

**ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ИНИЦИИРОВАНИЯ
НИЗКОВОЛЬТНОГО ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА ИЗЛУЧЕНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО
ДИАПАЗОНА**

**TIME RESPONSE CHARACTERISTICS OF PROCESS OF INITIATION OF THE
LOW-VOLTAGE VACUUM SPARK BY RADIATION OF OPTICAL BAND**

С.Г.Давыдов, А.Н.Долгов, А.А.Козлов, Р.Х.Якубов / sg.davydov@mail.ru

S.G.Davydov, A.N.Dolgov, A.A.Kozlov, R.Kh.Yakubov,

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова»
(ВНИИА), Москва

Исследован процесс коммутации низковольтного вакуумного диода под воздействием импульса излучения оптического диапазона. Продемонстрирован характер зависимости времени срабатывания от приложенного напряжения и давления остаточного газа. На основе полученных экспериментальных данных выдвинуто предположение о том, что первоначально зажигается тлеющий разряд, который в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости испытывает контракцию токового канала и переходит в дуговой.

Process of switching of the low-voltage vacuum-tube diode under the influence of the radiant pulse of optical band is investigated. The nature of dependence of response time on applied voltage and pressure of the residual gas is shown. On the basis of the obtained experimental data the assumption is made that the glow discharge being originally lit as a result of development ionization-overheating instability undergoes the contraction of current channel and passes into the arc discharge.

Ключевые слова: вакуумная искра, лазерная плазма, неустойчивость.

Keywords: vacuum spark, laser plasma, instability.

Вакуумная искра является одной из форм нестационарного электрического разряда, возникающей на финальной стадии процесса, называемого электрическим пробоем вакуумного промежутка. Широкое применение искровой разряд находит, например, как коммутирующий элемент в приборах импульсной техники [1]. Полученные при исследовании низкоиндуктивного вакуумного искрового разряда результаты указывают на возможность создания плазменного двигателя на основе искрового разряда для малых космических аппаратов, имеющих лучшие характеристики по сравнению со стационарной дугой [2].

Настоящая работа посвящена исследованию процесса коммутации короткого вакуумного промежутка под воздействием импульса излучения оптического диапазона в условиях низких напряжений, прикладываемых к промежутку.

Разрядное устройство, состоящее из двух коаксиальных кольцеобразных электродов внешним диаметром 10 мм и внутренним диаметром 4 мм, разделенных керамическим изолятором, помещалось в откачиваемую герметичную оболочку с оптически прозрачными стенками (рис. 1). Объем внутри оболочки откачивался до давления остаточных газов 10^{-2} – 10^0 Па. Катод – заземлен. Материал электродов – титан. Расстояние между электродами составляет 3 мм. За пределами межэлектродного промежутка на оси симметрии электродной системы располагается мишень из тугоплавкого материала – корунда. Мишень вынесена за пределы межэлектродного промежутка на расстояние 1 мм.

В качестве источника излучения использовался импульсный твердотельный лазер ЛТИ-60, работающий в режиме модулированной добротности и генерирующий импульс излучения с длиной волны 0,53 мкм энергией 5-10 мДж и длительностью 5 нс на полувывсоте импульса. Излучение лазера фокусировалось с помощью собирающей линзы, расположенной за пределами откачиваемой оболочки, на поверхности мишени сквозь стенку вакуумной камеры таким образом, что пучок излучения без потерь проходил на мишень сквозь отверстия в электродах. Интенсивность лазерного излучения задавалась диаметром пятна фокусировки. В экспериментах использовалась фокусирующая линза с фокусным расстоянием $F=50$ мм. При угловой расходимости лазерного пучка 4,5 мрад это теоретически позволяло получить пятно фокусировки диаметром 0,8 мм, что и было подтверждено экспериментально путем измерения следа пучка лазерного излучения на фотобумаге марки УНИБРОМ ГОСТ-10752-79. Измерение энергии лазерного импульса осуществлялось с помощью болометра ЗА-Р NOVA II, а временной профиль интенсивности излучения лазера регистрировался с помощью скоростного фотодатчика ФП-70А. Средняя по пятну фокусировки интенсивность падающего на поверхность мишени излучения составляла $(2-4) \cdot 10^8$ Вт/см².

