УДК 621.385

Воздействие однородного магнитного поля на режим срабатывания малогабаритного управляемого вакуумного разрядника

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

Исследовалась возможность управления процессом срабатывания малогабаритного управляемого вакуумного разрядника с помощью внешнего однородного магнитного поля. Обнаружен эффект подавления локализации области развития разряда. Предложен вероятный механизм воздействия магнитного поля на протекание разряда в стадии искры и дуги, приводящий к наблюдаемому эффекту.

PACS: 52.80.— s, 52.80.Vp
Ключевые слова: ***вакуумный разрядник, магнитное поле, искра, эрозия электродов, дуга.***

Введение

Исследования процессов, протекающих в вакуумных разрядах, развиваются во многих направлениях, что обусловлено с одной стороны наличием необъясненных до сих пор явлений, с другой — возможностями практического использования вакуумных разрядов для решения немаловажных, а порой просто жизненно необходимых технических задач, например, в области электроэнергетики.

Движение катодного пятна вакуумной дуги во внешнем тангенциальном магнитном поле в направлении, обратном по отношению к направлению действия силы Ампера — до сих пор одно из самых загадочных и трудно объяснимых явлений в физике вакуумного разряда. Внимание к данному явлению, помимо его экзотичности, связано еще и с тем, что, как предполагалось, выяснение его механизма позволит построить теорию катодного пятна вакуумной дуги [1–6].

Вызывает немалый интерес применение вакуумных искровых и дуговых разрядов в ионно-плазменных напылительных устройствах и источниках сильноточных пучков ионов металлов [7–11].

В частности, показано методами математического моделирования и экспериментально, что в ионных источниках на основе вакуумной дуги для получения высокой зарядности ионов следует налагать на разряд внешнее аксиально-симметричное магнитное поле, которое обеспечивает из-за удержания ионов более длительное их нахождение в области интенсивной ионизации [12–14].

Наиболее динамично физика сильноточного вакуумного разряда развивается в связи с его широким использованием в вакуумной коммутационной аппаратуре [15–17]. Используя процесс возбуждения вакуумной дуги с помощью воздействия на рабочую среду коммутирующего устройства импульсом магнитного поля, удается обеспечить надежное зажигание сильноточного тлеющего разряда и его переход в дуговой даже при пониженных рабочих давлениях [18,19]. Исследуется и находит применение процесс зажигания вакуумной дуги в неоднородном магнитном поле [20]. Получили распространение сильноточные размыкатели, в которых используется поперечное внешнее магнитное поле [21,22]. Обнаружен эффект стабилизации сильноточной вакуумной дуги внешним аксиально симметричным магнитным полем, что уже находит отражение в разработке конструкций вакуумных коммутаторов, отличающихся высокой коммутационной способностью по току и напряжению, что в свою очередь обеспечивается благодаря формированию в разрядном промежутке продольного по отношению к направлению тока дуги магнитного поля [23–27].

Управляемые малогабаритные вакуумные разрядники находят достаточно широкую область

Асюнин Вячеслав Игоревич, инженер.
Давыдов Сергей Геннадьевич, инженер
Долгов Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник.
Пшеничный Александр Александрович, инженер.
Якубов Рустам Халимович, зам. нач. отдела.
Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова.
Россия, 127055, Москва, ул. Сущёвская, 22.
Тел.: 8 499 4001970, доб. 1302
E-mail: vniia@vniia.ru; alnikdolgov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31 марта 2014 г.

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

для своего применения в аппаратуре, предназначенной, например, для генерации потоков проникающего излучения, фоторегистрации быстропротекающих процессов, формирования импульсов зондирующего электромагнитного излучения с различной длиной волны.

Известно много типов вакуумных разрядников с инициированием форплазмой на катоде. Авторы [28] разработали миниатюрные вакуумные разрядники типа ВИР. В этих разрядниках пробой основного промежутка инициируется вспомогательным пробоем по поверхности слюдяной шайбы, которая разделяет электроды поджигающего промежутка. Применение этой диэлектрической шайбы позволяет снизить пробивное напряжение поджигающего промежутка, а тем самым и амплитуду пускового импульса. Разрядники типа ВИР имеют большую область рабочего напряжения от 100 В до 10 кВ [29].

