

УДК 537.523.4

## ВНУТРЕННЯЯ МИКРОСТРУКТУРА ТОКОВЫХ КАНАЛОВ ПРОТЯЖЕННОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

М. А. Медведев, Е. В. Паркевич, А. В. Огинов, С. М. Захаров, И. С. Байдин

*В работе, с помощью методов лазерного зондирования, исследуются токовые каналы, формирующиеся в протяженном искровом разряде в воздухе при атмосферном давлении. Диагностика включает в себя лазерную интерферометрию, теневое и шлирен-фотографирование. Обнаружено, что в исследуемом разряде формируется тонкий (диаметром  $\approx 0.8$ –1 мм) токовый канал с внутренней микроструктурой. Микроструктура проявляется неоднородным распределением показателя преломления внутри токового канала. Микроструктура формируется в передней части канала и сохраняется внутри в течение продолжительного времени ( $> 400$  нс).*

**Ключевые слова:** протяженный искровой разряд, лазерная диагностика, микроструктура разряда.

Недавно, в работах [1, 2] по исследованию искрового разряда в коротких промежутках (зазор  $\sim 1$ –4 мм) было показано формирование внутренней микроструктуры токового канала искры. Микроструктура представляет собой скопление множества плазменных микроканалов диаметром порядка  $\sim 10$ –20 мкм. Микроканалы располагаются внутри результирующего искрового канала, имеющего характерный диаметр  $\sim 200$  мкм. Микроканалы имеют долгоживущий характер и наблюдаются вплоть до нескольких десятков наносекунд, начиная с момента начала формирования результирующего искрового канала в промежутке [3]. Механизмы формирования и поддержания микроструктуры искры на данный момент, неизвестны и требуют систематического исследования. Предполагая, что микроструктуризация токовых каналов является фундаментальным явлением для газового разряда, представляет интерес исследование развития внутренней микроструктуры токовых каналов при различных условиях эксперимента, в частности при различных масштабах разрядного промежутка и приложенного напряжения.

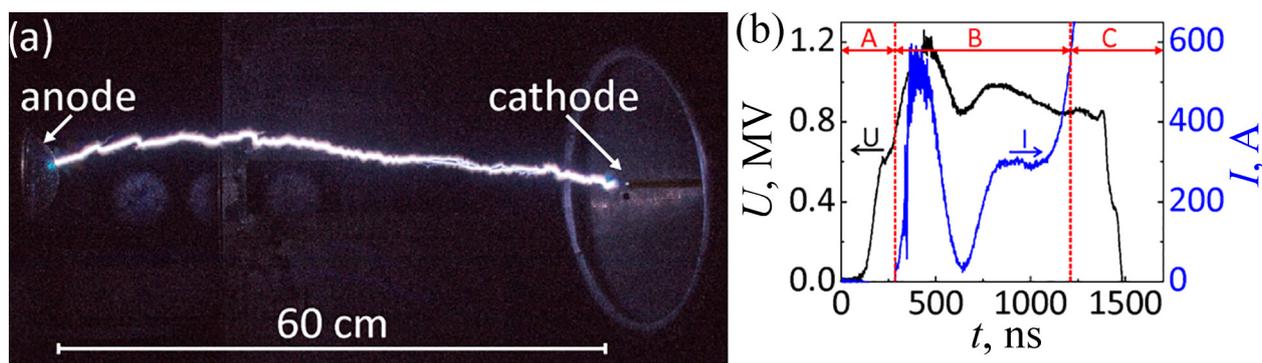


Рис. 1: Фотография разряда, снятая на цифровую фотокамеру (а); характерная осциллограмма тока и напряжения (б). На осциллограмме отмечены стадии разряда, разделяемые по характерному току: А – первая, В – вторая, С – третья стадии.

