

03:04:12

## Перестройка структуры ударной волны в плазме затухающего разряда

© А.С. Барышников, И.В. Басаргин, Е.В. Дубинина, Д.А. Федотов

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

Поступило в Редакцию 17 декабря 1996 г.

В работе изучается изменение структуры ударной волны в плазме затухающего разряда с числом Маха от 1.2 до 2. Предложен оригинальный метод исследования перестройки структуры ударной волны в нестационарных условиях. Определены времена протекания основных процессов, ответственных за возникновение эффекта.

Хорошо известен эффект перестройки структуры ударной волны в плазме тлеющего разряда [1–3]. Наряду с основным скачком плотности, амплитуда которого падает в плазме, появляются дополнительные области резкого повышения давления и плотности. Понимание физического механизма возникновения эффекта позволило бы найти способы предсказания и управления им. В данной работе изучается структура ударной волны с числом Маха ударной волны в разряде от 1.2 до 2. Анализ ее позволил продвинуться в понимании физического механизма эффекта для ударной волны умеренной интенсивности. Если механизм ясен, определение основных характеристик эффекта для сильных ударных волн не представляется затруднительным.

В настоящее время имеется ряд гипотез о природе физического механизма. Схематично их можно разделить на чисто электродинамические [3,4], объясняющие эффект только наличием заряженной компоненты и, прежде всего, электронов, и физико-химические гипотезы [5], которые для объяснения используют сложную физико-химическую кинетику превращения тяжелых частиц в плазме. Чтобы разобраться в сложной картине эффекта, заметим, что, как правило, различные по природе процессы в нестационарных условиях имеют различные временные масштабы своего протекания. Изучая весь спектр характерных времен перестройки структуры, можно сделать заключение

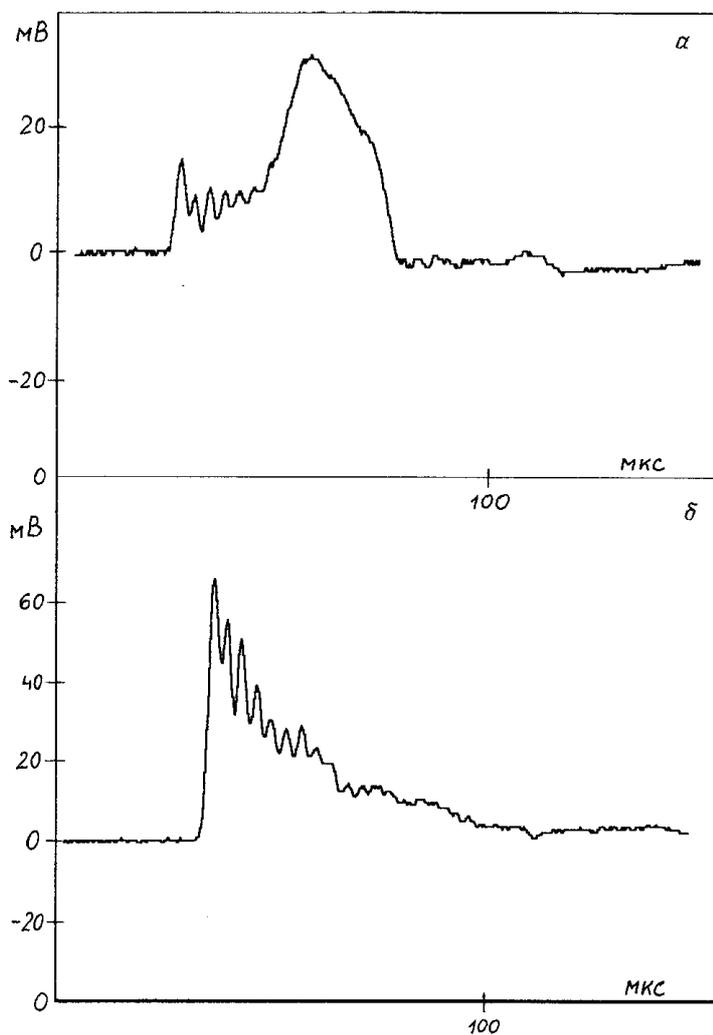
об основных процессах и основных компонентах, ответственных за возникновение эффекта.

Нестационарные условия в эксперименте создаются отключением внешнего источника питания. При этом последовательно через определенное время исчезают компоненты: электронная, озон, возбужденные атомы — и образуется исходный состав воздуха. Время затухания есть сумма времени задержки запуска ударной волны и времени распространения до исследуемой пространственной точки. В каждой серии экспериментов увеличивается время задержки. Каждый раз после увеличения времени затухания проводится изучение структуры ударной волны. Изучаются как амплитуда пиков структуры, так и амплитуды гармоник структуры после разложения ее в ряд Фурье. В работе [6] исследовалось только изменение амплитуды 1-го пика при максимальной скорости ударной волны. Анализ усложняется тем, что приходится обрабатывать большой объем информации, так как на каждом промежутке времени в обработку поступают результаты отдельного эксперимента. Анализ проводится на персональной вычислительной машине с помощью хорошо известных математических методов обработки экспериментальной информации [7].