Одной из проблем, которая требует решения для обеспечения большого ресурса и высокой стабильности работы вакуумного разрядника, является локализация области развития разряда. Указанное явление приводит к тому, что при многократном срабатывании коммутирующего устройства разряд происходит в ограниченной области его рабочего пространства. Тем самым воздействию разряда подвергаются только отдельные участки поверхности как диэлектрической шайбы, так и электродов, в первую очередь катода, что приводит к увеличению скорости эрозии

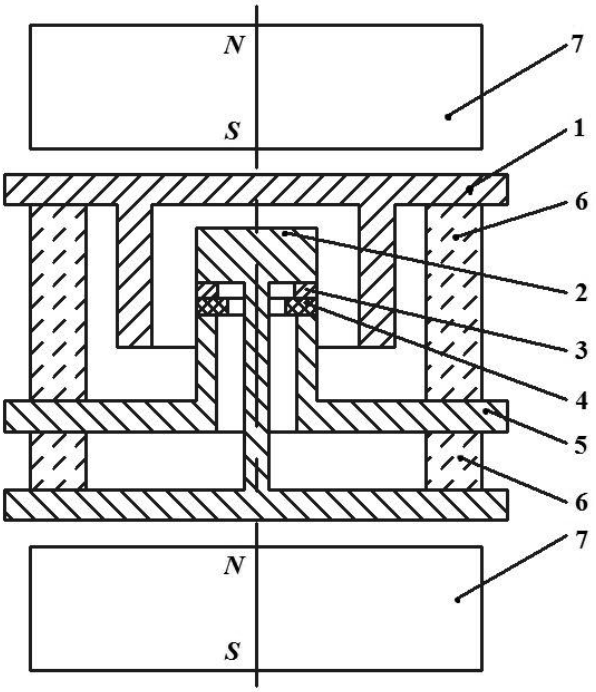


Рис. 1. Схема управляемого вакуумного разрядника: 1 — анод, 2 — катод, 3 — уплотняющая металлическая прокладка, 4 — диэлектрическая шайба, 5 — поджигающий электрод, 6 — герметичная диэлектрическая оболочка, 7 — постоянные магниты.

указанных поверхностей и переноса проводящего материала электродов на поверхность диэлектрической шайбы, что снижает ресурс и стабильность работы разрядника.

Целью данной работы было исследование возможности управления процессом срабатывания малогабаритного управляемого вакуумного разрядника с помощью внешнего однородного магнитного поля в интересах подавления локализации области развития разряда.

Методика эксперимента

Используемый в проведенных исследованиях управляемый вакуумный разрядник представляет собой трехэлектродную коаксиальную систему (катод, анод, поджигающий электрод), которая расположена внутри герметичной откачанной оболочки, выполненной из диэлектрического материала (рис. 1). Катод, поджигающий электрод и плотно сжатая между ними диэлектрическая шайба толщиной 100 мкм, выполненная из слюды, образуют систему поджига.

Наличие диэлектрика, заполняющего промежуток между катодом и поджигающим электродом служит для снижения и стабилизации напряжения поджигающего пробоя, инициирующего пробой между катодом и анодом, что приводит к срабатыванию разрядника в качестве коммутирующего элемента внешней электрической цепи. Внесение диэлектрика в вакуумный зазор между металлическими электродами само по себе приводит к резкому снижению электрической прочности промежутка, т.к. наличие диэлектрика приводит к усилению напряженности электрического поля в области контакта катод-диэлектрик за счет микрозазоров [30]. Помимо этого, при пробое промежутка «катод—поджигающий электрод» электроны из катодной области частично попадают на изолятор. Поскольку коэффициент вторичной эмиссии диэлектриков больше единицы, то бомбардируемая электронами поверхность изолятора в результате заряжается положительно, а следовательно, напряженность поля у катода также возрастает [29].

Величина зазора в промежутке катод-анод составляет 1 мм. Диаметр катода, выполненного из алюминия, равен 5 мм. Катод заземлен, анод до начала процесса коммутации находится под положительным потенциалом 2—3 кВ. Срабатывание разрядника происходит при подаче на поджигающий электрод положительного (относительно катода) импульса напряжения амплитудой 3,5 кВ и крутизной переднего фронта (1—2) $\cdot 10^{10}$ В/с. Коммутируемый в промежутке катод—анод ток имеет продолжительность $3\cdot 10^{-5}$ с и амплитуду 200—300 А.

