

04;09;12

Электродный СВЧ разряд пониженного давления в аргоне

© Ю.А. Лебедев, М.В. Мокеев

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН,
117071 Москва, Россия
e-mail: lebedev@ips.ac.ru

(Поступило в Редакцию 30 мая 2001 г.)

Представлено феноменологическое описание электродного СВЧ разряда в аргоне при давлениях 1–30 Торг и падающих мощностях < 300 W. Приведены результаты зондовых измерений. Показано, разряд может быть получен на конце возбуждающего штыря-антенны и имеет различные формы (например, форму шара или перемещающихся светящихся нитей). В случае шарового разряда его пространственная структура отличается большей однородностью от полученной ранее в молекулярных газах. Добавление кислорода увеличивает поглощенную плазмой мощность при неизменной падающей мощности, изменяет структуру разряда и приближает ее к структуре в молекулярных газах.

Одним из новых направлений исследований в области газовых разрядов является изучение электродных СВЧ разрядов. Сведения о них в литературе практически отсутствуют. Это вызвано тем, что основной тенденцией развития газоразрядных источников плазмы является стремление удалить из разрядного объема электроды как источник загрязнения. Теория таких разрядов отсутствует, и сейчас идет процесс накопления экспериментальных сведений о свойствах и параметрах разряда. Выполнен ряд экспериментальных исследований электродных разрядов в молекулярных газах [1–5]. Анализ данных, полученных в экспериментах с молекулярными газами, позволил сформулировать общие представления о физических процессах в электродных СВЧ разрядах, приводящих к существованию наблюдаемой структуры и объясняющих наблюдаемые экспериментальные зависимости. Оценки показали, что напряженность электрического поля во внешней области разряда (вне области свечения) недостаточна для поддержания разряда, и эта область является областью распадающейся плазмы. Светящаяся область разряда является областью самостоятельного разряда, в которой осуществляется энерговыдел. Так, она имеет неоднородную шаровую структуру с яркой светящейся приэлектродной пленкой. Показана также возможность использования таких разрядов в плазмохимии [6,7]. В настоящей работе приводятся результаты, полученные в разряде в аргоне.

Разрядная система была аналогична описанной в [1–5]. Разряд создавался в металлической вакуумированной камере, электромагнитная энергия (2.45 GHz, падающая мощность $P_{in} \leq 300$ W) вводилась в камеру с помощью штыря из нержавеющей стали (диаметр 6 mm). Падающая и отраженная разрядом мощность определялась с помощью направленного ответвителя. Степень согласования разрядной камеры с генератором могла изменяться с помощью короткозамыкающих поршней в подводной волноводной линии. Разряд возникал на конце штыря. Давление аргона в камере 1–30 Торг, расход аргона не превышал $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ (при нормальных условиях).

Визуализация разряда осуществлялась с помощью видеокамеры Panasonic NV-M3000EN (времена экспозиции 1/20–1/8000 с) с последующей цифровой обработкой изображений. Результаты приведены на рис. 1. Параметры плазмы определялись методом двойных электрических зондов [1,2], и полученные результаты показаны на рис. 2, *a, b*. Приведенные на рисунке значения ионного тока насыщения I_i соответствуют напряжениям на зондах 50 V и усреднены по значениям, вычисленным по обеим ветвям двухзондовой характеристики. Погрешность определения ионного тока $\sim 10\%$. Концентрацию заряженных частиц можно оценить по ионному току насыщения с помощью известного соотношения [8]

$$I_i = 0.61 N_i e S_p v_i, \quad (1)$$

где N_i — концентрация заряженных частиц, e — заряд электрона, $S_p = \pi d^2/4 = 4.7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$, $v_i \approx 10^4 (T_e/A)^{1/2}$ — средняя скорость ионов с учетом ускорения их в предслое, A — массовое число иона.

