

Параметры микроканалов электрической искры в прианодной области разряда

Е.В.Паркевич, А.И.Хирьянова, Т.Ф.Хирьянов, К.В.Шпаков,
Х.Т.Смазнова, Я.К.Болотов, С.А.Амброзевич

Рассмотрен случай образования электрической искры с острейшего анода в атмосферном воздухе, когда первичный искровой канал с самой ранней стадии своей эволюции сразу начинает формироваться в виде скопления микроканалов сильноионизированной плазмы. Посредством лазерного зондирования на длине волны 1064 нм разрешены микроканалы искры в прианодной области разряда, а также получены данные о величине и распределении электронной плотности плазмы одиночных микроканалов. Показано, что в течение первых наносекунд после момента пробоя разрядного промежутка электронная плотность в отдельных микроканалах распределена неоднородно и составляет от 10^{18} до 5×10^{19} см⁻³ при характерных диаметрах микроканалов 20–50 мкм.

Ключевые слова: микроканалы, атмосферный разряд, искра, лазерное зондирование.

1. Введение

Формирование микроструктуры у электрической искры во время импульсного разряда в воздушной среде является сложным и динамичным эффектом, причина развития которого до конца не известна. В современных работах установлено, что появление микроструктуры искры носит пороговый характер в зависимости от давления [1] и степени предьонизации [2] газоразрядной среды, а также предельного тока через разрядный промежуток [3]. Важно также отметить влияние полярности электрода на процесс генерации микроканалов. В работе [4] сообщалось о том, что искровой канал с катода сначала формируется без микроструктуры, которая возникает несколько позже на некотором расстоянии от катода. В то же время искровой канал, зародившийся на аноде, практически сразу начинает развиваться в виде множества микроканалов [5]. В работах [4, 5] было также показано, что одиночные микроканалы, находящиеся в стадии роста к противоположному электроду, вдали от электродов представляют собой сильноионизированную плазму с электронной плотностью вплоть до 5×10^{19} см⁻³. Исследования проводились в воздухе при атмосферном давлении.

Е.В.Паркевич, А.И.Хирьянова, Т.Ф.Хирьянов, К.В.Шпаков, Х.Т.Смазнова. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: parkevich@phystech.edu

Я.К.Болотов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

С.А.Амброзевич. Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5

Определенный интерес при этом вызывают параметры плазмы микроканалов, наблюдающихся вблизи поверхности анода в течение первых наносекунд после момента пробоя разрядного промежутка. Надежно разрешить такие каналы на ранней стадии их эволюции и восстановить распределение их электронной плотности пока еще не удалось ввиду недостаточной чувствительности техники лазерной интерферометрии и сильного перекрытия микроканалов друг с другом. Заметим, что во всех основополагающих исследованиях микроструктура искры зондировалась, как правило, на длине волны 532 нм [1–6]. В работе [7] было показано, что переход к длине волны 1064 нм значительно повышает чувствительность техники интерферометрии по отношению к плазме одиночных микроканалов электрической искры. В связи с этим представляется важным детально рассмотреть параметры микроканалов искры вблизи анода на раннем этапе их эволюции с использованием зондирующего излучения с более высокой длиной волны.

В настоящей работе исследована ранняя стадия развития микроканалов искры с поверхности острейшего анода в атмосферном воздухе при их зондировании лазерным излучением с длиной волны 1064 нм. Благодаря повышению чувствительности техники интерферометрии к электронной компоненте плазмы удалось не только надежно разрешить одиночные микроканалы в прианодной области на раннем этапе их развития, но и определить их характерную электронную плотность. Представлены соответствующие оценки параметров микроканалов.

2. Схема эксперимента

Экспериментальные измерения проводились на установке, аналогичной той, что была описана в работе [7]. Использовался высоковольтный генератор, выдающий импульсы напряжения с амплитудой до 25 кВ, фронтом ~ 4 нс и длительностью ~ 40 нс при максимальном токе

генератора ~ 300 А. Высоковольтный импульс подавался на плоский катод и сделанный из медной проволоочки диаметром 100 мкм анод (острый анод), которые ограничивали разрядный промежуток, заполненный воздухом при атмосферном давлении. Расстояние между плоским катодом и вершиной анодной проволоочки составляло ~ 2 мм. После приложения высоковольтного импульса и наступления электрического пробоя промежутка на катоде и аноде начиналось формирование пятен приэлектродной плазмы микронного размера [5], от которых впоследствии в сторону противоположного электрода развивались микроканалы сильноионизованной плазмы, образованной из воздушной среды. В настоящей работе особое внимание уделено одиночным микроканалам, развивающимся с поверхности острейшего анода, для которых ранее не было получено достоверной информации о характерных параметрах плазмы. Для этих целей использовалась техника лазерного зондирования на длине волны 1064 нм при длительности импульса лазерного излучения 100 пс. Микроканалы зондировались как на раннем этапе их формирования – в течение первых наносекунд после момента пробоя разрядного промежутка, так и на более позднем, когда промежуток закорачивался множеством микроканалов сильноионизованной плазмы. В случае, когда одиночные микроканалы удавалось разрешить на фоне скопления множества микроканалов, их интерференционные картины обрабатывались в соответствии с процедурой, описанной в работе [7].

