

УДК 533.9.07

## ПЛАЗМЕННЫЙ ПРЕРЫВАТЕЛЬ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БЫСТРЫХ РАЗРЯДОВ СО СКОРОСТЬЮ НАРАСТАНИЯ ТОКА ПОРЯДКА $10^{12}$ А/с

© 2011 г. П. С. Анциферов, Л. А. Дорохин, Ю. В. Сидельников

Институт спектроскопии РАН

Россия, 142190, Троицк Московской обл., ул. Физическая, 5

Поступила в редакцию 07.09.2010 г.

Описана конструкция плазменного прерывателя, способного создать разряд с током в несколько десятков килоампер и фронтом нарастания до  $10^{12}$  А/с через нагрузку с индуктивностью до 100 нГн. Приведены результаты тестов с имитатором нагрузки. Описанный разрядный контур предназначен для использования в экспериментах по генерации ударных волн в плазме.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов создания плотной горячей плазмы является кумуляция ударной волны, позволяющая получить плазменный объект, практически лишенный магнитогидродинамических неустойчивостей. Так, с помощью кумуляции цилиндрической ударной волны можно получить плазменный столб диаметром 0,3 мм длиной до 30 см, являющийся источником стимулированного излучения в вакуумной ультрафиолетовой области [1–3]. Другим примером является получение плазмы сферической формы [4, 5]. Для таких экспериментов, как правило, требуется электрический разрядный контур, способный обеспечить скорость нарастания тока в нагрузке  $\sim 10^{12}$  А/с. Индуктивный характер нагрузки требует приложения довольно высоких напряжений ( $10^5$  В при индуктивности 100 нГн). Прямое решение состоит в использовании генератора Маркса, как это было сделано в работах [1–3]. Альтернативным подходом является использование индуктивного накопителя с прерывателем тока, который фактически является “усилителем напряжения” [6].

Хотя основные принципы таких устройств изучены достаточно хорошо [7], в экспериментальной практике они используются редко. В настоящей статье описан вариант конструкции плазменного прерывателя и приведены результаты тестов с имитатором нагрузки.

### ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Общим принципом работы плазменного прерывателя является потеря проводимости разреженной плазмы при превышении некоторого критического значения тока через нее. Схематический чертеж устройства приведен на рис. 1.

Эффективная длина коаксиальной системы электродов, между которыми протекает начальный ток, составляет 150 мм. Внутренний электрод, катод, имеет диаметр 30 мм, внешний анод выполнен в виде “белчьего колеса” диаметром 70 мм, составленного из 20 спиц. Камера с электродами откачана до давления  $10^{-5}$  Торр. Основная емкость  $C_1$  (1,253 мкФ) заряжается до напряжения 35 кВ и коммутируется азотным разрядником  $P_1$ . Начальная плазма инжектируется в промежуток между электродами с помощью четырех плазменных пушек. Пушки соединены параллельно и включены в разрядную цепь, состоящую из конденсатора  $C_2$  (0,47 мкФ), заряженного до 15 кВ, и коммутирующего разрядника  $P_2$ . Задержка между моментом подачи напряжения на пушки и моментом коммутации разрядника  $P_1$  составляет 5–10 мкс и ее можно регулировать. Нагрузочная

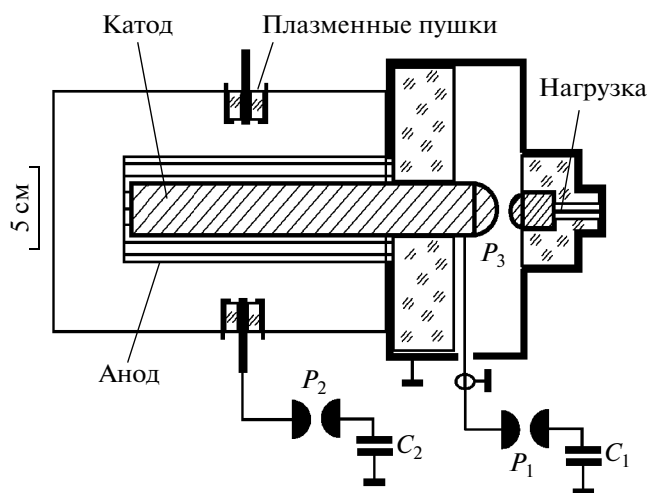


Рис. 1. Схематический чертеж плазменного прерывателя и разрядного контура.

