

04;12

Самоорганизация канальной структуры наносекундного диффузного разряда в электродной системе проволока–плоскость

© П.Б. Репин, А.Г. Репьев

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская область, Россия

(Поступило в Редакцию 28 августа 2000 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований пространственной структуры высоковольтного диффузного разряда в электродной системе проволока–плоскость. Обнаружена самоорганизация в регулярные ячейки токовых каналов разряда в плоскости перпендикулярной напряженности электрического поля. Изучены зависимости параметров структуры от величины межэлектродного зазора в сантиметровых промежутках и давления воздушной среды в диапазоне 220 . . . 760 Торг. Самоорганизация структуры разряда объясняется электрическим взаимодействием зарядов головок диффузных каналов в стадии переключения промежутка.

Высоковольтный диффузный разряд наносекундного диапазона в сантиметровых межэлектродных промежутках с резко неоднородным распределением электрического поля сопровождается потоками быстрых электронов и сопутствующего тормозного рентгеновского излучения [1]. Это обуславливает широкое применение разряда для предионизации активной среды газовых лазеров [2] и эффективной очистки воздуха от органических загрязнителей [3]. Генерация потоков ионизирующих излучений связывается с наличием канальной и микроканальной пространственной структуры разряда [1,4], что стимулирует ее изучение.

Исследования, проведенные к настоящему времени, позволили установить регулярный характер многоканальной структуры разряда и основные зависимости ее параметров и закономерностей формирования от режима возбуждения разряда [1,4,5]. В то же время регистрация пространственной структуры разряда в [4,5] была ограничена в основном фотографированием сбоку внешнего вида разряда, т.е. фактически фиксировались только проекции токовых каналов на проходящую через катод-проволочку–плоскость, перпендикулярную аноду. Кроме того, осталась невыясненной зависимость геометрических параметров токовых каналов от давления газовой среды.

В данной работе представлены результаты исследования пространственной структуры в плоскости анода наносекундного диффузного разряда, формируемого в воздухе при давлении $p = 220 \dots 760$ Торг.

Эксперименты проводились в электродной системе проволока (диаметр 0.2 мм, длина 120 мм)–плоскость. Величина межэлектродного зазора h варьировалась от 50 до 105 мм. Источник питания обеспечивал на катод-проволочке импульсы напряжения отрицательной полярности с фронтом нарастания 8 ns и полной длительностью 180 ns. Амплитуда напряжения в зависимости от условий формирования разряда составляла 80 . . . 100 kV. Амплитуда тока разряда по мере уменьшения давления и зазора возрастала от 20 до 860 А. Регистрация про-

странственной структуры разряда осуществлялась фотографированием внешнего вида разряда и отдельных его участков, а также методом автографов, оставляемых токовыми каналами на тонких слоях вещества, наносимого на анод. Фотографирование разряда производилось фотоаппаратом Zenit E (объектив Гелиос 44-2). Угол съемки выбирался таким образом, чтобы одновременно регистрировать пространственную структуру разряда и расположение каналов разряда по поверхности анода. Расстояние, с которого производилось фотографирование, варьировалось в пределах от 0.2 до 0.4 м. В качестве светочувствительного материала использовалась изохроматическая пленка со спектральной чувствительностью до 640 nm.

В качестве покрытий анода для получения автографов токовых каналов использовалась сажа, мелкодисперсное пенное вещество и фотоэмульсии заводского производства, пропитанные электролитом. В специальных экспериментах было установлено, что наличие на аноде регистрирующего покрытия не влияет на электрические характеристики и внешний вид разряда.

Наибольшей информативностью при регистрации автографов токовых каналов разряда, как установлено в экспериментах, обладают сажевые слои (толщина ~ 0.05 мм, дисперсность $\leq 4 \mu\text{m}$). Внешне автограф канала на саже представляет собой различимый на отблеск, круглый отпечаток, выделяющийся на фоне сажи несколько другим оттенком. Характерный серебристый оттенок придают отпечатку образующие его многочисленные микроканалы [1]. Сложность обработки автографов на сажевых слоях в сочетании с необходимостью большого числа повторных опытов из-за статического разброса результатов экспериментов обусловили использование сажевых покрытий в основном для контрольных экспериментов и при исследовании микроструктурных параметров разряда, результаты которых будут опубликованы в ближайшее время.

