

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ ИСКРОВОГО И ДУГОВОГО РАЗРЯДОВ В ВАКУУМНОМ РАЗРЯДНИКЕ

А. А. Козлов

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В работе проводились измерения параметров искрового и дугового разрядов в макете вакуумного искрового разрядника. Наблюдалась анизотропия разлета плазмы и немонотонная зависимость задержки основного разряда в вакуумном разряднике от давления и расстояния между электродами. Обнаружено явление возникновения микроразрядов по поверхности диэлектрика, предшествующих пробоя, в узле поджига.

Введение

Цель настоящей работы – изучение физических процессов, протекающих в малогабаритных вакуумных искровых разрядниках, которые оказывают решающее влияние на ключевые параметры указанных приборов. К таким процессам можно отнести: развитие пробоя и искрового разряда по поверхности диэлектрика в вакууме, формирование дугового разряда в вакуумном промежутке, воздействие разряда на поверхность электродов и диэлектрика в узле поджига. В рамках поставленной цели решались следующие задачи. Во-первых, измерение электронной температуры и концентрации плазмы, эмитируемой из искрового разряда по поверхности диэлектрика в узле поджига разрядника в различных направлениях; оценить возможность использования в дальнейших экспериментах метода интерферометрии когерентного излучения импульсного источника для исследования динамики пространственной структуры плазмы разряда. Во-вторых, исследовать зависимость времени задержки основного разряда в макете разрядника с разделенным катодом от давления остаточных газов и расстояния от узла поджига до основного разрядного промежутка. В-третьих, осуществить скоростную фотосъемку разряда в макете разрядника с двойным катодом с целью изучения пространственной структуры разряда при различной полярности и величине потенциала анода разрядника.

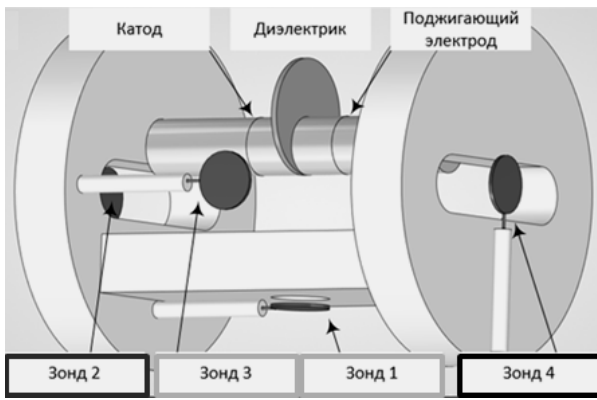
Зондовые измерения параметров плазмы искрового разряда

На начальном этапе исследований было решено экспериментально определить направленность в пространстве и провести оценку параметров потоков плазмы, генерируемой исключительно в узле поджига (рис. 1а). В пространстве вокруг узла поджига были размещены четыре плоских одиночных зонда Ленгмюра. Сигналы с зондов снимались при помощи осциллографа. Давление остаточного газа – 10^{-3} Па.

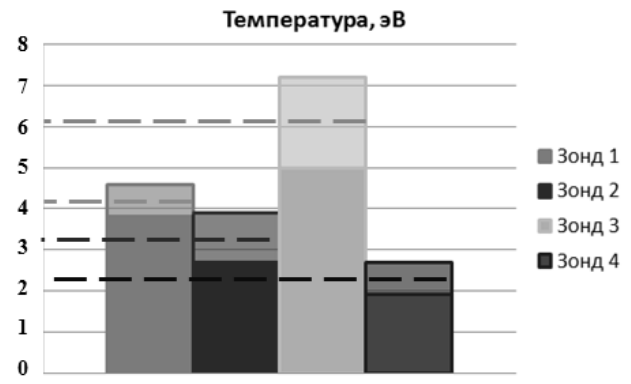
Анализ полученных результатов показал следующее. Наибольшая температура плазменного потока (рис. 1б) зафиксирована в направлении, касательном к поверхности диэлектрика и ортогональном оси симметрии разрядного устройства (зонд № 3). Как видно (рис. 1в,г), разлет плазмы искрового разряда по поверхности диэлектрика вдоль оси симметрии разрядного устройства происходит симметрично (зонды № 2 и 4) и не зависит от направления приложенного электрического поля, т. е. поток ускоренных полей заряженных частиц незначителен по сравнению с потоком частиц образующейся плазмы.

