

04.1

Вольт-амперные характеристики начальной стадии дугового разряда в высоковольтном вакуумном диоде

© С.Г. Давыдов, А.Н. Долгов[¶], А.В. Корнеев, Р.Х. ЯкубовВсероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
Москва, Россия[¶] E-mail: alnikdolgov@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 марта 2019 г.

В окончательной редакции 22 марта 2019 г.

Принято к публикации 27 марта 2019 г.

В вакуумном диоде в облаке разреженной плазмы наблюдалось развитие электронной неустойчивости, а также прохождение катодного электронного пучка и пучка аномальных ионов с последующим всплеском тока на начальной стадии дугового разряда, что соответствует модели аномального ускорения ионов межэлектродной плазмы на искровой стадии вакуумного разряда.

Ключевые слова: искровой разряд, дуговой разряд, вакуумный диод, катодное пятно.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.12.47916.17799

Сегодня управляемые малогабаритные вакуумные коммутаторы применяются в каротажной аппаратуре, высокоскоростной фотографии, устройствах подсветки быстропротекающих процессов импульсами оптического и рентгеновского излучения, а также в ряде других областей, где определяющими требованиями являются отсутствие накальных цепей, миниатюрность, широкий диапазон коммутируемых токов, устойчивость к внешним воздействиям [1]. Цель настоящей работы — изучить начальную стадию процесса коммутации в высоковольтном вакуумном диоде путем регистрации с временным разрешением наносекундного диапазона вольт-амперных характеристик основного дугового и вспомогательного искрового разрядов.

Разрядное устройство, использованное в экспериментах, представляет собой трехэлектродную осесимметричную систему. Диаметр цилиндрических соосных катода, поджигающего электрода и диэлектрической шайбы, разделяющей катод и поджигающий электрод, составляет 5 мм. Электроды были выполнены из алюминиевого сплава, диэлектрическая шайба — из слюды. Коаксиальный анод в виде полого цилиндра имеет внутренний диаметр 7 мм. Толщина диэлектрической шайбы 0.1–1 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 [2]. Разрядное устройство размещается в герметичной диэлектрической оболочке, откачанной до давления остаточного газа 10^{-2} –1 Па и снабженной вакуумно-плотными выводами-тоководами, позволяющими подключать электроразрядное устройство к внешним цепям.

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 с амплитудой до 4 кВ и скоростью нарастания $(1-2) \cdot 10^9$ В/с. Происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы, и плазма, образованная продуктами эрозии, создает проводящую среду в промежутке катод–анод. Регистрируемая амплитуда тока в промежутке катод–анод составляет до 100 А. Измерения напряжения в промежутке катод–поджигающий электрод и катод–анод осуществлялись с помощью низкоиндуктивных омических и емкостных делителей. Сила тока определялась исходя из напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении, включенном в соответствующую цепь.

На переднем фронте импульса основного тока, возникающего в промежутке катод–анод в результате перехода межэлектродной среды в проводящее состояние, в течение первых 20–60 нс регистрируются всплески тока, отвечающие протеканию тока как в „правильном“, т. е. соответствующем приложенному к промежутку катод–анод электрическому полю, так и в „неправильном“ направлении. Если в начале импульса тока на осциллограмме регистрируется всплеск „неправильной“ полярности, то он возникает практически одновременно с началом протекания тока поджига (рис. 1, *a*). Всплеск на переднем фронте импульса тока, соответствующий протеканию тока в „правильном“ направлении, всегда отстает от начала протекания тока поджига примерно на 10 нс (рис. 1, *b*). Амплитуда всплеска „правильной“ полярности можеткратно превысить амплитуду основного импульса тока (рис. 2).

Регистрация напряжения в промежутке катод–анод позволяет по существу проследить изменения состояния

