткового прианодного поперечного магнітного поля та переривання струму дуги з використанням секціонування струмоприймальної поверхні аноду.