

04;07;09;12

## Разновидности свечения ВЧ разряда в зависимости от влажности воздуха

© Е.Т. Протасевич

(Поступило в Редакцию 13 сентября 2004 г.)

Получены фотографии свечения ВЧ разряда, позволяющие сделать вывод о том, что различия в форме светящегося образования связаны с содержанием в нем паров воды.

В настоящее время наблюдается реанимация исследований, посвященных демонстрации плазмоидов во влажном воздухе [1,2], которые в методическом отношении фактически повторяют опыты Планте и Вебера 120-летней давности [3]. Так, Вебер отмечал, что „шар был ярко окрашен и передвигался вблизи поверхности воды. . . , цвет и интенсивность могли изменяться при изменении материала электрода и величин приложенного напряжения“, что полностью совпадает с выводами работ [1,2].

В данном сообщении обращается внимание на те различия, которые возникают в форме свечения ВЧ разряда в зависимости от содержания в нем паров воды. Подробная схема экспериментов описана в [4–7]. Отметим лишь, что разряд излучался в кварцевых трубках диаметров 7.2 см и длиной 35 см преимущественно при давлениях 133–4000 Па. Ионизация смеси (воздух+H<sub>2</sub>O) осуществлялась ВЧ полем на частотах 36 . . . 37 МГц, режим работы генератора импульсный ( $t = 10 \dots 60$  ms,  $F = 1 \dots 5$  Hz), пределы регулирования ВЧ мощности от 5 до 60 kW.

Для понимания физической природы плазменного образования принципиально важным является рассмотрение формы ВЧ разрядов в зависимости от концентрации паров воды в смеси (воздух+H<sub>2</sub>O). На рис. 1 показано типичное свечение разряда, когда в качестве исследуемой среды служил воздух при давлениях 133 . . . 4000 Па. Из рис. 1 видно, что даже без предварительной сушки воздуха свечение занимает весь разрядный объем. При этом однородность по концентрации электронов плазмы вдоль разрядной трубки зависит от ее длины, и при переходе от одной к двум (и более) парам внешних кольцевых электродов на практике легко можно получить плазму с длинной разрядной трубки, большей или равной 1 м.

Однако по мере введения в разряд паров воды область свечения плазмы стягивается в зону размещения внешних кольцевых электродов, как это показано на рис. 2. При этом существует оптимальная концентрация молекул H<sub>2</sub>O, которая обеспечивает максимальное охлаждение плазмы [4], в результате чего удается получить свечение в форме „диска“ с резко очерченной границей раздела между разрядом и окружающей средой. В обоих случаях мы имеем дело с квазистационарным разрядом, когда ВЧ поле длительное время ионизирует смесь

(воздух+H<sub>2</sub>O), т.е. от долей секунды до нескольких минут или даже часов.

При быстрой же подаче воды в ВЧ разряд в результате сложного комплекса плазмохимических реакций [4,8] происходит разложение в разряде молекул H<sub>2</sub>O, наблюдается частичное охлаждение плазмы [9,10] и из верхней части разряда происходит отрыв более „горячего“ сгустка плазмы, который под действием силы Архимеда всплывает наверх. Для регистрации этого процесса в разрядной трубке была предусмотрена специальная вертикальная секция. Один из таких сгустков показан на рис. 3. Формы и размеры такого сгустка сильно зависят



Рис. 1. Свечение плазмы ВЧ разряда в сухом воздухе при давлении приблизительно 1 кПа.

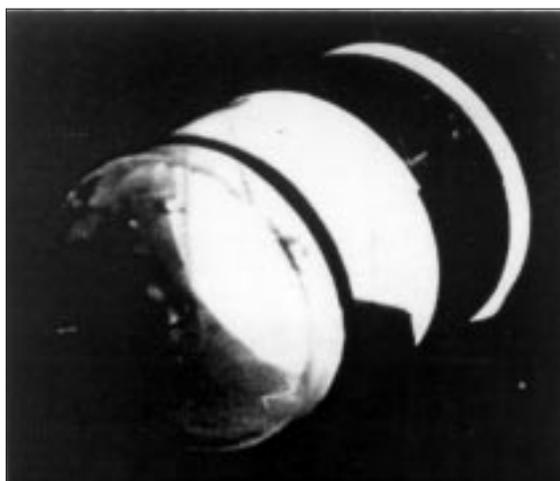
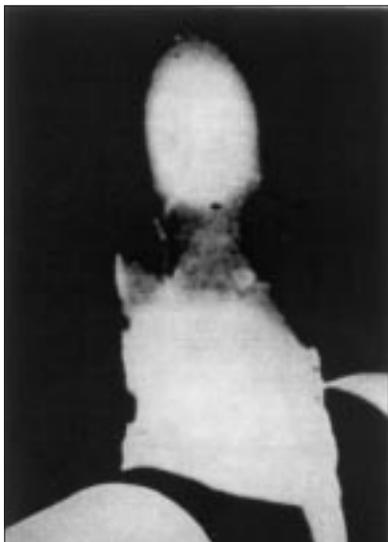


Рис. 2. Плазменный „диск“ ВЧ разряда, полученный при выполнении условия  $0.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1} < N/p < 3.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , где  $N$  — концентрация молекул воды,  $p$  — полное давление неионизированной смеси (воздух+H<sub>2</sub>O). Режим максимального охлаждения плазмы.



