

На рис. 2 изображен объект, который использовался в экспериментах по записи и ассоциативному считыванию безопорной псевдоглубокой голограммы, а также фотография изображения, восстановленного этой голограммой в случае, когда реконструкция осуществлялась левой частью объекта, имеющей вид длинной полоски. Как видно из рисунка, ассоциативные свойства голограммы проявились на эксперименте весьма определенно. Левая часть объекта („полоска“) восстановила весьма четкое изображение правой его части („пунктира“).

Как это и следует из принципа действия псевдоглубокой голограммы, все, не относящееся к изображению, лучи, соответствующие явлениям интермодуляции и сопряженным изображениям, уведены вверх и вниз от линии объекта. Сама линия объекта свободна от шумов, за исключением области, непосредственно прилегающей к освещенной части объекта, с помощью которой осуществляется реконструкция.

Эксперимент проявил также и другую особенность ассоциативной псевдоглубокой голограммы – ее чрезвычайно высокую чувствительность к сдвигу и наклону, что и обусловило необходимость проявлять голограмму непосредственно на том месте, где она была записана. Оказалось, например, что восстановленное изображение полностью исчезает при повороте вокруг оси  $y$  (см. рис. 1) на угол, равный  $5'$ .

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Д е н и с ю к Ю.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 8. С. 84–89.  
[2] V a n Н e e r d e n Р. J. // Appl. Opt. 1963. V. 2. N 4. P. 393–400.

Поступило в Редакцию  
18 мая 1989 г.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 14 26 июля 1989 г.  
04

#### ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ДОЛГОЖИВУЩИХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Ю.К. К у р и л е н к о в, Е.Т. П р о т а с е в и ч

Целью работы является экспериментальное моделирование долгоживущих плазменных образований (ДПО). Обсуждаются полученные результаты и возможная схема возникновения и существования некоторого класса таких состояний в эксперименте и в природных

условиях [1-3]. Эксперимент проводился по схеме емкостного ВЧ-разряда в кварцевых колбах ( $d \sim 7.2$  см,  $l \sim 37.5$  см) при давлениях 0.1-3.0 кПа [4, 5]. Методика эксперимента состояла в следующем. Сначала в сухом воздухе поджигался ВЧ-разряд ( $W \sim 40$  кВт,  $f = 37$  МГц,  $\tau = 10-60$  мс,  $F = 1-5$  Гц). При достижении концентрации плазмы  $n_i > 10^{14}$  см $^{-3}$  в колбу подавалась в проточном режиме рабочая смесь (воздух + пары воды, близкие к насыщению). Скорость подачи контролируемого количества смеси (через штуцер в торце колбы) не превышала  $\sim 5$  м/с. Исходная плазма сухого воздуха имела параметры  $T_e \sim 5 \cdot 10^3$  К,  $T \sim (1.0-1.2) \cdot 10^3$  К.

В результате поступления воды ВЧ-разряд уменьшался в объеме и стягивался в область кольцевых электродов, меняя при этом цвет с белого на голубоватый. При повышении мощности, поступающей в разряд, до  $\sim 20$  Вт/см $^3$ , был обнаружен воспроизводимый режим, в котором в месте контакта исходной плазмы с набегающим потоком водяного аэрозоля возникало и разрасталось в объеме ярко оранжевое образование (ДПО или плазмод). ДПО имело квазисферическую форму с резко очерченной границей раздела и характерный диаметр  $2 \approx 2.5$  см. Время жизни ДПО оценивалось как по его свечению с помощью скоростной фотосъемки, так и путем сопоставления с периодом следования ионизирующих ВЧ-импульсов ( $1/F$ ). Оно оказалось аномально большим  $\sim 0.4-5.0$  с. Плазмод легко увлекался потоком воздуха, поступающим в колбу с дисперсной фазой, перемещаясь к центру разрядной трубки со скоростью  $\sim 0.5-1.0$  м/с. ДПО регулярно воспроизводились в опытах при выполнении условий максимального охлаждения первичной плазмы, в частности при средней концентрации молекул воды  $N \sim (1.75-3.00) \times 10^{19}$  см $^{-3}$  [4]. ДПО сохраняли свою форму и размеры и не смешивались с первичной плазмой ВЧ-разряда или окружающим воздухом. Пример сформировавшегося ДПО в межэлектродном промежутке показан на рис. 1.

