

УДК 621.387.35

Гашение электрической дуги в вакуумном промежутке с однородным поперечным магнитным полем

Д. Ф. Алфёров, М. Р. Ахметгареев, Д. В. Евсин, В. П. Иванов
Всероссийский электротехнический институт, Москва, Россия
E-mail: alferov@vei.ru

Проведено экспериментальное исследование отключающей способности вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) с однородным поперечным магнитным полем, формируемым системой постоянных магнитов. При шунтировании емкостью 0,5 мкФ ВДК отключала постоянный ток до 150 А в диапазоне изменения индукции магнитного поля $B = 100—180$ мТл. Отключающую способность ВДК удалось увеличить до 300 А при $B = 120—160$ мТл путем введения неоднородности в распределение магнитного поля вблизи поверхности контактов.

PACS: 52.50.-b, 52.80.Vp

Введение

Одним из известных способов коммутации постоянного тока в вакуумных промежутках является повышение напряжения на промежутке с помощью поперечного магнитного поля. Известно, что создание магнитного поля в вакуумном промежутке приводит к существенному изменению динамики катодных пятен (КП) и генерируемого ими потока катодной плазмы [1—5].

В поперечном магнитном поле КП перемещаются поперек поля в ретроградном направлении (т. е. в противоположном направлению действия силы Ампера). Скорость перемещения групп КП по поверхности катода зависит от его материала и состояния поверхности, длины дуги и увеличивается с ростом индукции магнитного поля. Динамика плазменного потока определяется совместным действием силы Лоренца и холловского электрического поля. Результирующая сила приводит к изгибу потока в направлении действия силы Ампера.

В работах [3, 5] импульсное магнитное поле, перпендикулярное оси контактной системы вакуумного промежутка, создавалось с помощью двух соосных катушек, расположенных по бокам промежутка. Распределение магнитного поля в межконтактном промежутке было практически однородным.

В [6, 7] для отключения вакуумной дуги использовалось аксиально-симметричное импульсное магнитное поле, которое генерировалось катушками, расположенными соосно с электродной системой вакуумного промежутка со стороны катодного электрода.

В [8] была предложена конструкция ВДК, в межконтактном промежутке которой с помощью

постоянных магнитов формировалось аксиально-симметричное преимущественно радиальное магнитное поле. В этих условиях магнитное поле воздействовало на дугу в течение всего времени ее горения. В результате исследований [9—11] установлено, что развитие вакуумной дуги отключения в ВДК с аксиально-симметричным магнитным полем проходило через две характерные стадии. В первой, устойчивой стадии по мере разведения контактов напряжение на дуге монотонно повышалось от 15—17 до 25—30 В.

В момент перехода в неустойчивую стадию возникали значительные осцилляции напряжения и тока. Напряжение на вакуумном промежутке быстро возрастало до уровня, определяемого параметрами цепи, а ток уменьшался до нуля. Нарушение устойчивости горения дуги происходило при критическом токе, ниже которого вакуумная дуга в поперечном магнитном поле всегда имеет неустойчивую стадию. При токах выше критического дуга горела устойчиво.

В настоящей работе экспериментально исследовано развитие вакуумной дуги отключения в однородном поперечном магнитном поле, которое в межконтактном промежутке ВДК формировалось системой постоянных магнитов.

Эксперимент

Для проведения исследований использовалась ВДК отпаянной конструкции (рис. 1). Контактная система ВДК выполнена в виде торцевых цилиндрических вольфрамовых контактов диаметром 10 мм (1 — подвижный, 2 — неподвижный). Центральная часть корпуса, охватывающая межконтактный промежуток, выполнена в виде металли-

ческого цилиндра из немагнитного материала диаметром 40 мм. На этом участке корпуса сбоку напротив межконтактного зазора устанавливалась магнитная система. Контакты разводились электромагнитным приводом на расстояние $\delta = 4$ мм со скоростью $\sim 0,9$ м/с.

