

**Коммутация высоковольтного вакуумного диода плазмой  
вспомогательного искрового разряда***С. Г. Давыдов, А. Н. Долгов, А. В. Корнеев, Р. Х. Якубов*

*При изучении вольт-амперных характеристик процесса коммутации высоковольтного вакуумного диода плазмой искрового разряда по поверхности диэлектрика обнаружены свидетельства эффективной ионизации остаточного газа излучением катодного пятна, сформированного во вспомогательном разряде. Приведены экспериментальные факты в пользу модели аномального ускорения ионов в вакуумном разряде на искровой стадии.*

*Ключевые слова:* искровой разряд, разряд по поверхности диэлектрика, вакуумный диод, катодное пятно.

*Ссылка:* Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В., Якубов Р. Х. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 19.

*Reference:* S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, and R. Kh. Yakubov, Prikl. Fiz., No. 4, 19 (2019).

**Введение**

Управляемые сильноточные вакуумные коммутаторы находят достаточно широкую область для своего применения в аппаратуре, предназначенной, например, для генерации потоков проникающего излучения, фоторегистрации быстропротекающих процессов.

В настоящей работе изучались некоторые аспекты процесса перехода межэлектродного промежутка «катод-анод» вакуумного диода в проводящее состояние при инжекции в него плазмы вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика. Основным методом исследования – снятие зависимостей тока и напряжения от времени как основного разряда в про-

межутке «катод-анод» вакуумного диода, так и вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика.

**Схема эксперимента**

Используемое в проведенных исследованиях электроразрядное устройство [1] представляет собой трехэлектродную коаксиальную отпаянную систему. Основные элементы электроразрядной системы: анод, катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод и плотно зажата между ними. Катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба – соосные цилиндры одного диаметра (5 мм).

Анод – полый соосный с ними цилиндр большего диаметра (внутренний диаметр – 7 мм). Толщина диэлектрической шайбы – 0,1–1 мм. Материал электродов – алюминиевый сплав. Материал шайбы – слюда. Разрядное устройство размещается в герметичной диэлектрической оболочке, откачанной до давления остаточного газа  $10^{-2}$ – $10^0$  Па и снабженной вакуумноплотными выводами-токовыми, позволяющими подключать электроразрядное устройство к внешним цепям. В описываемых экспериментах между диэлектриче-

---

Давыдов Сергей Геннадьевич, с.н.с.  
Долгов Александр Николаевич, в.н.с., д.ф.-м.н.  
Корнеев Андрей Владимирович, н.с.  
Якубов Рустам Халимович, нач. отдела, к.т.н.  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА им. Н. Л. Духова).  
Россия, 127055, Москва, ул. Суцёвская, 22.  
Тел. 8(499) 400-19-70 доб. 1302.  
E-mail: vniia4@vniia.ru

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2018 г.

---

© Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Корнеев А. В.,  
Якубов Р. Х., 2019

ской шайбой и прилегающими электродами дополнительно и соосно с ними размещались металлические прокладки, каждая толщиной 0,1 мм. Между диэлектрической шайбой и катодом – одна прокладка коваровая и вторая титановая, между диэлектрической шайбой и поджигающим электродом – единственная коваровая прокладка. Как показали эксперименты, наличие указанных прокладок повышает стабильность срабатывания разрядного устройства [1].

Вакуумный диод выступает в роли коммутатора с переменным сопротивлением для RLC-контура, период собственных колебаний которого составляет 6 мкс. Катод диода заземлен, анод до начала коммутации находится под положительным потенциалом величиной до 3 кВ. Процесс коммутации стартует при подаче на поджигающий электрод положительного относительно катода импульса напряжения амплитудой до 4 кВ и скоростью нарастания  $(1-2) \times 10^9$  В/с. Происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы, и плазма, образованная продуктами эрозии, создает проводящую среду в промежутке катод-анод. Амплитуда тока поджига достигает 10 А. Амплитуда тока в промежутке «катод-анод» – до 100 А.

Измерения напряжения в промежутке «катод-поджигающий электрод» и «катод-анод» осуществлялись с помощью низкоиндуктивных омических и емкостных делителей. Сила тока в промежутке «катод-поджигающий электрод» определялась исходя из напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 10–20 Ом, включенном в цепь поджига. Сила тока в промежутке «катод-анод» определялась по сигналу с калиброванного пояса Роговского или по напряжению на низкоиндуктивном сопротивлении номиналом 1–3 Ом, включенном в коммутируемую цепь. Номинал используемых для измерений тока сопротивлений был существенно меньше омического и волнового сопротивлений контуров, в которые они были включены.