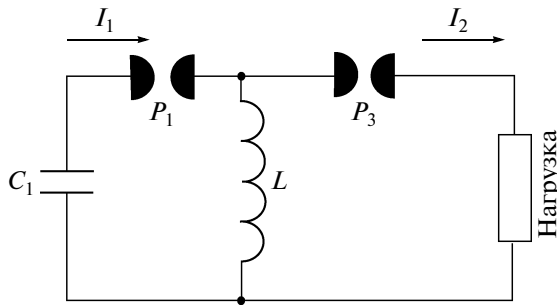


Рис. 2. Эквивалентная схема разрядного контура.

цепь отделена от основного разрядного контура воздушным разрядником  $P_3$ .

Эквивалентная электрическая схема установки приведена на рис. 2. Полный ток разряда  $I_1$  и ток в цепи нагрузки  $I_2$  регистрируют с помощью магнитных зондов. Осциллограммы этих токов, полученные с помощью осциллографа Tektronix 2024В, приведены на рис. 3. Накопление энергии происходит в конструктивной индуктивности  $L$  величиной 190 нГн.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Можно выделить три основные фазы развития разряда в описанной установке. Первая – подача высокого напряжения на плазменные пушки и инжекция плазмы в промежуток между коаксиальными электродами. Вторая – включение разрядника  $P_1$  с задержкой 5–10 мкс и развитие тока через инжектированную плазму между коаксиальными электродами. Третья – скачок сопротивления плазмы и переброс тока в нагрузочную цепь через разрядник  $P_3$ . Момент начала переброса тока в нагрузочную цепь определяется количеством начальной инжектированной плазмы.

В работе были исследованы параметры переброшенного тока в зависимости от времени задержки  $T$  этого момента относительно начала разряда по основной цепи (см. рис. 3). Нас интересовали значения скорости нарастания тока  $dI/dt$  и максимальное значение тока  $I_{max}$  через имитатор нагрузки. Скорость нарастания определялась по времени, за которое ток увеличивался от 0 до 20 кА. Результаты измерений величины  $dI/dt$  представлены на рис. 4. Разброс измеренных значений, по-видимому, связан с тем, что скачок сопротивления начальной плазмы является результатом развития неустойчивостей. Среднее значение  $dI/dt$  составило  $0.74 \cdot 10^{12}$  А/с. Интересным моментом явилось то обстоятельство, что среднее значение  $dI/dt$  не зависит от величины задержки  $T$  в диапазоне 300–600 нс. Зависимость величины  $I_{max}$  от  $T$  в

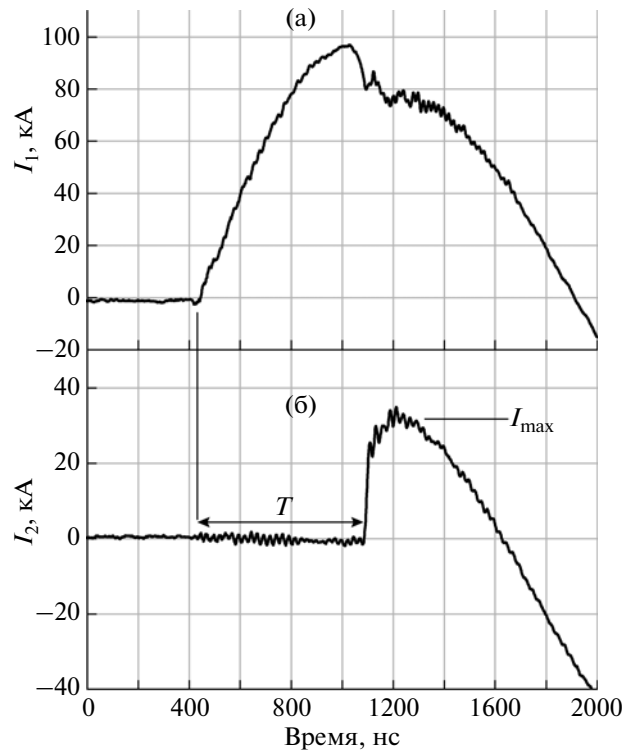


Рис. 3. Осциллограммы полного разрядного тока  $I_1$  (а) и тока в нагрузочной цепи  $I_2$  (б).