**Рис. 3.** Отрыв сгустка „горячей“ плазмы от основной части разряда. Случай низкой концентрации паров воды в разряде.  $N/p < 0.1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot \text{Па}^{-1}$ .



**Рис. 4.** Свечение ВЧ разряда, когда  $N/p > 5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot \text{Па}^{-1}$ . Максимальное охлаждение плазмы не достигнуто.



**Рис. 5.** Внешний вид квазисферического сгустка холодной неравновесной плазмы ВЧ разряда.

от концентрации молекул воды в разряде и от того, в каком виде они поступают в разрядный объем. При подаче водного аэрозоля наблюдаются испарение капель воды и образование пара. В этом случае образование сгустка квазисферической формы, подобного тому, что

представлен на рис. 3, хорошо регистрируется с помощью кино- и фотосъемки.

Необходимо отметить что при концентрации первичной плазмы  $n < 10^{14} \text{ см}^{-3}$  характер свечения разряда также отличается от трех рассмотренных выше. Присутствие в разрядном объеме молекул  $\text{H}_2\text{O}$  резко снижается степень ионизации воздуха и свечение приобретает вид, представленный на рис. 4. Из сравнения всех приведенных фотографий следует, что в этом случае разряд, строго говоря, не перестает быть объемным и средняя концентрация частиц в нем не превышает  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  (согласно оценке, произведенной с использованием СВЧ интерферометрии в трехсантиметровом диапазоне волн).

И наконец, пятый и, пожалуй, самый интересный для моделирования случай свечения разряда во влажном воздухе получается, когда в первичную плазму с концентрацией  $n > 10^{14} \text{ см}^{-3}$  поступает водяной пар с концентрацией молекул  $\text{H}_2\text{O}$ , близкой к той, что соответствует условиям оптимального охлаждения плазмы. Свечение этого вида представлено на рис. 5. В этом случае при концентрации паров, близкой к оптимальной, формируется сгусток холодной неравновесной плазмы квазисферической формы с резкой границей раздела между холодной плазмой окружающей среды. На снимке этот сгусток представляет собой квазисферическое образование плазмы ВЧ разряда [7]. Физической природе появления такого сгустка посвящено несколько предыдущих публикаций [4–10]. К сожалению, отсутствие современного оборудования не позволяет проанализировать этот режим более основательно. По этой причине приходится лишь констатировать, что плотность плазмоида близка к плотности неионизированного воздуха, а время его жизни в  $10^3 \dots 10^6$  раз превышает время распада плазмы ВЧ разряда, характерного для предыдущих случаев, в частности для сухого воздуха. И если в первых 4 случаях время распада плазмы составляло  $10 \dots 20 \mu\text{s}$ , то в последнем, пятом, случае, когда формировался квазисферический сгусток холодной неравновесной плазмы, было равно приблизительно 1 с [7,9].

Более подробная классификация ВЧ разрядов при пониженном давлении в зависимости от параметра  $N/p$  предложена в [10]. Однако из приведенных фотографий ВЧ разряда следует, что из формы свечения плазменных образований в атмосфере при различной влажности свечения плазменных образований в атмосфере при различной влажности воздуха будут значительно отличаться друг от друга как по своим свойствам, так и по форме. Отсюда легко объясняются неудачи разработки теории или воспроизведения в лабораторных условиях таких природных явлений, как шаровая или четочная молнии и пр. Однако ключ к их разгадке лежит в изучении свойств ВЧ разрядов во влажном воздухе и анализе физико-химических процессов, сопровождающих ионизацию влажного воздуха.

## Список литературы

- [1] *Егоров А.И., Степанов С.И., Шабанов Г.Д.* // УФН. 2004. Т. 174. С. 107–109.
- [2] *Егоров А.И., Степанов С.И.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 12. С. 102–104.
- [3] *Барри Дж.* Шаровая молния и неточная молния. Пер. в англ. / Под ред. А.В. Елецкого. М.: Мир, 1983. 288 с.
- [4] *Protasevich E.T.* Cold Non-Equilibrium plasma. Generation. Properties. Applications. Cambridge: Intern. Sci. Publ., 1999. 220 p.
- [5] *Протасевич Е.Т.* // ТВТ. 1989. Т. 27. Вып. 6. С. 1206–1218.
- [6] *Копытин Ю.Д., Протасевич Е.Т., Шишковский В.И.* Воздействие лазерного и ВЧ излучений на воздушную среду. Новосибирск: Наука, 1992. 190 с.
- [7] *Протасевич Е.Т.* // ТВТ. 2002. Т. 40. № 6. С. 1000–1004.
- [8] *Григорьев В.П., Протасевич Е.Т., Бейсембаев Ж.К.* // Сиб. физ. техн. журн. 1992. № 3. С. 57–62.
- [9] *Протасевич Е.Т.* Новые явления в физике газового разряда. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2002. 120 с.
- [10] *Протасевич Е.Т., Хан В.А.* Распространение пучков электромагнитных волн через атмосферу. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1994. 209 с.