

УДК 621.385

## Воздействие неоднородного аксиально-симметричного магнитного поля на плазму дугового разряда в вакууме

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

*Присутствие внешнего магнитного поля не избавило от эффекта привязки вакуумной дуги в коаксиальном разрядном устройстве, но, тем не менее, повысило стабильность напряжения иницирующего пробоя по поверхности диэлектрика. Предполагается, что неоднородное магнитное поле вызывает дрейфовое движение плазмы, тангенциальный поток которой в результате обдувает поверхность диэлектрика и стабилизирует его изоляционные свойства. Проведенные оценки показали, что подобный механизм может реализовываться.*

PACS: 52.80.-s, 52.80.Vp

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

### Введение

В исследованиях, посвященных влиянию воздействия магнитного поля на особенности протекания дугового разряда, значительное внимание уделяется попыткам выяснения обстоятельств, приводящих к перемещению катодного пятна по поверхности электрода в присутствии тангенциального магнитного поля [1, 2]. Реже внимание исследователей обращается, например, на проблему стабилизации разряда в магнитном поле [3] или предотвращения привязки разряда [4, 5]. Авторы настоящей работы поставили перед собой задачу исследовать возможность воздействия неоднородным магнитным полем внешнего источника на динамику плазмы дугового разряда, зажигаемого в вакууме.

### Методика эксперимента

Используемое в проведенных исследованиях электроразрядное устройство представляет собой трёхэлектродную коаксиальную систему, основными элементами которой являются анод, катод,

поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод (рис. 1).

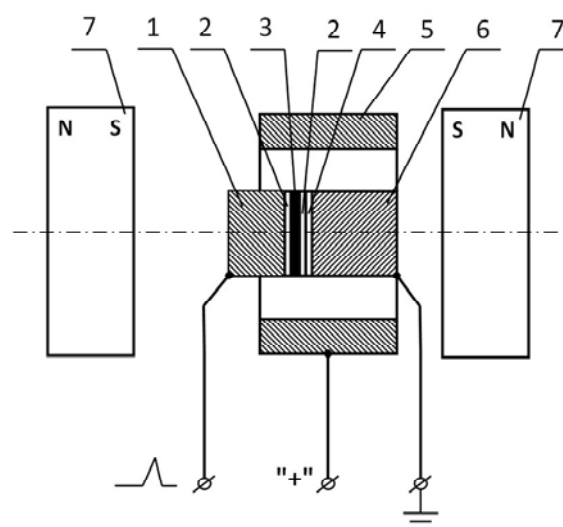


Рис. 1. Схема разрядного устройства:

1 — поджигающий электрод, 2 — коваровые прокладки, 3 — диэлектрическая шайба, 4 — титановая прокладка, 5 — анод, 6 — катод, 7 — магниты

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. Электроды выполнены из алюминия, диэлектрическая шайба — из слюды. Диаметр цилиндрических катода, поджигающего электрода и диэлектрической шайбы составлял 5 мм. Анод в виде полого цилиндра имеет внутренний диаметр 7 мм. Толщина диэлектрической шайбы — 0,1 мм.

Асюнин Вячеслав Игоревич, инженер.  
Давыдов Сергей Геннадьевич, научный сотрудник.  
Долгов Александр Николаевич, вед. научный сотрудник.  
Козловская Татьяна Ивановна, начальник отдела.  
Пшеничный Александр Александрович, инженер.  
Якубов Рустам Халимович, зам. начальника отдела.  
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова.  
Россия, 127055, Москва, ул. Суцёвская, 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

В описываемых ниже экспериментах между диэлектрической шайбой и прилегающими электродами соосно с ними размещались дополнительно металлические прокладки, каждая толщиной 0,1 мм и диаметром 5 мм: между диэлектрической шайбой и поджигающим электродом — коваровая, между диэлектрической шайбой и катодом — коваровая и титановая. Все указанные элементы разрядного устройства (кроме анода) поджигались вдоль оси для создания между ними плотного контакта, что контролировалось визуально с помощью оптического микроскопа МБС-9 при 14—100-кратном увеличении.