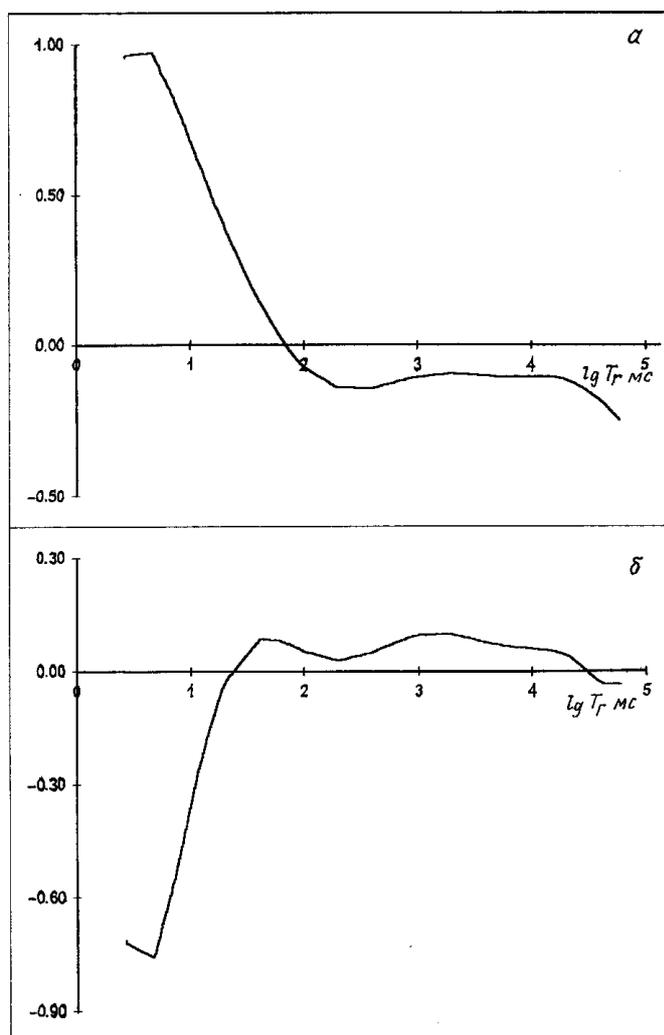
На рис. 1 и 2 показаны характерное распределение давления в ударной волне в тлеющем разряде (рис. 1, *a*) и распределение давления в воздухе без разряда (рис. 1, *b*), а также изменение амплитуды 1-й и 2-й гармоник разложения распределения в ряд Фурье в зависимости от времени затухания (рис. 2, *a* и *b*).

Самый важный результат следующий: время перехода от распределения (рис. 1, *a*) до установления распределения (рис. 1, *b*) составляет примерно 100 с. Такое большое время установления говорит о том, что чисто электродинамические гипотезы не могут объяснить изучаемый эффект, так как по оценкам время падения концентрации заряженных компонент на два порядка для изучаемого режима составляет не более 2 мс [8]. Вместе с тем на временах порядка десятков секунд еще существуют долгоживущие возбужденные состояния атомов и молекул, достаточно большая концентрация которых поддерживается вторичными процессами образования их в газе [8]. Известно, что радиационное время некоторых метастабильных состояний кислорода измеряется часами [9].

Второе характерное время, которое удалось точно идентифицировать: 10 мс. Именно на этом времени затухания разряда происходит



**Рис. 1.** Структура распределения давления в ударной волне (воздух, скорость ударной волны 625 м/с, давление 33 Тор): *a* — в плазме тлеющего разряда (напряжение на электродах 650 В, ток разряда 1.0 А); *б* — в воздухе без разряда на том же режиме.



**Рис. 2.** Амплитуда первой ( $\alpha$ ) и второй ( $\delta$ ) гармоники разложения в ряд Фурье распределения давления в ударной волне в зависимости от времени затухания разряда.

резкое изменение второй гармоники разложения в ряд Фурье. Амплитуда гармоники уменьшается на порядок (рис. 2, б). Надо заметить, что при данном давлении в плазме перед ударной волной 33 Тор это время совпадает с характерным временем дезактивации большинства возбужденных состояний в затухающем разряде [8]. Резкое уменьшение амплитуды второй гармоники с сохранением первой означает, что в профиле распределения давления в волне на порядок падает глубина провала давления после первого "горба" давления. Распределение переходит от "двугорбого" к почти "одногорбому".

Кроме указанных существуют еще ряд промежутков времени, на которых происходит уменьшение амплитуды гармоник, но не столь резкое, как для времени 10 мс. Можно предположить, что они отражают вторичные процессы образования возбужденной компоненты, после протекания которых концентрация возбужденных компонент резко снижается и эффект теряется. Проведенные исследования позволяют в дальнейшем обосновать конкретный механизм, объясняющий эффект.

В заключение авторы считают своим долгом выразить признательность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку проведенных исследований, грант № 96-01-00533.

## Список литературы

- [1] Басаргин И.В., Мишин Г.И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 4. С. 209–215.
- [2] Горшков В.А., Климов А.И., Коблов А.Н., Мишин Г.И., Федотов К.В., Явор И.П. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 10. С. 1893–1898.
- [3] Басаргин И.В., Мишин Г.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 8. С. 55–60.
- [4] Мишин Г.И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 5. С. 274–278.
- [5] Varyshniko A.S. Intensive plasma energy release behind a shock wave and flow patterns. In: Rarefied gas dynamics / Ed. by Beylich A.E. Proc. 17th Int. Symp. on Rarefied Gas Dynamics. VCH. Weinheim–N.Y.–Basel–Cambridge, 1991. P. 263–270.
- [6] Басаргин И.В., Мишин Г.И. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 7. С. 198–207.
- [7] Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М.: ГИЗФМЛ, 1961. 542 с.
- [8] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 535 с.
- [9] Радциг А.А., Смирнов Б.М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.