При подаче импульса напряжения на поджигающий электрод по мере роста напряжения напряженность электрического поля у кромки катода, прилегающей к диэлектрической шайбе, достигает значений, при которых возникают токи автоэлектронной эмиссии, достаточные для испарения микроострий на поверхности катода, ионизации образующихся паров вещества катода и молекул сорбированного на поверхности катода и диэлектрической шайбы газа. Формируется катодное пятно. Облако эмиттируемой из него плазмы первоначально закорачивает промежуток «катод—поджигающий электрод», а затем расширяется в окружающее пространство, в т.ч. в направлении анода как под действием приложенного к промежутку катод—анод напряжения, так и благодаря большой подвижности электронов. В конечном итоге, образуется катодный факел, который замыкает промежуток катод—анод, а искровая стадия разряда переходит в дуговую стадию [31].

Характерной для описанного коммутирующего устройства является несимметричность по периметру системы воздействия протекающего в нём разряда на поверхность электродов и диэлектрической шайбы вследствие, по-видимому, локализации области развития разряда. Следует отметить, что тщательная предварительная очистка поверхности электродов и диэлектрической шайбы и их центровка по оси симметрии разрядника не позволяет избавиться от данного явления.

Влиять на условия протекания разряда можно, например, с помощью внешнего магнитного поля. Известно, что при наличии тангенциального к поверхности катода магнитного поля происходит смещение катодного пятна. В искровом разряде наблюдается преимущественное возникновение новых центров электронной эмиссии и, соответственно, движение катодного пятна в направлении действия силы Ампера, в дуговом — в «аномальном» направлении, т.е. в направлении, противоположном действию силы Ампера [5]. Направленное смещение катодного пятна в процессе горения разряда способно привести к размытию области эрозии как электродов, так и диэлектрической шайбы, уменьшить скорость накопления проводящего вещества электродов на поверхности диэлектрической шайбы в расчете на единицу её поверхности, т.е. сделать более симметричным по периметру электродной системы воздействие на неё со стороны разряда. В результате, можно ожидать возрастания ресурса и стабильности работы разрядника.

Исходя из этих соображений, с целью управления условиями протекания разряда и для повышения симметричности его воздействия на электроды и диэлектрическую шайбу снаружи герметичной оболочки разрядника были размещены коаксиально два цилиндрических постоянных магнита размерами Ø12×15 мм, причем разноименными полюсами навстречу друг к другу (рис. 1). Магниты создавали в объеме разрядника практически однородное магнитное поле с индукцией ~10^{-1} Тл, силовые линии которого параллельны оси симметрии разрядника.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Были осуществлены две серии испытаний для двух идентичных разрядников — в каждой серии по тысяче срабатываний, в одном варианте в отсутствии магнитного поля, в другом варианте при наличии магнитного поля указанной выше конфигурации и величины индукции. В первом случае ощутимое снижение величины напряжения пробоя промежутка катод-поджигающий электрод,

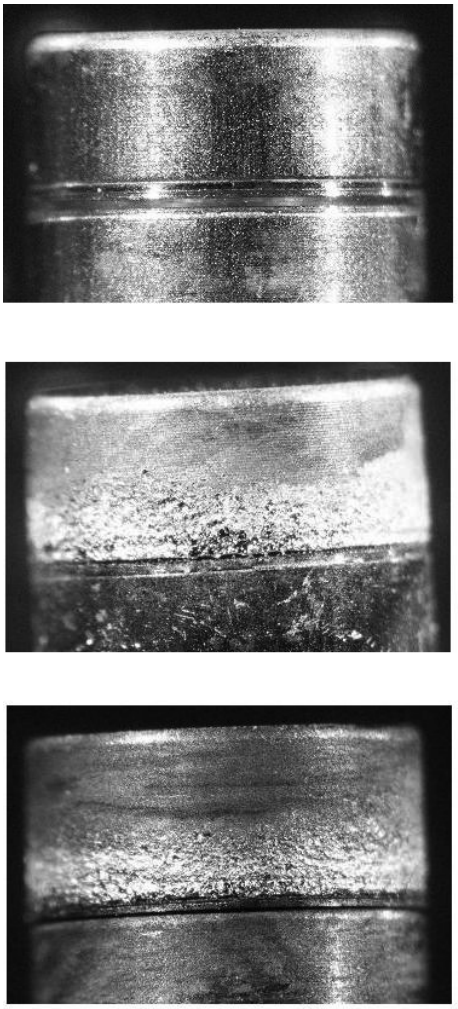


Рис. 2. Фотографии катодов: а) до начала испытаний, б) после испытаний в отсутствие магнитного поля, в) после испытаний в присутствие магнитного поля.