Была предусмотрена возможность помещать разрядное устройство в неоднородное магнитное поле, создаваемое двумя коаксиальными постоянными магнитами диаметром 12 мм и толщиной 15 мм каждый, которые были ориентированы в пространстве одноименными полюсами навстречу друг другу (рис. 1). Магниты создавали в объеме разрядного устройства магнитное поле с индукцией  $\sim 0,1$  Тл, силовые линии которого в окрестностях диэлектрической шайбы имеют ортогональное по отношению к её поверхности направление, т. е., другими словами, в указанной области пространства преобладала радиальная составляющая магнитного поля. Поле имеет неоднородную пространственную структуру, причём его индукция возрастает в осевом направлении.

Электропитание разрядного устройства осуществлялось от блока питания, размещаемого за пределами вакуумной камеры, через высоковольтные вакуумные разьёмы. 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 и крутизной  $(1-2) \cdot 10^{10}$  В/с. Происходил пробой по поверхности диэлектрической шайбы, и плазма, образованная продуктами эрозии катода, диэлектрической шайбы и поджигающего электрода (и дополнительных металлических прокладок, которые, как это продемонстрировали результаты предварительных исследований [3—6], оказывали стабилизирующее воздействие на условия инициирования разряда), 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.

В процессе экспериментов регистрировались осциллограммы напряжения на промежутке катод-анод и синхронно с ними осциллограммы тока в промежутке катод-анод (рис. 2). Периодически с помощью оптического микроскопа МБС-9 производилось визуальное обследование подвергаю-

щихся воздействию разряда поверхностей элементов разрядного устройства.

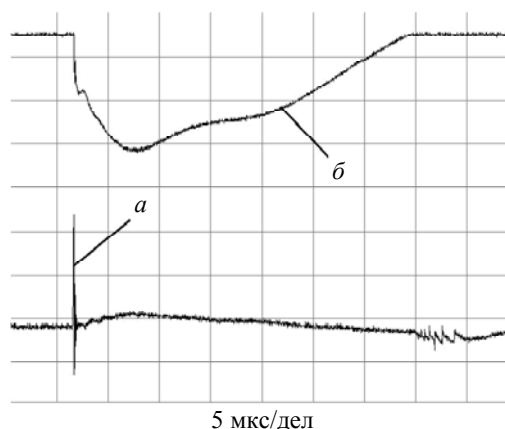


Рис. 2. Осциллограммы:

*a* — падение напряжения на промежутке катод-поджигающий электрод, *б* — сила тока в разряде в промежутке катод-анод

### Результаты эксперимента

В ходе выполнения первоначальных экспериментов, когда внешнее магнитное поле в объеме разрядного устройства отсутствовало, 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 %. Наличие внешнего магнитного поля, как показали результаты экспериментов, оказывает заметное стабилизирующее воздействие на параметры, характеризующие процесс инициирования разряда. Например, «скорость» снижения величины напряжения, при котором происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы (т. е. зависимость изменения усредненной по вышеуказанным сериям разрядов величины напряжения пробоя от количества последовательно осуществленных импульсов тока в промежутке катод-анод), с «включением» внешнего магнитного поля уменьшается примерно в 4—5 раз. Разброс времени задержки от момента подачи поджигающего импульса до момента начала протекания тока в промежутке катод-анод и разброс величины напряжения пробоя снижается примерно в 1,5 раза.

Визуальное обследование поверхности электродов и диэлектрической шайбы обнаружило следующие особенности состояния разрядного устройства после осуществления достаточно больших серий разрядов ( $\sim 10^3$ ) как в отсутствие внешнего магнитного поля, так и в условиях присутствия данного магнитного поля. Причем, как было установлено в серии экспериментов, в которой разряд в промежутке катод-анод не осуществ-

лялся (соответствующий контур не заряжался, т. е. напряжение на анод не подавалось), поджигающий разряд по поверхности диэлектрической шайбы не приводил к сколько-нибудь заметной эрозии элементов разрядного устройства в силу малости энергозапаса ( $\sim 10^{-4}$  Дж) в цепи поджига.