Коммутируемая разрядным промежутком цепь состояла из последовательно включенных низкоиндуктивных конденсатора емкостью 2,2 мкФ и сопротивления 47 Ом. Конденсатор заряжался до напряжения 20 – 150 В. Одна из обкладок конденсатора – заземлена, вторая находится под положительным потенциалом и соединена с анодом разрядного устройства. Измерения силы тока, протекающего в указанной цепи в процессе разряда конденсатора, осуществлялись с помощью регистрации напряжения на сопротивлении в коммутируемой цепи.

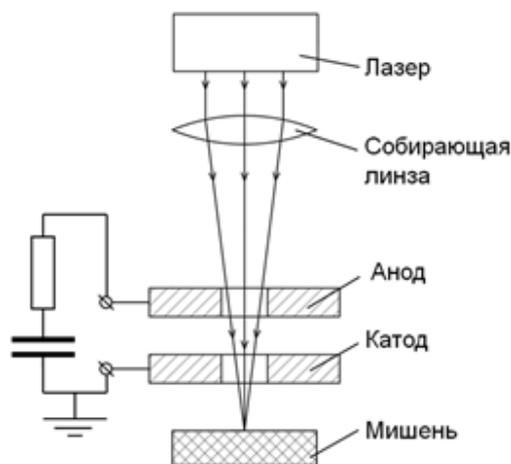


Рис.1. Схема эксперимента.

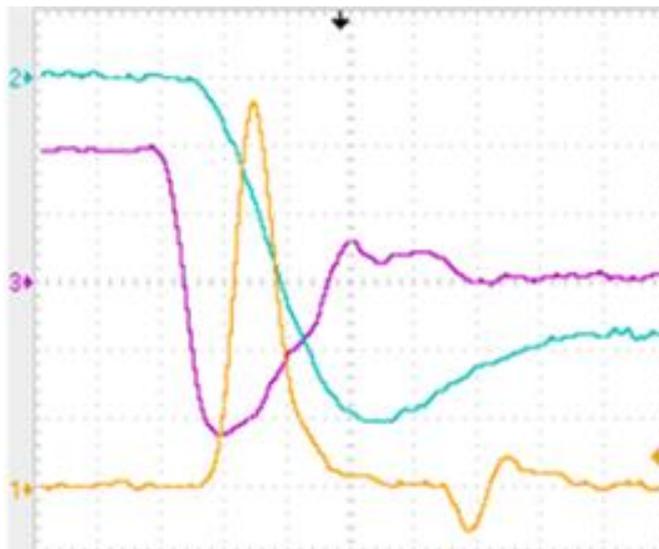


Рис.2. Осциллограммы сигнала со скоростного фотодатчика (луч №1 – интенсивность излучения в относительных единицах), тока в межэлектродном пространстве (луч №2 - 0,01 А/дел.) и напряжения на межэлектродном промежутке (луч №3 - 10 В/дел.). Развертка - 5 нс/дел. Давление остаточных газов - 10^{-1} - 10^0 Па. Величина зарядного напряжения на конденсаторе - 20 В.

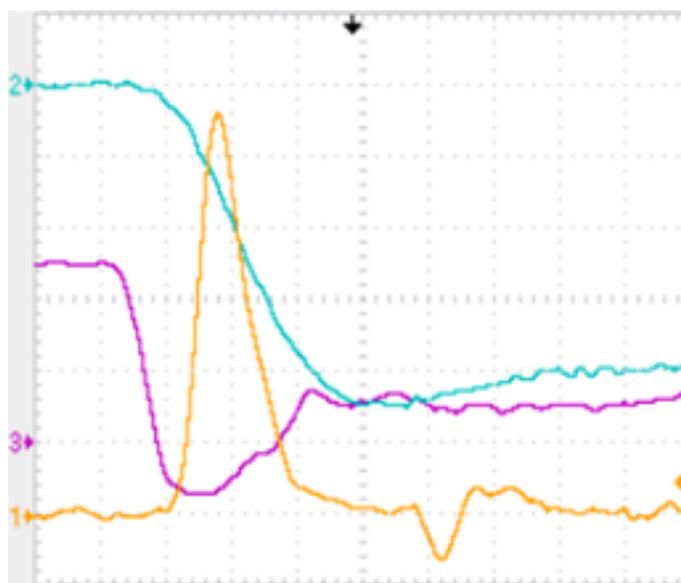


Рис.3. Осциллограммы сигнала со скоростного фотодатчика (луч №1 – интенсивность излучения в относительных единицах), тока в межэлектродном пространстве (луч №2 - 0,02 А/дел.) и напряжения на межэлектродном промежутке (луч №3 – 20 В/дел.). Развертка - 5 нс/дел. Давление остаточных газов: 10^{-1} - 10^0 Па. Величина зарядного напряжения на конденсаторе - 50 В.

