

Распад плазмы вакуумного дугового разряда после обрыва тока

Г.Ю. Юшков^{1,*}, А.Г. Николаев¹, Е.М. Окс^{1,2}, К.П. Савкин¹ В.П. Фролова^{1,2}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

*gyushkov@mail.ru

Аннотация. Исследованы процессы распада плазмы вакуумной дуги после обрыва тока разряда в зависимости от импульсного слабо изменяющегося магнитного поля индукцией до 0.6 Тл. В качестве основного метода применялось измерение ионного тока коллектора, находящегося под плавающим потенциалом, смещение которого определялось потоком плазмы вакуумного дугового разряда. Во время функционирования вакуумного дугового разряда с плотностью тока на катоде около 1 кА/см², характерной для большинства устройств на основе вакуумной дуги, ток коллектора определяется преимущественно более подвижными электронами. В результате прерывания тока дуги в цепи коллектора возникал ионный ток. Наличие магнитного поля в разрядном промежутке приводило к немонотонному затуханию импульса ионного тока, что выражалось в появлении нескольких пиков тока. Временной интервал между пиками также зависел от индукции магнитного поля. На основании этих результатов рассмотрено влияние магнитного поля на удержание плазмы в межэлектродном пространстве вакуумно-дуговой разрядной системы.

Ключевые слова: вакуумный дуговой разряд, магнитное поле, прерывание тока, распад плазмы.

1. Введение

Практический интерес исследований процессов в вакуумном дуговом разряде обеспечен возможностью применения результатов этих исследований для дальнейшего развития технологии эксплуатации вакуумных выключателей [1] и плазменных ускорителей [2]. Отдельного внимания заслуживает быстрое выключение вакуумной дуги, иначе говоря, обрыв тока. В этом случае плазма какое-то время продолжает существовать в разрядном промежутке, до тех пор, пока заряженные частицы не уйдут на поверхности электродов или иные конструктивные элементы разрядной системы. Присутствие магнитного поля, в зависимости от конфигурации его силовых линий, способно ускорять или наоборот удерживать плазменные электроны [3], тем самым оказывая влияние на скорость распада плазмы. Известные методы диагностики плазмы сильноточного вакуумного дугового разряда основаны на применении коллекторов или зондов, находящихся под отрицательным, относительно заземлённого анода, смещением. В этом случае на измерение ионного тока негативное влияние оказывают электрические пробой между плазмой, потенциал которой близок анодному, и поверхностью, собирающей ионы из этой плазмы. В настоящей работе применялась совокупность двух методов: принудительное выключение вакуумной дуги, при помощи обрыва тока, и коллектор, соединённый с заземлённым анодом через конденсатор, на который не подавалось смещение от дополнительного источника питания. Это позволило избежать пробоев и получить новые результаты о влиянии магнитного поля на распад плазмы вакуумной дуги.

2. Экспериментальная установка и методы.

Исследования выполнялись с применением разрядной системы источника ионов (Рис.1) на основе вакуумной дуги Мевва-5.Ру [4]. Катод вакуумного дугового разряда был изготовлен из меди. Коаксиально катоду располагался каркас катушки магнитного поля, который находился под потенциалом анода. Импульсное магнитное поле в разрядном промежутке создавалось при пропускании импульсов тока амплитудой около 600 А, длительностью около 2 мс через эту катушку.