В обоих случаях наблюдается так называемая привязка разряда, т. е. преимущественное протекание разряда в ограниченной области разрядного устройства, другими словами, не по всему периметру анода, катода и диэлектрической шайбы. Этот вывод можно сделать исходя из характера эрозии поверхностей катода, анода и диэлектрической шайбы. Эрозия всех элементов разрядного устройства — существенно неоднородная по периметру (при обходе вокруг оси симметрии). Наблюдается перенос материала катода на поверхность титановой вставки вплоть до образования сплошного покрытия и накопления материала катода на коваровой прокладке, расположенной со стороны катода, вплоть до образования по её периметру выступа высотой порядка ширины прокладки (рис. 3). В условиях отсутствия внешнего магнитного поля на поверхности диэлектрической шайбы и коваровой прокладки, расположенной со стороны поджигающего электрода, наблюдаются капли металла (вероятно, ма-

териала катода), которые иногда сливаются в капельки. Заметной эрозии самой коваровой прокладки не наблюдается. Наиболее заметна эрозия диэлектрической шайбы со стороны катода (рис. 4 и рис. 5).

В условиях присутствия внешнего магнитного поля, так же как и в предыдущем случае, наблюдается значительный перенос материала катода на поверхность титановой прокладки и накопление материала катода на коваровой прокладке, расположенной со стороны катода, с образованием выступа, который в данном случае имеет особенность, отличающую его предыдущего случая. А именно, выступ нависает (имеет форму козырька) над поверхностью диэлектрической шайбы, чего не наблюдалось в отсутствие внешнего магнитного поля. Ещё одна отличительная черта картины эрозии в присутствии магнитного поля состоит в том, что на поверхности диэлектрической шайбы наблюдаются в меньшем количестве и только отдельные капли металла. На поверхности коваровой прокладки, расположенной со стороны поджигающего электрода, продуктов эрозии (капель металла) не наблюдается. А вот эрозия диэлектрической шайбы со стороны катода по-прежнему заметна.

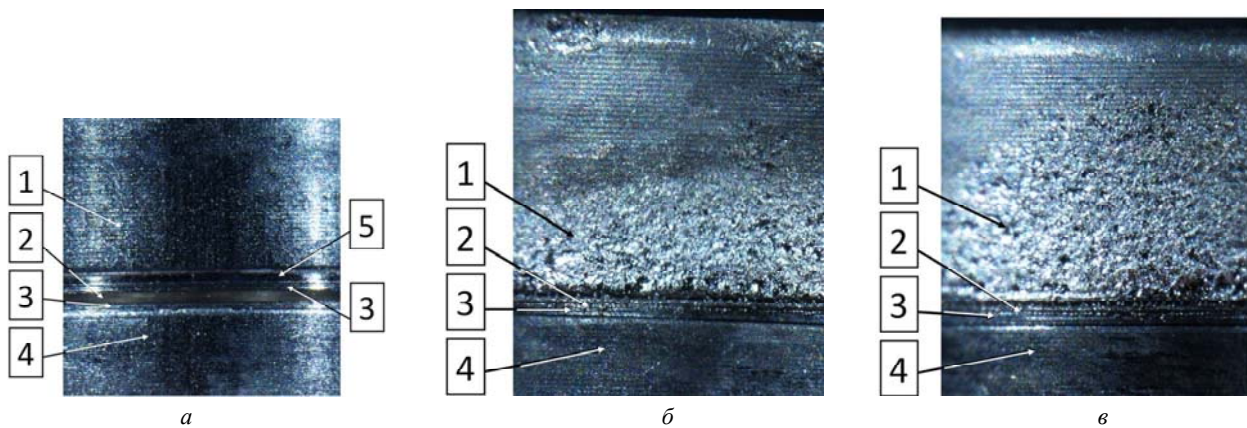


Рис. 3. Изображение элементов разрядного устройства (без анода), полученное с помощью оптического микроскопа: а — после «тренировки», б — в отсутствие внешнего магнитного поля после  $\sim 10^3$  разрядов, в — в присутствии внешнего магнитного поля после  $\sim 10^3$  разрядов