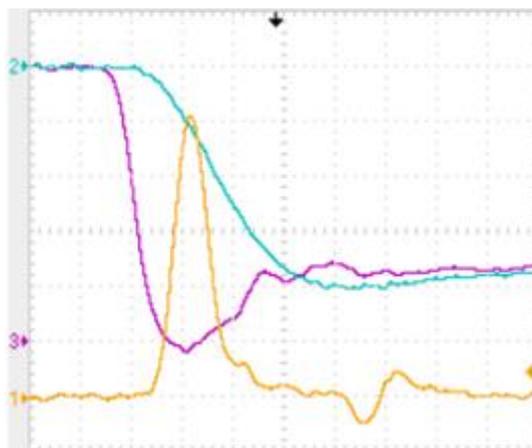


Рис.4. Оциллограммы сигнала со скоростного фотодатчика (луч №1 – интенсивность излучения в относительных единицах), тока в межэлектродном пространстве (луч №2 – 0,04 А/дел.) и напряжения на межэлектродном промежутке (луч №3 – 20 В/дел.). Развертка - 5 нс/дел. Давление остаточных газов: 10^{-1} - 10^0 Па. Величина зарядного напряжения на конденсаторе - 100 В.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что изменения зарядного напряжения на конденсаторе и давления остаточного газа в разрядном промежутке вызывают количественные и качественные изменения во временном профиле напряжения на межэлектродном промежутке и тока в межэлектродном пространстве в процессе протекания разряда. Если рассматривать первые примерно 50 нс после начала воздействия излучения на мишень, то можно отметить следующие особенности развития разряда. При величине зарядного напряжения в пределах ≤ 100 В время нарастания силы тока при коммутации межэлектродного промежутка остается практически неизменным.

Наиболее заметные изменения напряжения и силы тока происходят в течение времени воздействия излучения на мишень. Достижимая в разряде сила тока составляет величину $\leq 0,16$ А, что говорит о недостижении условий, необходимых для развития дугового разряда. При величине зарядного напряжения в пределах >100 В время нарастания силы тока при коммутации межэлектродного промежутка возрастает как с ростом зарядного напряжения, так и с уменьшением давления остаточных газов (рис. 2-6).

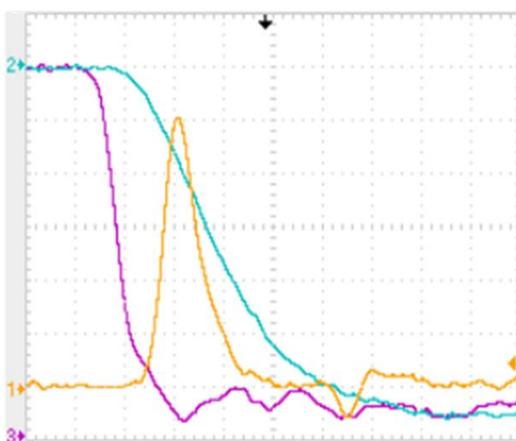


Рис.5. Оциллограммы сигнала со скоростного фотодатчика (луч №1 – интенсивность излучения в относительных единицах), тока в межэлектродном пространстве (луч №2 – 0,4 А/дел.) и напряжения на межэлектродном промежутке (луч №3 – 20 В/дел.). Развертка - 5 нс/дел. Давление остаточных газов: 10^{-1} -10 Па. Величина зарядного напряжения на конденсаторе - 140 В.

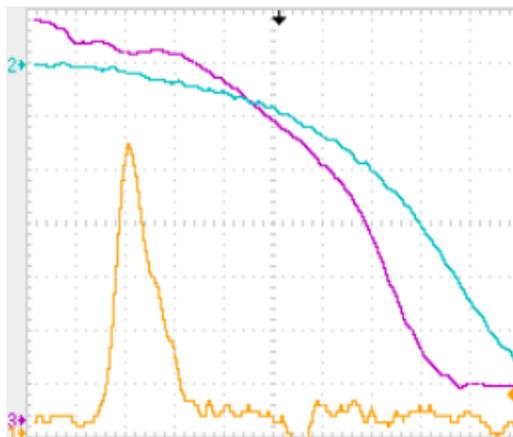


Рис.6. Оциллограммы сигнала со скоростного фотодатчика (луч №1 – интенсивность излучения в относительных единицах), тока в межэлектродном пространстве (луч №2 –0,4 А/дел.) и напряжения на межэлектродном промежутке (луч №3 –20 В/дел.). Развертка - 5 нс/дел. Давление остаточных газов - 10^{-2} Па. Величина зарядного напряжения на конденсаторе -150 В.