В данной работе исследуется протяженный искровой разряд на установке ЭРГ [4–6]. Результирующий канал разряда представляет собой ярко светящийся плазменный шнур длиной  $\sim 60$  см (рис. 1(а)). Максимальное напряжение на разрядном промежутке достигает 1.2 МВ. Разряд можно качественно разделить на три стадии с различным характерным током. На первой стадии ток не превышает 10 А, на второй ток возрастает и поддерживается в диапазоне 50–600 А, на третьей стадии ток резко возрастает до  $7 - 10 \cdot 10^3$  А. Соответствующие промежутки времени отмечены на характерной осциллограмме-разряде, показанной на рис. 1(б). В данной работе с пространственным разрешением  $\approx 20$  мкм исследовано формирование и развитие токового канала на второй стадии разряда. Отметим, что анализируемые в работе развивающиеся токовые каналы ассоциируются с результирующим каналом разряда, изображенным на рис. 1(а).

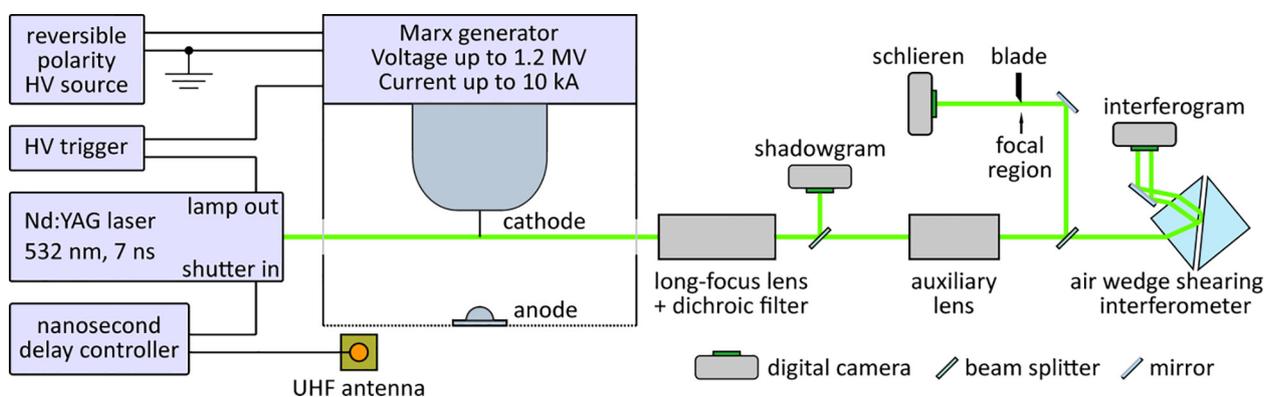


Рис. 2: Схема экспериментальной установки.

Общая схема экспериментального стенда показана на рис. 2. Генератор импульсов напряжения стенда собран по схеме Аркадьева–Маркса и позволяет подавать на нагрузку импульс напряжения амплитудой до 1.2 МВ и фронтом 250 нс. Максимальный ток генератора составляет  $\sim 20$  кА (ток короткого замыкания). Импульс напряжения подается на разрядный промежуток, который находится на оси заземленной металлической обечайки диаметром 2 м. В обечайке сделаны два прямоугольных диаметрально расположенных диагностических окна. Разрядный промежуток представляет собой открытый воздушный зазор с расстоянием 60 см между высоковольтным острым катодом и заземленным анодом в виде полусферы радиусом 7.5 см. Катод представляет собой латунный стержень диаметром 1 см и длиной 20 см, на конце которого припаяна стальная игла длиной 1 см, диаметром 0.5 мм и радиусом закругления острия 0.1 мм. Катод выбран острым для локализации разряда с помощью резко неоднородного электрического поля. Анод выполнен в виде полусферы радиусом 7.5 см из латунной сетки 0.5/2.5 мм. Анод такой геометрии повышает вероятность развития разряда по центру разрядного промежутка. Для измерения напряжения на разрядном промежутке использовался резистивный делитель, находящийся на выходе разрядной колонны генератора Маркса. Для измерения тока разряда использовался шунт сопротивлением  $\approx 100$  мОм, находящийся в составе заземленного электрода. Сигналы делителя напряжения и токового шунта с помощью коаксиальных кабелей RG-6 с волновым сопротивлением 75 Ом и длиной 20 м передавались в экранированную комнату с осциллографом. Сигналы делителя напряжения и токового шунта записывались осциллографом Tektronix TDS2024 с полосой пропускания 200 МГц. Временное разрешение электрической диагностики составляло  $\approx 10$  нс.

