

04

Особенности взаимодействия ударной волны с плазмой газового разряда

© А.С. Барышников¹, И.В. Басаргин¹, С.В. Бобашев^{1,2},
Н.А. Монахов^{1,2}, П.А. Попов^{1,2}, В.А. Сахаров¹, М.В. Чистякова¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

E-mail: v.sakharov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 11 марта 2015 г.

С помощью двойного электрического зонда проведены исследования распределения заряженных частиц за фронтом ударной волны в плазме газового разряда при наличии электрического поля и в распадающейся плазме без электрического поля. Обнаружено существенное отличие пространственного распределения заряженных частиц в рассматриваемых случаях.

Задача о взаимодействии ударной волны с плазмой является частью фундаментальной проблемы, непосредственно связанной с развитием современной аэронавтики и космической техники [1–4]. Сложность ее обусловлена, с одной стороны, электродинамическими процессами в газовом разряде, с другой, нестационарным газодинамическим процессом — движением ударной волны по среде сложного состава.

Исследования взаимодействия ударной волны с плазмой газового разряда в ФТИ было начато по инициативе Г.И. Мишина. В работах [5–8] изучалось распределение полного давления за ударной волной в плазме положительного столба тлеющего разряда. Данная работа является продолжением этих исследований и посвящена изучению распределения заряженных частиц за фронтом ударной волны.

Эксперименты проводились на плазмогазодинамической установке в атмосфере воздуха при давлении 4 кПа. Схема установки показана на рис. 1. В рабочей камере диаметром 300 мм и высотой 400 мм создавался стационарный тлеющий разряд между двумя коническими электродами (1 — анод, 2 — катод), расположенными вертикально на расстоянии 100 мм друг от друга. Внешний источник обеспечивал ток разряда 1.1 А при напряжении на электродах 650 В. Разряд имел

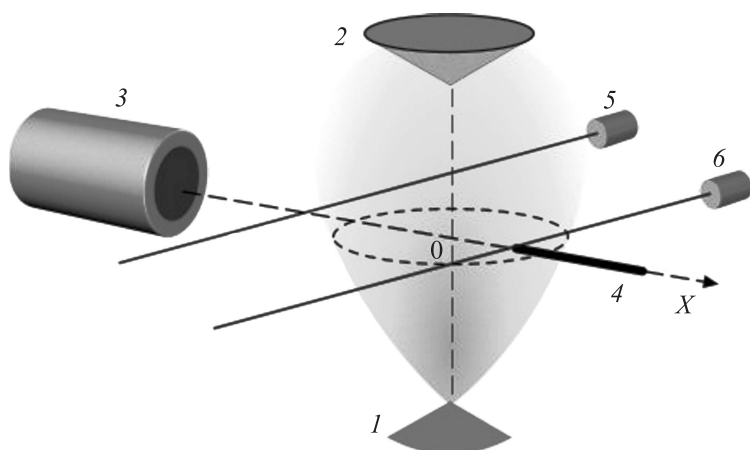


Рис. 1. Схема установки: 1 — анод, 2 — катод, 3 — ударная труба, 4 — электрический зонд, 5, 6 — фотодиод оптической системы.

форму тела вращения с увеличивающимся поперечным сечением в направлении к катоду.

Ударная волна формировалась электроразрядной ударной трубой 3 с внутренним диаметром 30 мм и длиной 700 мм. Выходное сечение ударной трубы находилось на расстоянии 100 мм от оси разряда. Скорость ударной волны на выходе ударной трубы соответствовала числу Маха 3.

С противоположной стороны рабочей камеры навстречу ударной волне располагался двойной электрический зонд 4, представляющий собой 2 параллельных платиновых электрода диаметром 0,5 мм и длиной 10 мм, удаленных на расстояние 8 мм друг от друга. Электроды зонда ориентированы параллельно оси разряда. Выбор платины в качестве материала электрода обусловлен ее малой химической активностью и незначительной термоэлектрической эмиссией. На электроды зонда подавалось постоянное напряжение 38 В, что обеспечивало работу зонда в режиме насыщения ионного тока. В этом случае изменение зондового тока соответствует изменению концентрации заряженных частиц.

Регистрация ударной волны осуществлялась с помощью оптической шлирен-системы, состоящей из лазерного источника и фотодиода с

ножом Фуко. Пересечение ударной волной луча лазера вызывает его отклонение на ноже Фуко, что приводит к изменению сигнала фотодиода. Луч оптической системы 5 оставался неподвижным, а луч системы 6 проходил через точку расположения электрического зонда.

В работе [9] была определена концентрация заряженных частиц в плазме тлеющего разряда $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, что соответствует степени ионизации $\sim 10^{-6}$. Температура атомов в плазме была измерена хромель-алюмелевой термопарой и в центре разряда составила 1200–1300 К. Достоверность результатов, полученных с помощью термопары, базируется на результатах экспериментальных исследований, проведенных в [10]. Окружающий разряд газ имел комнатную температуру.

