

УДК 621.385

Некоторые особенности динамики плазмы дугового разряда в неоднородном магнитном поле

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

Неоднородное аксиально-симметричное магнитное поле, созданное внешним источником, оказало в разряде вакуумной дуги стабилизирующее воздействие на напряжение иницирующего пробоя по поверхности твердотельного диэлектрика. В качестве объяснения предложен механизм формирования плазменного потока, очищающего поверхность диэлектрика от проводящих продуктов эрозии элементов разрядного устройства.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Vp

Ключевые слова: разрядное устройство, неоднородное магнитное поле, плазма, дуга.

Введение

В условиях, когда пробой по поверхности диэлектрика, инициирующий дуговой разряд, происходит поперек магнитного поля, становится возможным затян timer развитие пробоя и повысить вероятность появления новых центров взрывной электронной эмиссии на различных участках границы диэлектрика. Связано это с тем, что, согласно имеющимся экспериментальным данным [1—3], повышение силы тока через токовый канал искры вплоть до момента замыкания изолирующего промежутка плазменным факелом сопровождается повышением падения напряжения на изолирующем промежутке. Подобная ситуация, в свою очередь, создает условия для формирования нескольких каналов тока у поверхности диэлектрика, что при многократном срабатывании разрядного устройства, как можно надеяться, позволит избежать эффекта «привязки» разряда и повысить стабильность напряжения пробоя.

Целью данной работы являлось исследование возможности стабилизации вакуумного поверхностного разряда неоднородным аксиально-симметричным магнитным полем.

Методика эксперимента

Разрядное устройство, использованное в экспериментах, представляет собой трёхэлектродную коаксиальную систему, основными элементами которой являются анод, катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод.

Электроды были выполнены из алюминия, диэлектрическая шайба — из слюды. Диаметр цилиндрических катода, поджигающего электрода и диэлектрической шайбы составляет 5 мм. Анод в виде полого цилиндра имеет внутренний диаметр 7 мм. Толщина диэлектрической шайбы — 0,1 мм. Между диэлектрической шайбой и прилегающими электродами соосно с ними размещались дополнительно металлические прокладки, каждая толщиной 0,1 мм: между диэлектрической шайбой и поджигающим электродом — коваровая, между диэлектрической шайбой и катодом — коваровая и титановая (см. рис. 1).

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. Цилиндрические постоянные магниты создавали в объёме разрядного устройства магнитное поле с индукцией $\sim 0,1$ Тл, силовые линии которого в окрестностях 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

Асюнин Вячеслав Игоревич, инженер.
Давыдов Сергей Геннадьевич, научный сотрудник.
Долгов Александр Николаевич, вед. научный сотрудник.
Козловская Татьяна Ивановна, начальник НИО.
Пшеничный Александр Александрович, инженер.
Якубов Рустам Халимович, зам. начальника НИО.
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова.
Россия, 127055, Москва, ул. Сушнёвская, 22.
Тел. 8 (499) 400-19-70 доб. 1302. E-mail: asvi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2014 г.

© Асюнин В.И., Давыдов С.Г., Долгов А.Н.,
Козловская Т.И., Пшеничный А.А., Якубов Р. Х., 2014

подаче на поджигающий электрод положительно относительно катода импульса напряжения амплитудой 3,5 кВ и крутизной $(1-2) \cdot 10^{10}$ В/с. Происходил пробой по поверхности диэлектрической шайбы, и плазма, образованная продуктами эрозии (рис. 2 и 3), создавала проводящую среду в промежутке катод-анод. Дополнительные металлические прокладки в промежутке катод-анод, описанные выше, как продемонстрировали предварительные исследования, оказывали стабилизирующее воздействие на условия инициирования разряда [4]. Протекающий в промежутке катод-анод ток имел продолжительность $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ с и амплитуду 200—300 А.

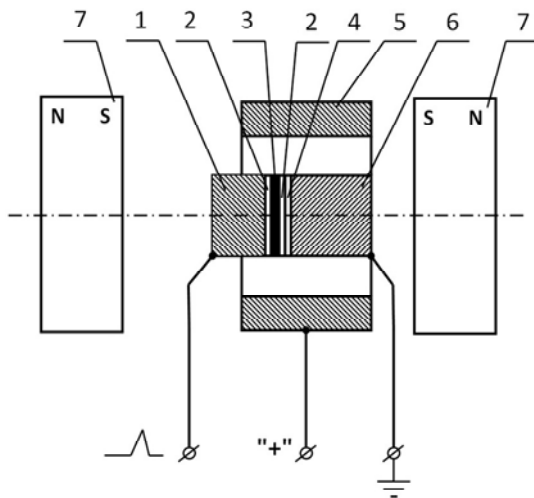


Рис. 1. Схема разрядного устройства: 1 — поджигающий электрод, 2 — коваровые прокладки, 3 — диэлектрическая шайба, 4 — титановая прокладка, 5 — анод, 6 — катод, 7 — магниты