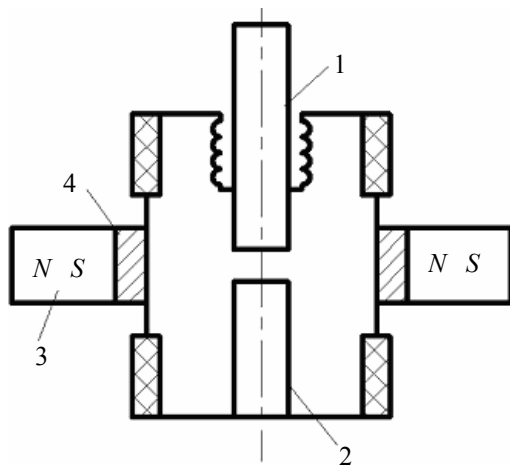


Рис. 1. Схема ВДК:

1 — подвижный контакт; 2 — неподвижный контакт;
3 — постоянный магнит; 4 — магнитопровод

Магнитная система выполнена из постоянных магнитов прямоугольной формы марки МАЕР 36АL с коэрцитивной силой $H_{cj} = 1000$ А/м. Высота магнитов вдоль оси камеры составляла 20 мм, а ширина в поперечном направлении — 30 мм. Магнитная система содержит магнитопровод специальной формы. Она формирует в вакуумном промежутке практически однородное поперечное магнитное поле, индукция которого регулируется путем изменения длины магнита в диапазоне 70—170 мТл. Распределение силовых линий в поперечном сечении ВДК показано на рис. 2.

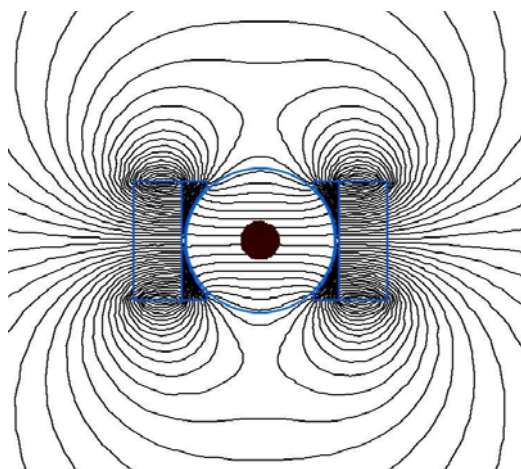


Рис. 2. Распределение силовых линий в поперечном сечении ВДК

Эксперименты проводили на сильноточном импульсном стенде, схема которого изображена на рис. 3. Стенд состоит из конденсаторной батареи

C_0 емкостью 5 мФ на максимальное напряжение 5 кВ, которая заряжалась от зарядного устройства G . В схеме устанавливали реактор с регулируемой индуктивностью L_0 до 6 мГн и токоограничивающий резистор R_0 . Контакты исследуемой ВДК Q_1 находились в нормально замкнутом положении и разводились с помощью электромагнитного привода Y_1 со средней скоростью $v \sim 1$ м/с. Параллельно Q_1 устанавливали нелинейный резистор R_1 для ограничения восстанавливающегося напряжения до уровня ~ 9 кВ и конденсатор C_1 . Все измерения проводили при зарядном напряжении $U_0 = 4$ кВ.

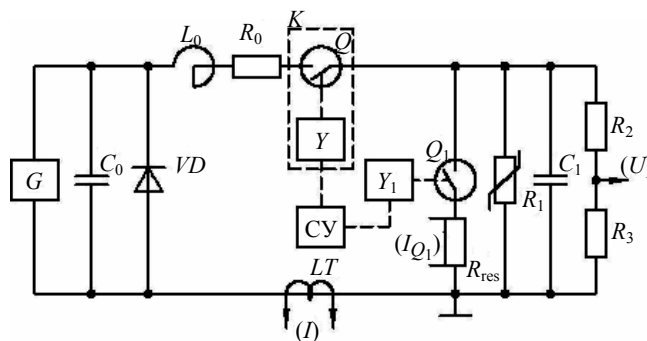


Рис. 3. Схема сильноточного импульсного стенда

Для коммутации цепи служил вспомогательный контактор K типа КВО с электромагнитным приводом Y . После подачи команды на схему управления (СУ) она генерировала сигнал на замыкание контактов вспомогательного контактора K . Когда по цепи начинал протекать ток, СУ вырабатывала сигнал на размыкание контактов исследуемой ВДК с некоторой временной задержкой. Временная задержка определяла начальный ток I_0 , при котором начинали размыкаться контакты в Q_1 .

