

УДК 533.9.082

ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРЫ ОДНОВРЕМЕННО НА ДВУХ ДЛИНАХ ВОЛН 532 НМ И 1064 НМ

Е. В. Паркевич¹, А. И. Хирьянова¹, Т. Ф. Хирьянов¹, Х. Т. Смазнова¹,
Я. К. Болотов^{1,2}, С. А. Амброзевич³

Впервые проведены исследования микроканалов электрической искры с использованием лазерного зондирования одновременно на двух длинах волн 532 нм и 1064 нм. Искра формировалась в воздухе атмосферного давления в миллиметровом промежутке при приложении к нему высоковольтного импульса с амплитудой до 25 кВ при максимальном токе генератора ~ 300 А. Показано, что переход к зондированию на длине волны 1064 нм позволяет получать более информативные данные о параметрах плазмы микроканалов в стадии их роста, когда микроканалы в принципе могут быть разрешены как одиночные объекты. Для локальных областей разряда вдали от электродов установлено, что в стадии роста микроканалы могут иметь максимальную электронную плотность от $8 \cdot 10^{18}$ см⁻³ до $4.5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ при характерном диаметре микроканалов примерно 20 мкм. Микроканалы, находящиеся в стадии роста и не разрешаемые интерферометрией на длине волны 532 нм, могут иметь среднюю электронную плотность порядка $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Ключевые слова: лазерное зондирование, микроструктура, электрическая искра, интерферометрия.

Введение. Причины возникновения микроструктуры у электрической искры до сих пор вызывают много вопросов, как, собственно, и сам процесс её формирования. Эф-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: parkevich@phystech.edu.

² МФТИ, 141701 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005 Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1.

фekt филаментации электрической искры – разбиение цельного искрового канала диаметром в несколько сотен микрон на множество каналов диаметром порядка 10 мкм, – был обнаружен относительно недавно в работах [1, 2]. Несмотря на обширную историю всесторонних исследований естественной электрической искры в малых воздушных промежутках [3], обнаружить у неё сложную внутреннюю микроструктуру удалось благодаря существенному улучшению пространственного и временного разрешения оптических систем фотографирования, основанных на методах лазерного зондирования. К сожалению, до сих пор получено мало экспериментальных данных о параметрах одиночных микроканалов результирующей искры, что вызвано многими техническими трудностями диагностики микроканалов. Важным моментом в данной области исследований является тот факт, что все проводимые ранее ключевые эксперименты по лазерному зондированию микроструктуры электрической искры были основаны на использовании лазерного излучения только с длиной волны 532 нм. Известно, что переход к большей длине волны, например к 1064 нм, имеет определенные преимущества, поскольку повышается чувствительность техники интерферометрии к электронной компоненте плазмы [4]. Это особенно важно для получения данных о параметрах плазмы микроканалов в стадии их роста, когда они в принципе могут быть разрешены как одиночные объекты. Однако соответствующих исследований с использованием излучения с длиной волны 1064 нм еще ни разу не проводилось.

В данной работе мы проводим качественное сравнение результатов зондирования микроканалов электрической искры, полученных при использовании излучения одновременно с длинами волн 532 нм и 1064 нм. Показано, что переход к 1064 нм позволяет получать более информативные данные о параметрах плазмы одиночных растущих микроканалов с лучшим разрешением в терминах сдвига фазы зондирующего излучения. Приводятся количественные оценки электронной плотности плазмы одиночных микроканалов.

Схема экспериментальных измерений. Исследования проводились на установке, детально описанной в работе [5]. В основе установки использовался кабельный генератор, выдающий высоковольтный импульс амплитудой до 25 кВ с фронтом ≈ 4 нс и длительностью ≈ 40 нс при максимальном токе генератора ~ 300 А. Генератор был синхронизован с пикосекундным Nd:YAG лазером LS-2151 с точностью не хуже 1 нс посредством разрядника с лазерным поджигом [6]. Излучение лазера имело следующие характеристики: энергия в импульсе до 80 мДж на двух длинах волн 1064 нм и 532 нм, длительность импульса излучения на длине волны 1064 нм ~ 100 пс. При срабатыва-

нии лазера и высоковольтного кабельного генератора выдаваемый импульс напряжения прикладывался к исследуемому разрядному искровому промежутку (с геометрией типа “остриё – плоскость”), расположенному в отдельной разрядной камере. Камера соединялась с управляемым разрядником через согласованную передающую линию. После прикладывания высоковольтного импульса на исследуемый промежуток инициировался разряд, и начиналось поэтапное (от стадии катодного пятна до растущего искрового канала [7]) формирование электрической искры.