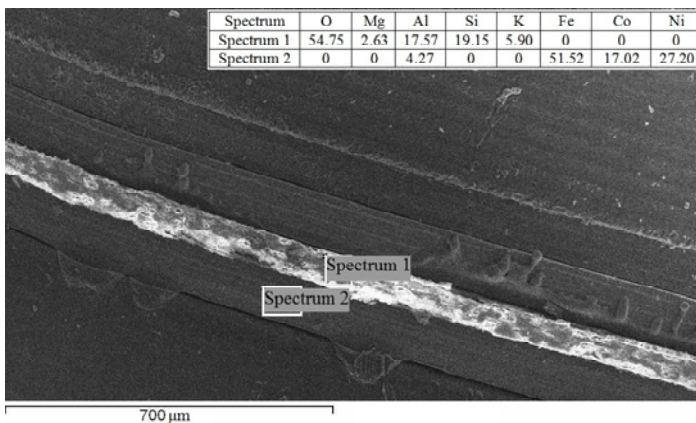
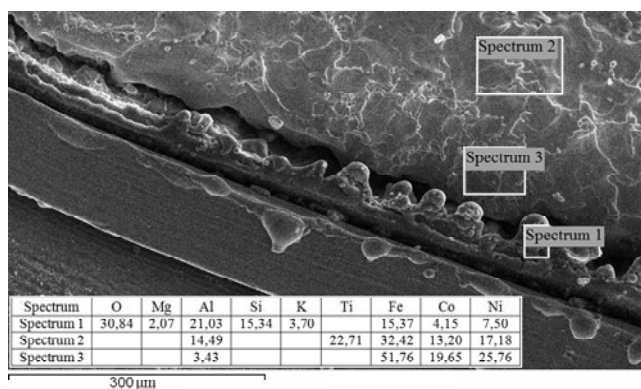


Рис. 4. Изображение элементов (без анода) разрядного устройства (снизу вверх): поджигающий электрод, коваровая прокладка (со стороны поджигающего электрода), диэлектрическая шайба, коваровая прокладка (со стороны катода), титановая прокладка, катод, полученное с помощью электронного микроскопа для случая 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



Возможным объяснением фиксируемых различий картины эрозии в случае отсутствия внешнего магнитного поля и в случае присутствия неоднородного внешнего магнитного поля является следующее. В неоднородном магнитном поле плазма разряда проявляет свои диамагнитные свойства и формирует плазменный поток, движение которого имеет направление от катода к поджигающему электроду вдоль поверхности электродов и диэлектрической шайбы. Поток плазмы определяет форму выступа, образованного продуктами эрозии материала катода на поверхности коваровой прокладки, расположенной со стороны катода. Кроме того, плазменный поток сдувает продукты эрозии элементов разрядного устройства — в первую очередь, катода — с поверхности диэлектрической шайбы и второй коваровой прокладки. Очищение плазменным потоком поверхности диэлектрической шайбы от проводящих продуктов эрозии приводит к стабилизации её изолирующих свойств.

### Обсуждение результатов эксперимента

Рассмотрим процесс развития разряда сначала в случае, когда внешнее магнитное поле отсутствует. Пробой по поверхности диэлектрической шайбы начинается, согласно современным представлениям, с возникновения центров взрывной электронной эмиссии на катоде и формирования плазменного факела, называемого также катодным факелом. Скорость распространения катодного факела, например, для алюминиевой плазмы в этом случае можно оценивать величиной  $\sim 2 \cdot 10^4$  м/с [4—7]. При толщине диэлектрической прокладки  $\sim 10^{-4}$  м получим в качестве оценки для длительности искровой стадии разряда, т. е. для длительности процесса замыкания промежутка катод-поджигающий электрод по поверхности диэлектрика проводящей средой — плазмой,  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$  с. Соответственно, для длительности искровой стадии в пространстве катод-анод при его протяженности 1 мм оценка даст величину  $\sim 5 \cdot 10^{-8}$  с. Если принять во внимание, что продолжительность цикла центра взрывной электронной эмиссии оце-

Рис. 5. 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

нивается разными авторами величиной порядка  $10^{-8}$  с [5—7, 8—10], то можно предположить, что к моменту перехода разряда в промежутке катод-анод в дуговую стадию катодное пятно, т. е. совокупность центров взрывной электронной эмиссии, обеспечивающая пропускание тока заданной параметрами разрядного контура силы [8—10, 11—13], не успеет сместиться заметным образом в сравнении с собственными размерами  $\sim 0,1$  мм. Таким образом, в месте пробоя начинается процесс интенсивной, как показывает визуальное обследование поверхности электродов и диэлектрической шайбы, эрозии и модификации поверхности. Согласно визуальным наблюдениям, преобладают процессы переноса и накопления вещества катода на поверхности диэлектрической шайбы и прилегающих прокладок, а также возрастание шероховатости поверхности катода. Локальное накопление проводящих продуктов эрозии на поверхности диэлектрической шайбы снижает её локальную электропрочность. Рост шероховатости поверхности электрода создает микрообласти, например, микроострия с резко неоднородным электрическим полем и высокими значениями напряженности поля у проводящей поверхности в момент подачи импульса поджигающего напряжения. Всё это вместе взятое, по видимому, и создает предпосылки для развития пробоя в последующих разрядах в той же области разрядного устройства, т. е. приводит к так называемой привязке разряда.