Если считать основным ионом аргоновой плазмы ион Ar^+ , то для оценок концентрации заряженных частиц ($n_e \approx n_i$) можно воспользоваться соотношением $N_i [\text{cm}^{-3}] \approx 7 \cdot 10^9 I_i [\mu\text{A}]$ (здесь считалось, что $T_e \sim 3 \text{ eV}$). Температура электронов определялась по вольт-амперной характеристике двойного зонда при плавающем потенциале по обычной методике (см., например, [8]). Поскольку разряд часто представляет собой систему перемещающихся нитевидных структур (рис. 1), а время измерения ВАХ зонда значительно превышает время изменения структуры разряда, данные рис. 2 характеризуют усредненные по времени характеристики разряда. Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

Разряд может существовать в двух видах (рис. 1): а — при давлениях, меньших 10 Торг, он имеет шаровую форму; б — с увеличением давления разряд приобретает вид перемещающихся нитей, начинающихся на электроде, причем нитевидная структура сильнее проявляется при больших давлениях. При больших давлениях наблюдение

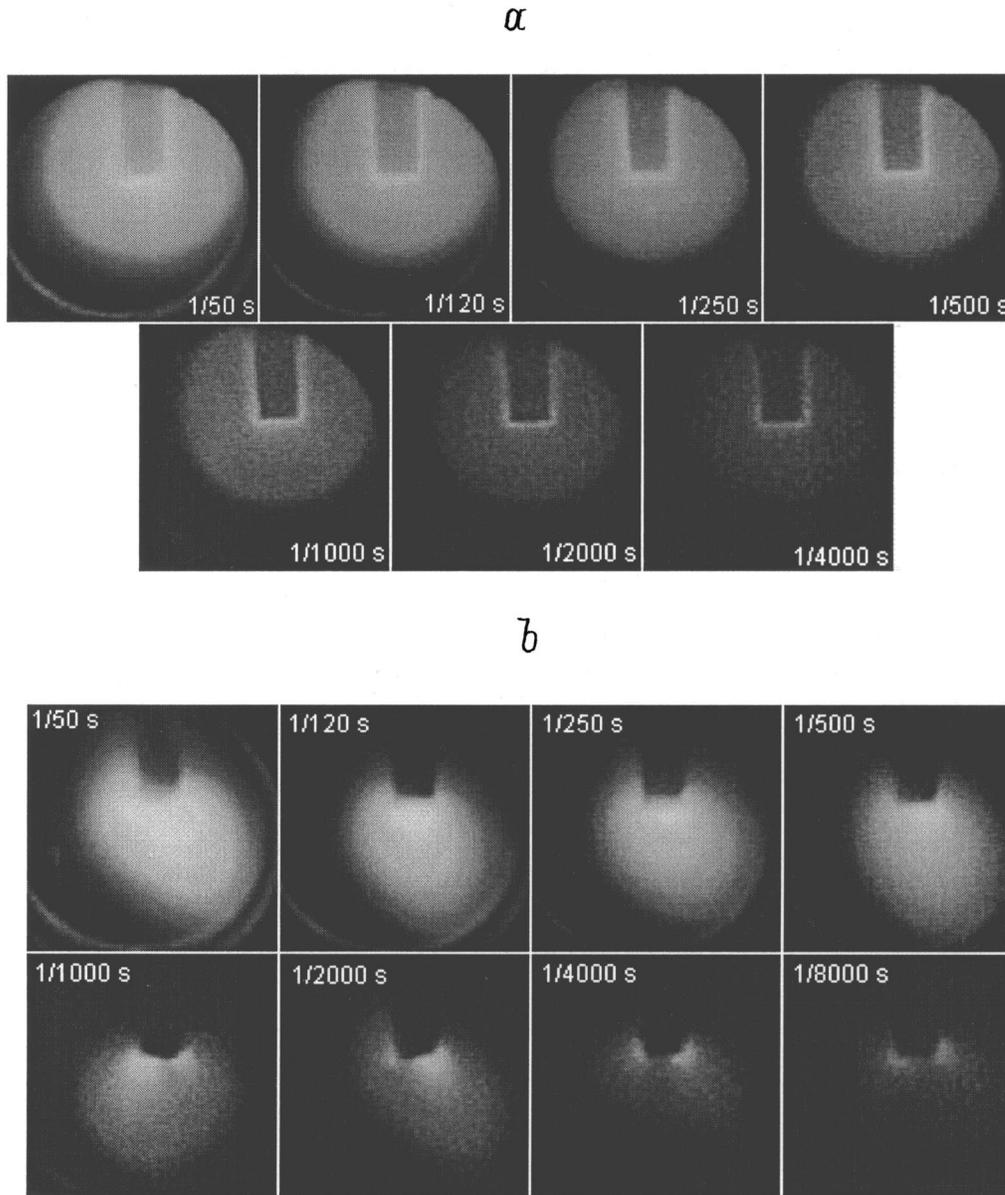


Рис. 1. Вид электродного разряда в аргоне при давлениях 1 (а), 10 (b), 20 (c), 30Торр (d) при различных временах экспозиции (масштаб плазменных образований ясен из сравнения с изображением на фотографиях цилиндрического электрода \varnothing 6 mm).

разряда с разными выдержками показало, что даже при видимой на глаз диффузионной форме разряда последняя создается перемещающимися нитями.

В случае шарового разряда интенсивность свечения разряда больше у антенны, и она монотонно спадает к периферии.

При больших уровня СВЧ мощности разряд зажигается в месте ввода антенны в камеру (сужение коаксиальной линии) и затем изменением положения поршней в волноводной линии может быть смещен на конец антенны. Как правило, разряд горит только при одном положении поршней и мощности. Изменение любого из них требует изменения и остальных. Система проявляет резонансные свойства.

Шаровой разряд в аргоне на конце антенны горит в условиях больших уровней отражения, значительно превышающих значения для молекулярных газов. Это объясняется тем, что в импедансе плазмы инертных газов в отличие от молекулярных газов преобладает реактивная составляющая. Отражение уменьшается только при появлении дополнительного разряда в месте ввода антенны в камеру, и он поглощает практически всю мощность (его интенсивность растет при увеличении мощности).

Добавление молекулярного газа (кислород) стабилизирует разряд и делает более четкой его границу. При сохранении падающей мощности увеличиваются температура электронов и концентрация заряженных частиц