Исследование токового канала проводилось методами лазерной диагностики. Запуск лазерной диагностики осуществлялся с помощью радиоизлучения разряда УКВ диапазона, которое регистрируется при переходе разряда во вторую стадию [7]. Радиосигнал принимался патч-антенной с резонансной частотой 2 ГГц и запускал генератор задержек Г5-56, управляющий затвором лазера. Момент генерации лазерного импульса фиксировался с помощью коаксиального фотоэлемента ФК-19. Сигнал с фотоэлемента записывался на осциллограф. Оптическая схема лазерной диагностики приведена на рис. 2. Для лазерного зондирования использовалась вторая гармоника (532 нм) излучения Nd:YAG лазера ЛТИПЧ, с длительностью импульса  $\approx 7$  нс и энергией в импульсе  $\approx 50$  мДж. Лазерный пучок, расширенный коллиматором до диаметра  $\approx 2$  см, проходил перпендикулярно оси разрядного промежутка через прикатодную область, захватывая

$\approx 2$  мм острия катода. Затем лазерный пучок собирался длиннофокусным объективом Canon EF 100-400 mm f/4.5-5.6L, настроенным на конец острия высоковольтного электрода. Для подавления свечения разряда использовался набор светофильтров (ЖЗС-12, СЗС-21, ЖС-18), расположенный перед объективом. После прохождения объектива лазерный пучок делился на два с помощью делительной пластины. Первый пучок использовался для регистрации теневых изображений разряда. Второй пучок собирался дополнительным объективом с высоким разрешением (ЭРА-13), транслирующим изображение разряда на расстояние, удобное для применения интерферометрии и шпирен-фотографирования. Интерферометрия осуществлялась сдвиговым интерферометром на воздушном клине [8]. Шпирен-изображение строилось с помощью асимметричной диафрагмы, находящейся в фокусе второго объектива. Изображения разряда записывались на три цифровых фотоаппарата Canon 1000D с CMOS матрицами. Временное разрешение оптической схемы эквивалентно длительности лазерного импульса и равно  $\approx 7$  нс. Пространственное разрешение оптической схемы было откалибровано на дополнительном стенде и составляло  $\approx 20$  мкм.

