УДК 621.385

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭРОЗИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В РАЗРЯДЕ ВАКУУМНОЙ ДУГИ С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.И. Асютин, С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов, Т.И. Козловская, А.А. Пшеничный, Р.Х. Якубов

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Приведены результаты исследований влияния внешнего магнитного поля на картину эрозии в управляемом вакуумном разряднике с пробоем по поверхности диэлектрика. Обнаружено, что присутствие однородного осесимметричного поля позволяет подавить локализацию разряда. Присутствие неоднородного осесимметричного поля, несмотря на сохранение локализации разряда, также создаёт условия для стабилизации работы разрядника.

Ключевые слова: разрядное устройство, магнитное поле, движение плазмы, дуга.

SOME POSSIBILITY OF EROSION PROCESS CONTROL IN THE VACUUM ARC BY MEANS OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD

V.I. Asiutin, S.G. Davydov, A.N. Dolgov, T.I. Kozlovskaya, A.A. Pshenichnyi, R.Kh. Yakubov

N.L. Dukhov All-Russian Automatics Research Institute, Moscow, Russia

The results of the investigations of the influence of external magnetic field on the character of the erosions in operated vacuum spark gap with breakdown over dielectric surface are brought. It is discovered that presence of uniform axially symmetrical field allows to suppress the discharge localization. The presence of axially symmetrical nonuniform field, in spite of conservation of the discharge localization, also creates the condition for stabilization of the vacuum spark gap functioning.

Key words: discharge device, magnetic field, plasma moving, arc.

ВВЕДЕНИЕ

Управляемые сильноточные вакуумные коммутаторы находят достаточно широкую область для своего применения в аппаратуре, предназначенной, например, для генерации потоков проникающего излучения, фоторегистрации быстротекущих процессов. Необходимость увеличения ресурса и стабильности функционирования указанных устройств постоянно возникает перед разработчиками. Одно из препятствий на пути успешного решения данной задачи — локализация области развития дугового разряда, или так называемая «привязка» разряда. Авторы настоящей работы изучали возможность воздействия на режим протекания разряда вакуумной дуги внешним магнитным полем с целью увеличения ресурса и стабильности работы миниатюрного управляемого вакуумного разрядника.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Разрядное устройство, использованное в экспериментах, представляет собой трёхэлектродную коаксиальную систему (рис. 1), основными элементами которой являются анод, катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод. Электроды выполнены из алюминия, диэлектрическая шайба — из слюды. Указанный выбор материала электродов и диэлектрической шайбы обеспечивает относительно высокую скорость процесса эрозии данных элементов конструкции, что ускоряет процедуру проведения экспериментов. Диаметр цилиндрических катода, поджигающего электрода и диэлектрической шайбы составляет 5 мм. Анод в виде полого цилиндра имеет внутренний диаметр 7 мм. Толщина ди-

Рис. 1. Схема разрядного устройства: 1 — поджигающий электрод; 2 — коваровые прокладки; 3 — диэлектрическая шайба; 4 — титановая прокладка; 5 — анод; 6 — катод; 7 — магниты

электрической шайбы 0,1 мм. Между диэлектрической шайбой и прилегающими электродами соосно с ними расположены металлические прокладки, каждая толщиной 0,1 мм: между диэлектрической шайбой и поджигающим электродом — коваровая, между диэлектрической шайбой и катодом — коваровая и титановая. Разрядное устройство размещалось в вакуумной камере, откачиваемой до давления не хуже 10^{-3} мм рт. ст., и подвергалось «тренировке» для очистки от сорбированного газа и диэлектрических плёнок на поверхности электродов, после чего давление устанавливалось на уровне порядка 10^{-4} мм рт. ст. С помощью цилиндрических постоянных магнитов в объёме разрядного устройства можно было создать магнитное поле с индукцией $\sim 0,1$ Тл одной из двух конфигураций в зависимости от взаимной ориентации магнитов (разноименными или одноименными полюсами навстречу друг другу): а) однородное, силовые линии которого параллельны оси симметрии системы, б) неоднородное осесимметричное, силовые линии которого вблизи диэлектрической шайбы имеют практически ортогональное по отношению к её поверхности направление, а индукция поля возрастает в осевом направлении.