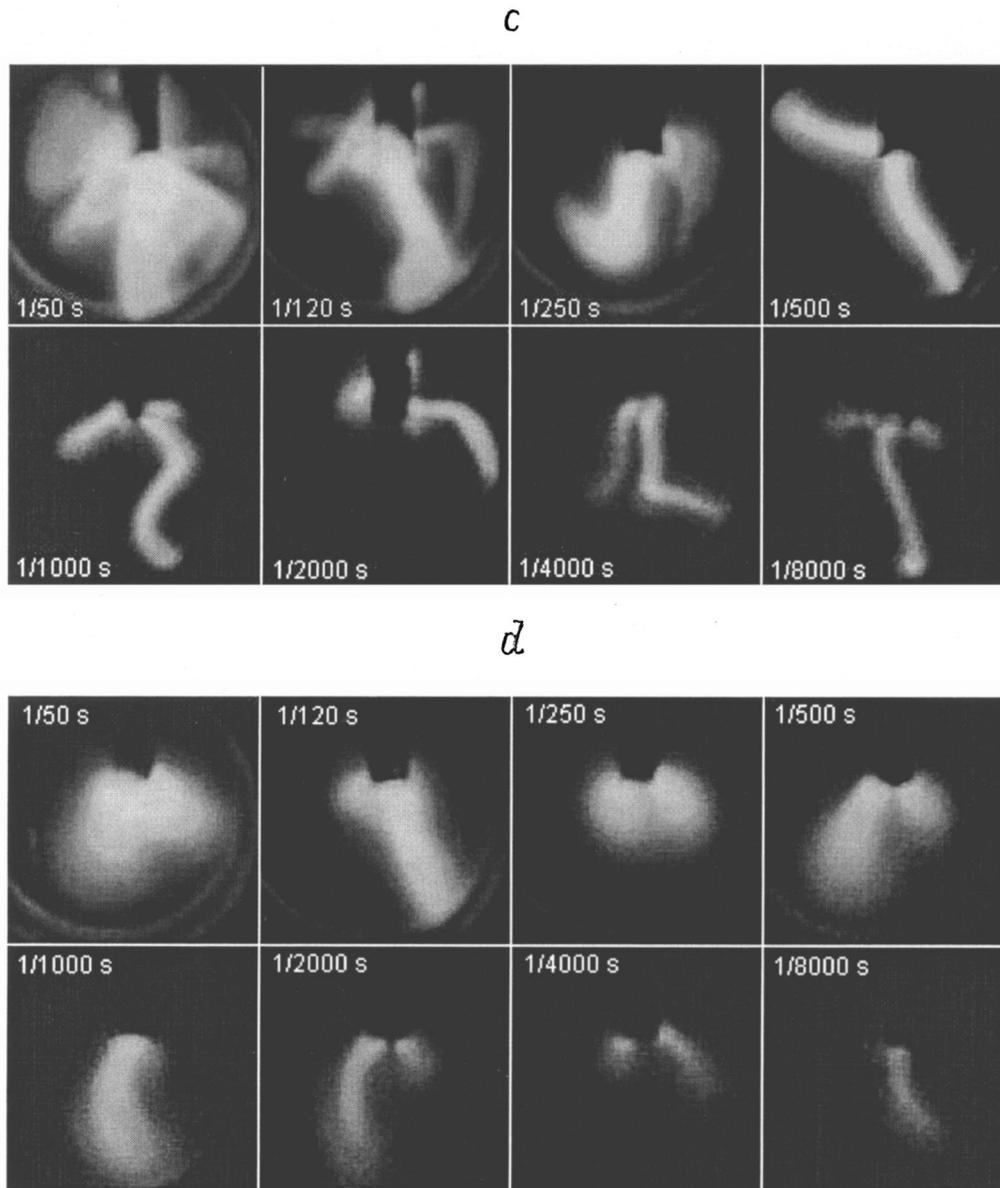


Рис. 1 (продолжение).

(кривые 4 и 3 на рис. 2, *a, b* соответственно). Это связано с увеличением поглощенной в плазме мощности. Разряд по структуре приближается к разряду в молекулярных газах [4,5].

Концентрация электронов на оси разряда превышает критическую концентрацию (для частоты 2.45 GHz, $n_{ec} \approx 7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

В [2] было показано, что результаты зондовых измерений температуры электронов в пространстве, окружающем шаровой электродный разряд в водороде, могут быть объяснены существованием поверхностной электромагнитной волны, напряженность которой экспоненциально спадает по нормали к границе разряда. Это проявляется при давлениях, когда радиальное изменение

температуры электронов определяется нагревом электронов электромагнитным полем и характерный пространственный масштаб столкновительной диссипации энергии электронов значительно меньше характерного масштаба изменения поля вне плазменной области. В водороде это проявлялось во всем диапазоне исследованных давлений (1–15 Torr). В аргоне, где средняя доля потерь энергии электронов $\delta \sim 10^{-4}$ существенно меньше, чем в молекулярном газе ($\sim 10^{-3}$), это должно проявляться при бóльших давлениях. Это и видно из рис. 2 (кривая 1): экспоненциальный спад температуры электронов наблюдается только при давлении 8 Torr. Как и в [2], напряженность электромагнитного поля в этом случае может быть оценена с помощью кинетического