Ток I в разрядном контуре измеряли датчиком тока типа LT-500-S/SP53 чувствительностью 212 А/В, напряжение U на Q_1 измеряли с помощью омического делителя ($K_U = 217$). Сигналы с датчиков регистрировались цифровым осциллографом Tektronix TDS 3014В с последующим сохранением и обработкой на персональном компьютере.

Перед измерениями проводили формовку ВДК без магнитного поля. Было выполнено порядка 100 коммутаций тока $I_0 = 120$ А.

- *Первая серия измерений* была проведена с магнитной системой, в которой поперечное сечение магнитопровода совпадало с сечением постоянных магнитов (высота 10 мм). Проводилось около 15 коммутаций при фиксированных значениях I_0 , B и C_1 .

Типичная осциллограмма напряжения U и тока I при $C_1 = 0$, $B \approx 100$ мТл для $I_0 \approx 40$ А показана на рис. 4, а. Видно, что как и в камере с аксиально-симметричным полем развитие дуги отключения при разведении контактов в ВДК проходит через

две стадии: устойчивую и неустойчивую с высокочастотными осцилляциями напряжения. Отличие заключается в сравнительно слабой реакции тока на увеличение напряжения на неустойчивой стадии.

Заметный спад тока наблюдался только при напряжении (амплитуда осцилляций), превышающем напряжение источника питания в данный момент времени. Среднее время отключения при $I_0 \approx 40$ А составило $t_{br} = 10$ мс и изменялось в диапазоне 3—40 мс. При увеличении I_0 до 80 А максимальное время отключения увеличилось до 70 мс. За это время отключаемый ток уменьшался до 55 А. При $I_0 \approx 160$ А максимальное время отключения превысило 100 мс, что соответствует минимальному отключаемому току ~ 55 А.

Подключение шунтирующей емкости $C_1 = 0,5$ мкФ привело к заметному уменьшению среднего времени отключения до 3 мс (см. рис. 4, б). Максимальное время отключения уменьшилось до 4 мс, соответственно, минимальный ток отключения увеличился до 140 А. Однако с увеличением тока I_0 до 370 А шунтирование ВДК емкостью $C_1 = 0,5$ мкФ не дало заметного эффекта для повышения ее отключающей способности. В этом случае возникновение неустойчивой стадии уже не приводило к отключению тока. Неустойчивая стадия снова переходила в устойчивую (без осцилляций напряжения) и продолжалась вплоть до уменьшения тока до 40—50 А (см. рис. 4, в). Отключающая способность ВДК практически не менялась при увеличении магнитного поля до 180 мТл.

