

Краткие сообщения

04;07;12

Плазменный фокус как коммутатор тока для капиллярного разряда

© Э.Ю. Хаутиев¹, П.С. Анциферов², Л.А. Дорохин², К.Н. Кошелев², Ю.В. Сидельников²¹Сухумский физико-технический институт, Сухуми, Абхазия²Институт спектроскопии РАН, 142092 Троицк, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 30 декабря 1996 г.)

Описаны эксперименты, в которых плазменный фокус использовался одновременно как индуктивный накопитель и коммутатор тока. Полученные скорости нарастания тока на нагрузке с сопротивлением 0.01Ω составляют 10^{12} A/s , максимальные значения переброшенного тока лежат в области 50–100 кА. Методика представляется перспективной для реализации капиллярного разряда как источника лазерной среды для мягкой рентгеновской области.

Введение

Возросший интерес к исследованиям капиллярного разряда как возможного источника среды с инверсией на переходах в мягком рентгеновском диапазоне [1,2] стимулирует поиски новых вариантов его практической реализации. Хотя полная энергетика такого разряда может быть весьма небольшой (10–100 Дж), его осуществление тем не менее не является тривиальной задачей. Основная трудность связана с необходимостью обеспечить достаточно крутой фронт нарастания тока (10–100 кА за времена 10–100 нс), чтобы исключить влияние на разряд испаряющихся стенок капилляра.

Как известно, индуктивные накопители энергии, несмотря на гораздо большую по сравнению с емкостными удельную энергоемкость, не получили такого широкого применения, как последние, вследствие того, что для их коммутации на нагрузку требуется разрывать токовую цепь [3,4]. Ряд разработанных для этой цели устройств, таких как плазменные и взрывные размыкатели, сами по себе являются достаточно сложными устройствами и не всегда обеспечивают требуемые фронты тока на нагрузке. В настоящей работе сообщается об использовании весьма широко распространенного устройства — плазменного фокуса в роли одновременно индуктивного накопителя энергии и коммутатора ее на нагрузку.

Основная идея заключена в следующем: после отрыва токового слоя от изолятора и выхода его на ось разряда система электродов анод–катод плазменного фокуса представляет собой индуктивность с запасенной энергией W . Дальнейшее развитие разряда в определенных режимах приводит к возникновению сильного скачка активного сопротивления в пинчующемся плазменном столбе. Этот скачок вызывает перенапряжение, которое может перебросить часть энергии W в нагрузочную цепь, подключенную через разрядник параллельно це-

пи анод–катод плазменного фокуса за времена гораздо меньшие, чем время разряда в основном разрядном контуре.

Эксперимент

Общая схема экспериментального устройства показана на рис. 1. Она содержит две основные части: собственно плазменный фокус и узел нагрузки. Был использован плазменный фокус мейзеровского типа с диаметром внешнего электрода (катода) 70 мм, внутрен-

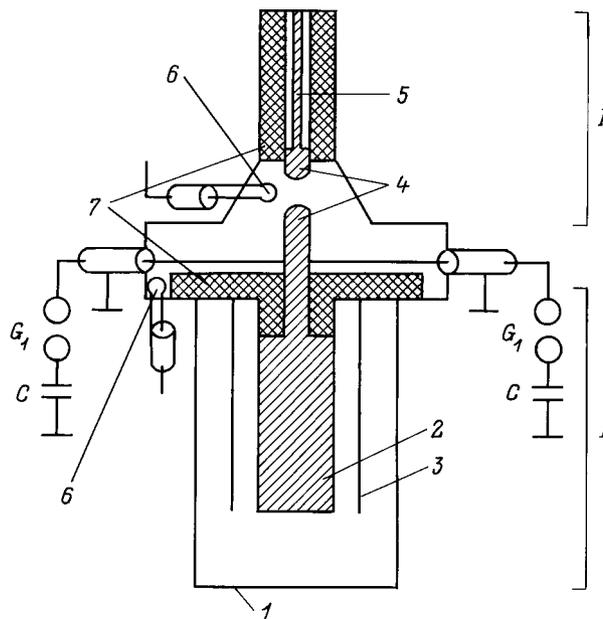


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: I — плазменный фокус, II — узел нагрузки; 1 — вакуумная камера, 2 — анод, 3 — катод, 4 — разрядник G_2 , 5 — нагрузка, 6 — магнитный зонд, 7 — изолятор.