### Результаты эксперимента

При срабатывании системы поджига в ряде случаев наблюдается скачок положительного потенциала анода на 40–80 В (рис. 1).



Рис. 1. Осциллограмма. Развертка 10 нс/дел. Луч № 1 – напряжение на промежутке катод-анод, чувствительность – 200 В/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 2 А/дел.

Спад напряжения между катодом и анодом в процессе коммутации диода, как правило, сопровождается сильными колебаниями указанного напряжения, что отражено на рис. 2.

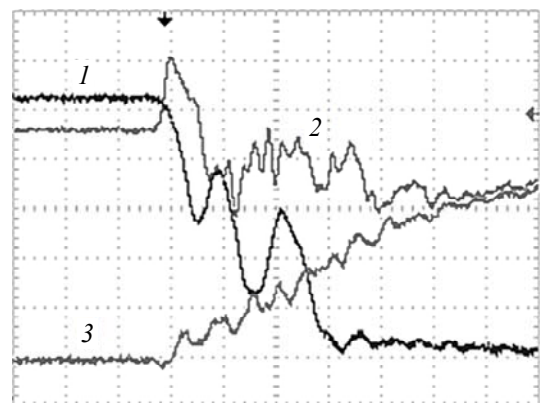


Рис. 2. Осциллограмма. Развертка 50 нс/дел. Луч № 1 – напряжение на промежутке катод-анод, чувствительность – 500 В/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 4 А/дел. Луч № 3 – ток разряда в промежутке катод-анод, чувствительность – 20 А/дел.

На переднем фронте импульса тока, возникающего в промежутке катод-анод в результате перехода межэлектродной среды в проводящее состояние, в течение первых 20–60 нс регистрируются одиночные и парные всплески тока, соответствующие протеканию тока как в «правильном», т. е. соответствующем приложенному к промежутку «катод-анод» электрическому полю, так и в «неправильном» направлении (рис. 3). Всплеск на переднем фронте импульса тока, соответствующий протеканию тока в «правильном»

направлении, если он регистрируется в самом начале импульса тока, отстает от начала протекания тока поджига примерно на 10 нс. Если же в начале импульса тока на осциллограмме регистрируется всплеск «неправильной» полярности, то он возникает практически одновременно с началом протекания тока поджига.

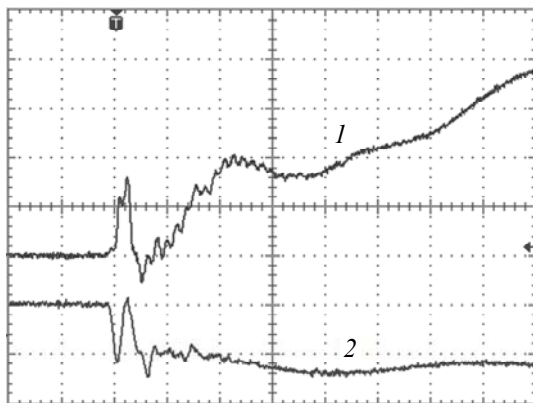


Рис. 3. Осциллограмма. Развертка 100 нс/дел. Луч № 1 – ток в промежутке катод-анод, чувствительность – 20 А/дел. Луч № 2 – ток поджига, чувствительность – 2 кВ/дел.

### Анализ наблюдаемых явлений

Регистрируемый ток поджига, судя по осциллограмме (рис. 3), является результатом развития искрового разряда. В центрах взрывной электронной эмиссии, образующих катодное пятно в процессе поджигающего разряда по поверхности диэлектрика, достигается плотность потока энергии на поверхности катода порядка  $10^9$  Дж/см<sup>2</sup> [2], и они, точнее, испускаемые ими плазменные факелы, должны являться яркими источниками ультрафиолетового излучения [3, 4]. Ультрафиолетовое излучение, в свою очередь, способно эффективно и практически без временной задержки выбивать фотоэлектроны с поверхности в нашем случае анода. В пространстве между анодом и поджигающим электродом в момент пробоя по поверхности диэлектрика имеется область, в которой электрическое поле не только не препятствует, а, напротив, способствует эмиссии фотоэлектронов с поверхности анода. Выход и удаление фотоэлектронов от анода вызывают наблюдаемый скачок положительного потенциала анода и регистрируются как импульс «неправильной» полярности на осциллограмме тока.