Процесс развития разряда на начальной его стадии в случае наличия внешнего магнитного поля будет выглядеть несколько иначе. Искровой пробой по поверхности диэлектрической шайбы происходит поперек магнитного поля. В указанных условиях процесс распространения катодного факела в направлении анода будет определяться скоростью диффузии плазмы факела в магнитном поле. Корректный расчет данного процесса в условиях неоднородности плазмы является достаточно сложной задачей. Имеются основанные на экспериментальных данных сообщения о том, что при наличии поперечного магнитного поля скорость распространения катодной плазмы уменьшается

примерно вдвое [4—7]. Для более осторожной оценки воспользуемся тем обстоятельством, что при электронной температуре плазмы в центре взрывной электронной эмиссии порядка  $3\div 5$  эВ [11—14] скорость эмитируемых в составе плазменного факела ионов может составить  $\sim 5 \cdot 10^3$  м/с. Таким образом, время замыкания промежутка катод-поджигающий электрод плазмой катодного факела может составить порядка  $(1\div 2) \cdot 10^{-8}$  с. Присутствие магнитного поля не влияет на процесс пробоя промежутка катод-анод, т. к. направление вектора индукции магнитного поля совпадает в данном случае с направлением распространения потока заряженных частиц из катодного пятна. В этих условиях затягивание искровой стадии разряда в промежутке катод-поджигающий электрод повышает вероятность появления новых центров взрывной электронной эмиссии на различных участках границы катод-диэлектрик-вакуум. Связано это с тем, что повышение силы тока через токовый канал искры вплоть до момента замыкания изолирующего промежутка плазмой сопровождается повышением падения напряжения на изолирующем промежутке согласно имеющимся экспериментальным данным [12—14, 15—17]. Подобная ситуация, в свою очередь, создает условия для формирования нескольких катодных пятен и, соответственно, нескольких каналов тока у поверхности диэлектрика, что может благоприятно сказаться на стабильности напряжения пробоя при многократном срабатывании разрядного устройства.

В заданной пространственной конфигурации внешнего магнитного поля возможно проявление диамагнетизма плазмы разряда. Магнитное поле неоднородно, т. е. имеется отличный от нуля градиент величины индукции магнитного поля, причем линии градиента величины индукции магнитного поля обладают аксиальной симметрией (ось симметрии градиента совпадает с осью симметрии электродной системы). Плазма как диамагнитная среда в неоднородном магнитном поле будет перемещаться как целое в направлении, противоположном направлению градиента  $\vec{\nabla}B$  [15—18].

В центрах взрывной электронной эмиссии плотность плазмообразующего вещества близка к плотностям твердого тела, и концентрация частиц составляет порядка  $10^{28}$  м<sup>-3</sup> [16—19], а температура оценивается величиной  $3\div 5$  эВ [11—14]. Если предположить, что разлет плазмы из центра взрывной электронной эмиссии происходит примерно изотропно, что соответствует результатам наблюдений при пробое коротких промежутков [4—7], т. е. падает при удалении от центра взрывной электронной эмиссии, размер которого можно оценить величиной  $\sim 10^{-6}$  м [16—19], обратно пропорционально третьей степени расстояния (впрочем некоторые авторы полагают, что плотность

плазмы падает несколько медленнее [17—20]), то даже на расстоянии  $10^{-3}$  м, равном расстоянию между катодом и анодом, концентрация частиц окажется равной  $\sim 10^{19}$  м<sup>-3</sup>, а радиус Дебая  $r_D$  [18—21] составит величину много меньшую размеров плазменного факела:

$$r_D = \left( \frac{\varepsilon_0 \cdot k \cdot T}{e^2 \cdot n} \right)^{1/2} \approx 2 \cdot 10^5 \text{ м}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная (система СИ),  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — приведенная температура плазмы,  $e$  — заряд электрона,  $n$  — концентрация заряженных частиц. Аналогичный результат получается, если мы рассмотрим область катодного пятна, размер которого составляет  $\sim 10^{-4}$  м, а радиус Дебая в этом случае окажется  $\sim 10^{-6}$  м. При переходе от стадии искры к дуговой стадии разряда, т. е. после замыкания межэлектродного пространства плазменным факелом, в промежутке катод-анод температура плазмы уменьшается примерно до  $0,2\div 0,5$  эВ, а плотность заряженных частиц составит  $\sim 10^{20}\div 10^{22}$  м<sup>-3</sup> [19, 20, 22, 23], что, однако, не изменит ситуацию — проводящей средой разряда по-прежнему будет являться плазма, а не просто ионизированный пар продуктов эрозии.