Анализ результатов фотосъемки ДПО в разные моменты времени позволяет получить представление о пространственно-временной эволюции областей одинакового почернения фотоматериалов. Соответствующие качественные зависимости интенсивности почернения пленки  $I(r)$  (рис. 2), не связанные однозначно с яркостной температурой плазмы и ДПО, обсуждаются в заключение.

О механизме возникновения ДПО. Полученные опытные результаты трудно объяснить в рамках традиционных представлений. Предположим, что главную роль в процессе возникновения и формирования ДПО играет вода и продукты ее разложения каким-либо внешним источником энергии. Рассмотрим возможные следствия этого единственного основного предположения и качественную эволюцию процесса во времени и пространстве, полагая, что воздушная среда является пока второстепенным фоном, а пары воды близки к насыщению, например, при нормальных температуре и давлении в атмосфере.



Рис. 1. Внешний вид ДПО в плазме ВЧ-разряда.

Известно, что по прошествии некоторого времени после энергетического воздействия на влажный воздух заряженные частицы в системе будут представлены в основном ионами оксония  $H_3O^+$  и гидроксильной группы  $OH^-$  [6, 7]. Учитывая, что КПД плазмохимического разложения воды может составить 20-40% [7], наиболее вероятно разрушение части молекул  $H_2O$  с прилипанием оставшихся к ионам, т.е. образование ионных комплексов типа  $H_3O^+ \cdot H_2O$  и  $OH^- \cdot H_2O$ . Таким образом, в окрестностях границы среда-источник ионизации (например, влажный воздух-плазма) на определенном этапе возникает холодная ионная плазма ( $n_i \sim 10^{16}$ ,  $10^{17}$  см $^{-3}$ ,  $T \sim 300-500$  K), начинающая рекомбинировать.

Однако в рассматриваемой газовой фазе при таких малых  $T$  рекомбинация ионов может быть существенно замедлена по ряду причин. Во-первых, усредненная по ансамблю частиц вероятность подбарьерного перехода валентного электрона от  $OH^- \cdot H_2O$  в поле  $H_3O^+ \cdot H_2O$  крайне мала из-за большой величины потенциального барьера (энергия сродства радикала  $OH$  к электрону  $\sim 1.83$  эВ, а электронная оболочка  $2p^6$  в  $OH^-$  заполнена). Во-вторых, малые тепловые скорости сталкивающихся ионов делают невозможным и отрыв протона  $H^+$  от  $H_3O^+ \cdot H_2O$  (энергия связи к протону  $\sim 7.18$  эВ) по схеме рекомбинации аналогичных ионов, например, при радиолитической воде в жидкой фазе [6]. В результате значительная часть разноименных ионов при сближении может образовать в воздухе долгоживущие (нерекombинирующие на межионных расстояниях, соответствующих минимуму потенциальной энергии) ионные пары  $H_2O \cdot H_3O^+ \dots OH^- \cdot H_2O$ , напоминающие состояния дипольных

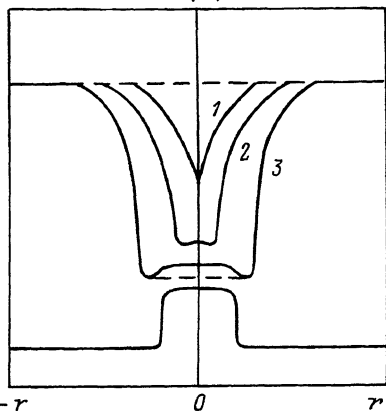
$I(r)$ 

Рис. 2. Распределения интенсивности свечения плазмы ВЧ-разряда при образовании ДПО в различные моменты времени (см. пояснения в тексте).