Ультрафиолетовое излучение, источником которого является плазма, образующаяся в центрах взрывной электронной эмиссии на стадии поджигающего разряда, должно ионизовать остаточный газ в объеме диода. Энергию этого излучения, исходя из оценки энергии, выделяющейся в разряде по поверхности диэлектрика с использованием осциллограмм напряжения и тока поджига, можно принять равной  $\sim 10^{-4}$  Дж. При энергии квантов  $\sim 10$  эВ получаем количество испускаемых в поджиге квантов на уровне  $N \sim 10^{14}$ . Сечение фотоионизации молекул азота и кислорода, составляющих подавляющую часть остаточного газа,  $\sigma_f \approx 10^{-17}$  см<sup>2</sup> [5]. Сильное ионизирующее воздействие с вероятностью, близкой к единице, следует ожидать при плотности потока фотонов [6]

$$N_f \geq 1 / \sigma_f \sim 10^{17} \text{ см}^{-2}. \quad (1)$$

Имеющуюся плотность потока фотонов оценим как

$$N / (2\pi\Delta R^2) \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}, \quad (2)$$

где  $\Delta R = 1$  мм – расстояние между катодом и анодом. Таким образом, можно ожидать примерно однопроцентной степени ионизации остаточного газа в промежутке «катод-анод» под действием излучения катодного пятна на стадии развития поджигающего разряда. В пользу именно этого механизма формирования проводящей среды в промежутке «катод-анод» на начальной стадии развития основного разряда в вакуумном диоде свидетельствует задержка длительностью  $\sim 10$  нс процесса формирования разряда в промежутке «катод-анод» относительно тока поджига [7].

Скорость электронов при концентрации носителей заряда  $n \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, т. е. при давлении остаточного газа на уровне 1 Па, может составить уже при токе 1 А порядка

$$v_{ed} \approx I / (2\pi R \Delta R n) \approx 3 \times 10^5 \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $R = 2,5$  мм – радиус катода; что явно будет превышать среднюю тепловую скорость ионов, а, следовательно, и ионно-звуковую

скорость в плазме. То, что данная проводящая среда является плазмой, доказывает соответствующая оценка радиуса Дебая

$$r_D \approx (\varepsilon_0 k T / (e^2 n))^{1/2} \approx 10^{-4} \text{ м} = 0,1 \text{ мм} \ll \Delta R, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная (в системе СИ);  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – электронная температура;  $e$  – заряд электрона. Тепловая скорость ионов при температуре 5 эВ, равной максимальной регистрируемой для электронов, составит  $v_i \approx 4 \times 10^3 \text{ м/с} \ll v_{ed}$ . Следствием данного обстоятельства станет раскачка колебаний электронной компоненты в плазме, аномальный рост сопротивления проводящей среды, формирование пучков убегающих электронов и амбиполярная диффузия плазмы в промежутке «катод-анод» [8]. Достаточно большая индуктивность разрядного контура может приводить к отсутствию значительных колебаний разрядного тока, но при этом происходят весьма значительные колебания напряжения в промежутке «катод-анод», вызванные колебаниями сопротивления плазмы разряда. Указанные процессы прекращаются после замыкания межэлектродного промежутка плотной плазмой, инжектируемой из катодного пятна. Скорость распространения плазмы в результате амбиполярной диффузии составляет  $\sim 10^4 \text{ м/с}$  [9], следовательно, время, необходимое для создания хорошо проводящей среды и перехода к дуговой стадии, составит  $\sim 10^{-7} \text{ с}$ .

Авторы [10] методами математического моделирования показали, что ускорение ионов на искровой стадии вакуумного разряда может происходить при наличии в межэлектродном промежутке плазменного облака. Развитие в этой плазме сильной электронной неустойчивости при прохождении катодного электронного пучка приведет к росту ее потенциала до значений, превышающих приложенную разность потенциалов. Следует ожидать, что появление аномально ускоренных ионов в межэлектродной плазме будет сопровождаться всплеском тока в диоде.