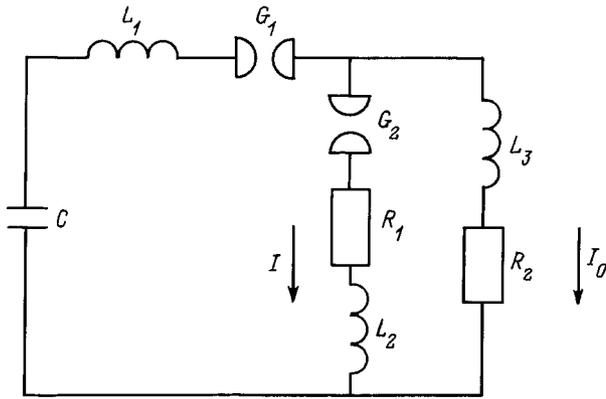


Рис. 2. Эквивалентная схема основного электрического контура.

него электрода (анода) — 26 mm и общей длиной коаксиальной электродной системы 110 mm. Фарфоровый изолятор имел длину 30 mm и диаметр 26 mm. Основная разрядная емкость C составляла $10 \mu\text{F}$, рабочее напряжение — 25 kV. Суммарная индуктивность разрядной цепи до вакуумной камеры (индуктивность основного конденсатора, системы подводящих кабелей и воздушного разрядника G_1) оценивается как $L_i = 0.11 \mu\text{H}$. Время первого полупериода равно $3.2 \mu\text{s}$. Максимальный ток в основной цепи (без подключения капилляра) составлял около 200 kA.

Процесс переключения тока исследовался с нагрузкой, представляющей собой тонкостенную трубку из нержавеющей стали внешним диаметром 4 mm, рабочей длиной 100 mm и сопротивлением $R_1 = 0.01 \Omega$. Конструктивно она расположена соосно с электродной системой плазменного фокуса и отделена от анода воздушным разрядным промежутком 10–13 mm (разрядник G_2 на рис. 1). Обратный токопровод нагрузки представляет собой цилиндр с внутренним диаметром 6 mm, изолированный по всей длине от нагрузочной трубки. Индуктивность нагрузочного узла вместе с разрядником G_2 оценивается как $L_2 = 0.03 \mu\text{H}$. Два индуктивных датчика позволяли регистрировать ток в цепях плазменного фокуса и нагрузки.

Эквивалентная электрическая схема, численная модель которой использовалась для анализа поведения системы, приведена на рис. 2. При моделировании полагалось, что полная индуктивность разрядной камеры L_3 плавно меняется вследствие движения токовой оболочки от $0.01 \mu\text{H}$ в начале разряда до $0.03 \mu\text{H}$ в конце первой четверти периода. Ключевым элементом модели является активное сопротивление разряда R_2 . Повышение этого сопротивления на определенной стадии пинчевания плазмы приводит к хорошо известному явлению — возникновению перенапряжений в разряде. Величина перенапряжений U составляет для установок, близких по параметрам к используемой нами, порядка

ста и выше киловольт. При токе около 200 kA это соответствует максимальному значению $R_2 \approx 0.5\text{--}1 \Omega$.

Разрядник G_2 пробивается в момент достижения перенапряжением определенной величины. С этого момента в нагрузочной цепи развивается ток, который направлен противоположно основному току. Скорость нарастания тока в нагрузочной (капиллярной) цепи равна скорости его уменьшения в основной цепи (L_2, R_2) плазменного фокуса. Производная этого тока может быть оценена из соотношения $dI/dt \approx U/(L_2 + L_3)$ и составляет для обсуждаемых параметров величину $\geq 10^{12} \text{ A/s}$. Полное значение переброшенного тока зависит также от времени существования высокого сопротивления R_2 . Для характерных времен порядка нескольких десятков наносекунд можно надеяться на полный ток в нагрузке (капилляре) от 50 до 100 kA. Точное решение электротехнических уравнений, описывающих эквивалентную схему на рис. 2, обсуждаются ниже. Как показывает сравнение с экспериментальными наблюдениями, эквивалентная схема хорошо описывает общий ход процесса переключения тока.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе было исследовано переключение разрядного тока на нагрузку с использованием в качестве рабочего газа водорода, гелия и неона с давлениями, обеспечивающими выход токовой оболочки на ось разряда в момент максимума разрядного тока. На рис. 3 приведены осциллограммы тока, текущего через разряд