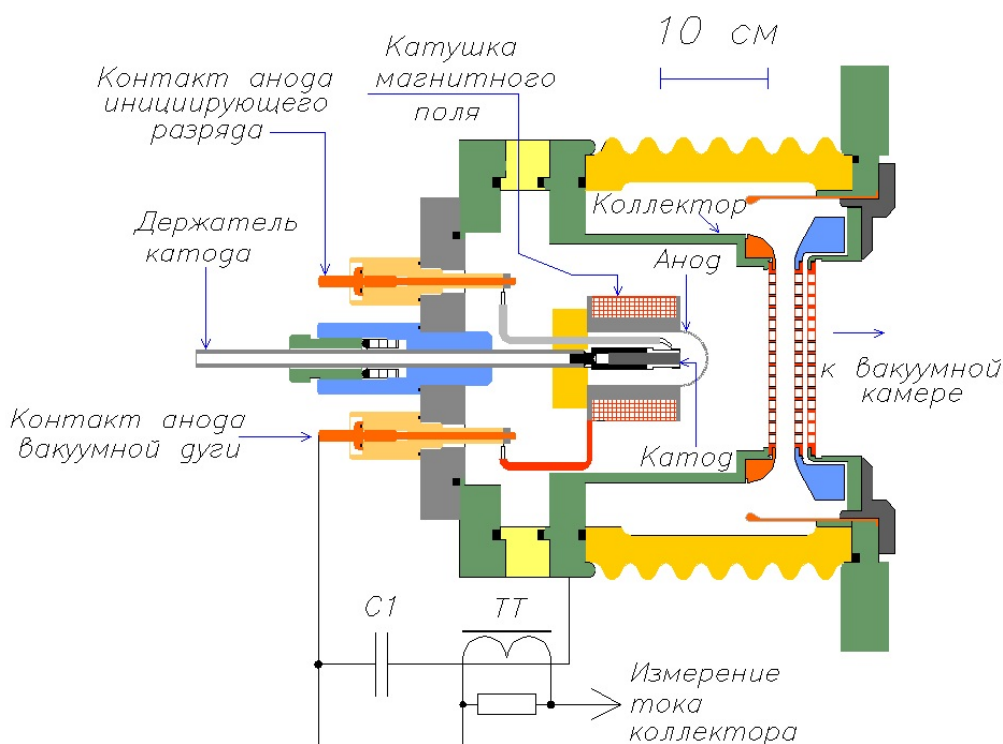


Рис.1. Экспериментальный макет для исследования параметров среднечастотного импульсного разряда атмосферного давления в потоке аргона (C1 – накопительная ёмкость; ТТ – трансформатор тока Pearson 0.01 В/А).

Для исключения потерь плазменного потока на каркасе катушки магнитного поля, рабочая поверхность катода располагалась с его торцом в одной плоскости. Анод вакуумного дугового разряда выполнен в виде полусферы, центр которой совпадает с центром рабочей поверхности катода. Расстояние от центра катода до анода составляло 15 мм. Поверхность анода имела низкую геометрическую прозрачность для уменьшения концентрации плазмы за пределами разрядного промежутка. Штатный полый анод разрядной системы ионного источника Mevva-5.Ru выполнял функцию коллектора и соединялся с заземленным анодом разряда через конденсатор емкостью 100 мкФ.

Таким образом, электрическое смещение коллектора определялось потоком заряженных частиц из плазмы вакуумного дугового разряда, проникающей через отверстия в сферическом аноде. Расстояние между катодом и коллектором составляло 50 мм. Необходимое рабочее давление в камере (не более $3 \cdot 10^{-6}$ Торр) обеспечивалось турбомолекулярным насосом.

Для исследования процессов распада плазмы применялся метод быстрого выключения тока вакуумного дугового разряда, основанный на замыкании накоротко источника питания через включенную параллельно электрическую цепь с низким сопротивлением, при срабатывании быстродействующего тиристора, известный как обрыв тока. При этом ток снижался до нуля за несколько микросекунд, и происходило погасание разряда [5]. Такой метод позволял сформировать более крутой спад импульса по сравнению с естественным затуханием импульса, генерируемого искусственной формирующей линией. Также следует отметить, что длительность импульса вакуумной дуги составляла 150 мкс до шунтирования разрядного промежутка цепью короткого замыкания, но полная длительность импульса тока, генерируемого источником питания составляла 250 мкс. Поэтому в течение 100 мкс после

этого события между катодом и анодом отсутствовало электрическое поле, способное повлиять на распад плазмы в результате извлечения заряженных частиц на электроды.

