

02;03;04

Характеристики распространения динамического состояния в струе капиллярного разряда

© С.Е. Емелин, А.Л. Пирозерский, В.С. Семенов, Г.Е. Скворцов

Научно-исследовательский институт физики
С.-Петербургского государственного университета

Поступило в Редакцию 12 мая 1997 г.

Работа посвящена изучению так называемого динамического состояния метастабильного вещества, характеризующегося возникновением в возбужденном веществе неравновесного энергетического взаимодействия (взаимообмена) на основе различных волн. Используя интенсивность оптического излучения для анализа динамического состояния исследовано распространение его переднего и заднего фронтов. Найдены ряд характеристик распространения и собственные формы в виде уединенных волн, имеющих сходство с волнами ионизации, что позволило сделать предположение о сущности исследуемого процесса. Наблюдавшиеся эффекты важны для установления физических условий образования вещества шаровой молнии, а также интересны для физики пламени, электрического пробоя, электрических пятен.

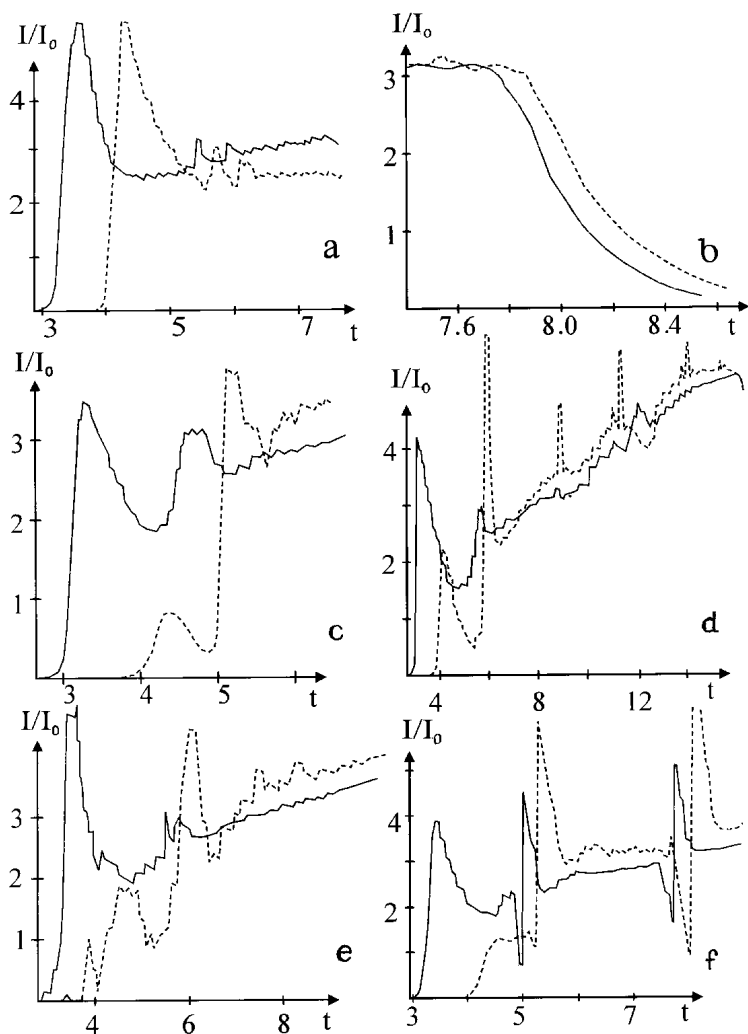
В работе [1] показано, что в метастабильном веществе струи капиллярного разряда возникает динамическое состояние, индуцируемое воздействием плазмогенератора и распространяющееся по струе со значительной скоростью. Величина скорости около выходного отверстия разрядника оценивалась по задержке характерных возмущений на временной зависимости сигнала зондирующей СВЧ аппаратуры. В качестве источника возмущений использовались скачки параметров, связанные с низкочастотными нелинейными колебаниями тока. Для исследования удаленных от разрядника частей струи методика, применявшаяся в [1,2], была изменена, так как вне области интенсивных выносных токов возмущения, создаваемые колебаниями тока, малы, прохождение струи через отверстия волновода сопровождается возникновением дополнительных возмущений, а большие размеры волновода определяют низкое пространственное разрешение. Поэтому в данной работе в качестве источников сильных возмущений использовались фронты импульса тока,