Наши наблюдения частично подтверждают указанные результаты математическо-

го моделирования. На рис. 3 мы можем увидеть на осциллограмме тока в промежутке «катод-анод» вначале сигнал «правильной» полярности, отвечающий приходу на анод пучка электронов, распространяющегося в плазме ионизованного ультрафиолетовым излучением остаточного газа. Даже при энергии всего 5 эВ им понадобится менее 1 нс, чтобы преодолеть расстояние между катодом и анодом. Затем через  $\sim 30 \text{ нс}$  после начала разряда появляется пик «неправильной» полярности, который вполне может отвечать ионам материала коваровой прокладки с энергиями  $10^2$ – $10^3 \text{ эВ}$ , если исходить из того, что указанное выше значение – это время пролета ионов в межэлектродном промежутке.

Далее, действительно, как и предсказывают результаты модельных расчетов, наблюдается некоторый всплеск тока в разряде. Удастся наблюдать подобные всплески, амплитуда которых кратно превышает амплитуду основного импульса тока в разряде.

## Заключение

При изучении с наносекундным временным разрешением вольт-амперных характеристик процесса коммутации высоковольтного вакуумного диода плазмой искрового разряда по поверхности диэлектрика обнаружены свидетельства эффективной ионизации остаточного газа излучением катодного пятна, сформированного во вспомогательном разряде. Характер регистрируемого сигнала на переднем фронте импульса тока в разряде в целом соответствует предсказаниям модели аномального ускорения ионов в вакуумном разряде на искровой стадии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козловская Т. И., Пшеничный А. А., Якубов Р. Х. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. 2015. Т. 38. Вып. 3. С. 49.
2. Mesyats G. A., Bochkarev M. B., Petrov A. A., Barenholtz S. A. // Applied Physics Letters. 2014. Vol. 104. No. 18. P. 4101.
3. Воробьев В. С. // УФН. 1993. Т. 123. № 12. С. 51.
4. Ананьин О. Б., Афанасьев Ю. В., Крохин О. Н. Лазерная плазма. Физика и применение: Монография. – М.: МИФИ, 2003. С. 400.

5. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. Физические величины: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 1232.

6. Арифов Т. У., Аскарьян Г. А., Тарасова Н. М. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8. Вып. 2. С. 128.

7. Аскарьян Г. А., Королев М. Г., Корчагина Е. Г., Якушкин К. Л. // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60. Вып. 1. С. 11.

8. Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы. – М.: Атомиздат, 1975.

9. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000.

10. Шмелев Д. Л., Месяц Г. А., Баренгольц С. А. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 33. № 10. С. 19.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Vp

## High-voltage vacuum diode switching process by means of plasma from accessory spark discharge

*S. G. Davydov, A. N. Dolgov, A. V. Korneev, and R. Kh. Yakubov*

All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow, Russia  
22 Sushevskaya st., Moscow, 127055, Russia  
E-mail: vniia4@vniia.ru.

*Received December 19, 2018*

***Evidence of effective residual gas ionization via cathode spot emission of accessory spark discharge has been obtained during research of vacuum diode switching current-voltage characteristics. Some experimental data confirm the abnormal ion acceleration model in vacuum discharge on spark phase.***

**Keywords:** spark discharge, dielectric surface, vacuum diode, cathode spot.

### REFERENCES

1. V. I. Asiunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, T. I. Kozlovskaya, A. A. Pshenichniy, and R. Kh. Yakubov, Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion **38** (3), 49 (2015).
2. G. A. Mesyats, M. B. Bochkarev, A. A. Petrov, and S. A. Barenholts, Appl. Phys. Lett. **104** (18), 4101 (2014).
3. V. S. Vorobiev, Phys. Usp. **123** (12), 51 (1993).
4. O. B. Ananyin, Yu. V. Afanasyev, and O. N. Krokhin, *Laser Plasma. Physics and Applications: Monography*, (MEPhI, Moscow, 1991) [in Russian].
5. A. P. Babichev, N. A. Babushkina, and A. M. Bratkovskiy, *Physical values: Handbook* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
6. T. U. Arifov, G. A. Askaryan, and N. M. Tarasova, Tech. Phys. Lett. **8** (2), 128 (1968).
7. G. A. Askaryan, M. G. Korolev, E. G. Korchagina, and K. L. Yakushkin, Tech. Phys. Lett. **60** (1), 11 (1994).
8. A. B. Mikhaylovskiy, *Plasma instability theory, Vol. 2. Instability of regular plasma* (Atomizdat, Moscow, 1975) [in Russian].
9. G. A. Mesyats, *Ectons in Vacuum Discharge* (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
10. D. L. Shmelev, G. A. Mesyats, and S. A. Barenholts, Tech. Phys. Lett. **33** (10), 19 (2007).