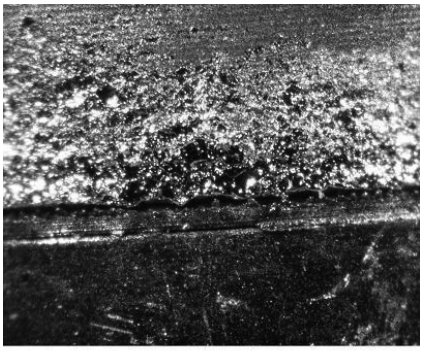
ведущего к срабатыванию разрядника, происходило примерно за сто срабатываний. Во втором случае снижение величины напряжения пробоя промежутка катод-поджигающий электрод удается обнаружить после осуществленных последовательно примерно трехсот-четырехсот срабатываний.

Обследование электродных систем разрядников, подвергшихся испытаниям, выполненное с помощью оптического микроскопа МБС-9 и электронного микроскопа JSM-35F дало следующие результаты.

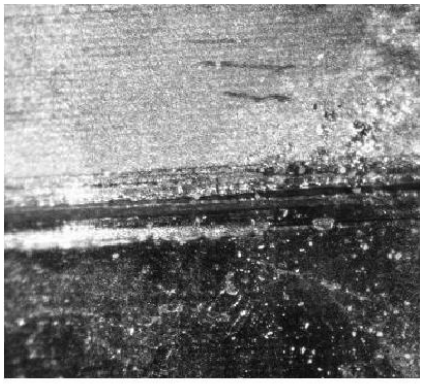
В отсутствие магнитного поля заметной эрозии было подвержено примерно 20─30 процентов боковой поверхности катода (рис. 2). То же самое можно сказать о диэлектрической шайбе. Локализация областей наиболее интенсивной эрозии катода и диэлектрической шайбы пространственно совпадает (рис. 3, 4). Можно отметить, что процесс эрозии в окрестностях диэлектрической шайбы носит двойственный характер. Во-первых, наблюдается перенос проводящего вещества катода в направлении диэлектрической прокладки, в том числе и на её поверхность. Во-вторых, происходит разрушение и вынос вещества самой диэлектрической прокладки, что отчетливо видно на изображениях, полученных с помощью электронного микроскопа (рис.4). Поверхность катода, подвергшаяся воздействию процесса эрозии, полностью оплавлена. На некоторых участках при визуальном обследовании удается выделить отдельные кратеры, оставленные катодными пятнами дугового разряда. Диаметр кратеров составляет 30–70 мкм, глубину, вероятно, можно оценить величиной 10–20 мкм. На торцевой поверхности катода эрозия не наблюдается.

При наличии магнитного поля эрозия наблюдалась по всей боковой поверхности катода и визуально была равномерной (рис. 5). Эрозия диэлектрической шайбы однородна по периметру. Эрозия торцевой поверхности катода не наблюдалась и в этом случае, но зато наблюдалась эрозия границы боковой цилиндрической и плоской торцевой поверхностей катода.

Таким образом, размещение малогабаритного управляемого вакуумного разрядника в магнитном поле (кстати, технически легко реализуемой величины и конфигурации) оказалось способно создать условия для повышения симметричности воздействия вакуумного разряда на электроды

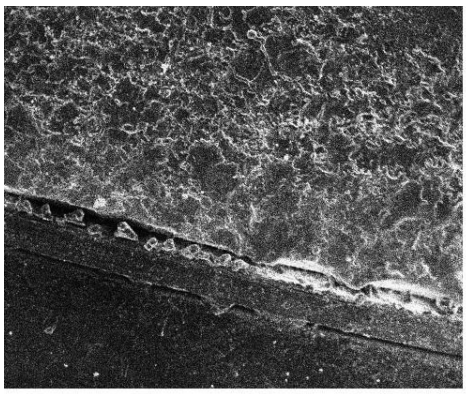


а

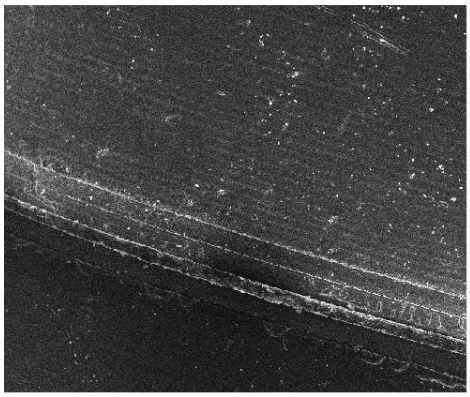


б

Рис. 3. Фотографии промежутка катод-диэлектрическая шайба-поджигающий электрод после испытаний в отсутствие магнитного поля: а) в области значительной эрозии, б) в области, подвергшейся слабому воздействию разряда.



