

резонансную систему с распределенным взаимопониманием электронного пучка и обратной волны. Стохастические колебания (рис. 2, область 3) и в этом случае возбуждаются вблизи границы синхронных колебаний (область 1) со всеми указанными выше особенностями, со стороны больших расстроек частот внешнего источника f' и автономной генерации f_0 при умеренных значениях мощности внешнего сигнала P , что качественно согласуется с результатами исследования простейшей модели колебательной системы с инерционной нелинейностью, находящейся во внешнем периодическом поле [4].

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А н и щ е н к о В.С. Стохастические колебания в радиофизических системах. Ч. 1. Саратов: СГУ. 1985. 180 с.
- [2] К а ц В.А. Механизмы возникновения хаоса в распределенном генераторе обратной волны. - В сб.: Некоторые вопросы современной физики. Часть 2, Саратов: СГУ. 1984. с. 28-33.
- [3] Е р м а к Г.П., Л у к и н К.А., Ш е с т о п а л о в В.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 5. С. 610-617.
- [4] Г а п о н о в А.В., Р а б и н о в и ч М.И., Ш а п и р о М.Ф. // Вестник МГУ. Физика. Астрономия. 1978. Т. 19. № 4. С. 125-136.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР, Харьков

Поступило в Редакцию
3 февраля 1989 г.
В окончательной редак-
ции 7 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 18 26 сентября 1989 г.
04; 12

ВЛИЯНИЕ АНОДНОГО ПЯТНА НА ПРЕРЫВАНИЕ ТОКА В ПЛАЗМЕННОМ ЭРОЗИОННОМ РАЗМЫКАТЕЛЕ

Е.В. К у м п я к, М.В. Н о в а к о в с к и й,
Ю.Ф. П о т а л и ц ы н, В.А. Р у д о в

В последнее время активно ведутся исследования плазменных эрозионных размыкателей тока (ПЭР), с которыми связана одна из перспектив развития мощной импульсной техники [1-3]. В основе действия ПЭР лежит образование прикатодного двойного слоя (ДС) в наполняющей вакуумный диод плазме, заранее созданной внешним источником [3, 4]. До настоящего времени остается неясным вопрос о физическом факторе, приводящем к началу прерывания тока в ПЭР. Знание этого фактора позволило бы управлять моментом прерывания, что очень важно для синхронизации ПЭР [2].

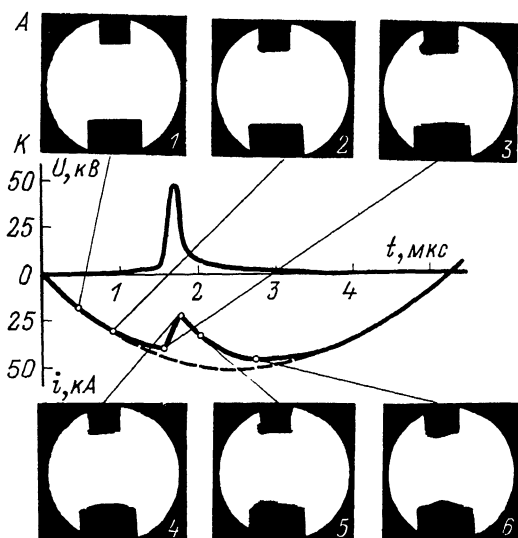


Рис. 1. Осциллограмма тока в основном контуре, напряжения на промежутке и теньевые фотографии разряда (белой чертой на фотографиях обведена граница электродов; пунктир на осциллограмме — форма тока на соответствующем участке при коротком замыкании).

В теоретических моделях ПЭР, например [3, 4], либо не учитываются совсем, либо считаются незначительными процессы в анодной области ПЭР. На основе экспериментов в [5] сделан вывод, что образование ДС не связано с электродными эффектами, а определяется лишь неоднородностью плазмы по длине. Однако в следующих работах [6, 7] авторы [5] установили, что пространственная неоднородность межэлектродного промежутка является причиной д в у х разнесенных во времени механизмов ограничения тока: прикатодного и межэлектродного, которые в основном и определяют динамику прямого разряда при низком давлении газа. В то же время в выводах [6] называют т р и места проявления механизма ограничения тока (катод, межэлектродное пространство, анод).

Разряд в ПЭР является одним из видов дугового разряда низкого давления [8]. Во многих работах по таким разрядам, например [9, 10], прерывание тока дуги связывали с явлениями в приэлектродных областях. По [10], наиболее вероятным механизмом колебаний тока является периодическое изменение анодного падения, связанное с функционированием анодного пятна (АП).