Кроме того, отсутствие дополнительного отрицательного смещения на коллекторе заряженных частиц, и формирование плавающего потенциала коллектора только за счет зарядки конденсатора, последовательно включенного между коллектором и анодом, позволяло получать достаточно короткий фронт импульса ионного тока в момент обрыва тока разряда.

3. Результаты и их обсуждение

При функционировании вакуумного дугового разряда без внешнего магнитного поля, частицы из плазмы проникали через отверстия в сферическом аноде, и, достигая коллектора, формировали в импульс тока (Рис.2а), заряжающий конденсатор $C1$ (Рис.1). С момента инициирования вакуумной дуги до обрыва, полярность импульса тока в цепи коллектора была отрицательной. Это обусловлено тем, что в анодной области разрядного промежутка преобладает присутствие электронов, а доля ионов в плазменном потоке, направленном в сторону анода, в случае применения медного катода, составляет немногим более 0.1 от тока разряда [6]. Выброс тока амплитудой около 36 А в первые 20 мкс длительности импульса (Рис.2а) вызван приходом электронов из плазмы высоковольтного инициирующего разряда по поверхности диэлектрика, генерируемой в результате приложения импульса напряжения амплитудой около 15 кВ между катодом и анодом инициирующего разряда [4]. В установившемся режиме вакуумной дуги, когда ток разряда можно принять квазистационарным, ток коллектора находился на уровне 8 А, вплоть до его принудительного выключения. Этот момент показан на Рис.2б в более крупном масштабе времени. На фоне спадающего тока вакуумного дугового разряда происходила смена полярности импульса тока коллектора. Очевидно данный эффект связан со следующими обстоятельствами. Током электронов конденсатор заряжался до напряжения, которое можно оценить по несложному соотношению, основанному на законе сохранения заряда, $C \cdot \Delta U = I \cdot \tau$, где C – емкость накопительного конденсатора $C1$, I – ток зарядки конденсатора, τ – длительность импульса. Таким образом, к моменту обрыва тока вакуумной дуги, коллектор находился под отрицательным потенциалом около 20 В относительно заземлённого анода.