До момента срабатывания разрядного устройства анод находился под положительным потенциалом 2—3 кВ, катод — заземлён. Срабатывание разрядного устройства происходило при подаче на поджигающий электрод положительного относительно катода импульса напряжения амплитудой 3,5 кВ. Происходил пробой по поверхности диэлектрической шайбы, и плазма, образованная продуктами эрозии (рис. 2, 3), создавала проводящую среду в промежутке катод-анод. Протекающий в промежутке катод—анод ток имел продолжительность $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ с и амплитуду 200—300 А.

Рис. 2. Изображение промежутка катод—диэлектрическая шайба—поджигающий электрод, получено с помощью электронного микроскопа JSM-35F, в области, подвергшейся слабому воздействию разряда

Рис. 3. Изображение промежутка катод—диэлектрическая шайба—поджигающий электрод, получено с помощью электронного микроскопа JSM-35F в области, подвергшейся сильному воздействию разряда

В присутствии однородного магнитного поля, тангенциального по отношению к поверхности катода в области иницирования разряда, можно ожидать перемещения катодного пятна по периметру диэлектрической шайбы со скоростью $\sim 10^4$ м/с на стадии искры и со скоростью $\sim 10^2$ м/с на дуговой стадии разряда [1—3], причём величина перемещения за время разряда составит порядка нескольких миллиметров, что, вероятно, приведёт к подавлению эффекта «привязки». В случае неоднородного осесимметричного магнитного поля описанной выше конфигурации, когда инициирующий пробой по поверхности диэлектрика происходит поперёк магнитного поля, становится возможным затян timer развития пробоя и повысить вероятность появления новых центров взрывной электронной эмиссии на различных участках границы диэлектрика. Связано это с тем, что повышение силы тока через токовый канал искры вплоть до момента замыкания изолирующего промежутка плазменным факелом сопровождается повышением падения напряжения на изолирующем промежутке согласно имеющимся экспериментальным данным [1]. Подобная ситуация, в свою очередь, создаёт условия для формирования нескольких каналов тока у поверхности диэлектрика, что при многократном срабатывании разрядного устройства, как можно надеяться, позволит избежать эффекта «привязки» разряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённые эксперименты дали следующие результаты. Визуальное обследование поверхности электродов и диэлектрической шайбы, выполненное после осуществления достаточно больших серий разрядов ($\sim 10^3$) с помощью оптического микроскопа МБС-9 при 14-100 кратном увеличении, обнаружило некоторое изменение картины эрозии при наличии внешнего магнитного поля. В отсутствие магнитного поля заметной эрозии было подвержено от одной четверти до одной трети боковой поверхности катода. То же самое можно сказать о диэлектрической шайбе. Локализация областей наиболее интенсивной эрозии катода и диэлектрической шайбы пространственно совпадает. При наличии однородного магнитного поля эрозия наблюдалась по всей боковой поверхности катода и визуально была равномерной. Эрозия диэлектрической шайбы также однородна по периметру. Таким образом при наличии осесимметричного однородного поля эффект «привязки» отсутствует. По-видимому, как результат значительно, примерно в 4 раза уменьшился темп снижения величины пробойного напряжения при увеличении количества последовательно осуществлённых разрядов (если брать первые две тысячи разрядов). В области эрозии как при наличии, так и в отсутствие магнитного поля наблюдаются значительный перенос материала катода на поверхность титановой прокладки и коваровой прокладки, расположенной со стороны катода, а также фрагментов проводящих продуктов эрозии на поверхность диэлектрической шайбы и коваровой прокладки со стороны поджигающего электрода и частичное оплавление и абляция материала диэлектрической шайбы см. рис. 2, 3, 4). Например, на рис. 2 приведён элементный состав поверхности диэлектрической шайбы (спектр № 1) и коваровой прокладки со стороны поджигающего электрода (спектр № 2) по результатам регистрации характеристического рентгеновского излучения в области, подвергшейся слабому воздействию разряда. Заметны следы переноса материала катода (Al) на поверхность коваровой прокладки, расположенной со стороны поджигающего электрода (спектр № 2). В то же время нет следов переноса материала коваровой прокладки на поверхность диэлектрической шайбы, хотя наблюдаются следы заметного воздействия разряда на материал коваровой прокладки, а именно локального плавления. В области, подвергшейся сильному воздействию разряда, как показывает приведенный на рис. 3 элементный состав фрагмента проводящих продуктов эрозии катода и коваровой прокладки (расположенной со стороны катода), имеет место значительный перенос на поверхность диэлектрической шайбы соответствующих металлов, по-видимому, в виде расплава (спектр № 1). На рис. 4 приведен элементный состав продуктов эрозии катода и коваровой прокладки (расположенной со стороны катода), перенесённых на подвергшуюся сильной модификации поверхность диэлектрической шайбы, вероятно, путём напыления из газовой фазы (спектр № 1). На поверхности коваровой прокладки, расположенной со стороны поджигающего электрода, и на поверхности поджигающего электрода заметны мелкодисперсные фрагменты продуктов эрозии (как можно предположить, в первую очередь материала катода).

