

ВЛИЯНИЕ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА РАБОТУ ПЛАЗМОЭРОЗИОННОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ

Е.Г. Крастелев, А.Г. Мозговой, М.Ю. Соловьев

Установлено, что протекание тока через плазмозерозионный размыкатель связано с образованием плотной катодной плазмы, а повторяемость ее геометрии влияет на воспроизводимость характеристик размыкателя.

Плазменные размыкатели (ПР) представляют собой быстродействующие сильноточные прерыватели тока. Действие их основано на изменении сопротивления плазмонаполненного промежутка в результате рассасывания (эрозии) плазмы протекающим через нее током [1, 2]. Эксперименты продемонстрировали работоспособность ПР в широком диапазоне токов наносекундной и микросекундной длительности. Они же выявили ряд недостатков, присущих ПР, в частности, невысокую воспроизводимость результатов. Как показывают приведенные ниже результаты экспериментального изучения, одна из причин этого связана с появлением в ПР плотной прикатодной плазмы. Она образуется на начальном этапе протекания тока через размыкатель и в дальнейшем служит эффективным эмиттером электронов, переносящих основную часть тока. В результате действующая геометрия ПР оказывается зависящей от размеров области катодной плазмы, а повторяемость результатов — от воспроизводимости ее параметров.

Эксперименты проводились на наносекундном сильноточном ускорителе в диапазоне напряжений 600 — 800 кВ и на испытательном стенде, в качестве источника тока в котором использовалась конденсаторная батарея емкостью от 0,1 до 1 мкФ, заряжаемая до 15 — 20 кВ. На ускорителе исследовалась работа коаксиального ПР, а на стенде — ПР как коаксиальной, так и плоской геометрии. Наиболее наглядно влияние катодной плазмы иллюстрируют результаты, полученные с плоским ПР.

Схема стенда показана на рис. 1. Он включает в себя малоиндуктивную конденсаторную батарею, управляемый разрядник, исследуемый ПР с подключенной к нему нагрузкой и источник направленного потока плазмы — коаксиальную пушку с пробоем по поверхности твердого диэлектрика.

Область ПР образована двумя расположенными в вакуумной камере ($P < 10^{-4}$ торр) электродами — катодом и анодом, отстоящими друг от друга на расстоянии 1 — 4 см. Плазма инжектируется в промежуток через окно в аноде сечением S от 5 до 40 см², закрытое сеткой из нержавеющей стали. Скорость фронта плазмы $V_p \cong 1,1 \cdot 10^7$ см/с. Параметры плазмы варьировались изменением расстояния от ПР до пушки (4 — 30 см) и изменением времени задержки между моментами срабатывания разрядников пушки и конденсаторной батареи. В качестве нагрузки цепи с ПР использовался либо вакуумный диод с острым катодом, либо твердотельный резистор сопротивлением 1 — 70 Ом.

В экспериментах регистрировались импульсы полного тока I_0 , тока нагрузки I_H , напряжения на размыкателе U . Появление катодной плазмы фиксировалось с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Длительность экспозиции 30 нс. Чувствительность системы была недостаточна для регистрации свечения инжектируемой редкой ($n_p \sim 10^{13}$ см⁻³) плазмы, но позволяла фиксировать появление более плотной катодной, а на поздних стадиях и анодной плазмы.

Эксперименты в различных режимах позволили выявить ряд общих закономерностей протекания тока через ПР. Весьма наглядно они проявляются при использовании в качестве нагрузки высокоомного диода, когда в течение всего времени $I_H \ll I_0$, а $I_{пр} \approx I_0$. Типичные осциллограммы импульсов тока и напряжения для такого режима показаны на рис. 2.

Характерной особенностью осциллограмм является наличие начальной стадии, в течение которой в цепи протекает сравнительно небольшой ток, а напряжение на размыкателе мало отличается от зарядного напряжения батареи. Свечение из промежутка не регистрируется. По порядку величины уровень тока

соответствует предельному току эмиссии ионов из инжектируемой плазмы $I_i \approx en_p V_p S$. Это указывает на отсутствие в течение этой стадии эффективной эмиссии электронов с катода.

К моменту времени t_1 на снимках появляется область яркого свечения вблизи катода. С этого момента ток нарастает со скоростью, которая соответствует колебательному процессу в короткозамкнутом LC контуре. Стадия проводимости продолжается до достижения током критического значения $I_{кр}$, соответствующего началу эрозии плазмы и увеличения сопротивления промежутка. После этого рост тока по сравнению с режимом короткого замыкания замедляется и одновременно начинается рост напряжения. Затем происходит резкий спад тока, в начале которого напряжение на ПР достигает максимума.