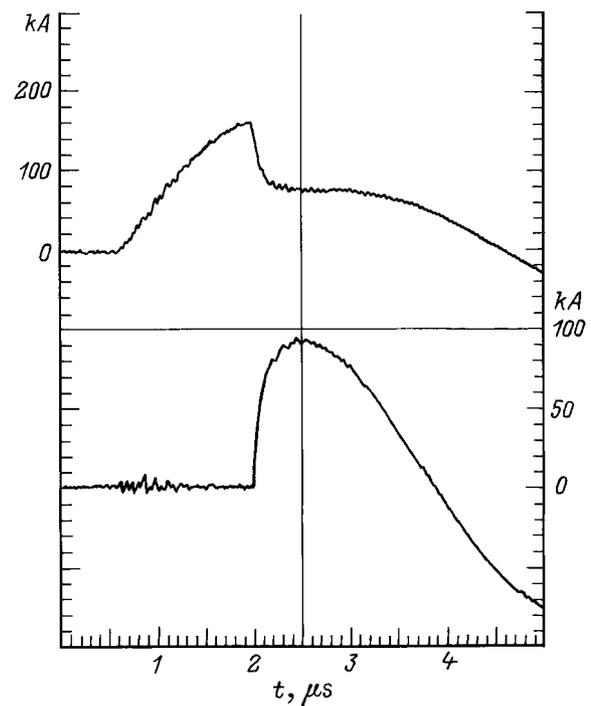


Рис. 3. Осциллограммы тока через плазменный фокус (верхний график) и через нагрузку (нижний график).

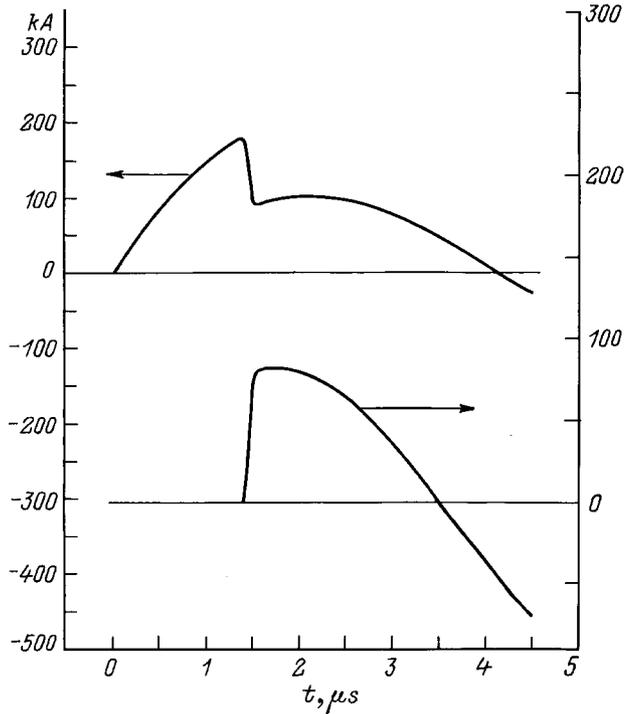


Рис. 4. Расчетные кривые тока через плазменный фокус (верхний график) и через нагрузку (нижний график).

и нагрузку для случая удачного переключения (10–20% от общего числа разрядов, см. ниже). Можно видеть, что за время порядка 50 ns на нагрузку удастся перебросить 50 кА, т.е. обеспечить скорость нарастания тока 10^{12} А/с.

Экспериментальные осциллограммы были проанализированы с помощью численной модели эквивалентной схемы (рис. 2). Результаты численных расчетов временных зависимостей соответствующих токов приведены на рис. 4.

В начальный момент времени емкость C заряжена до 25 кВ, все токи в цепях равны 0. В момент $t = 0$ происходит пробой основного разрядника G_1 и начинает развиваться ток через плазменный фокус. Время t_0 достижения максимального значения активного сопротивления R_2 выбиралось с помощью экспериментальных осциллограмм тока и соответствовало моменту начала переключения тока. Временной ход сопротивления R_2 задавался формулой

$$R_2 = R_0 \exp(-(t - t_0)^2 / \delta t^2). \quad (1)$$

Разрядник G_2 включался в момент достижения перенапряжения 30 кВ. Время развития разряда в воздушных разрядниках, как правило, не превышает 10 ns и в настоящих оценках не учитывается. Величины падения тока через разряд и соответственно скачка тока на нагрузку в основном зависят от произведения $R_0 \delta t$ (при условии $R_1 < R_0$), которое для наших экспериментальных данных описывается значением $\cong 0.02$ Ом \cdot μ s для величины скачка 50 кА. Последний факт можно понять, заметив,