а



б

Рис. 4 Изображение промежутка катод-диэлектрическая шайба-поджигающий электрод после испытаний в отсутствие магнитного поля, полученные с помощью электронного микроскопа JSM-35F: а) в области значительной эрозии, б) в области, подвергшейся слабому воздействию разряда.

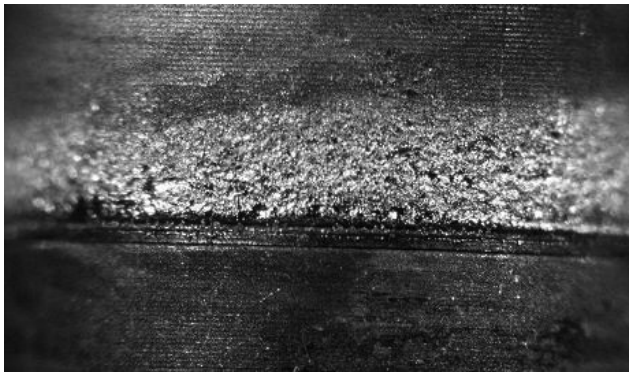


Рис. 5. Фотография промежутка «катод-диэлектрическая шайба-поджигающий электрод» в присутствие однородного магнитного поля.

и диэлектрическую шайбу системы поджига разрядника. Как следствие, это привело снижению и более равномерной их эрозии, что, в свою очередь, привело к увеличению ресурса и повышения стабильности работы прибора.

Теоретический анализ

Рассмотрим возможный механизм воздействия магнитного поля на условия протекания разряда, приводящие к наблюдаемым результатам. Наличие магнитного поля, с описанной выше пространственной конфигурацией, не влияет на процесс пробоя по поверхности диэлектрической шайбы, т.к. направление вектора индукции магнитного поля параллельно направлению распространения заряженных частиц из катодного пятна при подаче на поджигающий электрод импульса напряжения. Скорость распространения катодного факела для плазмы из алюминия в коротком межэлектродном промежутке в этих условиях можно оценить величиной $\sim 2\cdot 10^4$ м/с [32]. При толщине диэлектрической шайбы 10^{-4} м получим для длительности искровой стадии разряда по её поверхности величину $\sim 5\cdot 10^{-9}$ с. Напротив, развитие катодного факела в направлении анода при наличии магнитного поля может оказаться затруднено, т.к. в этом случае направление вектора магнитной индукции оказывается поперечным по отношению к направлению распространения потока заряженных частиц. Действительно, при температуре плазмы в катодном пятне 3—5 эВ [32] скорость электронов в его окрестностях составит $\sim 10^6$ м/с. При величине индукции магнитного поля в межэлектродном промежутке $B \approx 10^{-1}$ Тл ларморовский радиус электронов составит $\sim 5\cdot 10^{-5}$ м, что много меньше величины промежутка катод-анод.

Электрическое поле, приложенное к промежутку катод—анод, вырвать электроны из плазмы катодного факела не может в силу малости радиуса Дебая. В центрах взрывной электронной эмиссии плотность плазмы близка к плотности твердого тела и концентрация заряженных частиц составляет $\sim 10^{28}$ м$^{-3}$ [32]. Если предположить, что разлет плазмы происходит, примерно, изотропно, т.е. концентрация заряженных частиц падает при удалении от центра взрывной электронной эмиссии, размер которого можно оценить величиной $\sim 10^{-6}$ м [32—34], обратно пропорционально третьей степени расстояния, то на расстоянии 10^{-3} м, равном расстоянию между катодом и анодом, концентрация окажется равной $n \approx 10^{19}$ м$^{-3}$, а радиус Дебая составит $\sim 2\cdot 10^{-5}$ м [35], что оказывается величиной много меньшей размеров плазменного факела.