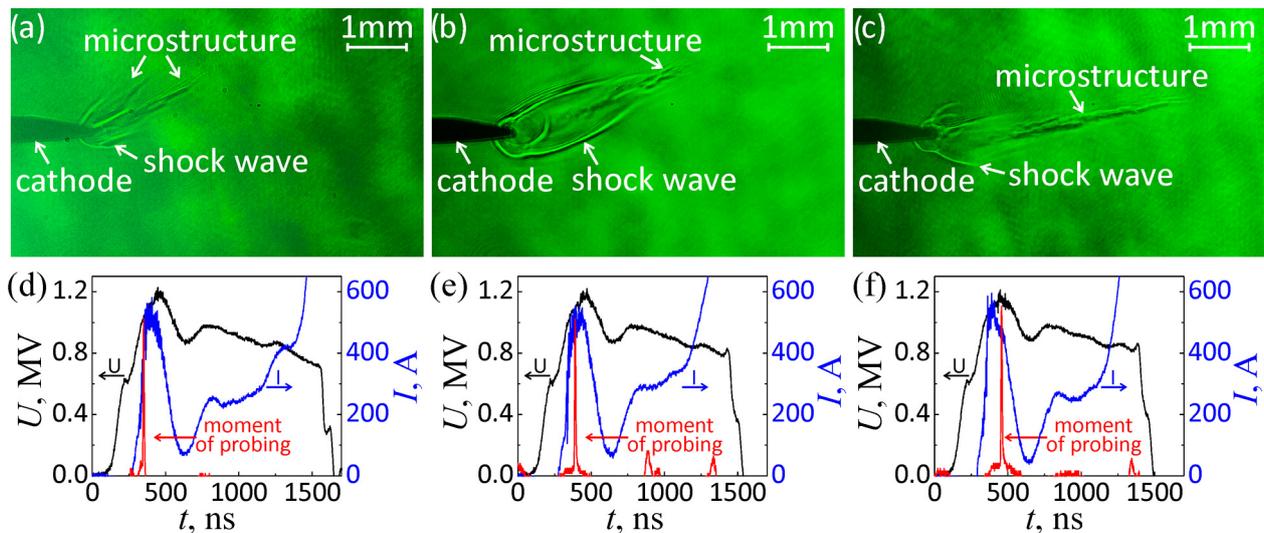


Рис. 3: Формирование токового канала разряда: (a), (b), (c) – тенеграммы разряда, на которых указано положение микроструктуры и ударной волны; (d), (e), (f) – осциллограммы разряда, соответствующие тенеграммам. На каждой осциллограмме приведены напряжение и ток разряда, отмечен момент лазерного зондирования.

В течение первой стадии разряда напряжение на промежутке вырастает до  $\sim 0.6$  МВ, при этом ток разряда ниже предела регистрирующей системы и не превышает 10 А.