При вакууме 10^{-1} - 10^0 Па и зарядном напряжении коммутируемой цепи 20 В достигаемая в разряде сила тока составила 0,05 А. Далее с повышением напряжения, соответственно: 50 В - 0,09 А; 100 В - 0,16 А; 140 В - 2,6 А.

Выше указанные обстоятельства заставляют предположить, что при величине зарядного напряжения конденсатора ≤ 100 В в течении воздействия лазерного излучения на мишень разряд носит несамостоятельный характер, т.е. в нем рождение носителей заряда не обусловлено действием прикладываемого к межэлектродному промежутку электрического поля, а преобладающим является иной механизм. Кроме того, даже при условии включения механизма амбиполярной диффузии факелу лазерной плазмы, возникающей у поверхности мишени, потребуется $\sim 200 - 400$ нс для того, чтобы замкнуть межэлектродный промежуток, что значительно превышает наблюдаемое время нарастания тока.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что действует гораздо более быстрый механизм возникновения проводящей среды, причем его быстрое действие зависит от наличия остаточных газов в межэлектродном пространстве. Остается сделать заключение о том, что разряд на регистрируемом начальном этапе, длительностью примерно до 50 нс, происходит в проводящей среде, возникшей в результате ионизации остаточного газа под действием УФ излучения лазерной плазмы и потока убегающих из лазерной плазмы достаточно высокоэнергетичных электронов. Электроны с энергией $\sim 10 - 100$ эВ пробегут расстояние между электродами за время $\sim 1 - 3$ нс. В описываемых экспериментах поток убегающих электронов не наблюдался. Более того, отдельно выполненные авторами исследования корпускулярной эмиссии лазерной плазмы при указанной выше интенсивности излучения на мишени с использованием методики электростатического зонда не обнаружили убегания электронов в нормальном по отношению к поверхности мишени направлении. Во всяком случае, можно уверенно говорить о том, что продолжительность такого потока не превысит в данных условиях и 5 нс и, следовательно, носителями тока убегающие электроны быть не могут.

Учет рассеяния электронов на нейтралах с концентрацией, соответствующей условиям наших экспериментов, $n_0 \approx 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3} = 10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$ при сечении рассеяния порядка $\sigma \approx 10^{-19} \text{ м}^2$ [3] даст для длины свободного пробега электрона величину $\lambda_{e0} \approx 1/\sigma n_0 \approx 10^1 - 10^3 \text{ м}$. Оценка длины свободного пробега электронов в полностью ионизованном газе при условии, что концентрации ионов и электронов не слишком сильно отличаются, даст величину, определяемую кулоновскими столкновениями [4]: $\lambda_{ei} = 4,5 \cdot 10^{11} \cdot T_e^2 / (n_e \cdot \Lambda_K) \approx 10^1 - 10^1 \text{ м}$, где Λ_K

≈ 10 – кулоновский логарифм, электронная температура $T_e \approx 1$ эВ выражается в Кельвинах, а концентрация электронов в м^{-3} . Оценка электронной температуры несколько занижена по сравнению с результатами зондовых измерений для лазерной плазмы. Таким образом, даже те свободные электроны, которые возникнут вследствие ионизации остаточных газов, будут собраны на аноде примерно за 5 нс. Остается заключить, что в течении лазерного импульса, падающего на поверхность мишени, происходит ионизация остаточных газов УФ излучением лазерной плазмы, и именно таким образом создается начальная проводящая среда разряда.

Судя по регистрируемой на начальной стадии разряда силе тока, а при зарядном напряжении конденсатора, удовлетворяющем условию ≤ 100 В, и на более поздних стадиях разряда, разряд носит характер тлеющего или близкого к нему. При зарядных напряжениях, удовлетворяющих условию >100 В судя по величине достигаемой силы тока, по-видимому, происходит контракция токового канала в результате развития ионизационно – перегретой неустойчивости и возникают условия для его перехода в дуговой режим [5].