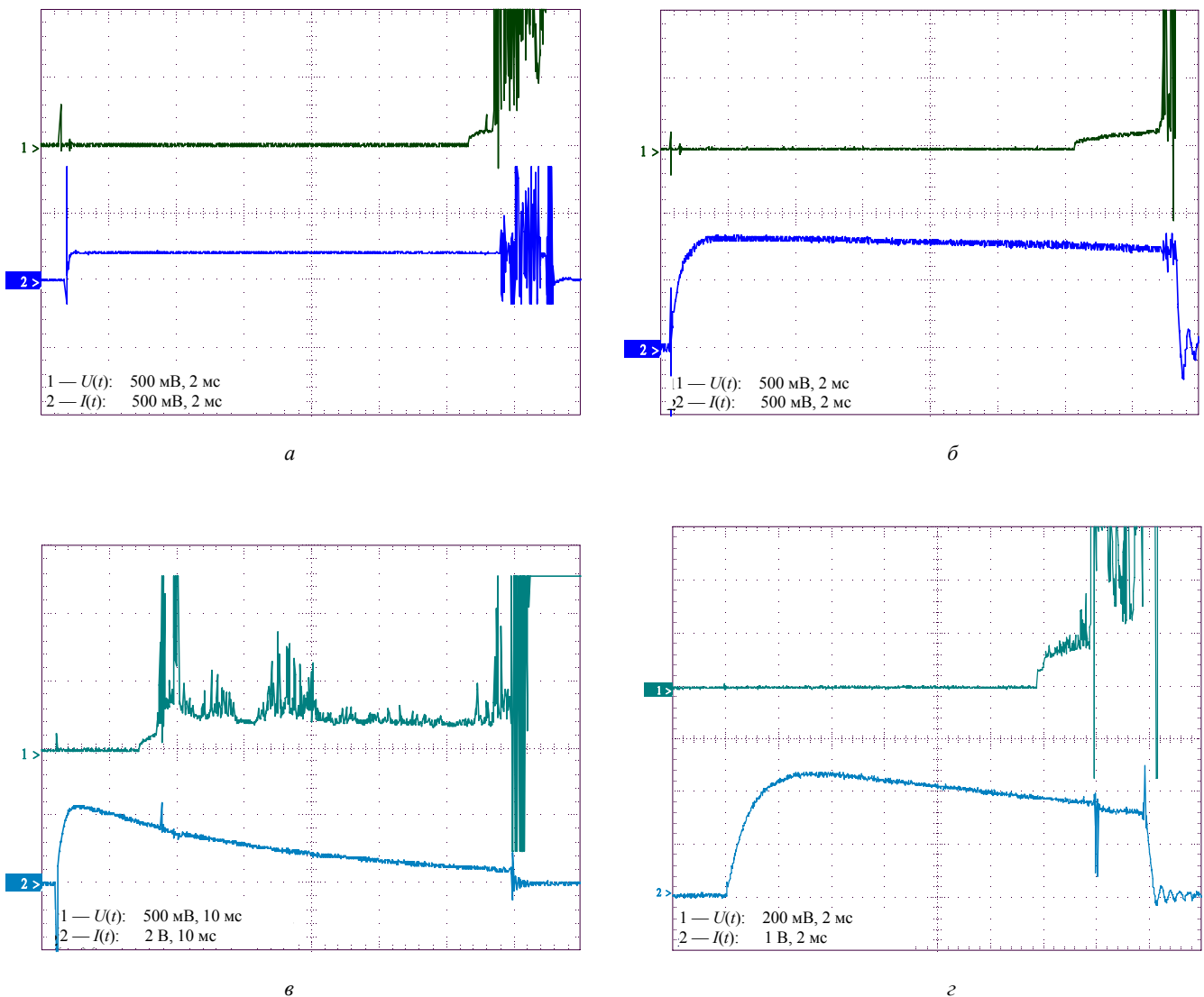


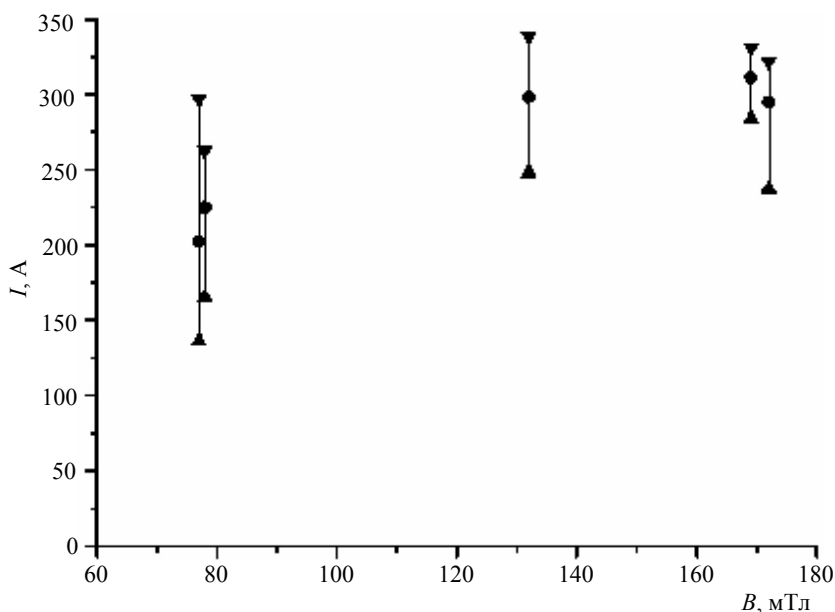
Рис. 4. Осциллограмма напряжения U (верхний луч, 108 В/дел) и тока I :
 а — (нижний луч, 106 А/дел) при $C_1 = 0$ мкФ, $B \approx 110$ мТл для $I_0 \approx 40$ А;
 б — (нижний луч, 106 А/дел) при $C_1 = 0,5$ мкФ, $B \approx 110$ мТл для $I_0 \approx 160$ А;
 в — (нижний луч, 424 А/дел) при $C_1 = 0,5$ мкФ, $B \approx 110$ мТл для $I_0 \approx 370$ А;
 з — (нижний луч, 212 А/дел) при $C_1 = 0,5$ мкФ, $B \approx 130$ мТл для $I_0 \approx 370$ А