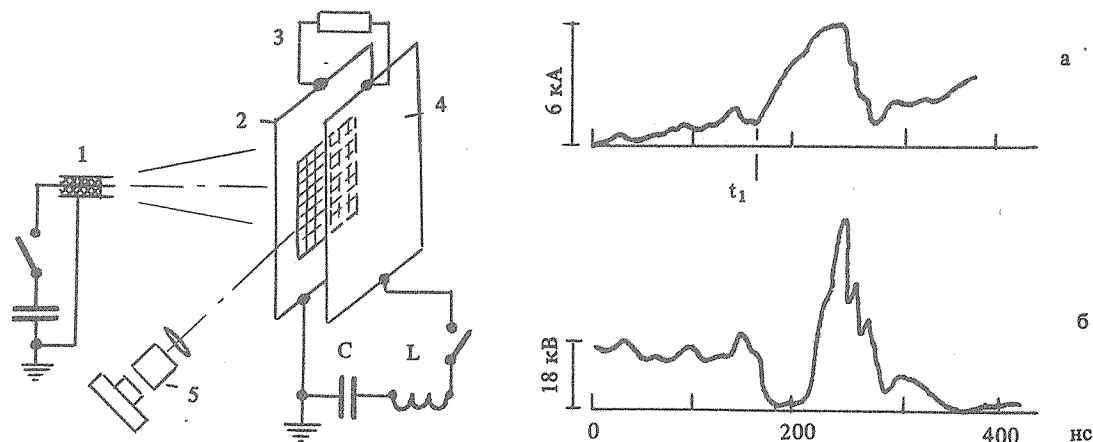


Рис. 1. Схема экспериментов с плоским ПР: 1 – плазменная пушка, 2 – анод с сеточным окном, 3 – нагрузка (вакуумный диод или набор резисторов), 4 – катодный электрод, 5 – ЭОП с фотокамерой.

Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока (а) и напряжения (б) на ПР для высокоомной диодной нагрузки. Задержка включения напряжения соответствует приходу фронта плазмы на катод, $C = 0,1$ мкФ, $U_0 = 17,5$ кВ.

При работе на диодную нагрузку наблюдается значительный разброс значений $I_{кр}$, который при больших размерах окна в аноде достигает 50%. На снимках в таком режиме видна явно выраженная неоднородность свечения плазмы по катоду, причем изменения $I_{кр}$ от импульса к импульсу качественно согласуются с изменениями размеров области свечения.

Картина существенно отличается при наличии на выходе ПР постоянно подключенной омической нагрузки. С уменьшением ее сопротивления резко уменьшается неоднородность свечения катодной плазмы и существенно уменьшается разброс $I_{кр}$. Отличие такого режима от рассмотренного выше состоит в том, что образование плазмы происходит в магнитном поле тока, протекающего по электродам ПР через нагрузку, сопротивление которой на начальной стадии оказывается много меньше сопротивления ПР. Характер изменения тока через ПР $I_{пр} = I_0 - I_H$ аналогичен показанному на рис. 2.

Длительность начальной стадии формирования катодной плазмы зависит от условий экспериментов. С увеличением напряжения, а также увеличением времени задержки между инжекцией плазмы и включением напряжения она быстро уменьшается. На осциллограммах, полученных в экспериментах на ускорителе ($U = 600 - 800$ кВ, $t_{дл} \cong 100$ нс), эта стадия в явном виде не выделена. Рост тока начинается практически сразу же с появлением напряжения. Однако и в этом случае он сопровождается появлением на снимках светящейся области катодной плазмы.

Наиболее вероятным механизмом образования катодной плазмы является взрывная эмиссия. Слабо меняющийся ток через размыкатель и сохраняющийся близким к зарядному уровню напряжения в течение первой стадии (рис. 2) указывают на квазистационарный процесс отбора ионов на катод из поступающей в промежуток плазмы. Толщину слоя прикатодного падения напряжения можно оценить из закона Чайльда – Ленгмюра. Оценки для водородной плазмы с $n_p = 10^{13}$ см⁻³ и $V_p = 10^7$ см/с при $U = 20$ кВ

дают значение $d \approx 1$ мм. Как показывают результаты исследования сильноточных диодов, соответствующая ему напряженность поля на катоде $E \sim U/d \approx 200$ кВ/см в условиях технического вакуума достаточна для инициирования взрывной эмиссии /3/. Появляющиеся в результате ионной бомбардировки вторичные электроны увеличивают суммарный ток через промежутки, но не экранируют поле у катода, поскольку коэффициент вторичной эмиссии в широком диапазоне энергий не превосходит нескольких единиц /4/ и электронный поток далек от насыщения.

Большую роль в образовании катодной плазмы могут играть адсорбированные на катоде вещества. Десорбция их под действием инжектируемой плазмы будет приводить к локальному увеличению давления и возможности возникновения газового разряда. На это указывает наблюдаемая зависимость толщины области свечения от времени задержки между инжекцией плазмы и началом напряжения. Неоднородность "загрязнений" катода проявляется в появлении при малых напряжениях на стенде вначале отдельных эмиттирующих пятен, которые действуют как ПР с малой площадью и соответственно малым уровнем $I_{кр}$. Этим можно объяснить характерные скачки тока, сопровождаемые скачками напряжения в течение первой стадии (рис. 2).

Неоднородность свечения плазмы уменьшается при наличии тока по электродам размыкателя. Аналогичная картина наблюдается в сильноточных диодах со взрывной эмиссией: введение магнитного поля, ориентированного параллельно поверхности катода, существенно улучшает однородность эмиссии за счет увеличения числа эмиссионных центров, причем основной рост их числа происходит в области малых значений напряженности магнитного поля /3/. Это указывает на возможность улучшения повторяемости характеристик ПР применением сравнительно небольшого магнитного поля, в частности, возбуждаемого током по электродам ПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mege R. A. et al. Appl. Phys. Lett., 42, 943 (1983).
2. Иваненков Г. В. Препринт ФИАН № 318, М., 1985.
3. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск, Наука, 1984.
4. Таблицы физических величин. Справочник. М., Атомиздат, 1976.

Поступила в редакцию 3 ноября 1987 г.