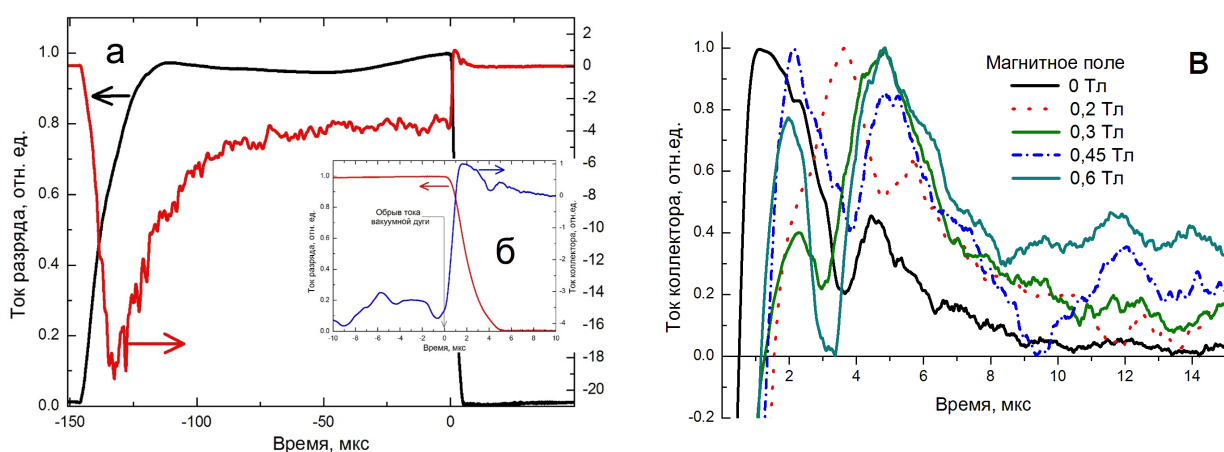


Рис.2. Осциллограммы токов: а – вакуумной дуги (нормирован на амплитудное значение 400 А) и тока коллектора (нормирован на амплитудное значение положительной составляющей импульса 2 А) в отсутствии магнитного поля; б – те же осциллограммы в увеличенном временном масштабе в момент обрыва тока дуги; в – осциллограммы положительных составляющих импульсов токов коллектора, при разных значениях индукции магнитного поля (нормированы на амплитудное значение 2–4 А).

Это приводило к появлению электрического поля между выпуклой поверхностью анода и коллектором, которое способствовало извлечению ионов из распадающейся плазмы на этот коллектор и отражению от него электронов.

При изучении положительной составляющей импульсов тока коллектора, в присутствии магнитного поля в системе электродов вакуумного дугового разряда (Рис.2в), заметно, как, при увеличении его индукции, изменяется амплитуда пиков, а также их положение во времени относительно обрыва тока дуги. Очевидно это связано с формированием явно выраженных двух групп ионов, при магнитном поле 0.2 и 0.3 Тл. При значениях индукции 0.45 и 0.6 Тл, заметно появление третьей группы, соответствующий пик которой наблюдается на 12 мкс спада импульсов ионных токов. Возможно, формирование этих групп ионов определяется изменением масс-зарядного состава плазмы вакуумной дуги в магнитном поле. Для подтверждения данного предположения требуются дополнительные исследования с привлечением масс-зарядных спектрометрических измерений.

4. Заключение

Процессы распада плазмы вакуумного дугового разряда с медным катодом после выключения разряда исследованы по временным характеристикам ионного тока, который собирался коллектором, находившимся под плавающим потенциалом. В отсутствии внешнего магнитного поля ионный ток достигал максимального значения примерно за 1 мкс и спадал до околонулевых значений примерно за 15 мкс. Создание магнитного поля в разрядном промежутке изменяло характер спада ионной составляющей импульса тока коллектора. С возрастанием индукции магнитного поля увеличивалась немонотонность ионного тока. Спад ионного тока становился более продолжительным в присутствии магнитного поля. Эти результаты являются косвенным подтверждением торможения ионов и, как следствие, более эффективного удержания плазмы, при наличии магнитного поля. Для объяснения увеличения числа пиков ионного тока при возрастании магнитного поля, требуются дальнейшие исследования, которые будут продолжены.

Благодарности

Исследование выполнено по теме государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM–2021–0006.

5. Литература

- [1] Paul G. Slade, *The Vacuum Interrupter: Theory, Design and Application*. (Taylor Boca Raton: & Francis Group, CRC Press, 2007); doi: 10.1201/9780429298912
- [2] Schoenberg K.F., Gerwin R.A., Moses R.W. Jr., Scheuer J.T., Wagner H.P., *Phys. Plasmas*, **5**, 2090, 1998; doi: 10.1063/1.872880
- [3] Frolova V.P., Nikolaev A.G., Oks E.M., Sidorov A.V., Vizir A.V., Vodopyanov A.V., Yushkov A.Yu., and Yushkov G.Yu., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **49**(9), 2478, 2021; doi: 10.1109/TPS.2021.3088154
- [4] Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P., Yushkov G.Yu., Brown I.G., *Rev. Sci. Instrum.*, **83**(2), 02A501, 2012; doi: 10.1063/1.3655529
- [5] Oks E.M., Savkin K.P., Frolova V.P., Yushkov G.Yu., *Proc. 29th ISDEIV*, 2020; doi: 10.1109/ISDEIV46977.2021.9587157
- [6] Anders A., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Savkin K.P., Brown Ian., and Nikolaev A.G., *Technical Physic*, **51**(10), 1311, 2006; doi: 10.1134/S1063784206100082