В данной работе мы зондировали растущий с катода (медная проволочка диаметром 100 мкм и длиной несколько миллиметров) искровой канал в стадии, когда уже произошло его деление на множество микроканалов, но которые еще не успевали закоротить весь разрядный промежуток. В этой промежуточной стадии развития искры некоторые одиночные микроканалы хорошо разрешались методами лазерного зондирования. В интересующей нас стадии развития искры последняя зондировалась одновременно (с точностью до нескольких сотен пикосекунд) двумя пучками, следующими под малыми углами друг относительно друга перпендикулярно оси разрядного промежутка. Каждый пучок имел свою длину волны, 532 нм или 1064 нм, отсекаемую соответствующим светофильтром в системе с оптической задержкой. Для снятия интерферограмм был создан и настроен специальный оптический канал с высококачественным объективом марки “Эра-14” [8]. Оба пучка собирались данным объективом и разводились позади него зеркалами. Каждый пучок далее вновь собирался дополнительным высококачественным объективом марки “Эра-13” ($\times 2$) и использовался в индивидуальном канале с интерферометрией (на основе сдвигового интерферометра [9]). Разрешение в каждом из каналов было близко к нескольким микронам, что позволяло отчетливо запечатлеть “тонкую структуру” искрового канала.

Экспериментальные результаты. Рис. 1((a)–(d)) демонстрируют интерферограммы разрядного промежутка, полученные без разряда, см. рис. 1(a) и (c), и в момент развития в нем искры, см. рис. 1(b) и (d). Изображения с искрой получены спустя примерно 5–6 нс от начала пробоя промежутка. Интерферограммы получены при зондировании разряда одновременно на двух длинах волн 532 нм и 1064 нм. Отметим, что настройка интерферометров производилась индивидуально для каждой длины волны, поэтому результирующий сдвиг соседних интерференционных изображений на интерферограммах, полученных при 532 нм и 1064 нм, различный. Пространственный масштаб всех изображений одинаковый.

Растущий искровой канал на рис. 1(b) и (c) запечатлен в стадии, когда уже начался процесс интенсивного образования микроканалов при токе разряда порядка 200–300 А. При этом в условиях эксперимента и в данном конкретном выстреле с катода начал развиваться не один, а два искровых канала. Характерный диаметр обоих таких каналов вблизи катода составляет порядка 100 мкм. В результате образования двух каналов и из-за небольшого сдвига между соседними интерференционными картинками на интерферограмме на рис. 1(d) сдвиговые изображения каналов частично наложились друг на друга. Тем не менее, некоторые зоны разряда, представляющие интерес с точки зрения анализа параметров плазмы одиночных микроканалов, разрешились надежно на фоне наложений интерференционных изображений.

На интерферограммах на рис. 1(b) и (d), полученных практически одновременно по времени (с точностью до нескольких сотен пикосекунд), прекрасно видно, что чувствительности техники интерферометрии не хватает для разрешения одиночных микроканалов на длине волны 532 нм. Примерно в середине промежутка микроканалы прослеживаются крайне слабо. Максимальный сдвиг фазы, вносимый ими, соизмерим с уровнем характерного шума на интерферограмме. Поэтому извлечь непротиворечивую информацию с интерферограммы на рис. 1(b) практически не возможно. Области разряда с микроканалами, которые в принципе поддаются обработке на интерферограмме на рис. 1(b), приходится туда, где количество микроканалов уже достаточно велико и сильно выражено их множественное переналожение друг друга. В результате искусственно увеличивается результирующий сдвиг фазы от их проекционной фазовой картины. Единственное, что остается верным, это оценка снизу, показывающая, что наиболее вероятная электронная плотность микроканалов близка к 10^{19} см⁻³. Отметим, что результирующая картина искрового канала немного отличается для интерферограмм на рис. 1(b) и (d), поскольку они получены при зондировании пучками, сведенными в области разряда под малыми углами друг другу. Общую суть дела данный факт, однако, не меняет.

В случае с интерферограммой на рис. 1(d) микроканалы разрешаются намного четче, при этом можно выделить зоны, где прослеживаются даже одиночные микроканалы. Заметим, что характерный диаметр микроканалов на порядок меньше диаметра участков искровых каналов вблизи катода; последние имеют характерный диаметр порядка 100 мкм. Качественное изменение интерференционной картины искры является результатом естественного увеличения чувствительности техники интерферометрии к электронной компоненте плазмы при переходе к большей длине волны.