Для исследования микроструктуры разряда вместо сажи использовалось мелкодисперсное пенное веще-

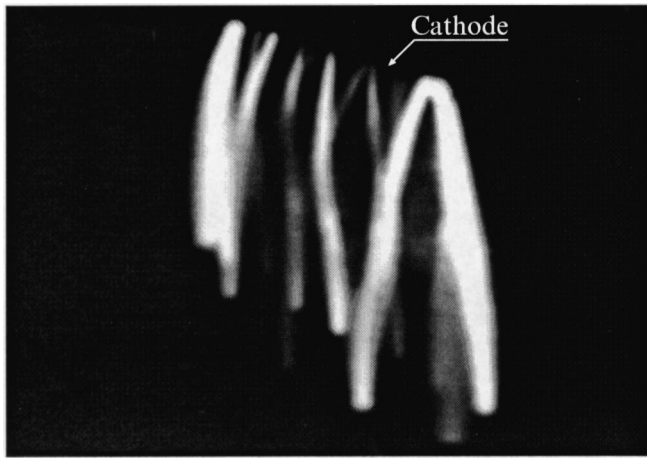


Рис. 1. Внешний вид разряда ($h = 74$ mm, $p = 310$ Torr).

ство. Преимуществом применяемого вещества является существенно бо́льшая по сравнению с сажей чувствительность к токовым каналам разряда (слой вещества толщиной ≈ 1 mm регистрирует не только основные каналы протекания тока, но и едва визуальными различимые фрагменты). Разрешающая способность метода определяется дисперсностью используемого вещества ≤ 200 μ m. Следует отметить, что с уменьшением давления дисперсность вещества постепенно увеличивается. В связи с этим при пониженных давлениях методика применялась только для определения числа токовых каналов и их пространственного расположения по поверхности анода.

В экспериментах установлено, что внешний вид разряда типичен для высоковольтных наносекундных разрядов в промежутке проволочка–плоскость [4,5] и представляет собой ряд отдельных диффузных каналов, равномерно распределенных по длине проволочки-катода (рис. 1).

Среднее число каналов разряда по мере увеличения зазора от 50 до 105 mm уменьшается от 36 до 14. Число диффузных каналов разряда N_c определялось с использованием всех трех выше упомянутых методик. Фотографирование внешнего вида разряда позволяет определить N_c во всем диапазоне давлений при малых межэлектродных зазорах и во всем диапазоне h

при пониженных давлениях, где разряд обладает достаточной для регистрации интенсивностью свечения. По сравнению с методом автографов фотографирование дает несколько заниженный результат по числу N_c . Специально поставленный эксперимент с одновременным использованием обоих методов позволил выяснить причину этого расхождения, заключающуюся в совпадении на пленке проекций некоторых каналов. Общая ошибка регистрации числа каналов методом фотографирования, учитывая совпадение проекций, а также в некоторых случаях недостаточную фокусировку отдельных каналов разряда, составляла 20...40%. Метод автографов на саже и метод автографов с использованием мелкодисперсного пенного слоя дают, как правило, близкие значения N_c . Общая погрешность регистрации N_c методами автографов находится в пределах $\pm 5\%$ и определяется погрешностью счетаразличимости отпечатка. Последняя обусловлена экспериментально обнаруженной вероятностью появления максимум одного на десять каналов объекта, возможно, не являющегося автографом (например, пылинки или дефект на поверхности сажи, лопнувший пузырек пены).

В экспериментах обнаружено, что периодический характер пространственной структуры разряда проявляется не только в равномерном распределении токовых каналов вдоль катода-проволочки. В плоскости анода наблюдается самоорганизация разрядных каналов в регулярные ячейки. На рис. 2 представлены отпечатки каналов одного разрядного импульса на слое мелкодисперсного пенного вещества. Анализ фотографий для различных h позволил установить, что каналы в плоскости анода располагаются в гексагональном порядке в несколько рядов, симметрично от проекции катода. Идеализированная картина распределения каналов по аноду представлена на рис. 3.

С уменьшением h от 100 до 60 mm происходит уплотнение отпечатков, т.е. без изменения числа рядов увеличивается число каналов в каждом ряду. Расстояние между осями крайних рядов при этом остается примерно одинаковым и равно 25 mm. Дальнейший переход к $h = 50$ mm сопровождается появлением дополнительных двух боковых рядов отпечатков, при этом расстояние между ближайшими к центральному рядами сокращается с 25 до 15 mm, а между осями крайних рядов состав-

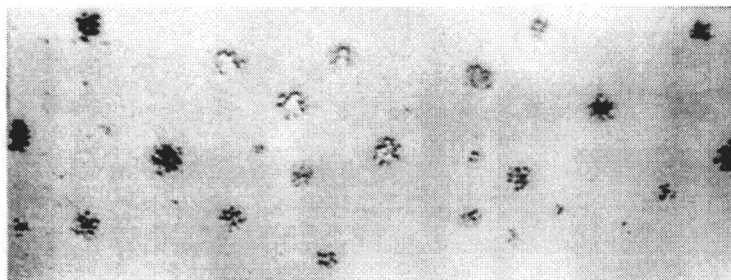


Рис. 2. Распределение автографов разряда по поверхности анода, покрытого тонким слоем мелкодисперсного пенного вещества ($h = 74$ mm, $p = 400$ Torr).