• *Вторая серия измерений* была проведена с магнитной системой, в которой высота магнитопровода около боковой поверхности камеры составляла 4 мм. Проводилось около 10 коммутаций при фиксированных значениях I_0 , B и $C_1 = 0,5$ мкФ. Путем перемещения магнитной системы вдоль оси камеры было найдено ее оптимальное положение напротив торца неподвижного контакта, при котором отключающая способность ВДК была максимальной.

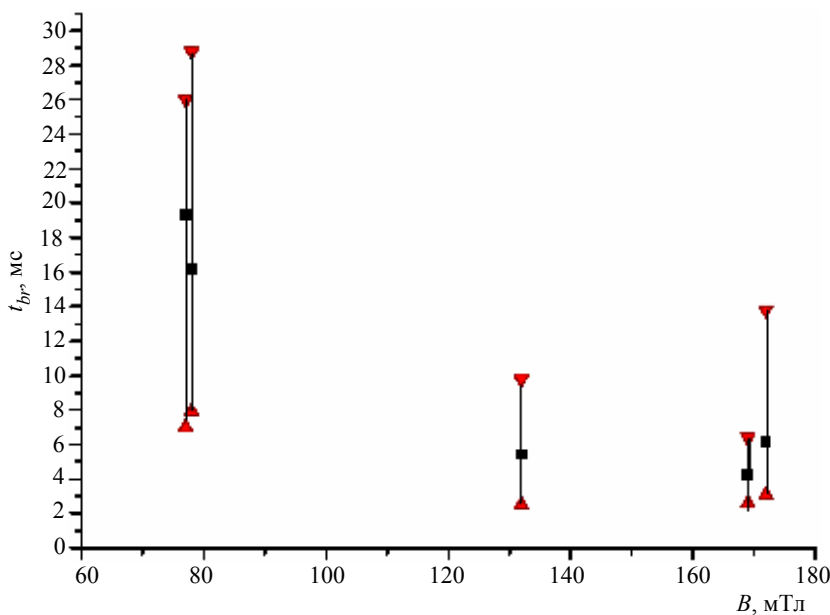
Типичная осциллограмма напряжения U и тока I для $I_0 \approx 370$ А при $B \approx 130$ мТл показана на рис. 4, з. Использование новой магнитной системы позволило существенно уменьшить время отключения

при $I_0 = 370$ А по сравнению с первой серией измерений.

Средние значения тока отключения I_{br} и разброс данных измерений при различных индукциях магнитного поля B показаны на рис. 5, а. На рис. 5, б представлены время отключения t_{br} и разброс данных измерения при тех же величинах индукции магнитного поля. Из данных рис. 5 видно, что при увеличении B от 78 до 132 мТл время t_{br} существенно уменьшилось, а отключаемый ток I_{br} увеличился до ~ 300 А. При дальнейшем увеличении магнитного поля до $B \approx 170$ мТл значения t_{br} и I_{br} практически не изменились.