Рис. 4. Изображение промежутка катод—диэлектрическая шайба—поджигающий электрод, получено с помощью электронного микроскопа JSM-35F в области, подвергшейся сильному воздействию разряда (с большим увеличением)

В присутствии осесимметричного неоднородного поля наблюдаемая картина эрозии элементов разрядного устройства указывает на сохранение эффекта «привязки» разряда. В то же время, несмотря на сохраняющийся значительный перенос материала катода на поверхность титановой прокладки и коваровой прокладки, расположенной со стороны катода, заметно сократился перенос материала катода на поверхность диэлектрической шайбы и коваровой прокладки, расположенной со стороны поджигающего электрода. Кроме того, в 4—5 раз упал темп снижения величины пробойного напряжения при увеличении количества последовательно осуществлённых разрядов (по крайней мере, в пределах первой тысячи разрядов), и по сравнению, по крайней мере, со случаем однородного поля повысилась стабильность импульсного на-

В присутствии осесимметричного неоднородного поля наблюдаемая картина эрозии элементов разрядного устройства указывает на сохранение эффекта «привязки» разряда. В то же время, несмотря на сохраняющийся значительный перенос материала катода на поверхность титановой прокладки и коваровой прокладки, расположенной со стороны катода, заметно сократился перенос материала катода на поверхность диэлектрической шайбы и коваровой прокладки, расположенной со стороны поджигающего электрода. Кроме того, в 4—5 раз упал темп снижения величины пробойного напряжения при увеличении количества последовательно осуществлённых разрядов (по крайней мере, в пределах первой тысячи разрядов), и по сравнению, по крайней мере, со случаем однородного поля повысилась стабильность импульсного на-

пряжения пробоя (ИНП). Вероятно, сокращение переноса проводящих продуктов эрозии на поверхность диэлектрической шайбы является причиной стабилизации её изолирующих свойств (рис. 5, *а—в*).