Целью настоящей работы было исследование с помощью лазерной теньевой фотографии динамики приэлектродных процессов и анализ их возможной связи с прерыванием тока в ПЭР.

Разрядный промежуток длиной 4,5 см образован плоским катодом ϕ 28 мм и полным цилиндрическим анодом — плазменной пушкой

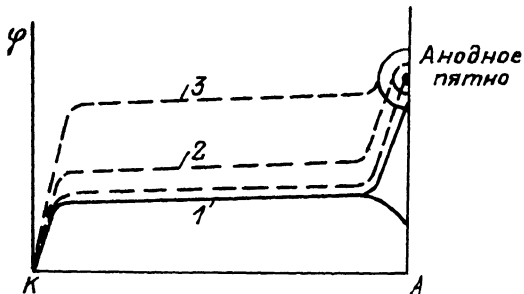
ϕ 16 мм. Ток пушки достигал максимума ~ 28 кА через ~ 3 мкс. Ток основного разряда включался с задержкой ~ 2.5 мкс относительно тока пушки и достигал максимума ~ 50 кА при полупериоде колебаний 5 мкс. Лазерная теневая диагностика [11, 16] позволяла получать 3 кадра с экспозицией 1 нс с интервалом между кадрами 4 нс.

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы основного разрядного тока, напряжения на промежутке и теневые фотографии для различных моментов времени. Видно (кадр 2), что за 0.5 мкс до начала прерывания тока на аноде появляется плотная плазма ($n_e \geq 10^{19}$ см $^{-3}$), которую мы отождествляем с анодным пятном (АП). Скорость расширения АП измерить не удалось из-за сложности увеличения интервала между кадрами более 10^{-8} с и из-за нестабильности АП. Оценки дают значение $\sim (10^5 - 10^6)$ см/с. Стадии появления и развития АП до момента прерывания соответствует небольшое уменьшение разрядного тока по сравнению с током короткого замыкания. Несмотря на значительную величину разрядного тока до появления АП (~ 30 кА) возможные электродные плазменные процессы на теневых фотографиях не фиксируются либо из-за недостаточного (10^{-4} м) пространственного разрешения, либо из-за низкой ($< 10^{19}$ см $^{-3}$) концентрации микроплазмы на электродах (кадр. 1).

Моменту начала срыва тока соответствует резкое увеличение объема плотной плазмы у поверхности катода (кадр 3). В процессе уменьшения разрядного тока (нарастания напряжения на промежутке) происходит рассасывание плазмы в межэлектродном пространстве и, соответственно, уменьшение плотности плазмы у поверхности электродов (кадры 4-6).

Полученные результаты позволяют предположить, что в исследованных условиях, достаточно типичных для ПЭР [1, 2, 12], инициирование прерывания тока связано с появлением АП. Такой вывод согласуется с результатами работ [9, 10] и соответствует представлениям о неустойчивостях анодного пятна в вакуумных дугах [8]. АП возникает при больших значениях положительного анодного падения потенциала, которое растет с увеличением разрядного тока от отрицательных значений при малом токе, переходит через нулевое значение, может приводить к появлению анодной светящейся пленки [9] при сравнительно небольших положительных значениях анодного падения (не вызывающих прерывание тока) [13] и, наконец, при большом ($\geq 10^2$ В) [9] положительном анодном падении возникает АП. Плазма АП нейтрализует отрицательный объемный заряд в прианодной области, резко увеличивает ее проводимость, благодаря чему происходит быстрое перераспределение напряжения на разрядном промежутке, что соответствует представлениям [10]. Практически все напряжение дуги оказывается приложенным к прикатодной области (проводимость положительного столба также достаточно высока), что регистрировалось в экспериментах [6, 14, 15]. Этот момент, вероятно, и является началом третьей, основной стадии [3] работы размыкателя - ускоренного роста ДС.

Рис. 2. Схематическое распределение потенциала φ вдоль промежутка катод К — анод А в разные моменты времени (цифры соответствуют номерам кадров рис. 1).



Появление АП снимает ограничение на рост тока в анодной области и вызывает необходимость соответствующей „подстройки“ проводимости положительного столба и эмиссионной способности катода. Эта „подстройка“ происходит благодаря резкому увеличению катодного падения, росту ДС, эрозии прикатодного конца положительного столба. Увеличение напряженности электрического поля в прикатодной области усиливает вервную электронную эмиссию, что и проявляется в совпадении моментов начала прерывания тока и резкого увеличения объема катодной плазмы. Проводимость положительного столба увеличивается за счет ускорения электронов в усиленном электрическом поле ДС [6].