При температуре плазмы на стадии искры  $3\div 5$  эВ скорость электронов составляет  $V_e = \sim 10^6$  м/с. При величине индукции магнитного поля в межэлектродном промежутке  $B = \sim 10^{-1}$  Тл ларморовский радиус [18—21] для электронов составит:

$$r_{Le} \approx \frac{m_e \cdot V_e}{e \cdot B} \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad (2)$$

где  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона, соответственно,  $V_e = (2We/m_e)^{1/2}$ ,  $We$  — средняя кинетическая энергия электрона. Следовательно, ларморовский радиус много меньше величины промежутка катод-анод. На стадии дуги при температуре  $0,2\div 0,5$  эВ скорость электронов составит  $\sim (3\div 4) \cdot 10^5$  м/с, а ларморовский радиус  $(2\div 3) \cdot 10^{-5}$  м, т. е. на обеих рассматриваемых стадиях разряда электронный ларморовский радиус оказывается значительно меньше величины промежутка катод-анод.

Учет столкновений частиц в плазме дает следующее уточнение. Длина свободного пробега электронов в плазме (степень ионизации достаточно велика) [15—18]:

$$l \approx \frac{1}{n \cdot \sigma}, \quad (3)$$

где  $\sigma = \pi \Lambda \left( 2kZe^2 / m_e V_e^2 \right)^2$  — сечение кулоновского рассеяния электрона на ионе,  $\Lambda \approx 15$  — кулоновский логарифм,  $Z$  — средняя кратность иони-

зации атомарных частиц [18—21]. Что касается искровой стадии разряда, то в случае примерно изотропного разлета плазмы с учетом  $Z \approx 3$  длина свободного пробега электронов окажется, по оценке, меньше ларморовского радиуса электронов на расстоянии больших  $\sim 7 \cdot 10^{-4}$  м от центра взрывной электронной эмиссии, т. е. можно сказать, что практически электроны в плазме катодного факела не будут замагничены на этой стадии разряда. На дуговой стадии  $Z \approx 1$  и длина свободного пробега электронов в плазме разряда составит  $\sim (0,2 \div 5) \cdot 10^{-5}$  м, т. е. электроны в плазме окажутся замагничены.

Ларморовский радиус ионов в плазме разряда при температуре плазмы  $\sim 0,2 \div 0,5$  эВ для ионов алюминия, материала катода, дающего количественно основной вклад в продукты эрозии, составит  $r_{Li} \approx (3 \div 6) \cdot 10^{-3}$  м. Таким образом, выполняются условия замагниченности электронов и незамагниченности ионов в разряде на стадии дуги при наличии заданного внешнего магнитного поля. Градиент магнитного поля, на присутствие которого указывалось ранее, приведет к дрейфу замагниченных электронов (так называемый градиентный дрейф) вокруг оси симметрии системы со скоростью [18—21]:

$$\vec{V}_D = \frac{V_{\perp}^2}{2\omega} \frac{[\vec{B} \nabla B]}{B^2}, \quad (4)$$

где  $V_{\perp}$  — поперечная по отношению к вектору индукции магнитного поля скорость частицы;  $\omega = V_{\perp}/r_{Le}$  — ларморовская частота частицы. Если принять характерный масштаб неоднородности магнитного поля порядка размера создающих его магнитов, т. е.  $\sim 10^{-2}$  м, то скорость градиентного дрейфа электронов окажется  $\sim 10^3$  м/с, и за время, например, заполнения межэлектродного промежутка ионами  $\sim 2 \cdot 10^{-7}$  с их смещение относительно ионов (при градиентном дрейфе разноименно заряженные частицы дрейфуют в противоположных направлениях) может достигнуть величины порядка радиуса Дебая, т. е. создаст разделение зарядов, близкое к максимально возможному. Возникающее электрическое поле, направленное по вектору скорости градиентного дрейфа, может достигать величины:

$$E_{cs} \approx \left( \frac{2W_e \cdot n}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \approx 10^5 \text{ В/м}, \quad (5)$$