Эксперименты проводились в двух режимах работы установки. Первый обеспечивал взаимодействие ударной волны с плазмой при наличии электрического поля между электродами. Во втором случае взаимодействие реализовывалось в распадающейся плазме без электрического поля.

В первом режиме результатом воздействия ударной волны на разряд являлось прекращение тока разряда. Его уменьшение до нуля происходило за время 0.8–1.0 ms, при этом напряжение на электродах оставалось практически неизменным. Время регистрации процесса составляло 0.5 ms. Для реализации второго режима работы осуществлялось шунтирование разрядного промежутка за время не более 10^{-5} s , после чего напряжение на электродах становилось практически нулевым. Движение ударной волны через плазму начиналось спустя 1.5 ms после выключения тока, когда скорость рекомбинации заряженных частиц становилась малой и их концентрация практически не изменялась за время эксперимента.

На рис. 2, а показаны осциллограммы тока зонда за фронтом ударной волны в плазме тлеющего разряда в различных точках. Отсчет времени ведется от момента прихода ударной волны в точку измерения. Координата точки измерения отсчитывалась от оси разряда в направлении движения ударной волны.

Приход ударной волны отражается на сигнале зонда появлением положительного импульса, что соответствует увеличению концентрации заряженных частиц. Максимум импульса тока остается практически постоянным в области разряда (кривые 1, 2 и 3) и вне этой области (кривые 4 и 5) уменьшается. Отметим, что радиус сечения проводящей

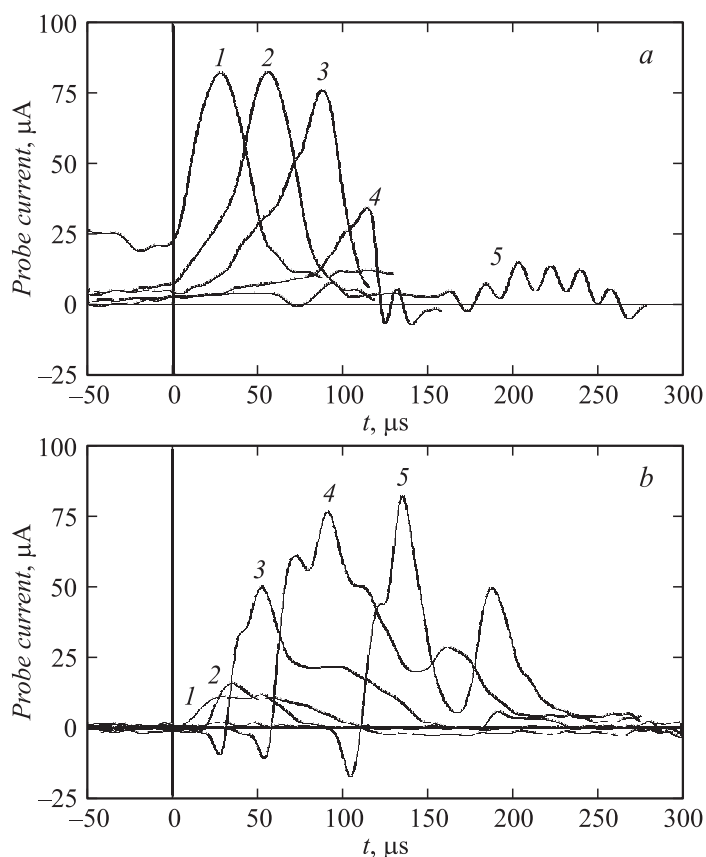


Рис. 2. Сигналы зонда за фронтом ударной волны в тлеющем разряде (*a*) и распадающейся плазме (*b*) на различном удалении от оси разряда: 1 — 10 мм, 2 — 40, 3 — 50, 4 — 60, 5 — 70 мм. $t = 0$ — момент прихода ударной волны в точку измерения.

области составляет примерно 40 мм. При удалении от оси разряда максимум сигнала зонда смещается вправо по временной оси.