При рассасывании анодной и катодной плазмы концентрация и проводимость положительного столба могут увеличиваться незначительно, что приведет к восстановлению близкого к исходному распределению напряжения вдоль промежутка с восстановлением положительного анодного падения и многократному повторению прерываний тока, связанных с колебаниями состояния анодной области (пятна) [10]. При значительном увеличении проводимости промежутка в результате рассасывания приэлектродной плазмы происходит необратимый переход разряда в стационарный режим протекания тока с низким падением напряжения на дуге.

При скорости расширения АП (10^5 – 10^6) см/с и времени развития АП $\sim 10^{-6}$ с оценка длины анодного слоя (1–10) мм — соответствует [8–10]. Поскольку возникновение АП связано с характеристиками материала и состоянием поверхности анода [8], прерывание должно зависеть от материала анода, что наблюдалось в [12].

В связи с изложенными данными вторая стадия [3, 4] (медленное нарастание импеданса ПЭР) может быть связана с появлением и продвижением АП в области анодного падения, что приводит к перераспределению напряжения на промежутке (рис. 2) и медленному росту ДС. После заполнения АП всей области анодного падения (кривая 3) практически все напряжение дуги оказывается в катодной области, и начинается третья, основная, стадия работы ПЭР.

Таким образом, в типичных условиях работы ПЭР начало прерывания тока и роста прикатодного ДС может быть обусловлено инерцией реакции (подстройки) катода и положительного столба дуги на снятие ограничения тока в анодной области в связи с образованием

АП. Вероятной причиной многократных прерываний (колебаний) тока является колебание состояния прианодной области (АП и анодного падения потенциала) в ходе рассасывания приэлектродной плазмы, приводящее к колебаниям распределения напряжения на разрядном промежутке, за которыми не успевает реакция катода и положительного столба.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К о в а л ь ч у к Б.М., М е с я ц Г.А. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 4. С. 857-859.
- [2] Г о л о в а н о в Ю.П., Д о л г а ч е в Г.И., З а к а - т о в Л.П., С к о р ю п и н В.А. - // Физика плазмы. 1988. Т. 14. В. 7. С. 880-885.
- [3] O t t i n g e r P.F., G o l d s t e i n S.A., M e g e r R.A. 33 J. Appl. Phys. 1984. V. 56. N 3. P. 774-784.
- [4] И в а н е н к о в Г.В. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. В. 6. С. 733-741.
- [5] Л у ц е н к о Е.И., С е р е д а Н.Д., К о н ц е в о й Л.М. // ЖТФ. 1975. Т. 45. В. 4. С. 789-796.
- [6] Л у ц е н к о Е.И., С е р е д а Н.Д., Д и м и т р о в а В.Д. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. В. 1. С. 151-164.
- [7] Л у ц е н к о Е.И., С е р е д а Н.Д., Ц е л у й к о А.Ф. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 7. С. 1299-1309.
- [8] Вакуумные дуги / Под. ред. Лафферти Дж. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 432 с.
- [9] К л я р ф е л ь д Б.Н., Н е р е т и н а Н.А., Д р у ж и - н и н а Н.П. // ЖТФ. 1972. Т. 42. В. 6. С. 1253-1264.
- [10] Г р а н о в с к и й В.Л., Б ы х о в с к а я Л.Н. // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. В. 9. С. 823-831.
- [11] К р е м н е в В.В., Н о в а к о в с к и й М.В., П о т а - л и ц ы н Ю.Ф. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. В. 10. С. 1285-1290.
- [12] А б д у л л и н Э.Н., Б а ж е н о в Г.П., Б а с т р и - к о в А.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. 1988. № 4. С. 112-113.
- [13] Д ю ж е в Г.А., Ш к о л ь н и к С.М., Ю р ь е в В.Г. // ЖТФ. 1978. Т. 48. В. 6. С. 1203-1212.
- [14] С у л а д з е К.В., Ц х а к а я Б.А., П л ю т т о А.А. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. № 6. С. 282-284.
- [15] Б е р г е р Н.К., К о й д а н В.С., П а п ы р и н А.Н. и др. // ЖЭТФ. 1969. Т. 56. В. 5. С. 1463-1479.
- [16] З а й д е л ь А.Н., О с т р о в с к а я Г.В. Лазерные ме-тоды исследования плазмы. Л.: Наука, 1977. 219 с.

Институт сильноточной электроники
СО АН СССР, Томск

Поступило в Редакцию
2 декабря 1988 г.
В окончательной редакции
6 июня 1989 г.