где  $E_{cs}$  — напряженность электрического поля, вызванного разделением зарядов. Возникает ситуация скрещенных полей магнитного и электрического, которая вызовет дрейф частиц в направ-

лении вектора  $[\vec{E}_{cs} \vec{B}]$  со скоростью, величина которой может достигать [18—21]:

$$V_{cs} \approx \frac{E}{B} \approx 10^5 \text{ м/с}, \quad (6)$$

т. е. может оказаться значительно больше тепловой скорости ионов. Дрейф частиц в скрещенных полях вызовет поток плазмы в направлении диэлектрической шайбы параллельно поверхности электродов, обдувающий и очищающий поверхность шайбы, что приводит к стабилизации её диэлектрических свойств. Вышесказанное имеет, по видимому, значение, в первую очередь, для дуговой стадии горения разряда ввиду ее большой по сравнению с искровой стадией продолжительностью.

### Заключение

В настоящей работе исследовалась возможность воздействия неоднородным магнитным полем внешнего источника на плазму дугового разряда, зажигаемого в вакууме. Цель, которую в первую очередь преследовали авторы работы — изучить влияние внешнего магнитного поля на эрозионные процессы, протекающие в управляемом трёхэлектродном разрядном устройстве коаксиальной геометрии с иницированием разряда пробоем по поверхности диэлектрика.

Присутствие внешнего магнитного поля вышеописанной конфигурации не позволило избавиться от эффекта так называемой привязки разряда, т. е. преимущественного протекания разряда в ограниченной области разрядного устройства при многократном иницировании разряда, что приводит к локализации эрозионных процессов в разрядном устройстве. В частности, как в отсутствие, так и в присутствии внешнего магнитного поля наблюдается перенос материала катода на поверхность диэлектрика при многократном иницировании разряда, что изменяет условия осуществления вспомогательного управляющего разряда. Тем не менее, в присутствии внешнего магнитного поля при многократном иницировании разряда снижается примерно в 4—5 раз темп уменьшения величины напряжения, при котором происходит пробой по поверхности диэлектрика. Разброс времени задержки от момента подачи поджигающего импульса до момента начала протекания тока в промежутке катод-анод и разброс величины напряжения пробоя снижается примерно в 1,5 раза.

Визуальное обследование подвергающихся воздействию разряда поверхностей элементов разрядного устройства, выполненное с помощью оптического микроскопа, и выявленные особенности картины эрозии позволили выдвинуть предполо-

жение о том, каков механизм влияния внешнего неоднородного магнитного поля на эрозионные процессы. Предполагается, что неоднородное магнитное поле вызывает градиентный дрейф плазмы, разделение зарядов в плазменном факеле, дрейф плазмы в скрещенных магнитном и наведенном электрическом полях, т. е. вызывает, в конечном итоге, касательный по отношению к поверхности диэлектрика поток плазмы, обдувающий и очищающий эту поверхность от проводящих продуктов эрозии, что приводит к стабилизации её диэлектрических свойств. Прделанные в рамках указанной модели оценочные расчеты показывают, что подобный механизм вполне может реализовываться в вакуумном разряде.

#### Литература

1. Баренгольц С. А., Месяц В. Г., Шмелёв Д. Л. // Письма в ЖТФ, 2010. Т. 36. Вып. 23. С. 91.
2. Андреев А. А. // ВАНТ. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения, 2000. № 1. С. 13.
3. Герман В. О., Глинов А. П., Головин А. П. и др. // Прикладная физика. 2012. № 6. С. 108.
4. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 182.
5. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н. и др. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 72.
6. Пиеничный А. А., Якубов Р. Х. // Вакуумная наука и техника. Материалы научно-технической конференции. / Под ред. Д. В. Быкова. — М.: МИЭМ. 2011. С. 153.

7. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Мир, 2000.
8. Siemroth P., Schülke D.M., Witke T. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. P. 571.
9. Brown I. G., Spädtkle P., Rück D. M., et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A., 1990. V. 295. P. 12.
10. Smeets R. P. P., Schulpen F. J. H. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1988. V. 21. P. 301.
11. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. — М.: Наука, 1968.
12. Харрис Л. Катодные процессы: Вакуумные дуги. Теория и приложения. — М.: Мир, 1982.
13. Anders A., Anders S., Jüttner B., et al. // J. Appl. Phys., 1992. V. 71. P. 4763.
14. Vogel N., Heinzinger J., Cichos F. // IEEE Trans. Plasma Sci., 1995. V. 23. No. 6. P. 926.
15. Корон Е. Д., Плюммо А. А. // ЖТФ, 1970. Т. 40. Вып. 12. С. 2534.
16. Корон Е. Д. // ЖТФ, 1976. Т. 46. Вып. 10. С. 2187.
17. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004.
18. Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е. Основы физики плазмы. — М.: Атомиздат, 1977.
19. Anders S., Anders A., Brown I. // Rev. Sci. Instrum. V. 65. No. 4. P. 1253.
20. Jüttner B., Förster A. / Proc. XVII Int. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, 1996. P. 118.
21. Франк-Каменецкий Д. А. Лекции по физике плазмы. — М.: Атомиздат, 1968.
22. Кобайн Дж. Введение в физику вакуумной дуги. — М.: Мир, 1982.
23. Wang L., Jia S., Shi Z., Rong M. // J. Phys. D: Appl. Phys., 2005. V. 38. P. 1034.

## Influence of an axially-symmetric non-uniform magnetic field on the arc plasma in vacuum

V. I. Asiunin, 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 presence of an external magnetic field hasn't removed the effect of vacuum arc attaching in coaxial triggered-vacuum gap. However it increased stability of triggered breakdown voltage on dielectric surface. It is assumed that non-uniform magnetic field causes plasma drift motion, in which tangent flow blows on the dielectric surface stabilizing its insulating properties. Estimations have shown that the above mentioned mechanism could be implemented.*

PACS: 52.80.-s, 52.80.Vp

*Keywords:* triggered-vacuum gap, magnetic field, plasma motion, arc.

## References

1. S. A. Barenkol'ts, V. G. Mesyats, and D. L. Shmelev, *Tech. Phys. Lett.* **36** (23), 91 (2010).
2. A. A. Andreev, VANT. Ser.: Plasmic Electronics, No. 1, 13 (2000).
3. V. O. German, A. P. Glinov, A. P. Golovin, et al. *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 108 (2012).
4. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 182 (2014).
5. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 2, 72 (2014).
6. A. A. Pshenichnyi and R. Kh. Yakibov, in *Proc. Conf. on Vacuum Science and Techniques* (MIEM, Moscow, 2011). P. 153.
7. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharge* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
8. P. Siemroth, D.M. Schülke, and T. Witke, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25**, 571 (1997).
9. I. G. Brown, P. Spädtke, D. M. Rück, et al., *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* **295**, 12 (1990).
10. R. P. P. Smeets and F. J. H. Schulpen, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21**, 301 (1988).
11. I. G. Kesaev, *Cathode Processes of Electrical Arc* (Nauka, Moscow, 1968) [in Russian].
12. L. Harris, *Cathode Processes* (Mir, Moscow, 1982) [in Russian].
13. A. Anders, S. Anders, B. Jüttner, et al., *J. Appl. Phys.*, **71**, 4763 (1992).
14. N. Vogel, J. Heinzinger, and F. Cichos, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **23**, 926 (1995).
15. E. P. Korop and A. A. Plyutto, *Tech. Phys.* **40**, 2534 (1970).
16. E. P. Korop, *Tech. Phys.* **46**, 2187 (1976).
17. F. A. Mesyats, *Pulsed Energetics and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
18. V. E. Golant, A. P. Zhilinsky, and I. E. Sakharov, *Foundation of Plasma Physics* (Atomizdat, Moscow, 1977) [in Russian].
19. S. Anders, A. Anders, and I. Brown, *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 1253.
20. B. Jüttner and A. Förster, in *Proc. XVII Int. Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, (Berkeley, 1996). P. 118.
21. D. A. Frank-Kamenetsky, *Lectures on Plasma Physics*. (Atomizdat, Moscow, 1968) [in Russian].
22. J. Kobine, *Introduction in Physics of Plasma Arc* (Mir, Moscow, 1982) [in Russian].
23. L. Wang, S. Jia, Z. Shi, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 1034 (2005).