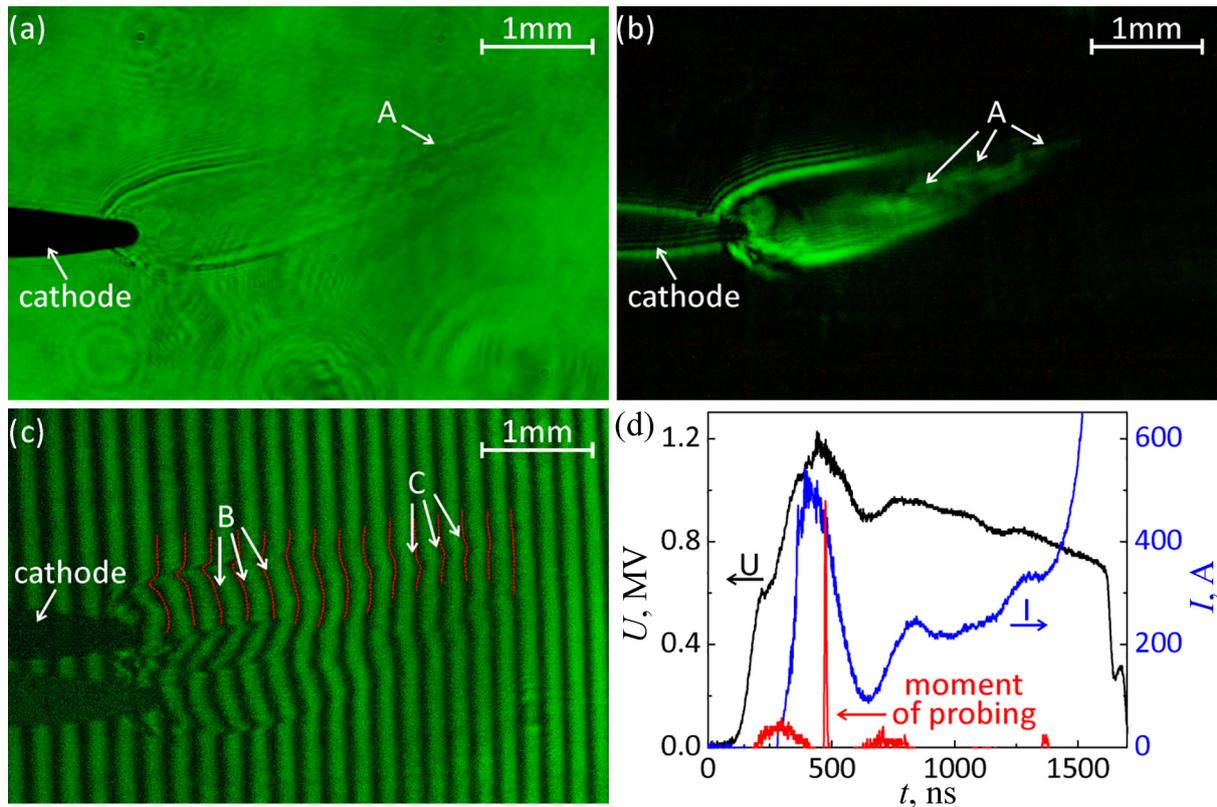


Рис. 4: Тенеграмма (a), шлирен-изображение (b), интерферограмма разряда (c) и соответствующая им осциллограмма тока и напряжения разряда (d). A – внутренняя микроструктура разряда; B – сдвиг интерференционных полос внутри канала за ударной волной; C – сдвиг интерференционных полос в области неоднородностей на фронте канала. На осциллограмме показан момент лазерного зондирования.

Чувствительности применяемой лазерной диагностики не хватает для исследования разряда в этой стадии. Во второй стадии разряда ток быстро (с нарастанием до 5 А/нс) достигает значений  $\sim 500$  А, после чего так же резко снижается до 50 А. Далее ток в течение 0.5–1 мкс возрастает до значений  $4 - 5 \cdot 10^2$  А, после чего переходит в сильноточную третью стадию, сопровождаемую резким ростом тока до 7–8 кА. На рис. 3 представлены лазерные тенеграммы токового канала разряда в первые 200 нс после начала второй стадии разряда и соответствующие им осциллограммы тока и напряжения. Развитие канала начинается непосредственно с острия катода и сопровождается образованием ударной волны на его границах, визуализируемой в виде резких градиентов интенсивности тенеграммы, соответствующих перепадам коэффициента преломления среды. Образование ударной волны происходит, предположительно, вследствие

быстрого прогрева газа внутри канала. Передняя часть канала сильно вытянута в сторону анода и имеет конусообразную форму с углом при вершине  $\sim 10\text{--}15^\circ$ , при этом диаметр канала не превышает 1 мм. Внутри канала визуализируются неоднородности, вытянутые продольно. Поперечный размер внутренних неоднородностей составляет 40–100 мкм. Внутренние неоднородности токового канала образуют его микроструктуру, схожую по морфологии с микроструктурой искрового разряда в работах [1, 2].

На рис. 4 приведены тенеграмма, шпирен-фотография и интерферограмма разряда в момент развития канала. Наличие второго изображения катода и разряда на интерферограмме обусловлено особенностями применяемого интерферометра и его настройкой [8]. Ширина канала равна  $d_k = 1$  мм, поперечный размер неоднородностей в передней части канала равен  $d_s = 0.2$  мм. Сдвиг интерференционных полос в канале примерно равен  $k_k = 0.24$  (область В на рис. 4(с)), в области неоднородностей в передней части канала  $k_s = 0.17$  ширины интерференционных полос (область С на рис. 4(с)). Без учета дифракции лазерного пучка при прохождении через объект, получаем среднее изменение показателя преломления в канале  $\Delta n_k \approx 1 \cdot 10^{-4}$  и в области с неоднородностями в передней части канала  $\Delta n_s \approx 4.5 \cdot 10^{-4}$ . Изменение показателя преломления в токовом канале определяется плотностью разогретого нейтрального газа, концентрацией ионов и свободных электронов. Существенная разница в изменении показателя преломления внутри сформированной части канала и в его передней части должна быть связана с интенсивностью процессов ионизации и рекомбинации, локальностью прогрева среды перед каналом. Для более конкретных выводов необходимо проведение дополнительной диагностики разряда, например, спектроскопии и лазерного зондирования на другой длине волны.