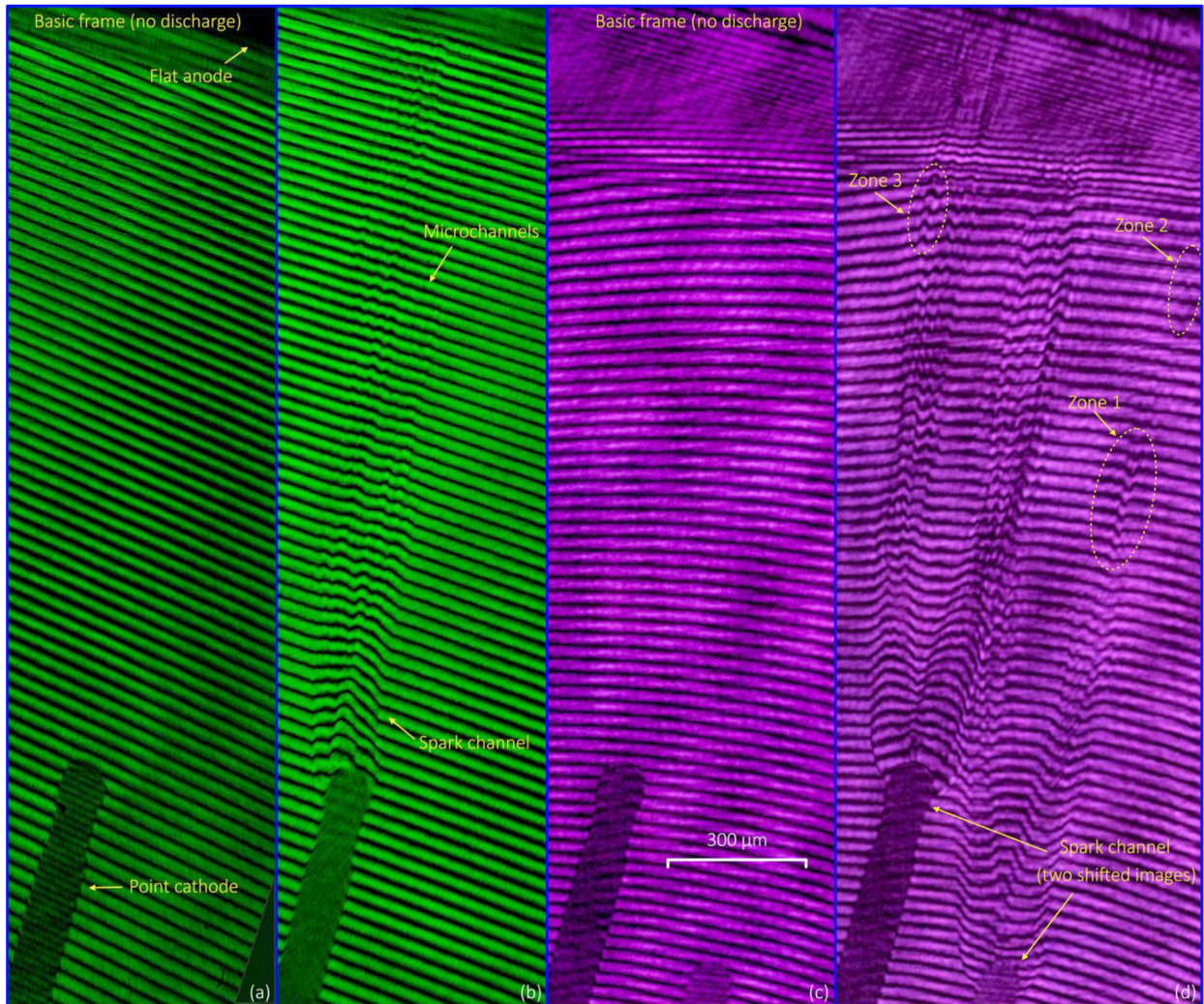


Рис. 1: Интерферограммы разрядного промежутка ((a)–(d)), снятые без формирования искры (a), (c) и в момент её развития (b), (d) на длинах волн 532 нм (a), (b) и 1064 нм (c), (d).