Что касается плазменных потоков, эмитируемых в плоскости, перпендикулярной оси симметрии, то разлет явно носит неизотропный характер: преимущественно заряженные частицы летят по нормали к поверхности диэлектрика (зонд № 1). Корпускулярный поток в направлении, близком к касательной к поверхности диэлектрика, заметно меньше (зонд № 3), в этом же направлении наблюдается максимальная температура плазмы.

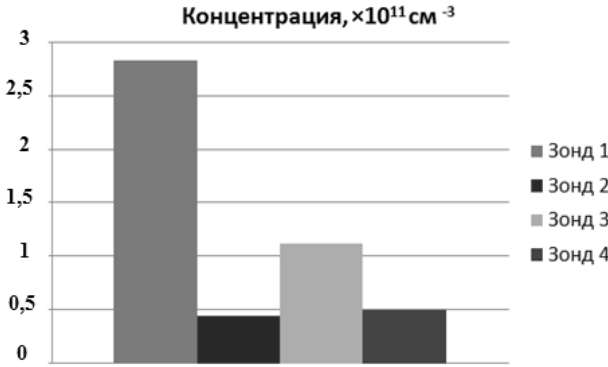
Исходя из того обстоятельства, что концентрация частиц в процессе разлета плазмы убывает обратно пропорционально квадрату расстояния [1], мы можем оценить, что при размере первоначального сгустка $\sim 0,1$ мм (характерный размер катодного пятна) концентрация электронов составит $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$, т. е. окажется достаточной для создания заметного набега фазы зондирующего излучения оптического



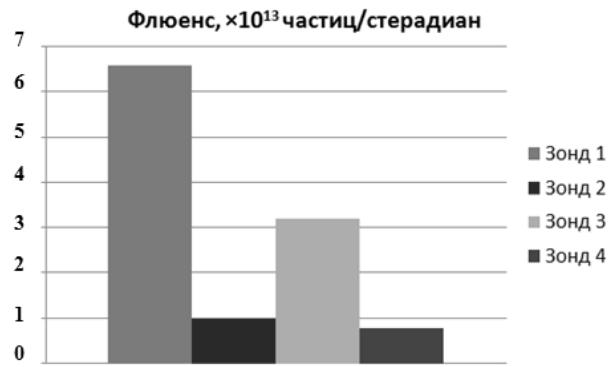
а



б



в



г

Рис. 1. Исследовательский макет и диаграммы распределения измеренных параметров: а – макет разрядного устройства с зондами Ленгмюра; б – диаграмма средней по времени температуры; в – диаграмма концентрации; г – диаграмма флюенсов электронов

диапазона. Таким образом, применение интерферометрии, планируемой в качестве метода визуализации для исследования таких объектов, как плазма катодного и анодного пятен [1], с использованием излучения импульсного лазера с наносекундной длительностью импульса может быть эффективным.

Изучение микроразрядов

В процессе зондовых исследований искрового разряда по поверхности диэлектрика при отрицательной полярности поджигающего импульса, было обнаружено явление, суть которого состоит в том, что зонд фиксировал поток электронов до возникновения искрового разряда (рис. 2). Синхронно с регистрацией предваряющего пробой потока электронов наблюдался резкий, но небольшой порядка 200 В, провал на фронте возрастающего потенциала поджигающего электрода, что свидетельствовало о развитии микроразряда по поверхности диэлектрика.

На рис. 2 представлена осциллограмма сигнала с зонда, фиксирующего микропробой, предшествующий основному разряду, верхний луч – сигнал с зонда, нижний луч – поджигающий импульс напряжения. Развертка: 100 нс/дел.