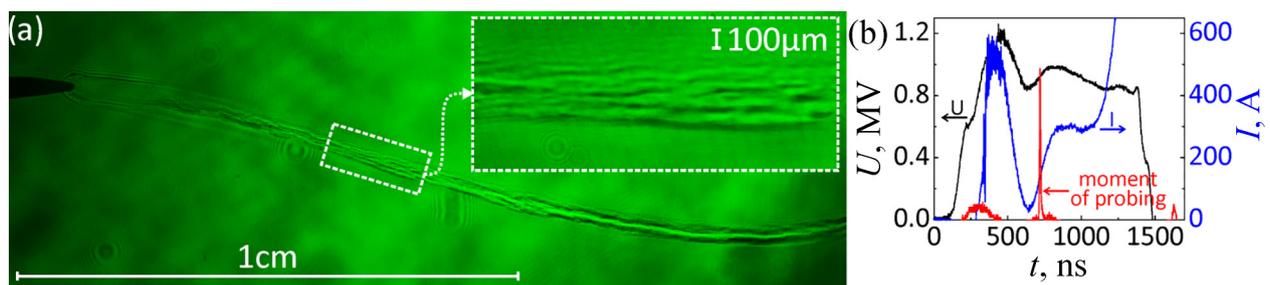


Рис. 5: Тенеграмма разряда (а); осциллограмма тока и напряжения (б).

На рис. 5 показана тенеграмма токового канала разряда длиной более 1.5 см с ярко выраженной микроструктурой внутри канала. Лазерное зондирование проведено через  $\sim 400$  нс после начала второй стадии разряда. Диаметр токового канала составляет

~0.8–1 мм вдоль обозреваемой части. Поперечный масштаб неоднородностей начинается от 40 мкм. Размытие неоднородностей в правой части тениграммы связано с отклонением токового канала от объектной плоскости оптической системы.

В данной работе продемонстрировано наличие микроструктуры в токовом канале протяженного искрового разряда. Микроструктура проявляется при развитии канала в его передней части и сохраняется внутри канала в течение продолжительного времени, более 400 нс (среднее время от начала формирования токового канала до перехода в сильноточную стадию разряда составляет 1 мкс). Характерный поперечный масштаб неоднородностей микроструктуры варьируется от 40 мкм до 100 мкм, что значительно меньше диаметра токового канала (0.8–1 мм).

Работа была поддержана грантом РФФИ № 20-08-01156. Анализ изображений был частично поддержан в рамках гранта Президента РФ № МК-703.2020.2.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] E. V. Parkevich, M. A. Medvedev, G. V. Ivanenkov, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**(9), 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768.
- [2] K. I. Almazova, A. N. Belonogov, V. V. Borovkov, et al., *Tech. Phys.* **63**(6), 801 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218060026.
- [3] K. I. Almazova, V. V. Borovkov, E. V. Gorelov, et al., *Phys.* **64**(1), 61 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219010043.
- [4] С. А. Чайковский, А. В. Огинов, К. В. Шпаков и др., *Известия Высших Учебных Заведений. Физика* **58**(9/2), 258 (2015) [in Russian].
- [5] A. V. Agafonov, A. V. Oginov, A. A. Rodionov, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**(9), 095014 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3c79.
- [6] A. V. Agafonov, V. A. Bogachenkov, A. P. Chubenko, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**(16), 165202 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa5dba.
- [7] И. С. Байдин, А. В. Огинов, Е. В. Паркевич, *ЖТФ* **91**(12), 1910 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51756.12-21.
- [8] S. A. Pikuz, V. M. Romanova, N. V. Baryshnikov, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **72**(1), 1098 (2001). DOI: 10.1063/1.1321746.

Поступила в редакцию 23 июля 2021 г.

После доработки 28 октября 2021 г.

Принята к публикации 29 октября 2021 г.