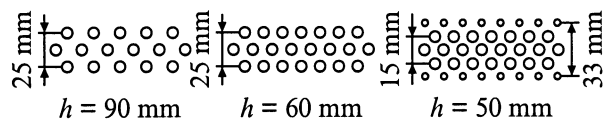


Рис. 3. Идеализированная картина расположения автографов на поверхности анода.

ляет 33 mm. Скорость увеличения числа регистрируемых каналов с уменьшением h в диапазоне $50 \text{ mm} < h < 60 \text{ mm}$ заметно выше, чем при изменении зазора от 100 до 60 mm. Следует отметить, что наблюдаемая картина организации структуры разряда стыкуется с результатами [4], где также отмечался нелинейный характер зависимости числа разрядных каналов от величины межэлектродного зазора.

Средний диаметр канала при увеличении h от 50 до 80 mm слабо уменьшается от 1.1 mm до 0.9 mm, в то время как дальнейший рост h до 105 mm ведет к заметному уменьшению диаметра до 0.4 mm. Диаметр отпечатков каналов в центральных рядах картины распределения автографов на аноде, как правило, больше, чем в крайних. Это может быть обусловлено увеличением длины каналов при удалении от проекции катода на анод (длина канала соответствует длине силовой линии внешнего поля [5]) и связанным с этим падением тока в канале за счет увеличения его сопротивления.

Число каналов и их распределение по аноду от давления практически не зависят. Только вблизи нижней границы исследованного диапазона p наблюдается тенденция уменьшения числа разрядных каналов, что может быть связано с переносом части разрядного тока визуально наблюдаемыми при пониженных давлениях областями диффузного свечения и недостаточной чувствительностью методик определения числа каналов при падении плотности тока. При всех значениях p наблюдается три ряда автографов ($h = 74 \text{ mm}$). Расстояние между осями крайних рядов увеличивается от 25 до 40 mm по мере уменьшения давления от атмосферного до $p \approx 300 \text{ Torr}$. Средний диаметр канала при этом увеличивается от 1 до 4.5 mm.

Наблюдаемая самоорганизация структуры разряда в плоскости, перпендикулярной направлению электрического поля, наиболее логичным образом объясняется электрическим взаимодействием зарядов головок каналов в стадии перемигания промежутка [5].

Вблизи катода головки стартовавших с него каналов находятся на различных расстояниях от анода в силу статистического разброса времени старта и осесимметричного распределения электрического поля в непосредственной близости от проволоочки, определяющего начальное направление движения каналов. По мере удаления от катода и спада напряженности поля, задаваемого геометрией электродной системы, направление дальнейшего движения каждого отдельного канала определяется суперпозицией внешнего электрического

поля и поля, создаваемого несколькими ближайшими каналами. При этом запаздывающие каналы, благодаря электрическому взаимодействию зарядов своих головок с квазинейтральными столбами соседних каналов большей длины, сливаются с ними [5]. Эффект слияния каналов ведет к уменьшению их числа, увеличению среднего расстояния между ними и выравниванию положения головок остающихся каналов относительно анода. В свою очередь это ведет к замедлению самого эффекта слияния и нелинейному характеру зависимости числа отпечатков каналов на аноде от межэлектродного расстояния. Распространение каналов, концы которых находятся примерно на одинаковых расстояниях от анода, сопровождается расталкиванием их одноименно заряженных головок. В результате распределение каналов в плоскости, перпендикулярной напряженности внешнего электрического поля, упорядочивается в регулярную структуру.

Список литературы

- [1] Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. и др. // Исследования по физике плазмы / Под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998. С. 39–67.
- [2] Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И. и др. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 7. С. 891.
- [3] Буранов С.Н., Воеводин С.В., Воеводина И.А. и др. // Исследования по физике плазмы / Под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998. С. 339–361.
- [4] Павловский А.И., Воинов М.А., Горохов В.В. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 1. С. 64.
- [5] Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б. // ТВТ. 1991. Т. 29. № 2. С. 383.