

04

## **Экспериментальное исследование влияния влажности воздуха на распределение заряженных частиц в плазме тлеющего разряда**

© А.С. Барышников, И.В. Басаргин, С.В. Бобашев, Н.А. Монахов, П.А. Попов, В.А. Сахаров<sup>¶</sup>, М.В. Чистякова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
<sup>¶</sup> E-mail: v.sakharov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2016 г.

Распределение заряженных частиц в плазме тлеющего разряда в воздухе с различным влагосодержанием исследовалось с помощью двойного электрического зонда. Обнаружено существенное различие в распределении заряженных частиц в разряде в зависимости от влажности воздуха. Количество водяного пара с относительной концентрацией 2% практически не влияет на распределение заряженных частиц в плазме; при увеличении влагосодержания до 15% наблюдается двукратное увеличение концентрации ионов на оси разряда.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.22.45257.16640

Применение водяного пара в плазменных технологиях — актуальное и развивающееся направление [1–3], используемое в плазмохимии, металлургии, металлообработке, утилизации вредных веществ, лазерной технике и др. Основным элементом этих технологий являются электрические разряды различного типа в парах воды и их смесях с другими газами.

Объектом настоящего исследования является плазма тлеющего разряда в воздушной среде с различным содержанием паров воды. Цель работы состоит в изучении распределения заряженных частиц поперек положительного столба при помощи двойного электрического зонда. В исследованиях по взаимодействию ударной волны с тлеющим разрядом обнаружено различие в распределении газодинамических параметров и зондового тока за фронтом ударной вол-

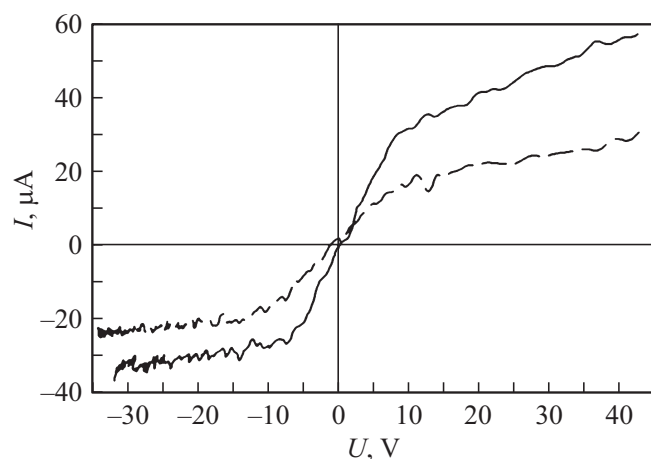
ны как в плазме тлеющего разряда, так и в распадающейся плазме [4–5]. В настоящее время авторы не имеют удовлетворительного объяснения этим результатам. В качестве первого шага предлагается рассмотреть влияние влажности атмосферного воздуха на распределение заряженных частиц в плазме тлеющего разряда, тем более что ранее роль этого фактора в таких экспериментах была отмечена [6].

Плазма создавалась в воздухе при давлении 4 кПа между двумя коническими электродами, расположенными вертикально на расстоянии 100 мм друг от друга. Ток через разрядный промежуток составлял 1.1 А, напряжение между электродами 680 В. Тлеющий разряд имеет форму тела вращения с увеличивающимся к верхнему электроду поперечным сечением. Степень ионизации в центре разряда не превосходила  $10^{-6}$ , температура электронов составляла около 1 eV, температура газа была не более 1500 К.

Двойной электрический зонд представляет собой два платиновых электрода диаметром 0.5 мм и длиной 10 мм, ориентированных параллельно оси разряда и удаленных друг от друга на расстояние 8 мм. На электроды зонда подавалось напряжение, которое вызывало прохождение электрического тока через плазму. Зондовые измерения осуществлялись на различных расстояниях от оси разряда. Измерительное сечение располагалось примерно посередине разрядного промежутка в положительном столбе тлеющего разряда.

В работе сравнивались вольт-амперные характеристики (ВАХ) двойного зонда, полученные в плазме воздуха с различной влажностью. Для построения ВАХ на электроды зонда подавалось напряжение, монотонно изменяющееся во времени, а в эксперименте регистрировались ток двойного зонда и напряжение на электродах зонда.

Использовались сухой воздух, атмосферный воздух с естественной влажностью и воздушная среда с повышенным содержанием воды. Содержание паров воды характеризуется отношением парциальных давлений (концентраций частиц) водяного пара и воздуха. Это отношение было рассчитано для температуры 20°C, относительной влажности 90% и плотности насыщения водяного пара  $\rho = 17 \text{ g/m}^3$  и оказалось равным 2%.

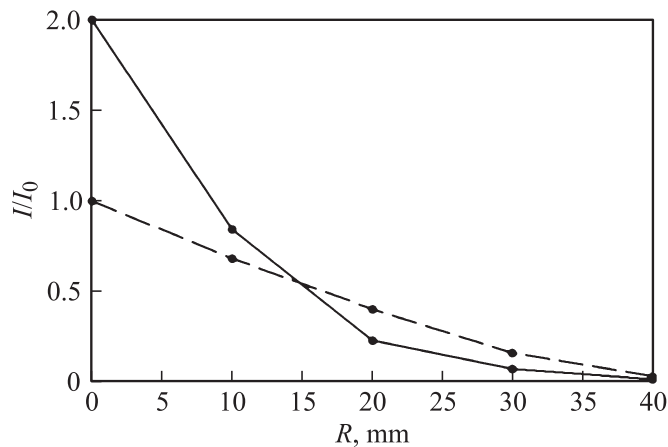


**Рис. 1.** Вольт-амперные характеристики двойного зонда на оси разряда в сухом (штриховая линия) и влажном (сплошная линия) воздухе.