этом же диапазоне приведена на рис. 5. Видно, что увеличение  $T$  приводит к падению  $I_{max}$  от 80–90 до 30 кА.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что разработанный разрядный контур с плазменным

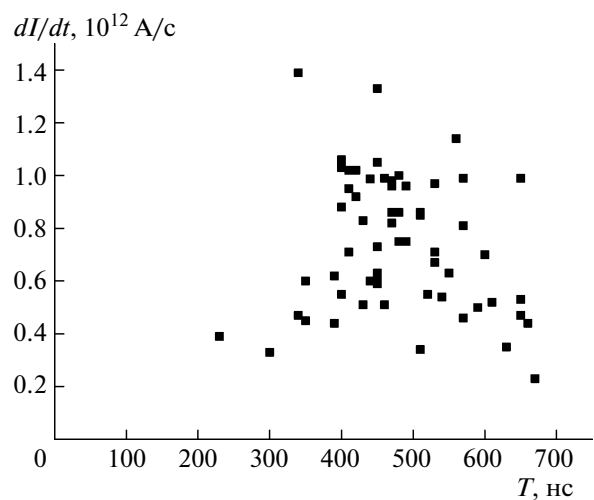


Рис. 4. Значения  $dI/dt$  в зависимости от времени задержки переброса  $T$ .

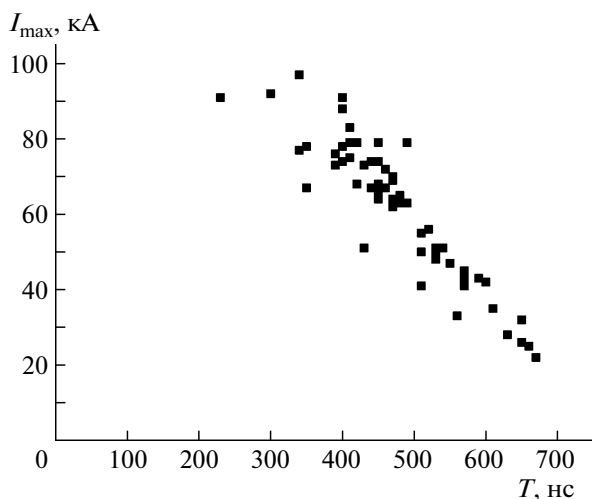


Рис. 5. Значения  $I_{\max}$  в зависимости от времени задержки переброса  $T$ .

прерывателем тока может быть использован для изучения плазменных ударных волн. Дальнейшее улучшение параметров тока нагрузки (фронта и максимума переброшенного тока) может быть до-

стигнуто при одновременном увеличении емкости  $C_1$  и количества инжектированной плазмы. Наличие разброса величины  $dI/dt$  не является принципиальным обстоятельством для лабораторных экспериментов, поскольку этот разброс может быть скомпенсирован набором достаточной статистики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rocca J.J., Clark D.P., Chila J.L.A., Shlyaptsev V.N. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. № 8. P. 1476.
2. Benware B.R., Macchietto C.D., Moreno C.H., Rocca J.J. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. № 26. P. 5804.
3. Macchietto C.D., Benware B.R., Rocca J.J. // Optics Letters. 1999. V. 24. № 16. P. 1115.
4. Antsiferov P.S., Dorokhin L.A., Sidelnikov Yu.V., Koshelev K.N. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. № 10. P. 103305.
5. Antsiferov P.S., Dorokhin L.A., Koshelev K.N. // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. № 10. P. 103306.
6. Bluhm H. Pulsed Power Systems. Principles and Applications. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 2006. P. 74.
7. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. С. 344–368.