а состояние возбужденного вещества и его динамика анализировались по временной зависимости интенсивности излучения в диапазоне $0.3\text{--}1\ \mu\text{m}$, аналогично [3–5]. Характеристики распространения определялись при сравнении синхронных осциллограмм сигналов двух датчиков (см. рисунок, $a\text{--}f$), разнесенных вдоль струи на $15\ \text{mm}$.

Эрозионный генератор включал в себя разрядник из полиэтилена с каналом длиной $l_c = 20\ \text{mm}$ и диаметром $d_c = 1.8\text{--}2.0\ \text{mm}$, медный торцевой электрод диаметром $d_c = 1.4\ \text{mm}$, дроссель $L = 0.5\ \text{mH}$, ограничительное сопротивление $R = 200\ \Omega$, накопитель $C = 0.2\ \text{mF}$, постоянная времени схемы $\tau_{sch} = L/R = 2.5\ \mu\text{s}$. Начальное напряжение накопителя $U_s = 1.3\text{--}1.6\ \text{kV}$, напряжение обрыва тока $U_e \sim 1.25\ \text{kV}$.

Появление сигналов измерительной аппаратуры происходит с задержкой, обусловленной не только временем перемещения переднего фронта состояния до датчиков, но и временем установления динамического режима. Для исследования стадий переходного процесса был проведен дополнительный эксперимент, в котором осуществлялось принудительное прекращение разряда в выбранный момент времени путем закорачивания электродов разрядника механическим программным устройством. Фотографировались осциллограммы сигнала датчика оптического излучения из канала, тока и напряжения разряда, фиксировалась на медной фольге последовательность (развертка) автографов смещающихся и трансформирующихся электродных пятен аналогично [2]. Сопоставляя эти данные, определяли комплекс параметров, включающий интенсивность оптического излучения и постоянную времени ее затухания после отключения тока, диаметр и удельное сопротивление разрядного объема и др., анализировался процесс кернообразования. В этом эксперименте было выяснено, что в процессе установления, начинающемся с расконтрагирования разряда и длящегося от десятых долей до единиц миллисекунд ($d_c = 1.4\text{--}5.0\ \text{mm}$), постоянная времени затухания излучения возрастает примерно на два порядка и далее изменяется слабо. Интенсивность излучения и удельное сопротивление разрядного объема ведут себя аналогично.

При распространении переднего фронта динамического состояния сигналы электрического зонда и датчика излучения, расположенных рядом, появляются одновременно. При длине светящейся части струи в конце импульса $\sim 10\text{--}15\ \text{cm}$ скорость фронта по излучению, определенная в $55\ \text{mm}$ от разрядника по задержке сигнала второго датчика



Зависимость интенсивности излучения в диапазоне $0.3-1 \mu\text{m}$ (в относительных единицах) от времени (в ms) на расстоянии от разрядника 47.5 mm — сплошная линия, 62.5 mm — пунктир. Начальное напряжение накопителя $U_s = 1.35$ kV (a, b), $U_s = 1.5$ kV (c), $U_s = 1.6$ kV (d-f).

относительно сигнала первого (см. рисунок, *a, b*), $V_1 \sim 15$ m/s. Она уменьшается с ростом диаметра канала и, по-видимому, близка к скорости движения вещества. Начало светящегося участка струи (10–15 mm) состоит из яркой фронтальной части и задней части с плавным понижением яркости. Наличие крутого переднего фронта, соседствующего с резким максимумом излучения, указывает на накопление возбуждений, поток которых движется от генератора быстрее вещества и отражается от границы плазмоподобного состояния, а также на лидерный характер перемещения этой границы.