Осушка воздуха проводилась путем вымораживания. Для этого использовался теплообменник, состоящий из трех последовательно соединенных стеклянных сосудов с жидким азотом, через которые газ поступал в рабочую камеру.

Воздушная среда с повышенным содержанием влаги готовилась непосредственно в рабочей камере путем многочасовой выдержки сосуда со свободной поверхностью воды в воздухе при давлении, близком к рабочему. Таким способом удалось увеличить содержание воды в воздухе до относительной концентрации 15%. Во всех перечисленных вариантах влажности среды концентрация паров воды более чем на четыре порядка превосходит концентрацию заряженных частиц.

Сначала исследовались ВАХ в плазме разряда, созданного в сухом и атмосферном воздухе. Построение ВАХ проводилось в точках, удаленных на различные расстояния от оси разряда. Сравнение показало практически полное совпадение ВАХ в плазме разряда в сухом и атмосферном воздухе в измерительном сечении. Однако в плазме воздуха с повышенной влажностью наблюдается существенное отличие ВАХ.



**Рис. 2.** Распределение ионного тока зонда в поперечном сечении разряда в сухом (штриховая линия) и влажном (сплошная линия) воздухе.

На рис. 1 показаны ВАХ двойного зонда в плазме сухого и влажного воздуха.

Анализ электронных ветвей ВАХ в окрестности нуля позволяет по их наклону оценить температуру электронов в плазме. Оценки показывают практическое совпадение электронных температур в плазме сухого и влажного воздуха.

Из рисунка видно, что при напряжении между электродами зонда более 15 В реализуется режим насыщения ионного тока. Участок ВАХ в этом диапазоне напряжений имеет линейный вид. В этом случае величина ионного тока при прочих равных условиях пропорциональна концентрации ионов, квадратному корню из температуры электронов и площади поверхности электрода зонда, находящегося под отрицательным потенциалом. Поэтому при смене полярности напряжения на электродах зонда величина ионного тока будет определяться другим электродом и параметрами плазмы в месте его расположения. Этим обстоятельством обусловлен асимметричный вид ВАХ относительно нуля. Из рисунка видно, что асимметрия ВАХ зонда в плазме влажного воздуха заметно больше, чем для сухого.

Полученные вольт-амперные характеристики позволяют построить распределение ионного тока двойного зонда в поперечном сечении разряда. На рис. 2 показано безразмерное значение ионного тока  $I/I_0$  при напряжении между электродами зонда 30 V, соответствующем правой ветви насыщения ВАХ. Величина тока отнесена к значению тока в центре разряда в плазме сухого газа,  $R$  — удаление от оси разряда. Видно, что в сухом воздухе ток распределен практически линейно по радиусу сечения разряда, а во влажном воздухе концентрируется ближе к центру разряда и его величина на оси вдвое больше, чем в плазме сухого воздуха. Причиной этого может быть высокая теплоемкость паров воды, что вызывает понижение температуры при  $R > 15$  mm. Поскольку в этих случаях зонд работал в режиме насыщения ионного тока, распределения тока на рис. 2 соответствуют изменению относительной концентрации ионов. Следует отметить, что ток через разрядный промежуток в рассматриваемых вариантах оставался неизменным.

При исследовании влияния влажности воздуха на распределение заряженных частиц в плазме газового разряда установлено, что количество водяного пара, содержащегося в атмосферном воздухе с относительной концентрацией пара 0.02, практически не влияет на распределение ионного тока в плазме тлеющего разряда. При искусственном увеличении влагосодержания в воздушной среде до значения относительной концентрации 0.15 наблюдается существенное изменение распределения тока в сечении и двукратное его увеличение на оси разряда по сравнению с величиной в случае плазмы в сухом воздухе.

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-06280.

## Список литературы

- [1] Михайлов Б.И. // Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы / Г.Ю. Даутов, А.Н. Тимошевский, Б.И. Урюков и др. Новосибирск: Наука, 2004. С. 105–145.
- [2] Миленин В.М., Тимофеев Н.А., Вуль А.Я., Кидалов С.В., Ходорковский М.А. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26 В. 18. С. 63–67.
- [3] Михайлов Д.В., Пастор А.А., Сердобинцев П.Ю., Тимофеев Н.А., Ходорковский М.А. // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 8. С. 94.

- [4] Барышников А.С., Басаргин И.В., Бобашев С.В., Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А., Чистякова М.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 15. С. 83–89.
- [5] Bobashev S.V., Basargin I.V., Baryshnikov A.S., Monahov N.A., Popov P.A., Sakharov V.A., Chistyakova M.V. // Abstracts of 15th Int. Workshop on magnetoplasma aerodynamics. Moscow, 2016. P. 112–113.
- [6] Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистякова М.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 10. С. 54–57.