В предположении, что ионы в плазме факела имеют небольшие зарядности порядка единицы и кулоновские столкновения электронов с ионами происходят в условиях максвелловского распределения электронов по скоростям, длину свободного пробега электронов можно оценить с помощью следующего выражения [36]:

$$l = \frac{4{,}5\cdot 10^{11}\cdot T^2}{n\cdot L_K}, \qquad (1)$$

где T — электронная температура в Кельвинах, n — электронная плотность в м$^{-3}$, $L_K \approx 15$ — кулоновский логарифм. Нетрудно убедиться, что на стадии искрового разряда, когда, по-видимому, есть основания приписать электронам температуру $\sim 5\cdot 10^4$ К, согласно выше приведенному выражению электроны в плазменном факеле окажутся незамагниченными, так как в пределах всего промежутка между катодом и анодом длина свободного пробега электронов окажется меньше или по крайней мере сравнима с их ларморовским радиусом. Ситуацию не меняет учет зарядности ионов, так как средняя длина пробега электронов обратно пропорциональна второй степени среднего заряда ионов.

В данных условиях процесс распространения катодного факела в направлении анода будет происходить, вероятно, со скоростью, близкой к ранее приведенной для факела алюминиевой плазмы в электрическом поле, и неограниченной присутствием магнитного поля. При температуре плазмы порядка 3÷5 эВ средняя тепловая скорость ионов оказывается $\sim 5\cdot 10^3$ м/с, что дает нижнюю границу скорости распространения плазменного факела. Таким образом время замыкания промежутка катод-анод составит величину порядка $5\cdot 10^{-8}$ с или несколько большую. Под действием магнитного поля будет происходить перемещение катодного пятна на стадии искрового разряда в направлении действия силы Ампера со скоростью $\sim 10^4$ м/с [32]. За время искровой стадии смещение катодного пятна составит порядка миллиметра.

С переходом к дуговой стадии разряда скорость перемещения катодного пятна упадет на два

порядка величины (направление движения катодного пятна в магнитном поле сменится на противоположное) [34], однако и продолжительность дуговой стадии $3 \cdot 10^{-5}$ с такова, что смещение окажется порядка нескольких миллиметров, что сравнимо с размерами катода. Кроме того, так как продолжительность цикла центров взрывной электронной эмиссии 10^{-8} с [29] много меньше времени развития искрового разряда в промежутке катод-анод, то под действием, например, излучения, испускаемого плазмой катодного факела и падающего на поверхность катода, возможно формирование новых катодных пятен в условиях сохраняющегося на промежутке катод-анод высокого напряжения. Этим, вероятно, объясняется наличие эрозии границы боковой цилиндрической и плоской торцевой поверхностей катода, где напряженность электрического поля имеет повышенную величину.

Заключение

Проведенное исследование показало, что использование магнитного поля, создаваемого в рабочем объеме малогабаритного вакуумного импульсного разрядника с помощью простых технических средств, продемонстрировало свою эффективность в качестве средства управления условиями протекания разряда. В однородном магнитном поле оказалось возможным подавить эффект локализации области протекания коммутируемого тока при многократном повторении рабочего цикла разрядника.

В результате, удалось добиться снижения степени воздействия на элементы системы поджига разрядника в расчете на единицу поверхности, что создает условия для увеличения ресурса и повышения стабильности его работы.