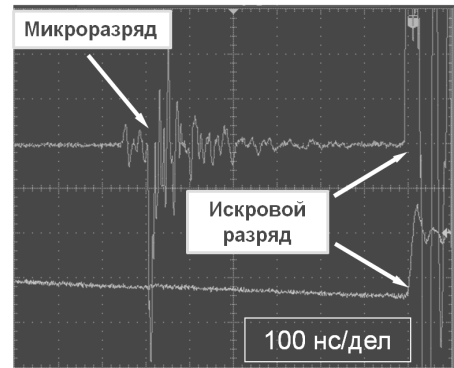


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с зонда

Используя полученные осциллограммы микроразрядов (рис. 2) и предположив, что разлет частиц микроразряда – изотропный в полусфере, можно рассчитать некоторые параметры микроразряда. Например, оценить энергию микроразряда $W_{\text{микро}}$, зная емкость конденсатора, образованного диэлектрической шайбой (с площадью $S = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ и толщиной $d = 10^{-4} \text{ м}$) и двумя электродами, а также напряжение U (2,5 кВ) в промежутке катод – поджигающий электрод на момент начала протекания микроразряда и падение напряжения ΔU (200 В), вызванное микроразрядом:

$$C_{\text{диэл}} \approx \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \approx 10^{-11} \text{ Ф.} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{микр}} &= \frac{C_{\text{диэл}} U^2}{2} - \frac{C_{\text{диэл}} (U - \Delta U)^2}{2} = \\ &= \frac{C_{\text{диэл}} U^2}{2} - \frac{C_{\text{диэл}} U^2}{2} + C_{\text{диэл}} U \cdot \Delta U - \frac{C_{\text{диэл}} \Delta U^2}{2} = \\ &= C_{\text{диэл}} U \cdot \Delta U = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.} \end{aligned} \quad (2)$$

Количество электронов, участвовавших в процессе переноса заряда с одной обкладки конденсатора емкостью $C_{\text{диэл}}$ на другую его обкладку, т. е. электрод:

$$N_{\text{ток}} \approx \frac{C_{\text{диэл}} \Delta U}{e} \approx 10^{10}, \quad (3)$$

где e – заряд электрона. Энергия, переносимая данными электронами между обкладками конденсатора, близка к энергии микроразряда $W_{\text{микр}}$:

$$N_{\text{ток}} U e \approx 4 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.} \quad (4)$$

Далее можно оценить энергию, по-видимому, необходимую для инициирования искрового пробоя по поверхности диэлектрика $W_{\text{пробоя}}$, когда происходит короткое замыкание емкости $C_{\text{диэл}}$:

$$W_{\text{пробоя}} = \frac{C_{\text{диэл}} U^2}{2} = 20 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.} \quad (5)$$

Как видно, энергия, необходимая для пробоя по поверхности диэлектрика, заметно больше энергии микроразряда, поэтому пробой и не происходил. Полную энергию, выделяющуюся в нашем случае в искровом разряде по поверхности диэлектрика, можно оценить как:

$$W_{\text{искр}} \approx I \langle U \rangle \Delta t_{\text{искр}} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ Дж,} \quad (6)$$

где I – максимальная сила тока в искровом разряде, $\langle U \rangle$ – среднее напряжение и $\Delta t_{\text{искр}}$ – продолжительность протекания основного импульса тока.

Количество электронов, эмитируемых микроразрядом $N_{\text{эл.микр}}$, можно оценить, предполагая их разлет изотропным в полусферу: исходя из количества электронов, попавших на зонд $N_{\text{эл.зонд}}$ (из осциллограммы рис. 186), и, зная расстояние от точки протекания разряда до зонда $l = 7$ см и радиус зонда $r = 1$ см:

$$N_{\text{эл.зонд}} \approx \frac{I_{\text{зонд}} \cdot \Delta t_{\text{зонд}}}{2e} \approx 10^{10}. \quad (7)$$

$$N_{\text{эл.микр}} = N_{\text{эл.зонд}} \frac{l^2}{\pi r^2} = 10^{12}. \quad (8)$$

где $I_{\text{зонд}}$ – максимальный ток электронов на зонд от микроразряда, $\Delta t_{\text{зонд}}$ – продолжительность импульса тока электронов на зонд (по основанию).