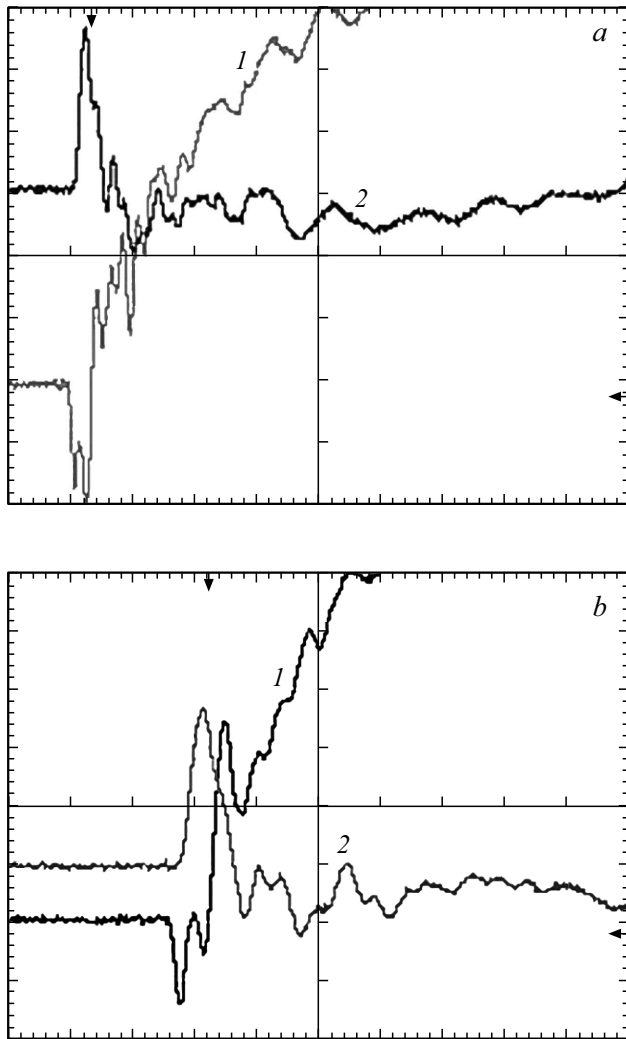


Рис. 1. Осциллограммы тока в промежутке катод–анод и тока поджига. Наблюдается всплеск на переднем фронте импульса тока в промежутке катод–анод, соответствующий протеканию тока в „неправильном“ (а) и „правильном“ (б) направлениях. Развертка 50 (а) и 25 ns/div (б). Луч 1 — ток в промежутке катод–анод, чувствительность 20 A/div, луч 2 — ток поджига, чувствительность 2 A/div.

проводимости среды в межэлектродном пространстве. Старт спада напряжения, свидетельствующий о начале процесса перехода среды из непроводящего в проводящее состояние, совпадает со стартом регистрируемого в диапазоне свыше 1 А тока поджига. Сила тока во вспомогательном разряде по поверхности диэлектрика позволяет считать, что мы имеем дело с искровым разрядом, а следовательно, мы наблюдаем процесс рождения и действия центров взрывной электронной эмиссии. Таким образом, процесс перехода среды из непроводящего в проводящее состояние происходит синхронно с процессом рождения и действия центров взрывной электронной эмиссии, по крайней мере с точностью до нескольких наносекунд.

На рис. 3 представлены измеренные синхронно осциллограммы тока и напряжения основного разряда в начальной его стадии. На переднем фронте импульса тока наблюдается пик тока в „правильном“ направлении, затем следует небольшой пичок „неправильной“ полярности и далее менее акцентированный всплеск тока в „правильном“ направлении с последующим относительно медленным возрастанием силы тока в разряде. Следует отметить, что в течение первых примерно 250 ps после старта регистрируемого тока, т.е. на стадии первых двух из указанных пиков („правильной“ и „неправильной“ полярности), происходят сильные колебания напряжения на межэлектродном промежутке.

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 J/cm^2 [3], и они, точнее, испускаемые ими плазменные факелы должны являться яркими источниками ультрафиолетового излучения [4,5]. 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, что приводит к перераспределению потенциала электрического поля в межэлектродном пространстве и индуцированию на поверхности катода положительного заряда. В результате фиксируется ток „неправильного“ направления или пик „неправильной“ полярности на осциллограмме.

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 $\sim 10^{-4} \text{ J}$. При энергии квантов $\sim 10 \text{ eV}$ получаем количество испускаемых в поджиге квантов на уровне $N \sim 10^{14}$. Сечение фотоионизации молекул азота и кислорода, составляющих подавляющую часть остаточного газа, $\sigma_f \approx 10^{-17} \text{ cm}^2$ [6]. Сильное ионизирующее воздействие с вероятностью, близкой к единице, следует ожидать при плотности потока фотонов [7]:

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

Имеющуюся плотность потока фотонов оценим как

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

где $\Delta R = 1 \text{ mm}$ — расстояние между катодом и анодом. Таким образом, можно ожидать примерно однопроцентной степени ионизации остаточного газа в промежутке

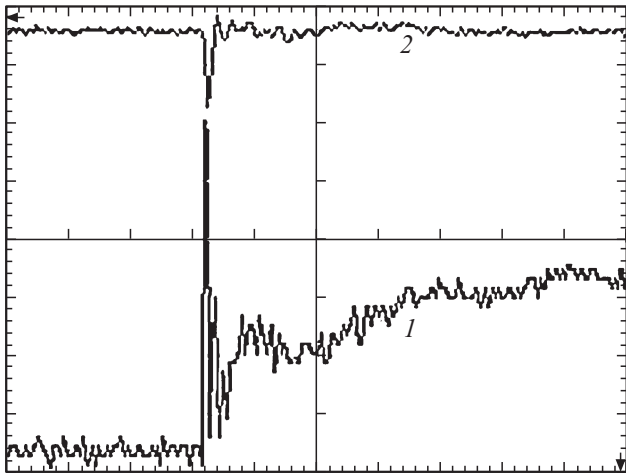


Рис. 2. Осциллограммы тока в промежутке катод-анод и тока поджига. Амплитуда всплеска „правильной“ полярности на переднем фронте импульса тока в промежутке катод-анод превышает амплитуду основного импульса тока примерно вдвое. Развертка 250 ns/div. Луч 1 — ток в промежутке катод-анод, чувствительность 10 A/div, луч 2 — ток поджига, чувствительность 5 A/div.