а



б

Рис. 5. Зависимость от индукции магнитного поля: а — тока отключения; б — времени отключения

Из результатов измерений при различных I_0 в диапазоне токов 100—450 А для фиксированных B следует, что практически отсутствует зависимость времени t_{br} от I_0 для всех $B = 70—170$ мТл.

Отметим, что длительность устойчивой стадии дуги во всех режимах составляла 0,3—0,5 мс. Напряжение на ВДК перед первыми заметными осцилляциями напряжения изменялось в диапазоне 30—40 В независимо от режима коммутации.

Отличительная особенность полученных осциллограмм — появление промежуточной стадии между устойчивой (монотонный рост напряжения) и неустойчивой (высокочастотные осцилляции напряжения с амплитудой более 500 В) стадиями дуги. На этой стадии плавный рост напряжения продолжается, но с заметным шумом.

Обсуждение результатов эксперимента

Известно, что в однородном поперечном магнитном поле КП выстраиваются вдоль силовой линии магнитного поля и перемещаются в ретроградном направлении со скоростью v (м/с) $\sim \sim 200 \cdot B_{\perp}$ (Тл) [5]. При $B_{\perp} = 100$ мТл линейка КП перемещается со скоростью ~ 2 см/мс, и за время менее 0,5 мс КП могут достигнуть края торцевой поверхности контакта. Это время примерно соответствует наблюдаемой в эксперименте длительности устойчивой стадии дуги. При выходе на периферию катода КП могут смещаться по его боковой поверхности, что обычно сопровождается шумом напряжения.

Таким образом, шум напряжения в рассматриваемой ВДК с магнитным полем может появиться задолго до возникновения условий нарушения устойчивости дуги вследствие торможения ионов. С увеличением межконтактного зазора напряжение на шумящей дуге должно повышаться, что и наблюдалось в эксперименте в течение так называемой промежуточной стадии дуги. При дальнейшем разведении контактов на расстояние, необходимое для образования анодного слоя с положительным анодным падением, происходит резкое повышение напряжения. Дуга переходит в неустойчивую стадию и при благоприятных условиях погасает.

Вероятность погасания дуги в значительной степени определяется возможностью зажигания каскадного дугового канала с катода на экран и на анод. Учитывая, что такой канал будет направлен вдоль силовых линий магнитного поля, вероятность его образования должна увеличиваться с ростом тока. По-видимому, образование каскадного канала является одной из основных причин ограничения отключающей способности ВДК с поперечным однородным магнитным полем.

Сужение размера источника магнитного поля в направлении оси камеры приводит к появлению заметной неоднородности распределения магнитного поля. На периферии катода и вблизи его боковой поверхности появляется аксиальная составляющая магнитного поля. В таком магнитном поле КП могут перемещаться в азимутальном направлении по боковой поверхности катода. В результате длина каскадного канала может существенно увеличиться, что приведет к повышению напряжения на вакуумном промежутке и тем самым к увеличению отключающей способности ВДК.

Заключение

Из результатов выполненных экспериментов следует, что поведение дуги отключения при разведении контактов в ВДК с однородным поперечным магнитным полем отличается от поведения дуги в аксиально-симметричном магнитном поле. Одна из отличительных особенностей — более слабая реакция тока на повышение напряжения на неустойчивой стадии дуги.

Переход из устойчивой стадии дуги в неустойчивую в однородном магнитном поле происходит плавно с постепенно нарастающей амплитудой шума напряжения. Длительность устойчивой стадии практически не зависела от тока и магнитного поля.

При шунтировании емкостью 0,5 мкФ ВДК с однородным магнитным полем отключала ток 150 А в диапазоне изменения индукции магнитного поля $B = 100—180$ мТл. Отключающую способность ВДК удалось увеличить до 300 А при $B = 120—160$ мТл путем изменения распределения магнитного поля вблизи поверхности контактов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 08-06-00096-а и 08-08-13520-офи_ц).