молекул с ионной связью (типа  $CsCl$  [9]). Замедленная рекомбинация ионов и преобладание в пространстве, занятом ионными продуктами разложения воды, сил притяжения (из-за взаимодействий заряд-заряд, диполь-заряд и диполь-диполь)

будут способствовать тому, что начнется стягивание частиц в сгусток существенно меньших объемов, чем первоначальный. При этом в центре сгустка за счет частиц, поступающих с периферии, и вытеснения воздуха возникнет и будет разрастаться по радиусу „ядро” холодной и более плотной сильносвязанной плазмы, состоящей из  $H_3O^+ \cdot H_2O$ ,  $OH^- \cdot H_2O$  и их ионных квазимолекул ( $n_i \sim 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ ; поскольку  $T$  мала, то параметр неидеальности в такой плазме может быть

$\gamma = e^2 n_i^{1/3} / T \geq 1$  [8, 9]). Максимальные  $n_i$  достигаются в несколько аналогичных этапов.

Однако и в „ядре” рекомбинация может стать заметной не сразу. Из-за действия квазистатических электрических микрополей плазмы ( $\sim 10^6-10^7 \text{ В/см}$ ), а также полей диполей (включая  $H_2O$ ), часть высоковозбужденных дискретных состояний, на которые осуществляется захват электронов при рекомбинации, может отсутствовать [10, 11]. При рассматриваемых малых  $T$  узкая область примыкающих к континууму указанных состояний, существенных для захвата электрона при рекомбинации, может целиком поглотиться при увеличении  $n_i$  областью нереализации дискретных уровней ( $\Delta E/T \sim 4\gamma$ ). В результате рекомбинация ионов окажется почти приостановленной, несмотря на большие значения  $n_i$ . Оценки показывают, что эффективный коэффициент рекомбинации  $\alpha^*$  в этом случае может составить  $\leq 10^{-18}-10^{-19} \text{ см}^3/\text{с}$ , а увеличение  $n_i$  не обязательно означает рост скорости рекомбинации [11].

Медленная в целом рекомбинация носит ион-ионный характер, и поскольку  $H_3O^+ \cdot H_2O$  и  $OH^- \cdot H_2O$  являются окислителем и восстановителем соответственно, химическая реакция с их участием означает процесс горения, продуктом которого является вода. Таким образом, активное вещество ДПО, содержащее горючее и окислитель, связано взаимодействием зарядов и диполей, напоминая диссоциированную на ионы гремучую смесь с удельным энергозапасом  $\sim 0.1-10 \text{ Дж/см}^3$ . Он может варьироваться для различных ДПО и будет определяться критической плотностью  $n_i^*$ , при которой начавшееся заметное горение и прогрев активного веществ-

ва стабилизирует коллапс зарядов и диполей под действием сил притяжения. Важно, что горение осуществляется в пульсирующем режиме, поскольку существует способствующая устойчивости горения обратная зависимость коэффициента ион-ионной рекомбинации и температуры  $\alpha^* \sim T^{-k}$  ( $k \approx 3/2-5/2$ ). Увеличение температуры замедляет рекомбинацию, что приводит к уменьшению выделения энергии в ДПО (и наоборот). В результате будет иметь место квазистационарное стабильное горение, заканчивающееся спокойным исчезновением ДПО при полном медленном выгорании  $\text{OH}^-$  или взрывом гремучей смеси (из-за случайного перегрева, детонации, развития цепной реакции и т.п.).

Ион-ионная рекомбинация, сопровождающаяся суммарным выделением  $\sim 7$  эВ на пару ионов, происходит с участием третьих частиц (молекулы воды, компоненты воздуха и примеси, другие продукты химического взаимодействия). Поэтому основным механизмом, ответственным за свечение ДПО, по-видимому, является рекомбинационная люминесценция. При этом излучение носит существенно неравновесный характер, заметно превышая тепловое излучение ДПО. Интенсивность хемилюминесценции, включая свечение и вне видимой области спектра (в частности, в ближнем УФ за счет полос  $\text{OH}$ ) может быть переменной во времени вследствие отмеченного выше пульсирующего режима горения активного вещества ДПО. Форма, устойчивость, радиоизлучение, электрические свойства и другие особенности ДПО [1-3] также могут быть объяснены в предположении, что активным веществом в ряде случаев является частично диссоциированная холодная неидеальная ионная плазма.