3. Экспериментальные результаты

Тенеграммы и интерферограммы разрядного промежутка, к которому прикладывается высоковольтный импульс, продемонстрированы на рис.1. Изображение на рис.1,а иллюстрирует весь разрядный промежуток без приложения напряжения. Изображения с микроканалами на остром аноде получены спустя примерно 1–3 нс от момента пробоя промежутка. Пространственный масштаб изображений на рис.1,б–ж одинаковый. Восстановленные распределения электронной плотности для некоторых одиночных микроканалов представлены на рис.1,з–и. Распределения показаны как функции радиуса микроканалов r .

Результаты обработки показывают, что у микроканалов, развивающихся в прианодной области разряда, имеется существенный градиент электронной плотности в продольном направлении. В непосредственной близости от поверхности острейшего анода величина электронной плотности может достигать 5×10^{19} см $^{-3}$ (имеется в виду максимальная плотность электронов в сечении одиночного микроканала). Заметим, что столь большие значения плотности электронов указывают на достижение состояния почти полностью диссоциированной и однократно ионизованной воздушной среды при атмосферном давлении. По мере приближения к вершине растущего микроканала максимальная плотность электронов в сечении микроканала падает до значений порядка 1×10^{19} см $^{-3}$ и меньше. Также вблизи вершины микроканала наблюдаются значения плотности электронов в диапазоне $(1-10) \times 10^{18}$ см $^{-3}$. Можно предположить, что в режиме роста одиночные микроканалы представляют собой область плазмы с электронной плотностью в

основном порядка 10^{18} см $^{-3}$, которая локально увеличивается вследствие поэтапного усиления ионизации среды. Возможно, в режиме роста микроканалы характеризуются электронной плотностью меньше 10^{18} см $^{-3}$, однако такие значения находятся за пределами чувствительности техники интерферометрии, достигнутой даже на длине волны 1064 нм. На рис.1,з–и видно, что распределения плотности электронов могут сильно отличаться друг от друга не только для различных микроканалов, но и для разных участков одного и того же микроканала.

Данный факт указывает на сильную неоднородность процессов интенсивной ионизации среды на масштабах порядка единиц микрон. При этом имеются отдельные микроканалы с более и менее выраженным темпом развития, определяемым различными скоростями ионизации среды и прорастания микроканалов в направлении противоположного электрода. В целом появление микроканалов на аноде носит стохастический характер, т.е. их количество, размеры и пространственное распределение меняются от выстрела к выстрелу. Диаметры микроканалов, берущих начало от поверхности анода, находятся в диапазоне от 20 до 50 мкм. Чем дальше от поверхности электрода, тем уже микроканал и меньше его максимальная величина электронной плотности. Примечательно, что на лазерных тенеграммах одиночные микроканалы визуализируются, как правило, в виде узких жгутов со светлой сердцевинкой и темной цилиндрической границей. Высокие перепады интенсивности в области микроканала указывают на существенный эффект дифракции лазерного излучения на неоднородной плазме, в то же время позволяя более точно определить местоположение микроканала в пространстве. Расшифровать теневую картину микроканалов, однако, можно только путем численного исследования общей задачи дифракции излучения на сильнонеоднородной плазменной среде с учетом возможного эффекта дефокусировки оптики.

4. Заключение

В соответствии с результатами обработки лазерных интерферограмм можно предположить, что одиночные микроканалы, развивающиеся с поверхности анода, имеют достаточно высокую электронную плотность, находящуюся в диапазоне от 10^{18} до 5×10^{19} см $^{-3}$. В районе вершины растущего микроканала электронная плотность может не превышать 1×10^{19} см $^{-3}$ и в целом быть порядка 10^{18} см $^{-3}$. Высокие значения электронной плотности присутствуют либо приэлектродной зоне микроканалов, либо их участкам, далеко отстоящим от вершины микроканалов. Вдоль микроканалов прослеживается существенный градиент электронной плотности, характеризующий ее спадом практически на порядок величины. Разрешенные на изображениях микроканалы имеют диаметры 20–50 мкм. Полученные данные хорошо согласуются с результатами других исследований, проведенных с использованием зондирующего лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Результаты настоящей работы могут быть полезны при разработке моделей кинетики газоразрядных процессов, а также при описании плазменных неустойчивостей в приэлектродных областях.