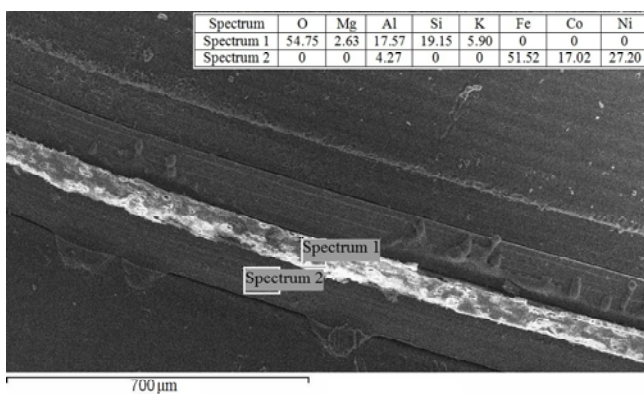


Рис. 2. Изображение элементов (без анода) разрядного устройства (снизу вверх): поджигающий электрод, коваровая прокладка (со стороны поджигающего электрода), диэлектрическая шайба, коваровая прокладка (со стороны катода), титановая прокладка, катод, полученное с помощью электронного микроскопа для случая слабой эрозии после «тренировки» разрядного устройства. Приведен элементный состав поверхности диэлектрической шайбы (спектр № 1) и коваровой прокладки со стороны поджигающего электрода (спектр № 2) по результатам регистрации характеристического рентгеновского излучения

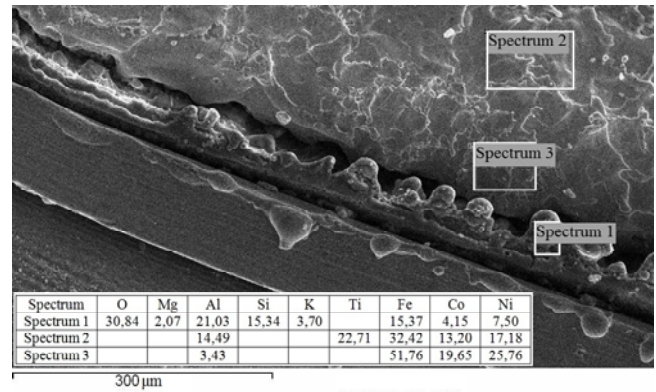


Рис. 3. Изображение элементов (без анода) разрядного устройства (снизу вверх): поджигающий электрод, коваровая прокладка (со стороны поджигающего электрода), диэлектрическая шайба, коваровая прокладка (со стороны катода), титановая прокладка, катод, полученное с помощью электронного микроскопа для случая сильной эрозии (после $>10^3$ разрядов). Приведен элементный состав поверхности диэлектрической шайбы (спектр № 1), титановой прокладки (спектр № 2) и коваровой прокладки со стороны катода (спектр № 3) по результатам регистрации характеристического рентгеновского излучения

Результаты эксперимента

В отсутствие внешнего магнитного поля наблюдалось в среднем (при усреднении по сериям из каждых последовательных 50 разрядов) постепенное снижение величины напряжения, при котором происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы в разрядном устройстве. Разброс значений соответствующих напряжений в пределах серии составлял порядка 50—60%. «Включение» внешнего магнитного поля не позволило избежать эффекта «привязки» разряда [5, 6], но оказало заметное стабилизирующее воздействие на параметры, характеризующие процесс инициирования разряда. В 4—5 раз упал темп снижения величины пробойного напряжения при увеличении количества последовательно осуществленных разрядов. В 1,5 раза уменьшился разброс времени задержки от момента подачи поджигающего импульса до момента начала протекания тока в промежутке катод-анод и разброс величины напряжения пробоя.

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. 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. Вероятно, сокращение переноса проводящих продуктов эрозии на поверхность диэлектрической шайбы является причиной стабилизации её изолирующих свойств.

повторяемости условий инициирования разряда. Выполненные авторами оценочные расчеты показывают осуществимость данного механизма воздействия неоднородного магнитного поля на плазму дуги в условиях проведенных экспериментов.

Обсуждение результатов эксперимента

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

Литература

1. Короп Е. Д., Плютто А. А. // ЖТФ, 1970. Т. 40. № 12. С. 2534.
2. Короп Е. Д. // ЖТФ, 1976. Т. 46. № 10. С. 2187.
3. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004.
4. Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. / Материалы научнотехнической конференции «Вакуумная наука и техника». — М.: МИЭМ. 2011. С. 153.
5. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 182.
6. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н. и др. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 72.

Arc discharge plasma dynamic features in inhomogeneous magnetic field

V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov,
T. I. Kozlovskaya, A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov

All-Russian Research Institute of Automatics
22 Sushchevskaya str., Moscow, 127055, Russia
E-mail: asvi@mail.ru

Received November 27, 2014

The inhomogeneous axially symmetric magnetic field, created by an external source, had performed a stabilizing effect on initiating breakdown voltage along the surface of a solid dielectric in the vacuum arc discharge. As an explanation, the mechanism of formation of a plasma current, which cleans the surface of a dielectric from conducting erosion products of discharging device elements, was suggested.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Vp

Keywords: spark gap, inhomogeneous magnetic field, plasma, arc.

References

1. E. P. Korop and A. A. Plyutto, Tech. Phys. **40**, 2534 (1970).
2. E. P. Korop, Tech. Phys. **46**, 2187 (1976).
3. F. A. Mesyats, *Pulsed Energetics and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
4. A. A. Pshenichniy and R. Kh. Yakubov, in *Proc. Conf. Vacuum Science* (MIEM, Moscow, 2011), p. 153.
5. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 182 (2014).
6. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 2, 72 (2014).