Расчитанные для микроразряда величины интересно сравнить с параметрами известного в физике вакуумного разряда объекта – эктона. Эктон – это элементарный центр взрывной эмиссии электронов, представление о котором лежит в основе теории искрового и дугового разряда в вакууме, предложенной Г. А. Месяцем. Согласно данным, приводимым Месяцем Г. А., энергия эктона, образующегося в результате электрического взрыва микроострия на поверхности металлического электрода, составит $W_{\text{эктона}} = (5 - 7) \cdot 10^{-7}$ Дж, а количество электронов,

испускаемых эктоном, $N_{\text{эл.электрона}} = 5 \cdot 10^{11}$ частиц. Следует отметить, что в своей расчетной модели автор не учитывал протекания некоторых физических процессов и потому энергия, необходимая для рождения эктона, занижена.

Действительно, если мы возьмем среднюю энергию испускаемых из микроразряда электронов из проведенных измерений электронной температуры (предположив, что в микроразряде достигается та же температура, что и в искре ~ 5 эВ) и умножим на общее число испущенных из микроразряда электронов, то получим величину $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ Дж, что близко к величине, приводимой Месяцем Г. А. Но, если мы добавим энергию, необходимую для образования плазмы, учтя, по крайней мере, ионизацию первоначально нейтральной среды, то уже получим величину $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Дж, что с учетом энергии, переносимой электронами между обкладками конденсатора емкостью $C_{\text{диэл}}$, существенно ближе к ранее полученной нами оценке энергии микроразряда.

Кстати, на осциллограммах сигнала с зонда импульсу тока, соответствующего приходу на зонд потока электронов, предшествует наводка продолжительностью $\tau_{\text{прол}} = 50$ нс. Если мы предположим, что наводка создается самим потоком электронов, распространяющимся в пространстве, то скорость регистрируемых электронов составит $1,4 \cdot 10^6$ м/с, а кинетическая энергия ~ 6 эВ, что свидетельствует в пользу выше приведенной оценки полной энергии испущенных из микроразряда электронов.

Количество эмитируемых электронов хорошо согласуется с величиной, приводимой Месяцем Г. А. Более того, если взять для сравнения еще один параметр – время жизни эктона $t_{\text{ж.эктона}} = 20$ нс, и сравнить его с регистрируемой продолжительностью потока электронов из микроразряда на зонд $t_{\text{сигн}} = (20 - 30)$ нс, можно заметить, что эти времена практически совпадают.

По всей видимости, нам удалось зафиксировать самопроизвольное рождение единичных эктонов.

Зависимость времени задержки от давления газа и расстояния от узла поджига

Важный параметр разрядника – время задержки между моментом подачи управляющего импульса напряжения на поджигающий электрод и началом протекания коммутируемого тока через разрядник (рис. 3а). Изменяя давление в вакуумной камере и расстояние между узлом поджига и основным разрядным промежутком, наблюдали, как изменяется при этом время задержки в разряднике с двойным катодом (рис. 3б).

По полученным в этих экспериментах данным, была построена зависимость (рис. 4) задержки возникновения дугового разряда от давления остаточных газов при различных расстояниях от узла поджига до основного разрядного промежутка (катод № 2 – анод). На графике (рис. 4) можно выделить два характерных набора точек: для расстояния 0,25 см

(задержка $\sim 0,1$ мкс) и для расстояния $\geq 0,4$ см (задержка ~ 1 мкс). Наблюдаемые задержки невозможно объяснить только движением плазмы из узла поджига (скорость плазмы $\sim 10^4$ м/с).

Возможным фактором, обуславливающим возникновение разряда в промежутке катод № 2 – анод, может являться эмиссия из искрового разряда в узле поджига излучения и электронов, которые ионизуют остаточный газ. На малых расстояниях плотность потока излучения и электронов (скорость $\sim 10^6$ м/с) велика и обеспечивает высокую степень ионизации и быстрое возникновение дугового разряда. С ростом расстояния плотность потока падает, первоначально возникает слаботочный разряд, например, объемный тлеющий, который со временем в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости претерпевает самопроизвольную контракцию, т. е. сжатие канала тока, и переходит в дуговой.

