

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОДНОГО СВЧ РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В ВОДОРОДЕ ПО ИНТЕНСИВНОСТЯМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ.

Лебедев Ю. А., Мокеев М. В.

*Институт нефтехимического синтеза РАН,  
119991, г. Москва, Ленинский просп., 29. mtokeev@ipc.ac.ru.*

**I.** СВЧ разряды, возникающие в окрестности электрода, когда размеры плазменного образования меньше размеров разрядной камеры являются ярким примером структурообразования плазмы [1,2]. Разряд состоит из яркой тонкой приэлектродной пленки и окружающей ее шаровой светящейся области, отделенной от темного внешнего пространства резкой границей. Параметры плазмы в таких разрядах до сих пор оставались практически неизвестными.

**II.** Метод относительных интенсивностей спектральных линий был развит для определения напряженности электрического поля и плотности плазмы в разряде в  $H_2+5\%Ar$  (Ar добавлялся в диагностических целях). В [1] показано, что линии водорода  $H_\alpha$  и  $H_\beta$  (656.3 и 486.1 нм) возбуждаются за счет диссоциативного процесса, из молекул  $H_2$  электронным ударом, а линия Ar 763.5 нм в результате возбуждения прямым электронным ударом. При этом:

$$k_{Ar}[Ar]n_e = [Ar^*]/\tau_{Ar} \quad (1),$$

$$k_H/k_{Ar} = ([Ar]\tau_{Ar}/[H_2]\tau_H)[H^*]/[Ar^*], \quad (2),$$

где  $k_{Ar}$ ,  $k_H$  – константы прямого возбуждения аргона и диссоциативного возбуждения водорода,  $\tau_{Ar}$  и  $\tau_H$  – радиационные времена жизни возбужденных атомов  $Ar^*$  и  $H^*$ . По интенсивности линий ( $H_\alpha$  или  $H_\beta$  и 763.5 нм) определялись концентрации возбужденных атомов  $[H^*]$  и  $[Ar^*]$ , и по формуле (2) находилось отношение констант процессов. Напряженность поля  $E$ , соответствующая найденному значению отношения  $k_H/k_{Ar}$  определялась из численных расчетов однородного уравнения Больцмана [3]. При этом значении  $E$  по уравнению Больцмана рассчитывались сами величины  $k_H$  и  $k_{Ar}$ , и по формуле (1) находилась концентрация электронов  $n_e$ . Критерием применимости метода служит совпадение величин  $E$  и  $n_e$ , рассчитанных по двум разным парам линий ( $H_\alpha$  и 763.5 нм или  $H_\beta$  и 763.5 нм).

**III.** Эксперименты проводились в разряде при разных значениях давления (1, 2, 4, 8 Тор,  $W_{пад} = 80$  Вт) и падающей мощности (20, 40, 60, 80 Вт,  $p = 1$  Тор). На основании полученных данных могут быть сделаны следующие выводы.

- В менее яркой сферической области, окружающей приэлектродную пленку применим описанный метод определения параметров плазмы.
- При давлении 1 Тор напряженность поля в сферической области практически постоянна по пространству и слабо растет с ростом падающей мощности (от 75-90 при 20 Вт до 90-120 при 80 Вт).
- Концентрация электронов в сферической области достигает  $(2-4)\cdot 10^{10}$  см<sup>3</sup> на некотором расстоянии от центра разряда, практически вне зависимости от падающей мощности. На оси разряда она значительно меньше,  $(0.5-2)\cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>. Это уменьшение концентрации отчетливо выражено при больших мощностях, когда разряд имеет большие размеры. Падению концентрации электронов соответствует и спад в несколько раз интенсивности излучения при движении к оси разряда. Окружающая приэлектродную пленку область представляет собой не “шар”, а “сферу” как по интенсивности излучения, так и по концентрации электронов. В самой “сфере” концентрация электронов практически постоянна.

В сферической области при движении вдоль радиуса к периферии концентрация электронов, пройдя через максимум, резко падает на границе (на порядок на расстоянии 2-3 мм). Этому падению соответствует и экспоненциальное падение интенсивности излучения.