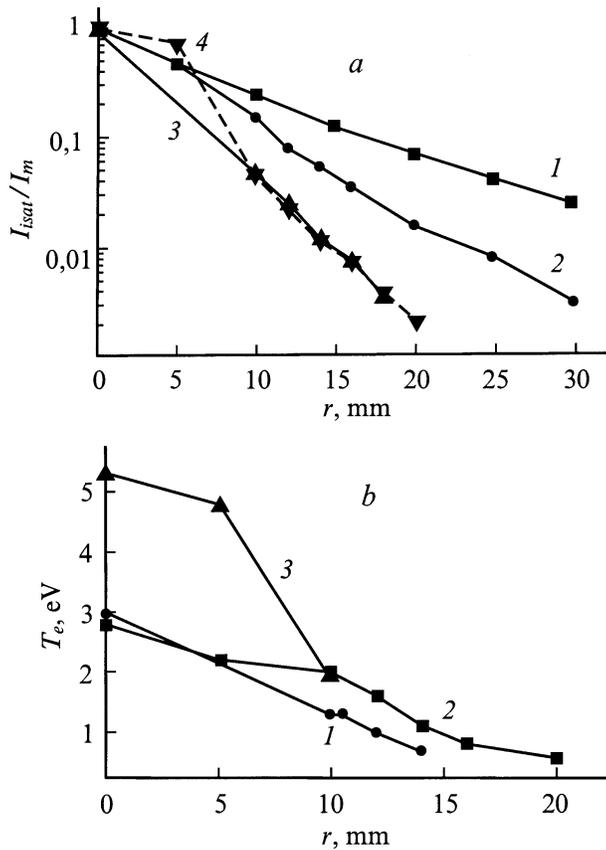


Рис. 2. *a* — радиальные распределения ионного тока насыщения зондов, нормированные на максимальное значение в Ag при давлении 1 Torr (*1*, падающая мощность 140 W, $I_{i\max} = 24 \mu\text{A}$), 3 Torr (*2*, падающая мощность 200 W, $I_{i\max} = 80 \mu\text{A}$), 8 Torr (*3*, Ag, падающая мощность 200 W, $I_{i\max} = 92 \mu\text{A}$) и в смеси Ag + 16% O₂ при давлении 3 Torr (*4*, падающая мощность 200 W, $I_{i\max} = 140 \mu\text{A}$); *b* — радиальные распределения температуры электронов в плазме в Ag при давлении 3 Torr (*2*, падающая мощность 200 W), 8 Torr (*1*, падающая мощность 200 W) и в смеси Ag + 16% O₂ при давлении 3 Torr (*3*, падающая мощность 200 W).

уравнения Больцмана. Оно позволяет рассчитать напряженность поля, соответствующего измеренным значениям температуры электронов. Уравнение решалось численно [9]. Следует отметить, что эти оценки в случае аргона в отличие от водорода усложняются тем, что энергетическое распределение электронов в области ядра распределения сильно зависит от концентрации электронов. Это обусловлено существенным влиянием межэлектронных столкновений. Оценки показали, что напряженность электрического поля в окрестности плазменного образования 2.5–4 V/cm, что существенно меньше значений, определенных в [2] для водорода.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке NWO (Голландия) (грант № 047.011.000.01).

Авторы признательны А.А. Сковороде за предоставление аппаратуры для визуализации разряда и участие в работе.

Список литературы

- [1] Бардош Л., Лебедев Ю.А. // Физика плазмы. 1988. Т. 24. № 10. С. 956–960.
- [2] Бардош Л., Лебедев Ю.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 12. С. 29–33.
- [3] Лебедев Ю.А., Мокеев М.В., Татаринев А.В. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 3. С. 293–298.
- [4] Лебедев Ю.А., Мокеев М.В. // ТВТ. 2000. Т. 38. № 3. С. 381–385.
- [5] Бардош Л., Лебедев Ю.А. // ТВТ. 2000. Т. 38. № 4. С. 552–556.
- [6] Bardos L., Barankova H., Lebedev Yu.A. et al. // Diamond and Related Materials. 1997. Vol. 6. N 3. P. 224–226.
- [7] Bardos L., Barankova H., Lebedev Yu.A. // 42^d Ann. Conf. Soc. of Vac. Coaters. Proc. SVC TC. Chicago, 1999. Paper E-7.
- [8] Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгрена. М.: Мир, 1971. С. 459.
- [9] Александров Д.И., Дианов Е.М., Блинов Л.М. и др. // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 8. С. 1008–1112.