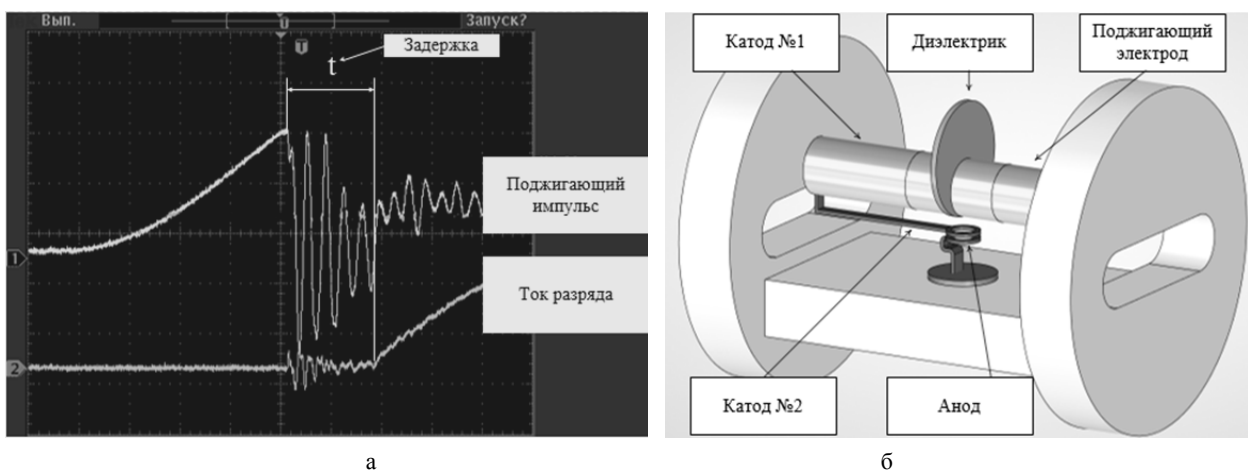


Рис. 3. Иллюстрация методики измерения и исследовательский макет: а – методика измерения временной задержки; б – макет разрядного устройства с двойным катодом

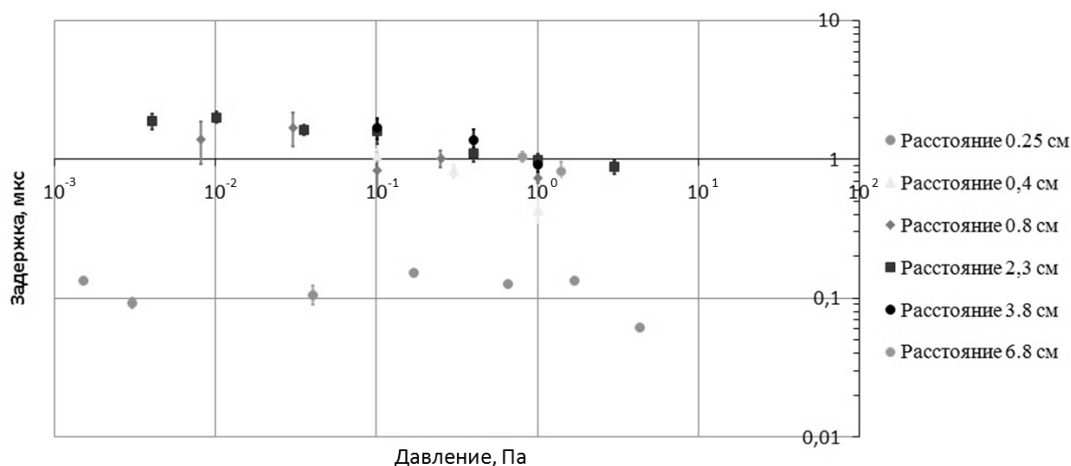
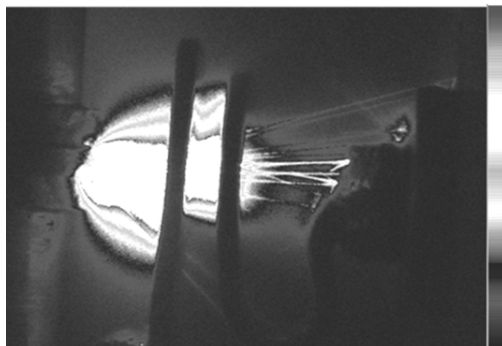