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

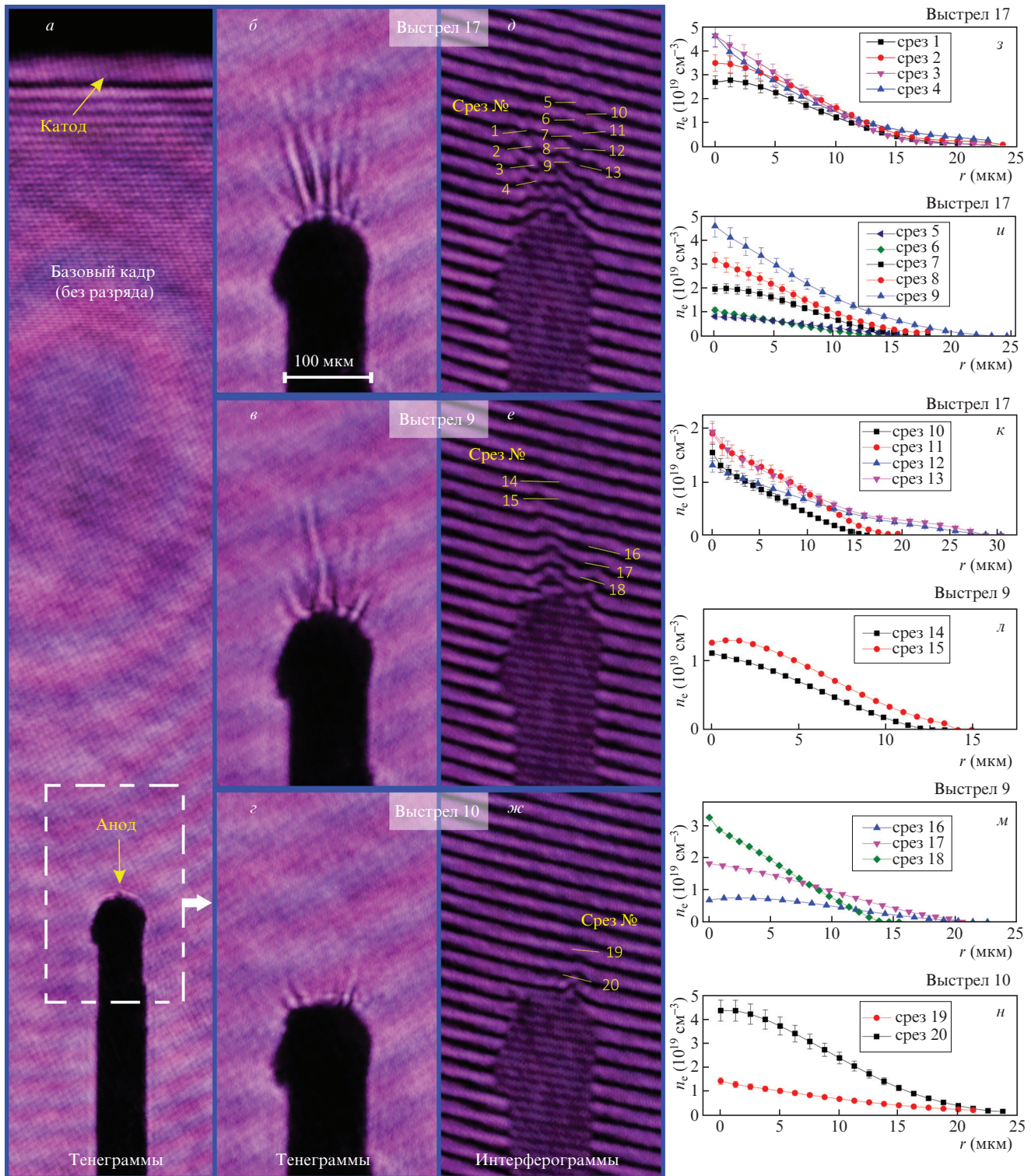


Рис. 1. Тенеграмма разрядного промежутка, полученная без разряда (а), тенеграммы (б)–(з) и интерферограммы (д)–(ж) прианодной области, снятые в момент развития искры, а также восстановленные распределения электронной плотности (з)–(и) для срезов 1–20, проведенных в прианодной области с разрешенными одиночными микроканалами.

1. Tren'kin A.A., Almazova K.I., Belonogov A.N., Borovkov V.V., Dolotov A.S., Morozov I.V. *Tech. Phys.*, **9**, 1153 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.09.54678.58-22.
2. Tren'kin A.A., et al. *Tech. Phys.*, **1**, 31 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.01.52529.237-21.
3. Parkevich E.V., Khirianova A.I. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, **49** (9), 302 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622090068.
4. Parkevich E.V., et al. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28** (9), 095003 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3768.
5. Parkevich E.V., Medvedev M.A., Khirianova A.I., Ivanenkov G.V., Selyukov A.S., Agafonov A.V., Shpakov K.V., Oginov A.V. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **28** (12), 125007 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab518e.
6. Almazova K.I., Belonogov A.N., Borovkov V.V., Gorelov E.V., Morozov I.V., Tren'kin A.A., Kharitonov S.Yu. *Tech. Phys.*, **63** (6), 801 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218060026.
7. Parkevich E.V., et al. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* (2023) [in print].