С повышением начального напряжения U_s до 1.5 kV наблюдается нарастание интенсивности излучения в течение импульса (см. рисунок, *c*), по достижении струей около половины максимальной длины за лидером образуются провал интенсивности и последующий подъем. За 15 mm пути до второго датчика из них формируется новый, задержанный и видоизмененный лидер, а старый, по-видимому, вследствие лишения энергетической подпитки, диссипирует. Благодаря этому распространение проводящего, плазмоподобного состояния приобретает ступенчатый характер [6]. Аналогичные эффекты, происходящие на удалении от фронта, дают пики усиления интенсивности излучения на порядок короче (см. рисунок, *d*), которые могут выходить за передний фронт (см. рисунок, *e*). Некоторые из них сопряжены с расположенным впереди пиком уменьшения излучения — областью "тени" (см. рисунок, *f*). По нашему мнению, это указывает на увлечение уединенными волнами выделенных возбуждений, фрагментов возбужденного вещества и возникновение на их основе энергетически более плотных объектов, поглощающих возбуждения, движущихся с увеличенной в несколько раз скоростью и способных некоторое время автономно поддерживать свое состояние.

Завершающая фаза разряда характеризуется резким обрывом тока через разрядник и релаксацией плазмоподобного состояния метастабильного вещества. Постоянная времени затухания оказалась существенно разной для разных параметров. Быстрее всех релаксирует электрический потенциал струи (длительность фронта изменения потенциала в [1] не более 30 ns), далее следует СВЧ отражение (не более 10 μ s в отсутствие дополнительных возмущений, например акустических) и оптическое излучение (более 0.3 ms, см. рисунок, *b*).

Задержка начала релаксации излучения (см. рисунок, *b*) растет с удалением от разрядника, а определяемая из нее скорость заднего

фронта динамического состояния V_2 падает до 150 m/s в 55 mm от разрядника и до 40 m/s в 10 mm от фронта лидера.

Приведенные экспериментальные результаты подтверждают, что в метастабильном веществе струи капиллярного разряда устанавливается особое состояние, названное в [1] динамическим. В некоторых режимах оно приводит к значительному удлинению светящейся части струи, выносу тока и кернообразованию, появлению у нее некоторых внешних признаков возбужденного конденсированного состояния: устойчивости формы и способности выделять энергию в металле, разрушаясь при ударе о мишень. Это состояние, индуцированное плазмогенератором, наблюдается лишь в подвижных формах, и, следовательно, имея волновую природу, связано с возникновением условий для существования слабозатухающих волн различного типа. Их интенсивное возбуждение активизирует явления переноса, устанавливая в метастабильном веществе неравновесный энергетический обмен, имеющий выделенное направление потока энергии — от генератора. Обнаруженные в исследованном режиме собственные формы динамического состояния в виде уединенных волн движутся от генератора со скоростью, превышающей в несколько раз скорость вещества, но вместе с тем значительно меньшей скорости звука. Они похожи на волны ионизации и в то же время существуют на фоне эффектов энергонакопления, характерных для метастабильного вещества на основе деструктурированного в сильнонеравновесных условиях металла или полимера. Это придает им сходство с автоволнами в активных средах, поэтому в [7] они названы волнами возбуждения. Нелинейные эффекты, сопровождающие их распространение и ответственные за преобразование структурно-энергетических состояний, способны привести к волновой самофокусировке, что может объяснить концентрическую структуру струи [2].

Список литературы

- [1] Емелин С.Е. и др. // ПЖТФ. 1996. Т. 22. В. 24. С. 21–24.
- [2] Емелин С.Е., Семенов В.С. и др. // Шаровая молния в лаборатории: Сб. М.: Химия, 1994. С. 87–95.
- [3] Кропочев В.В., Манькин Э.А. и др. // Там же. С. 211–217.
- [4] Авраменко Р.Ф. и др. // Исследования электрических разрядов в атмосфере: Сб. Ярославль: ЯрГУ, 1991. С. 74–84.

- [5] *Туммерман Л.А., Чаянов Б.А.* // Исследования по экспериментальной и теоретической физике. Сб. М.: АН СССР, 1959. С. 231–243.
- [6] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [7] *Емелин С.Е., Семенов В.С., Бычков В.Л.* и др. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 3. С. 19–28.