На графике рис. 2, *b* приведены результаты измерений за ударной волной в распадающейся плазме. В отличие от предыдущего случая максимум сигнала зонда многократно увеличивается при удалении от

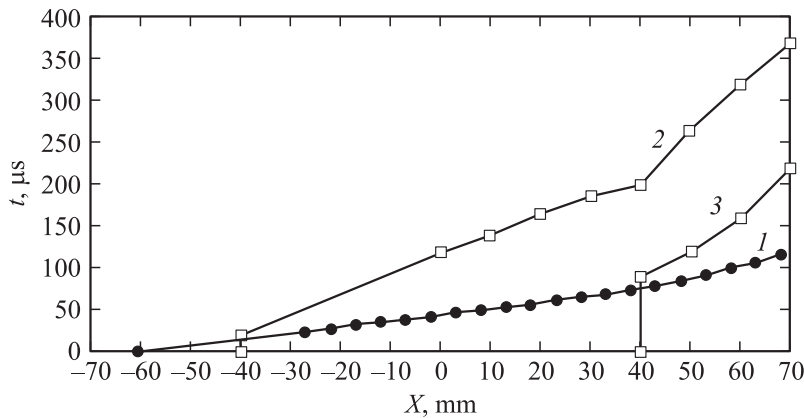


Рис. 3. Пространственно-временная диаграмма взаимодействия ударной волны с распадающейся плазмой. 1 — траектории ударной волны, 2 и 3 — траектория левой и правой границы сечения области, занятой плазмой.

оси разряда. Вид сигналов тока приобретает более сложную форму с несколькими локальными экстремумами и появлением отрицательных значений тока.

Наблюдаемое различие в пространственном распределении заряженных частиц в тлеющем разряде и распадающейся плазме позволяет утверждать, что электрическое поле удерживает заряженные частицы в межэлектродном пространстве, не позволяя им следовать за ударной волной.

Указанное выше увеличение концентрации заряженных частиц за ударной волной в распадающейся плазме (рис. 2, *b*) может быть результатом газодинамического сжатия, поскольку без электрического поля заряженные частицы и нейтральный газ движутся одинаково. Газодинамическое сжатие обусловлено разностью давлений за фронтом ударной волны в окружающем газе и в области, занимаемой плазмой, из-за разницы начальных температур газа в этих областях.

Показанная на рис. 3 пространственно-временная диаграмма дает представление о газодинамическом сжатии плазмы. Временной отсчет идет от момента прихода ударной волны в сечение, которое пересекает луч оптической системы (сигнал фотодиода 5 на рис. 1), а пространственная координата отсчитывается от оси разряда.

Траектория ударной волны (кривая 1) построена по результатам обработки сигналов фотодиода. Временная координата левой и правой границы разряда (кривые 2 и 3) определялась по сигналу зонда в момент, когда ток становился нулевым. Пространственная координата задавалась положением зонда. Из графика видно, что скорость ударной волны практически постоянна в области разряда и за ее пределами ($X > 40 \text{ mm}$) становится меньше. По траектории левой границы 2 можно заключить, что в течение примерно $200 \mu\text{s}$ от начала процесса взаимодействия ударной волны с распадающейся плазмой окружающий холодный газ заполняет межэлектродное пространство.

О деформации проводящей области можно судить по изменению расстояния между ее левой и правой границей. Начальный размер этой области в момент $t = 0$ составляет примерно 80 mm , а в конце процесса взаимодействия $t = 220 \mu\text{s}$ сокращается почти втрое. Несмотря на то что описанный выше процесс газодинамического сжатия плазмы имеет место, появление отрицательных значений зондового тока (кривые 3, 4 и 5 на рис. 2, б) говорит, скорее, о том, что увеличение концентрации заряженных частиц вызвано наличием в плазме неких механизмов электродинамической природы.

Анализ результатов измерений позволяет сделать следующие выводы. Газодинамическое воздействие на плазму газового разряда выражается в деформации области нагретого газа и интенсивном притоке внешнего газа в межэлектродное пространство. Электрическое поле „удерживает“ заряженные частицы в межэлектродном пространстве, препятствуя их уносу ударной волной. В отсутствие электрического поля плазма сносится на расстояние, сравнимое с поперечным размером газового разряда. При взаимодействии ударной волны с распадающейся плазмой наблюдается существенное увеличение концентрации заряженных частиц за фронтом волны.

Работа поддержана грантами РФФИ № 13-08-01327 и 14-08-00525.

Список литературы

- [1] Macheret S.O., Ionikh Y.Z., Chernysheva N.V., Yalin, A.P., Martinelli L., Richard B.Miles // Phys. Fluids. 2001. V. 13. N 9. P. 2693–2705.
- [2] Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D., Garscadden A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R33–R57.
- [3] Moreau E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 605–636.

- [4] *Starikovskiy A., Aleksandrov N.* // Aeronautics and Astronautics. InTech, 2011. P. 55–96.
- [5] *Басаргин И.В., Мишин Г.И.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 7. С. 198–203.
- [6] *Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистякова М.В.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 10. С. 54–57.
- [7] *Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистякова М.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 15. С. 12–15.
- [8] *Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистякова М.В.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 10. С. 10–13.
- [9] *Басаргин И.В., Васильев А.П.* Зондовые измерения в свободном тлеющем разряде в воздухе при средних давлениях. Препринт ФТИ № 1643. 1995.
- [10] *Очкин В.Н., Савинов С.Д.* // ЖПС. 1978. Т. 3. С. 408–412.