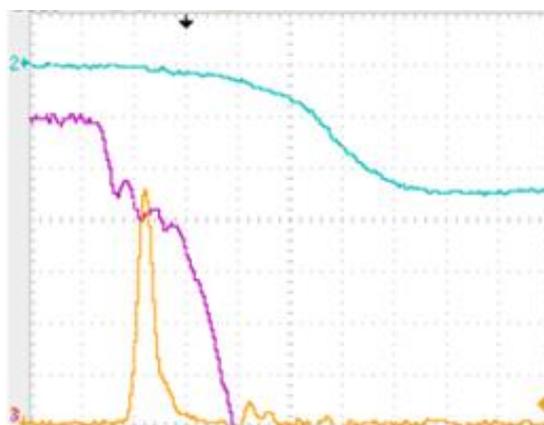


Рис.7. Осциллограммы сигнала со скоростного фотодатчика (луч №1 – интенсивность излучения в относительных единицах), тока в межэлектродном пространстве (луч №2 – 1 А/дел.) и напряжения на межэлектродном промежутке (луч №3 – 5 В/дел.). Развертка - 10 нс/дел. Давление остаточных газов – 10^{-2} Па. Величина зарядного напряжения на конденсаторе: – 150 В.

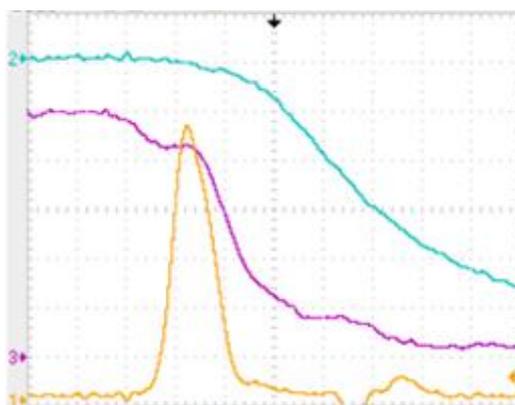


Рис.8. Осциллограммы сигнала со скоростного фотодатчика (луч №1 – интенсивность излучения в относительных единицах), тока в межэлектродном пространстве (луч №2 – 0,2 А/дел.) и напряжения на межэлектродном промежутке (луч №3 – 10 В/дел.). Развертка - 5 нс/дел. Давление остаточных газов – 10^{-2} Па. Величина зарядного напряжения на конденсаторе – 50 В. Материал катода (он же – мишень) – ковар.

В пользу данной версии развития разряда свидетельствуют следующие обстоятельства. На осциллограмме сигнала, показывающего на начальной стадии разряда временной ход напряжения на межэлектродном промежутке (рис.7), при давлении остаточных газов 10^{-2} Па, как правило, регистрируется ступенька – спад напряжения примерно на 10 В в течении 10 – 15 нс, сопровождающийся колебаниями. Вероятно, мы наблюдаем отражение процесса формирования анодного слоя с избыточным отрицательным зарядом [6]

То обстоятельство, что речь идет именно об анодном слое, подтверждается результатами специально выполненного эксперимента (рис.8), в котором катод имел форму диска, т.е. в электроде отсутствовало отверстие и, соответственно, он выполнял роль мишени для лазерного излучения. В этих условиях можно было бы ожидать в первую очередь формирования катодного слоя, но в условиях разряда типа тлеющего падение потенциала на катодном слое составило бы величину на порядок большую. Однако на осциллограмме напряжения на промежутке катод-анод, приведенной на рис.8, отчетливо прослеживается точно такая же ступенька, как и на рис.7.

Измерения, выполненные методом одиночного зонда Ленгмюра, дали для оценки температуры и концентрации частиц на начальной стадии рассматриваемого процесса (момент времени 5 нс после старта разряда) вполне разумные величины для разряда типа тлеющего $T_e \approx 3-4$ эВ и $n_e \approx 10^{10} \div 10^{11}$ см⁻³, соответственно. Таким образом выдвигаемая гипотеза о характере разряда и его динамике находит дополнительное подтверждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника – М.: Наука, 2004, - 704 с.
2. Горбунов С.П., Красов В.И., Паперный В.Л., Коробкин Ю.В., Романов И.В. // Прикладная физика. 2006. №6. с. 72.
3. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1970, -536 с.
4. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. -320 с.
5. Райзер Ю.П. // Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. -536 с.
6. Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахманов А.Т. // Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987. -160 с.