- При неизменной падающей мощности (80 Вт) с ростом давления напряженность поля в сферической области слабо растет (от 90-120 В/см при 1 Тор до 90-140 В/см при 8 Тор), концентрация составляет  $(0.5-2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .
- Поле резко возрастает при приближении к приэлектродной пленке. На уровне на 1.6 мм ниже электрода зарегистрирован рост поля при движении от периферии к центру от  $\approx 80 \text{ В/см}$  до по крайней мере (в области применимости метода)  $\approx 180 \text{ В/см}$  при падающей мощности 80 Вт для давлений 1-8 Тор, и несколько меньший для меньших падающих мощностей при давлении 1 Тор.
- В тонкой приэлектродной пленке описанный метод определения параметров плазмы неприменим. Расчет по интенсивностям разных водородных линий ( $H_\alpha$  и  $H_\beta$ ) дает разные результаты. Это может быть связано с наличием в этой области больших градиентов полей, которые не учитываются использованной программой решения *однородного* уравнения Больцмана. Большую роль в этой области могут играть различные неучтенные нами факторы, связанные с возможным в этой области плазменным резонансом.
- В некоторых случаях (давление 1 Тор, при падающей мощности 80 Вт выше края электрода на 0.6 мм, и при падающей мощности 20 Вт ниже края электрода на 0.5 мм) все же с помощью метода оказалось возможным диагностировать и плазму приэлектродной пленки. Концентрация электронов достигает здесь  $(1-3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .
- В области, где метод не применим, можно сделать оценки зависимости от мощности и давления максимальной напряженности электрического поля в приэлектродной области, по расчетам с использованием только одной линии атомарного водорода  $H_\alpha$ . Рассчитанное таким образом поле при давлении 1 Тор растет с ростом падающей мощности (от  $\approx 150 \text{ В/см}$  при 20 Вт до  $\approx 200 \text{ В/см}$  при 80 Вт) и с ростом давления при постоянной падающей мощности 80 Вт (от  $\approx 250 \text{ В/см}$  при 1 Тор до  $\approx 460 \text{ В/см}$  при 8 Тор).

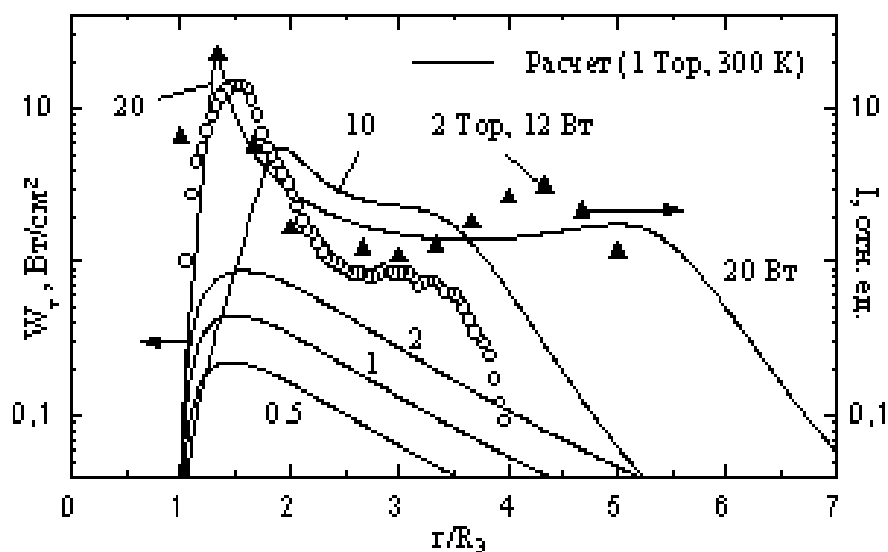
IV. Таким образом, напряженность электрического поля резко возрастает при приближении к электроду, оставаясь в сферической области на 6-10 мм ниже края электрода практически постоянной по радиусу. Распределение поля похоже на распределение около стержня, к которому приложено напряжение, расположенного над заземленной плоскостью [4]. В плоскости вблизи края электрода поле резко, по обратному степенному закону падает вдоль радиуса, а в плоскости несколько ниже электрода (уже на 1-1.5 диаметра стержня) поле вдоль радиуса практически неизменно.

В сферической области концентрация электронов ( $5 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) значительно ниже критической для данной частоты поля ( $\approx 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ), практически постоянна по пространству и слабо меняется при изменении падающей мощности. Этот факт позволяет рассматривать сферическую область как область несамостоятельного разряда. Объем этой области растет с ростом падающей мощности, а значения  $E$  и  $n_e$  меняются слабо. Внутри светящейся сферы, в темном пространстве, концентрация электронов спадает в несколько раз. На внешней границе сферической области  $n_e$  резко падает – на порядок на расстоянии 2-3 мм.

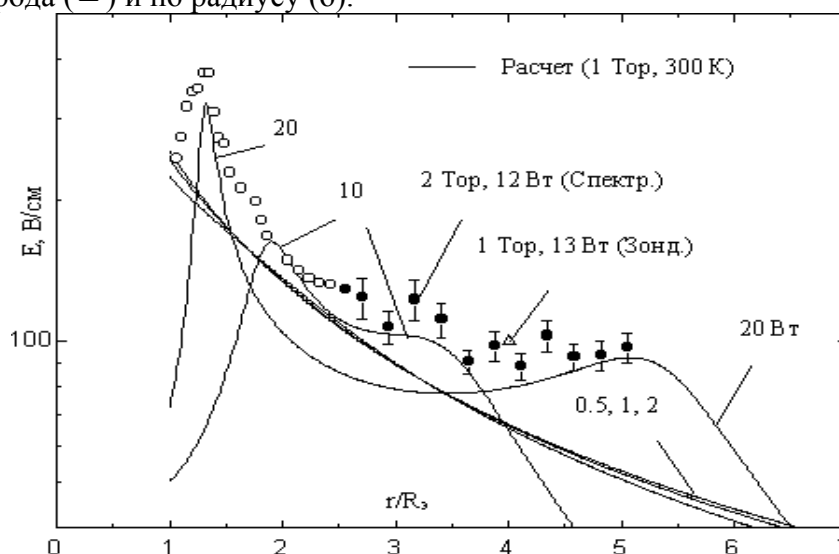
Яркая приэлектродная пленка представляет собой существенно неоднородное образование. В этой области реализуются большие напряженности и градиенты поля, закритическая концентрация электронов ( $\approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ), а значит, и *плазменный резонанс*. Здесь возможно возникновение высокоэнергетичных электронов (ср. [5]). Одним из