Рис. 5. Характерный пример зависимости ИНП от числа разрядов: *а* — без магнитного поля, *б* — с однородным магнитным полем, *в* — с неоднородным магнитным полем

Что касается результатов, полученных при осуществлении разряда в осесимметричном неоднородном поле, то оценки демонстрируют, что электронная компонента плазмы разряда оказывается замагничена [4, 5]. В этих условиях можно предположить, что в неоднородном магнитном поле плазма дугового разряда проявляет свои диамагнитные свойства и формирует плазменный поток, движение которого имеет направление от катода к поджигающему электроду вдоль поверхности электродов и диэлектрической шайбы, т.е. в направлении, противоположном направлению градиента индукции магнитного поля. Плазменный поток сдувает продукты эрозии элементов разрядного устройства с поверхности диэлектрической шайбы, что и приводит к лучшей повторяемости условий иницирования разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовалось воздействие внешнего магнитного поля на режим протекания дугового разряда в миниатюрном управляемом вакуумном разряднике с пробоем по поверхности диэлектрика с целью увеличения ресурса и стабильности его работы. Присутствие однородного магнитного поля тангенциального по отношению к поверхности катода в области иницирования разряда позволило избавиться от эффекта локализации области развития дугового разряда, или так называемой «привязки» разряда. Причиной, по-видимому, явилось перемещение катодного пятна вдоль периметра диэлектрической шайбы под действием приложенного магнитного поля. В присутствии осесимметричного неоднородного поля наблюдаемая картина эрозии элементов разрядного устройства указывает на сохранение эффекта «привязки» разряда. При этом, однако, наблюдается сокращение переноса проводящих продуктов эрозии на поверхность диэлектрической шайбы, что можно объяснить формированием в неоднородном магнитном поле направленного плазменного потока, который сдувает продукты эрозии элементов разрядного устройства с поверхности диэлектрической шайбы. В обоих случаях — как однородного, так и неоднородного внешнего магнитного поля — можно говорить об увеличении ресурса управляемого миниатюрного вакуумного разрядника и повышении стабильности его работы.

REFERENCES

1. Korop E.D., Plyutto A.A. — ZhTF (JTP), 1970, vol. 40, issue 12, p. 2534 (in Russian).
2. Korop E.D. — ZhTF (JTP), 1976, vol. 46, issue 10, p. 2187 (in Russian).
3. Mesyats G.A. Pulse energetics and electronics. — M.: Nauka (Science), 2004, 704 p. (in Russian).
4. Asyunin V.I., Davydov S.G., Dolgov A.N., Kozlovskaya T.I., Pshenichnyi A.A., Yakubov R.Kh. Some peculiarities of arc discharge plasma dynamics in heterogeneous magnetic field. — Prikladnaya fizika (Applied physics), 2014, № 2, p. 72 (in Russian).
5. Davydov S.G., Dolgov A.N., Kozlovskaya T.I., Revazov V.O., Seleznev V.P., Yakubov R.Kh. The switching process of vacuum electric discharge gap by laser plasma. — Prikladnaya fizika (Applied physics), 2014, № 6, p. 32 (in Russian).

AUTHORS

Asyunin V.I. N.L. Dukhov All-Russian Automatics Research Institute, Sushchevskaya str. 22, 127055 Moscow, Russia; vniia@vniia.ru
 Davydov S.G. N.L. Dukhov All-Russian Automatics Research Institute, Sushchevskaya str. 22, 127055 Moscow, Russia; vniia@vniia.ru
 Dolgov A.N. N.L. Dukhov All-Russian Automatics Research Institute, Sushchevskaya str. 22, 127055 Moscow, Russia; vniia@vniia.ru
 Kozlovskaya T.I. N.L. Dukhov All-Russian Automatics Research Institute, Sushchevskaya str. 22, 127055 Moscow, Russia
 Pshenichnyi A.A. N.L. Dukhov All-Russian Automatics Research Institute, Sushchevskaya str. 22, 127055 Moscow, Russia
 Yakubov R.Kh. N.L. Dukhov All-Russian Automatics Research Institute, Sushchevskaya str. 22, 127055 Moscow, Russia; vniia@vniia.ru

Received 24 April 2015

Problems of Atomic Science and Technology
 Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 3, pp. 49—52