Рис. 4. Зависимость задержки возникновения дугового разряда от давления остаточных газов при различных расстояниях от узла поджига до основного разрядного промежутка (в логарифмическом масштабе)

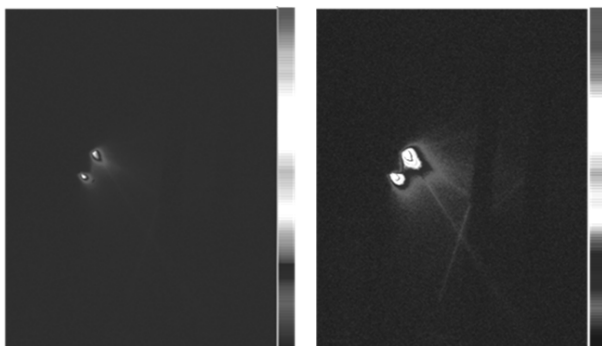
Скоростная фотосъемка разряда

Изучение пространственной структуры разряда было решено начать с фотосъемки при помощи фотокамеры с малой экспозицией.

Эксперименты проводились при давлении 10^{-4} мбар, с экспозицией 60 мкс, при разных полярностях потенциала, подаваемого на анод в системе с двойным катодом (рис. 3б). Оказалось, что факт зажигания разряда зависит от полярности прикладываемого к электродному промежутку напряжения. При отрицательной полярности «анода» разряд в основном разрядном промежутке загорался крайне редко (рис. 5б).



а



б

в

Рис. 5. Фотографии разряда при различной полярности потенциала анода: а – потенциал анода: +100 В; б – потенциал анода: –100 В; в – потенциал анода: –100 В, повышенный контраст изображения

В связи с этим, можно сделать вывод о том, что в развитии разряда основную роль играют потоки электронов, эмитируемые узлом поджига. По-видимому, при отрицательном потенциале анода электронам не удается попасть в основной разрядный промежуток и осуществить ионизацию остаточного газа. Следует отметить, что в некоторых случаях разряд все же загорается, по всей видимости, благо-

даря ионизирующему действию излучения инициирующего разряда.

В экспериментах был замечен разлет макрочастиц из узла поджига, причем направление их разлета зависит от полярности прикладываемого напряжения. По-видимому, они обладают отрицательным зарядом. Это можно объяснить тем, что, попадая в плазму разряда, любое проводящее тело приобретает отрицательный заряд из-за того, что подвижность электронов плазмы больше, чем подвижность ионов. В конце своего пути частицы испытывают столкновение с поверхностью анода, вследствие чего можно наблюдать эффект, напоминающий расщепление капли жидкости при столкновении с твердой поверхностью. В связи с этим можно сделать вывод о том, что макрочастицы – это капли жидкого металла катода № 1.

Заключение

1. Методом электростатического зонда Ленгмюра для плазмы искрового разряда по поверхности диэлектрика определены температура и концентрация плазмы, эмитируемой в различных направлениях. Показана перспективность использования интерферометрии для изучения динамики пространственной структуры катодного и анодного пятна.

2. Обнаружено явление возникновения микро-разрядов по поверхности диэлектрика в узле поджига, предшествующих пробое. На основе анализа результатов эксперимента сделан вывод о том, что зафиксировано самопроизвольное рождение единичных эктонов – элементарных центров взрывной электронной эмиссии.

3. Обнаружены свидетельства определяющей роли излучения и потоков электронов инициирующего разряда в формировании проводящей среды разряда в основном коммутируемом промежутке при давлениях остаточного газа $10^{-3} - 10^2$ Па.

4. Методом скоростной фотосъемки установлено присутствие в разряде заряженных макрочастиц – капель жидкого металла материала катода. Продемонстрирована определяющая роль потока электронов из инициирующего разряда в формировании проводящей среды разряда в основном коммутируемом промежутке при давлениях остаточного газа 10^{-2} Па.

Литература

1. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Мир, 2000. С. 424.