Значения  $E$  и  $n_e$ , в области несамостоятельного разряда.  $P$  – давление,  $W$  – падающая мощность.

$P$ , Тор	$W$ , Вт	$n_e$ , $10^{10}$ см $^{-3}$	$E$ , В/см
1	20	2-4	70-90
	40	2-4	85-100
	60	2-3	85-100
	80	1.5-2.5	90-120
2	80	0.7-1.5	100-110
4		$\sim 0.7$	95-120
8		$\sim 1$	100-140



**Рис. 1.** Сравнение рассчитанного радиального ( $r/R_3$ , где  $R_3$  – радиус электрода) распределения удельной поглощенной мощности [6] с измеренным распределением интенсивности излучения вдоль оси электрода ( $\blacktriangle$ ) и по радиусу ( $\circ$ ).



**Рис. 2.** Сравнение измеренного радиального распределения  $E$  ( $\bullet$ ) с расчетным [6].  $\circ$  – оценочные значения  $E$ , определенные только по  $N_\alpha$ ,  $\Delta$  – результат, полученный зондовым методом [2].

свойств этой области является то, что интенсивность линии с наиболее высоким порогом,  $H_{\beta}$ , возрастает в приэлектродной области значительно круче, чем интенсивность других линий. Были зарегистрированы и случаи, когда в некоторых областях приэлектродной пленки заселенность 4-го, более высокого уровня, с которого происходит излучение  $H_{\beta}$ , оказывалась равной заселенности 3-его, с которого излучается  $H_{\alpha}$ . Около края электрода, со стороны его торца приэлектродная пленка представляет собой светящееся кольцо. В самой пленке интенсивности линий резко возрастают, внутри кольца, в менее яркой области, спадают. При этом, чем выше порог возбуждения линии, тем круче это возрастание и падение, так что интенсивность  $H_{\beta}$  спадает практически до нуля вблизи края электрода около его оси. Этот эффект зависит от формы электрода, он лучше выражен в случае электрода-трубки, чем в случае электрода-стержня. В случае электрода-трубки в некоторой плоскости вблизи края электрода линия  $H_{\alpha}$  также, как и  $H_{\beta}$  спадает практически до нуля около оси электрода внутри яркого кольца.

V. Результаты самосогласованного моделирования в квазистатическом приближении [6] хорошо соответствуют данным экспериментов о распределении напряженности поля и интенсивности излучения (удельного энерговыклада), рис. 1, 2. Однако рассчитанное при этом распределение концентрации электронов не соответствует измеренному. Соответствие расчетных и экспериментальных данных по полю и удельному энерговыкладу наблюдается только когда концентрация электронов превышает критическую во всей светящейся области, как в приэлектродной пленке, так и в сферической области. Расчет не позволяет получить и резкого спада концентрации электронов на границе светящегося образования. К удержанию разряда в виде компактного образования с резкой границей может приводить наличие на границе светящейся области двойного электрического слоя [7, 8].

VI. Структура разряда может быть объяснена существованием области самостоятельного разряда (тонкая приэлектродная пленка), области несамостоятельного разряда (сферическая область) и отделенной от нее двойным электрическим слоем области распадающейся плазмы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 02-02-16021).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев Ю. А., Мокеев М. В. // *Физика плазмы*. 2001. Т. 27. № 5. С. 443.
2. Lebedev Yu. A., Mokeev M. V., Tatarinov A. V., Epstein I. L. // *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. IV International Workshop. Zvenigorod, Russia. 2000. Moscow, Yanus-K 2001. P. 187.*
3. Lebedev Yu. A., Epstein I. L. // *J. Moscow Phys. Soc.* 1995. V. 5. № 1. P. 103.
4. Райзер Ю. П. // *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987.
5. Kudela J., Terebessy T., Kando M. // *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. IV International Workshop. Zvenigorod, Russia. 2000. Moscow, Yanus-K 2001. P. 63.*
6. Lebedev Yu. A., Tatarinov A. V., Epstein I. L. // *Plasma Sources Sci&Technol*. 2002 (accepted for publication).
7. Аланакян Ю. Р. // *Физика экстремальных состояний вещества –2001. Труды XVI междунар. конф. “Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество”*. Черногловка, 2001.
8. Ivanov S. T., Thomae R. W., Klein H., Hilschert F. H. // *Bulgarian Journal of Physics* 25 Nos 1/2 (1998). P. 49-55.