Литература

1. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. — М.: Наука, 1968.
2. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука, 2000.
3. Emtage P. R., Kimblin C. W., Gorman J. G. et al. Interaction between vacuum arcs and transverse magnetic fields with application to current limitation//IEEE Trans. Plasma Sci. 1980. V. 8. No. 4. P. 314—319.
4. Перский Н. Е., Сысун В. И., Хромой Ю. Д. Динамика катодных пятен вакуумного разряда//ТВТ. 1989. Т. 27. № 6. С. 1060.
5. Zabello K. K., Barinov Y. A., Chaly A. M., Logatchev A. A., Shkol'nik S. M. Experimental study of cathode spot motion and burning voltage of low-current vacuum arc in magnetic field//IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. No. 5. P. 1497—1503.

6. Алфёров Д. Ф., Иванов В. П., Сидоров В. А. Устойчивость горения вакуумной дуги постоянного тока в осесимметричном магнитном поле//Прикладная физика. 2001. № 4. С. 27—34.

7. Прозоров Е. Ф., Ульянов К. Н., Федоров В. А. Экспериментальное изучение влияния неоднородного осесимметричного поля на обрыв тока вакуумного дугового разряда//ТВТ. 2003. Т. 42. № 6. С. 850—855.

8. Алфёров Д. Ф., Гостицев В. Г., Иванов В. П. и др. Вакуумный выключатель тока: Пат. 2230385. РФ; БИ. № 16, 2004.

9. Alferov D. F., Ivanov V. P., Sidorov V. A. Characteristics of DC vacuum arc in the transverse axially symmetric magnetic field//IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. V. 31. No. 5. P. 918—922.

10. Алфёров Д. Ф., Иванов В. П., Сидоров В. А. Вакуумная дуга постоянного тока в аксиально-симметричном неоднородном магнитном поле//ТВТ. 2006. Т. 44. № 3. С. 349—361.

11. Алфёров Д. Ф., Евсин Д. В., Лондер Я. И. Нарушение устойчивости электрической дуги при разведении контактов в вакуумном промежутке с поперечным магнитным полем//Прикладная физика. 2006. № 1. С. 29—36.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2008 г.

Quenching of an electric arc in a vacuum gap with an uniform transverse magnetic field

D. F. Alferov, M. R. Ahmetgareev, D. B. Yevsin, V. P. Ivanov
FGUP VEI, Moscow, Russia
E-mail: alferov@vei.ru

The experimental study of breaking ability of vacuum interrupter (VI) with the uniform transverse magnetic field formed by system of permanent magnets is carried out. The VI switched off DC current up to 150 A in a range of a magnetic field induction 100—180 mT with shunting capacitor 0,5 μ F in parallel with VI. The breaking ability of VI in a range of magnetic field induction 120—160 mT has been increased up to 300 A by introduction of non-uniform magnetic field near contact surface.

PACS: 52.50.-b, 52.80.Vp

УДК 621.793.74

Характеристики плазмы магнетронного разряда на больших расстояниях от катода

В. Н. Пашенцев
Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва, Россия
E-mail: pashentsev2001@mail.ru

Измерены параметры плазмы магнетрона на больших расстояниях, в несколько раз превышающих диаметр катода. Зондовым методом измерены температура и плотность плазмы, составляющие 1,4 эВ и $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, соответственно. Получены зависимости плотности и температуры плазмы от потока аргона при нанесении покрытия TiAlN. Получена очистка подложки ионным распылением перед нанесением покрытия при напряжении смещения на подложке более 200 В.

PACS: 52.25.-b, 52.70.Ds, 52.77.Dq, 81.15.Cd

Введение

Широкие возможности для нанесения покрытий имеют вакуумные установки, содержащие дуговые испарители и распылительные магнетронные источники [1]. Плазменные источники используются для нанесения покрытий на поверхности обрабатываемого инструмента и различные

детали для улучшения их характеристик: повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, снижения коэффициента трения [2].

В установках для нанесения покрытий плазменные источники располагают по периметру цилиндрической вакуумной камеры, внутри которой расположен карусельно-планетарный механизм вращения деталей.