Для уточнения параметров плазмы отдельных микроканалов на интерферограмме на рис. 1(d) рассмотрены три зоны разряда. Результаты обработки для данных зон представлены на рис. 2. Восстановление электронной плотности произведено для срезов 1–3, проведенных, как показано на рисунке. Обработка интерферограмм заключалась в их трассировке – определении локальных максимумов и минимумов интенсивности, построении непрерывной карты сдвига фазы, и поиске срезов с наиболее осесимметричным распределением сдвига фазы. Извлеченные распределения сдвига фазы сглаживались осесимметричными кривыми, которые далее использовались при численном

решении обращенного уравнения Абеля. Для этих целей использовался метод расчета обратного интегрального уравнения Абеля, детально описанный в работе [10]. Результирующая ошибка построения распределений электронной плотности, включающая в себя ошибку численного счета, сглаживание извлеченных распределений сдвига фазы и качество построения карт сдвига фазы, не превышала 10%, что учтено в соответствующих распределениях электронной плотности на рис. 2.

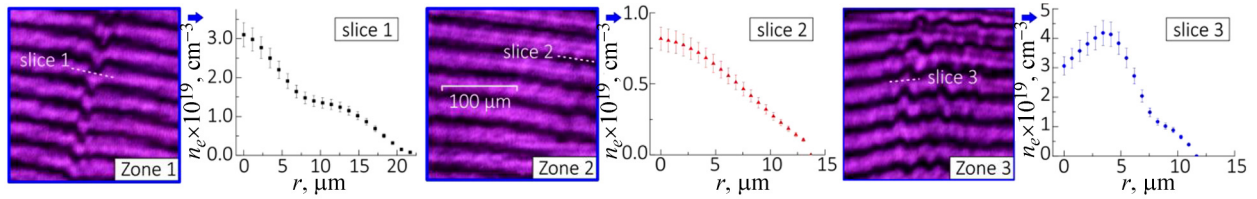


Рис. 2: Результаты обработки интерферограмм для срезов в трех зонах на рис. 1(d) и восстановленные для них распределения электронной плотности.

Распределения электронной плотности на рис. 2 представлены как функции радиуса микроканалов r . В областях, где удалось разрешить одиночные микроканалы, их диаметр составляет примерно 20 мкм. Максимальная величина электронной плотности ранжируется от $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до $4.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Средняя электронная плотность в сечении микроканала сильно зависит от степени ионизованности микроканала и стадии его эволюции. Для более развитых микроканалов её величина в разы выше 10^{19} см^{-3} . При этом микроканалы, находящиеся в стадии роста к аноду, могут в среднем иметь электронную плотность ниже, порядка $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, которую не представляется возможным запечатлеть при зондировании искры на длине волны 532 нм.

Заключение. При использовании техники лазерной интерферометрии переход к длине волны 1064 нм позволяет лучше разрешить микроструктуру электрической искры и получить количественную информацию и представление о параметрах плазмы одиночных микроканалов. В частности, тех микроканалов, которые находятся в стадии роста и в принципе не разрешаются техникой интерферометрии, реализованной на длине волны 532 нм. Соответствующие результаты работы могут быть полезны при постановке и проведении последующих поисковых исследований в данной области физики газового разряда.

Работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-00799.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] E. V. Parkevich et al., *Plasma Sources Science and Technology* **28**(9), 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768.
- [2] К. И. Алмазова и др., *Журнал технической физики* **88**(6), 827 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218060026.
- [3] Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц, *Физика импульсного пробоя газов* (М., Наука, 1991).
- [4] Г. В. Островская, *Журнал технической физики* **78**(9), 1 (2008). DOI: 10.1134/S1063784208090016.
- [5] E. V. Parkevich et al., *Opt. Lasers Eng.* **116**, 82 (2019). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.12.014.
- [6] E. V. Parkevich et al., *Plasma Sources Science and Technology* **29**(5), 05LT03 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/ab8173.
- [7] E. V. Parkevich et al., *Plasma Sources Science and Technology* **27**(11), 11LT01 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aaebdb.
- [8] D. S. Volosov, *Photographic optics* (Moscow, Iskusstvo, 1978).
- [9] S. A. Pikuz et al., *Rev. Sci. Instrum.* **72**(1), 1098 (2001). DOI: 10.1063/1.1321746.
- [10] K. Bockasten, *JOSA* **51**(9), 943 (1961). DOI: 10.1364/JOSA.51.00094.

Поступила в редакцию 2 августа 2023 г.

После доработки 30 августа 2023 г.

Принята к публикации 31 августа 2023 г.