Таким образом, ДПО при нормальных условиях может представлять собой своеобразный переменный по плотности не полностью диссоциированный воздушный электролит ( $n_i \sim 10^{18}-10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). Воздух в ДПО по отношению к активному веществу ( $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}^- \cdot \text{H}_2\text{O}$  и их квазимолекулы) играет роль не растворителя, как вода в жидком электролите, а некоторого меняющегося по плотности фона, оказывающего на свойства образования может быть и важное, но лишь ограниченное влияние, требующее отдельного анализа. Отметим, что предлагаемая плазмохимическая концепция развивает ряд соображений, обсуждавшихся ранее в первую очередь авторами работ [8, 1].

Заключение. Вернемся к опытным данным по ВЧ-разряду во влажном воздухе. Формирование ДПО оказывается возможным при разных давлениях среды, в частном случае - примерно на два порядка меньше атмосферного. Поэтому  $n_i^*$  составляет  $\sim 10^{16}-10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Разложение воды происходит на границе с плазмой ВЧ-разряда, в дальнейшем заряженные продукты разложения воды стягиваются, образуя холодную область (рис. 2, кривая 1). В ее центре, где значение  $n_i$  станет максимальным, может начаться слабое горение, необязательно заметное по интенсивности (кривая 2), а сам плазмод, увлекаемый потоком воздуха, продвинется в межэлектродное пространство. В результате на фоне интенсивного

излучения плазмы ВЧ-разряда ДПО может восприниматься как оптически непрозрачная область (рис. 1; рис. 2, кривая 3). Его собственное неравновесное свечение становится заметным лишь после рекомбинации воздушной плазмы при выключении разряда (кривая 4), визуально напоминая солнце на закате.

Предложенная интерпретация эксперимента носит гипотетический характер, очевидно, не являясь вполне однозначной и исчерпывающей. Количественное сопоставление и уточнения требуют дальнейших измерений, совершенствования диагностики и развития самой физической модели. Возможно, что рассмотренные эксперимент и схема формирования ДПО окажутся полезными и для лучшего понимания ряда природных явлений в атмосфере, в частности, возникновения и распада шаровых молний [1, 2], описания особенностей их свечения в различных спектральных интервалах, включая модуляцию интенсивности излучения (см., например, рис. 2.5, 2.6, 5.3 в [3]) в ненаблюдаемой области спектра и др.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] С та х а н о в И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [2] С м и р н о в Б.М. Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988.
- [3] Б а р р и Дж. Шаровая молния и чёточная молния. М.: Мир, 1983.
- [4] Г р и г о р ь е в В.П., П р о т а с е в и ч Е.Т., Т о л м а ч е в В.И. // ХВЭ. 1988. Т. 22. С. 78.
- [5] П р о т а с е в и ч Е.Т. // ПТЭ. 1986. № 5. С. 152.
- [6] П и к а е в А.К. Современная радиационная химия. М.: Наука, 1986.
- [7] Р у с а н о в В.Д., Ф р и д м а н А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.
- [8] Б и б е р м а н Л.М., Н о р м а н Г.Э. // ТВТ. 1969. Т. 7. С. 822.
- [9] З е й г а р н и к В.А., К о б з е в Г.А., К у р и л е н к о в Ю.К., Н о р м а н Г.Э. // ТВТ. 1972. Т. 10. С. 693.
- [10] К о б з е в Г.А., К у р и л е н к о в Ю.К., Н о р м а н Г.Э. // ТВТ. 1977. Т. 15. С. 193.
- [11] К у р и л е н к о в Ю.К. // ТВТ. 1980. Т. 18. С. 1312.

Поступило в Редакцию  
25 апреля 1989 г.