Литература

1. *Андреев А.А.* // ВАНТ. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2000. № 1. С. 63.
2. *Баренгольц С.А., Месяц В.Г., Шмелев Д.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 23. С. 91.
3. *Boxman R.L., Sanders D.M., Martin P.J., Eds.* Handbook of vacuum arc science and technology: fundamentals and applications. Park Ridge, N.J.: Noyes, 1995.
4. *Ульянов К.Н.* / Материалы XXXVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 9–13 февраля 2009, Звенигород, с.217.
5. *Цвентух М.М., Месяц Г.А., Баренгольц С.А.* / Материалы XL Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 11–15 февраля 2013, Звенигород, с.314.
6. *Алферов Д.Ф., Воздвиженский В.А., Сибиряк И.О.* // ЖТФ. 1990. № 4. С.202.
7. *Brown I.G.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1993. V. 21. No. 5. P. 537.
8. *Юшков Г.Ю., Бугаев А.С., Кринберг И.А., Окс Е.М.* // Доклады РАН. 2001. Т. 78. № 1. С.41.
9. *Горбунов С.П., Красов В.И., Кринберг И.А., Паперный В.Л.* // Прикладная физика. 2004. № 4. С. 83.
10. *Красов В.И., Кринберг И.А., Паперный В.Л., Коробкин Ю.В., Романов И.В.* // Прикладная физика. 2007. № 6. С. 88.
11. *Кринберг И.А.* // Прикладная физика. 2004. № 6. С. 77.
12. *Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Ю.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 5. С. 39.
13. *Кринберг И.А.* // ПЖТФ. 2003. Т. 29. № 12. С. 42.
14. *Кринберг И.А., Матафонов Г.К.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 4. С. 114.
15. *Алферов Д.Ф., Коробкова Н.И., Сидоров В.А.* // Прикладная физика. 1998. № 1. С. 67.
16. *Алферов Д.Ф., Иванов В.П., Сидоров В.А., Федоров В.В.* // Прикладная физика. 2001. № 4. С. 41.
17. *Алферов Д.Ф., Лукацкая И.А., Селикатова С.М., Сидоров В.А.* // Прикладная физика. 2001. № 4. С. 35.
18. *Костюк Г.И., Сысокв Ю.А.* Новые технологии и робототехнические комплексы в производстве авиационной техники / Сборник научных трудов национального аэрокосмического университета им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков, 1989, с. 27
19. *Аксенов И.И.* Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы.— Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005,
20. *Chaly A.M., Logatchev A.A., Zabello K., Shcolnik S.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. V..31. No. 5. P. 884.
21. *Бендер Е.Д., Кривенко А.С.* // Прикладная физика. 1999. № 5. С. 33.
22. *Алферов Д.Ф., Евсин Д.В., Лондер Я.И.* // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 29.
23. *Watanabe K., Kaneko E., Yanabu S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. No. 4. P. 609.
24. *Chaly A.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. V. 33. No. 5. P. 1497.
25. *Алферов Д.Ф., Лукацкая И.А., Селикатова С.М., Сидоров В.А.* // Прикладная физика. 2003. № 1. С. 71.
26. *Алферов Д.Ф.*, *Иванов В.П.*, *Сидоров В.А.* // ТВТ. 2006. т. 44. № 3. с.349.
27. *Алферов Д.Ф.*, *Ахметгареев М.Р.*, *Сидоров В.А.* // Успехи прикладной физики, 2013, том 1, № 2. с.154.
28.. *Бриш А.А., Дмитриев А.Б., Космарский Л.Н. и др.* // ПТЭ. 1958. № 5. С. 53.
29. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника.— М.: Наука. 2004.
30. *Kofoid M.J.*// Power Apparatus and Systems. 1960. V. 6. P. 999.
31. *Пшеничный А.А., Якубов Р.Х.* / Вакуумная наука и техника. Материалы XVIII научно-технической конференции. Под ред. Д.В.Быкова. М.: МИЭМ.2011.с.153.
32. *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга.— М.: Наука. 2000.
33. *Раховский В.И.* Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука. 1970.
34. *Кобайн Дж., Эккер Г., Фаррелл Дж., Гринвуд А., Харрис Л.* Вакуумные дуги: Пер. с англ./ Под ред. Дж. Лафферти.— М.: Мир. 1982..
35.*Франк-Каменецкий Д.А.* Лекции по физике плазмы.— М.: Атомиздат. 1968.
36. *Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З.* Физика плазмы для физиков.— М.: Атомиздат, 1979.

Influence of an uniform magnetic field on the switching mode of a managed compact triggered vacuum gap

V. I. Asiunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov

All-Russian Research Institute of Automatics,
22 Susshchevskaya str., Moscow, 127055, Russia
E-mail: vniia@vniia.ru
Received March 31, 2014

The possibility of actuation process control of a compact triggered vacuum gap by an external uniform magnetic field was studied. The effect of localization suppression of the discharge region was discovered. A probable mechanism of a magnetic field influence on the course of the discharge under the spark and arc stages, leading to the observed effect, was suggested.

PACS: 52.80.— s, 52.80.Vp
Keywords: vacuum gap, magnetic field, spark, erosion of electrodes, arc.