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 ~ 10 ns процесса формирования разряда в промежутке катод-анод относительно тока поджига [8].

Скорость токового дрейфа электронов при концентрации носителей заряда $n \approx 10^{18} \text{ m}^{-3}$, т.е. с учетом степени ионизации при давлении остаточного газа на уровне 1 Па, может составить уже при токе 1 А порядка

$$V_e \approx I / (2\pi R \Delta R e n) \approx 3 \cdot 10^5 \text{ m/s} \quad (3)$$

(где $R = 2.5 \text{ mm}$ — 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

$$r_D \approx (\epsilon_0 k T / (e^2 n))^{1/2} \approx 10^{-4} \text{ m} = 0.1 \text{ mm} \ll \Delta R, \quad (4)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, k — постоянная Больцмана, T — электронная температура, e — заряд электрона. Тепловая скорость ионов при температуре 5 eV, равной максимальной температуре, регистрируемой для электронов, составит $V_i \approx 4 \cdot 10^3 \text{ m/s} \ll V_e$. Следствием данного обстоятельства станут раскачка колебаний электронной компоненты в плазме, аномальный рост сопротивления проводящей среды, формирование пучков убегающих электронов и амбиполярная диффузия плазмы в промежутке катод-анод [9]. Достаточно

большая индуктивность разрядного контура приводит к тому, что значительные колебания разрядного тока могут отсутствовать, но при этом происходят довольно сильные колебания напряжения в промежутке катод-анод, вызванные колебаниями сопротивления плазмы разряда. Эти процессы прекращаются после замыкания межэлектродного промежутка плотной плазмой, инжектируемой из катодного пятна. Скорость распространения плазмы в результате амбиполярной диффузии составляет $\sim 10^4 \text{ m/s}$ [10]; следовательно, время, необходимое для создания хорошо проводящей среды и перехода к дуговой стадии, составит $\sim 10^{-7} \text{ s}$.

Авторы [11] 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 данные подтверждают результаты моделирования: мы наблюдаем признаки образования в межэлектродном промежутке плазменного облака в результате фотоионизации остаточного газа; регистрируем развитие сильной электронной неустойчивости; наблюдаем прохождение электронного пучка, распространяющегося от катода к аноду (пик „правильной“ полярности), и распространение пучка ионов в том же направлении (пичок „неправильной“ полярности); фиксируем на переднем фронте импульса тока всплески, амплитуда которых по крайней мере в 2 раза превышает амплитуду основной части импульса.

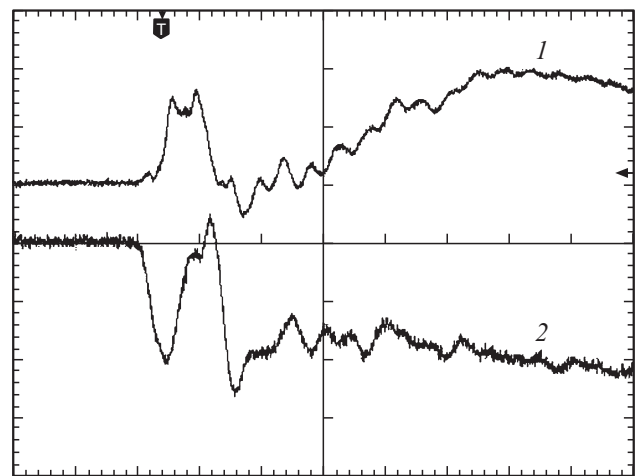


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на начальной стадии разряда в промежутке катод-анод. Развертка 40 ns/div. Луч 1 — ток в промежутке катод-анод, чувствительность 20 A/div, луч 2 — напряжение в промежутке катод-анод, чувствительность 2 kV/div.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [2] *Асюнин В.И., Давыдов С.Г., Долгов А.Н., Козловская Т.И., Пшеничный А.А., Якубов Р.Х.* // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.* 2015. Т. 38. В. 3. С. 49–52.
- [3] *Mesyats G.A., Vochkarev M.B., Petrov A.A., Varengolts S.A.* // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 104. N 18. P. 184101.
- [4] *Воробьев В.С.* // *УФН.* 1993. Т. 123. № 12. С. 51–83.
- [5] *Ананьин О.Б., Афанасьев Ю.В., Крохин О.Н.* *Лазерная плазма: физика и применение.* М.: МИФИ, 2003. 400 с.
- [6] *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М.* *Физические величины.* М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [7] *Арифов Т.У., Аскарьян Г.А., Тарасова Н.М.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1968. Т. 8. В. 3. С. 128–132.
- [8] *Аскарьян Г.А., Королев М.Г., Корчагина Е.Г., Якушкин К.Л.* // *Письма в ЖЭТФ.* 1994. Т. 60. В. 1. С. 11–15.
- [9] *Михайловский А.Б.* *Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы.* М.: Атомиздат, 1975. 272 с.
- [10] *Месяц Г.А.* *Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга.* М.: Наука, 2000. 424 с.
- [11] *Шмелев Д.Л., Месяц Г.А., Баренгольц С.А.* // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33. В. 10. С. 19–26.