что нарастание тока I в цепи R_1-L_2 определяется уравнением $dI/dt = (L_2 + L_3)^{-1} \cdot I_0 \cdot R_2(t)$, и если ток через плазменный фокус I_0 за время переброса меняется несильно (это предположение, вообще говоря, выполняется плохо, и поэтому обсуждаемая зависимость не является абсолютно строгой), то справедлива оценка

$$I(t) \cong I_0 \cdot (L_2 + L_3)^{-1} \int_0^t R_2(t) dt. \quad (2)$$

При этом величина интеграла всегда может быть оценена как произведение некоей характерной величины сопротивления на время процесса, т.е., как было уже отмечено, полная, величина переброшенного тока в этих условиях не зависит от деталей временного хода сопротивления R_2 . Имея в виду, что полное время переключения составляет величину порядка δt , можно сделать вывод, что среднее значение dI/dt на нагрузке будет определяться значением R_0 . Отметим, что детали фронта тока на экспериментальных осциллограммах указывают на временной ход этого сопротивления, более сложный, чем это заложено в формуле (1).

Разряд плазменного фокуса является, вообще говоря, плохо воспроизводимым физическим объектом, поэтому процесс переключения тока на нагрузку с его помощью также характеризуется некоей статистикой. На рис. 5 приведены результаты статистической обработки серии экспериментов (50 разрядов) с использованием в качестве рабочего газа в разряде плазменного фокуса He. В каждой экспериментальной осциллограмме было определено время, за которое ток через нагрузку достигает значения 20 кА. Показаны процентные распределения числа разрядов, в которых переброшенный на нагрузку ток достигает соответствующих значений за время от t до $t + \Delta t$ ($\Delta t = 20$ ns). Приведенная гистограмма дает представление о средних и предельных характеристиках фронта тока на нагрузке. Так, в 17% случаев от общего числа разрядов была получена скорость нарастания тока от $0.5 \cdot 10^{12}$ до $1 \cdot 10^{12}$ А/с. С точки зрения получения самых коротких фронтов представляется более предпо-

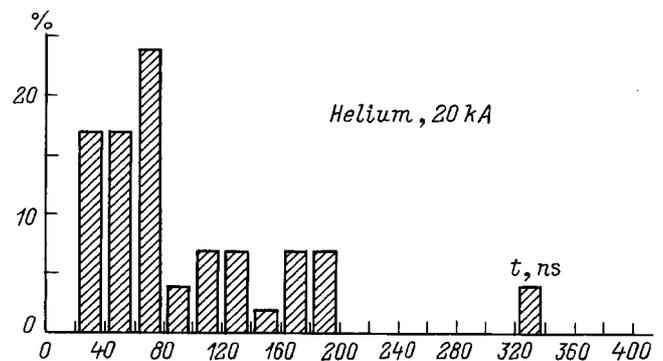


Рис. 5. Статистика времени нарастания тока на нагрузку до значений 20 кА при использовании гелия в качестве рабочего газа в плазменном фокусе.

чительным использование He и Ne, нежели H₂, в качестве рабочего газа. Давление рабочего газа не оказывает существенного влияния на процесс переключения тока, пока особенность разрядного тока через плазменный фокус остается в области его максимума (от первой до второй микросекунды). Отметим, что попыток оптимизации самого плазменного фокуса с точки зрения процесса переключения пока не предпринималось и, возможно, приведенная статистика может быть улучшена.

Настоящая работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (проект № 95-02-04495а).

Список литературы

- [1] *Steden C., Kunze H.-J.* // Phys. Lett. A. 1990. Vol. 151. P. 534.
- [2] *Rocca J.J., Cortazar O.D., Shapiro B. et al.* // Phys. Rev. E. 1993. Vol. 47. P. 1299.
- [3] *Месяц Г.А.* Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио. 1974.
- [4] *Ковальчук Б.М., Котов Ю.А., Месяц Г.А.* // ЖТФ. 1974. Т. 41. Вып. 1. С. 215.