References

1. A. A. Andreev, VANT. Series: Plasma Electronics and Accelerators, No. 1, 63 (2000).
2. S. A. Barengolts, V. G. Mesyats, and D. A. Shmelev, Tech. Phys. Lett. **36**, 91 (2010).
3. R. L. Boxman, D. M. Sanders, P. J. Martin, et al., *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology: Fundamentals and Applications* (Park Ridge, N.J.: Noyes, 1995).
4. K. O. Ul'yanov, in *Procedeengs of the XXXVI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics* (February 9–13, 2009, Zvenigorod), p. 217.
5. M. M. Tsventukh, G. A. Mesyats, and S. A. Barengolts, in *Procedeengs of the XL International Zvenigorod Conference on Plasma Physics* (February 11–15, 2013, Zvenigorod), p. 314.
6. D. F. Alferov, V. A. Vozdvizhensky, and I. O. Sibiryak, Tech. Phys., No. 4,.202 (1990).
7. I. G. Brown, IEEE Trans. Plasma Sci. **21**, 537 (1993).
8. G. Yu. Yushkov, A. S. Bugaev, I. A. Krinberg, et al., Docl. Phys. **378**. 41 (2001).
9. S. P. Gorbunov, V. I. Krasov, I. A. Krinberg, et al., Prikladnaya Fizika, No. 4, 83 (2004).
10. V. I. Krasov, I. A. Krinberg, V. L. Papernyi, et al., Prikladnaya Fizika, No. 6, 88 (2007).
11. I. A. Krinberg, Prikladnaya Fizika, No. 6, 77 (2004).
12. A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and G. Yu. Yushkov, Tech. Phys. **68,** 39 (1998).
13. I. A. Krinberg, Tech. Phys. Lett. **29**, 42 (2003).
14. I. A. Krinberg and G. K. Matafonov, Tech. Phys. **76**, 114 (2006).
15. D. F. Alferov, N. I. Korobkova, and V. A. Sidorov, Prikladnaya Fizika, No. 1 67 (1998).
16. D. F. Alferov, V. P. Ivanov, V. A. Sidorov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 4, 41 (2001).
17. D. F. Akferov, I. A. Lukatskaya, S. M. Selikatova, et al., Prikladnaya Fizika, No. 4, 35 (2001).
18. G. I. Kostyuk and Yu. A. Sysokv, Bull. Kharkov Aerospace University, 27 (1989).
19. I. I. Aksenov, Vacuum Arc in Erosion Plasma Sources (KhFTI, Kharkov, 2005) [in Russian].
20. A. M. Chaly, A. A. Logatchev, K. Zabello, et al., IEEE Trans. Plasma Sci., **31**, 884 (2003).
21. E. D. Bender and A. S. Krivchenko, Prikladnaya Fizika, No. 5, 33 (1999).
22. D. F. Alferov, D. V. Evsin, and Ya. I. Londer, Prikladnaya Fizika, No. 1, 29 (2006).
23. K. Watanabe, E. Kaneko, and S. Yanabu, IEEE Trans. Plasma Sci., **25**, 609 (1997).
24. A. M. Chaly, IEEE Trans. Plasma Sci., **33**, 1497 (2005).
25. D. F. Alferov, I. A. Lukatskaya, S. M. Selikatova, et al., Prikladnaya Fizika, No. 1, 71 (2003).
26. D. F. Alferov, V. I. Ivanov, and V. A. Sidorov, High Temp. **44**, 349 (2006).
27. D. F. Alferov, M. P. Akhmetgareev, and V. A. Sidorov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1,** 154 (2013).
28. A. A. Brish, A. B. Dmitriev, L. N. Kosmarskii, et al., Instrum. Exp. Tech., No. 5, 53 (1958).
29. G. A. Mesyats,.*Pulse Energetics and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
30. M. J. Kofoid, Power Apparatus and Systems **6,** 999 (1960).
31. A. A. Pshenichnyi and R. Kh. Yakubov, in *Proc. XVIII Conference on Vacuum Science and Engeeniring*. Ed. by D. V. Bykov (MIEM, Moscow, 2011) p. 153.
32. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharge: Breakdown, Spark, and Arc* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
33. V. I. Rakhovskii, *Basic Physics of Switching an Electric Current in Vacuum* (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
34. J. Cobain, G. Ecker, G. Farrall et al., *Vacuum Arcs. Theory and Application.* Ed. By J. M. Lafferty (A Wiley-Interscience Publication, New York — Toronto, 1980; Mir, Moscow, 1982).
35. D. A. Frank-Kamenetskii, *Lectures on Plasma Physics* (Atomizdat, Moscow, 1968) [in Russian].
36. L. A. Artsimovich and R. Z. Sagdeev, *Plasma Physics for Physicists* (Atomizdat, Moscow, 1979) [in Russian].