

04;09;12

Электродный шаровой СВЧ разряд. Феноменология и результаты зондовых измерений

© Л. Бардош¹, Ю.А. Лебедев²¹Уппсальский университет,
Уппсала, Швеция²Институт нефтехимического синтеза РАН,
117912 Москва, Россия

(Поступило в Редакцию 8 июля 1997 г.)

Описан шаровой инициированный СВЧ разряд, возникающий на конце антенны в металлической разрядной камере с размерами, существенно превышающими размеры светящейся области плазмы. Эксперименты проведены в водороде при давлениях 1–15 Тор. Метод двойного электрического зонда использован для исследования структуры плазмы. С помощью уравнения Больцмана сделаны оценки напряженности СВЧ поля, соответствующие измеренным значениям температуры электронов в окрестности светящейся области разряда. Показано, что пространственная структура поля соответствует структуре поля поверхностной волны, распространяющейся вдоль поверхности разряда. Существованием такой волны может быть объяснено возрастание интенсивности излучения плазмы у ее границы.

Введение

В последнее время большое внимание исследователей привлекают инициированные СВЧ разряды — разряды, существующие только в присутствии инициатора при мощностях меньше необходимых для поддержания разряда без него [1,2]. Инициаторами могут быть внешние источники ионизации, тела, помещенные в разрядную камеру, пылевые частицы и т.д. Такие разряды обладают рядом интересных качеств: могут существовать при аномально малых мощностях, позволяют создавать неравновесную плазму при давлениях вплоть до атмосферного, дают возможность эффективного управления параметрами плазмы и др. Сейчас это наименее изученный тип СВЧ разряда. Не исследованы физические процессы, приводящие к его возникновению, структура и параметры. В некоторых работах делается предположение, что в случае пассивного инициатора он состоит из самостоятельного разряда, окруженного областью несамостоятельного разряда [1].

Несмотря на отсутствие достаточных сведений о природе таких разрядов, их широкие возможности уже проиллюстрированы, например, в плазмохимии [3,4]. Свойства инициированного разряда, по-видимому, проявляются и в результатах [5], показавших высокую конверсию метана в ацетилен в СВЧ разряде в разрядной камере, содержащей никелевые пластины.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты исследования параметров СВЧ разряда, создаваемого на конце металлической антенны при пониженных давлениях.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1. Разрядная камера представляла собой металлический цилиндр (радиус ~ 10 см), возбуждаемый с торца

антенной (трубка из нержавеющей стали). Трубка (диаметр 6 мм) была элементом коаксиально-волноводного перехода, который мог подстраиваться с помощью короткозамыкающих поршней. Размеры разрядной камеры специально не подбирались. Разрядная система сходна с описанной в [6] с тем отличием, что расстояние от нижнего торца камеры до антенны превышало 15 см и не варьировалось. Таким образом, разряд создавался на конце уединенной антенны.

Использовался СВЧ генератор с выходной мощностью до 2.5 kW и частотой 2.45 GHz. Поглощенная мощность определялась с помощью рефлектометра вычитанием отраженной мощности из падающей. Сразу отметим, что вычисленная таким образом мощность не может быть априори определена как поглощенная плазмой, поскольку

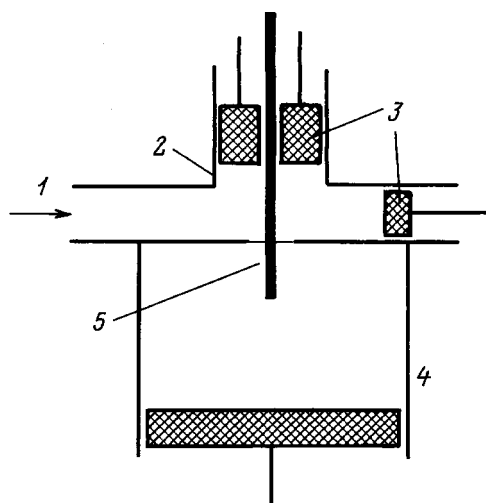


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — узел ввода электромагнитной энергии в волновод, 2 — коаксиально-волноводный переход, 3 — короткозамыкающие поршни, 4 — разрядная камера, 5 — антенна.

ку возможны потери в элементах передачи энергии в камеру и в ее стенках [7].

Для измерения параметров электронной компоненты плазмы использовался двойной электрический зонд. Методика таких измерений в СВЧ плазме была ранее подробно описана в [8]. Вольфрамовые зонды диаметром $100 \mu\text{m}$ в кварцевых капиллярах с длиной изолированной части 1 mm и расстоянием между зондами 3 mm вводились через отверстие в боковой поверхности камеры и могли смещаться вдоль радиуса разряда. Каждый из зондов был помещен в металлический экран. Измерения проводились в плоскости, расположенной на расстоянии 3 mm от возбуждающего электрода и перпендикулярной его оси.

Несколько замечаний о роли электрода в СВЧ плазме. Эта проблема достаточно подробно изучена применительно к ВЧ разрядам (см., например, [9]). При увеличении частоты поля толщина слоя пространственного заряда у электрода уменьшается, уменьшается и энергия ионов, бомбардирующих электрод. В области СВЧ диапазона проводимость слоя мала и непрерывность тока обеспечивается токами смещения через слой. В этом случае электрод не играет никакой роли в генерации заряженных частиц (γ -процессы, связанные со вторичной электронной эмиссией из электродов несущественны) и разряд существует в α -форме (играют роль процессы объемной ионизации). Это подтверждается экспериментальными данными об отсутствии эрозии электрода в СВЧ плазме в смеси водорода с метаном [6]. Электрод, по-видимому, лишь определяет структуру электромагнитного поля и, в частности, создает неоднородное СВЧ поле с увеличением напряженности у его поверхности.

В настоящей работе приведены результаты, полученные в разряде в водороде.

Феноменология разряда

Основные черты разряда могут быть описаны следующим образом.

Разряд существует на конце возбуждающего штыря, частично покрывая его и имеет шаровую форму.

Разряд может возникать в месте ввода в камеру возбуждающего штыря и быть смещен к его концу перемещением короткозамыкающих поршней в волноводном тракте при неизменной падающей мощности. При увеличении последней разряд вновь перемещался к месту ввода штыря в камеру и мог быть смещен к его концу только изменением положения поршней настройки. Таким образом, СВЧ разряд и камера (включая внешние элементы настройки) представляют собой сильно связанную СВЧ систему.

При малых уровнях падающей мощности (недостаточной для возбуждения разряда) разряд на конце штыря может быть инициирован катушкой Тесла.

Диаметр разряда растет при уменьшении давления и увеличении падающей мощности.

Свечение разряда неоднородно: возбуждающий штырь в центре разряда покрыт яркой светящейся пленкой. При увеличении расстояния от оси интенсивность излучения плазмы падает и вновь растет к периферии шаровидного образования. Граница разряда четко выражена. Свечение вдоль поверхности сферы разряда неоднородно: менее яркое у поверхности антенны со стороны СВЧ генератора и наиболее яркое с противоположной стороны.

Была получена структура разряда типа гантели — два шара, соединенных слабо светящейся перемычкой. Один из шаров находился на конце возбуждающего штыря, а второй — на штыре, расстоянии, приблизительно равном $\lambda/4$ ($\lambda \approx 12.2 \text{ cm}$ — длина волны электромагнитного излучения в свободном пространстве). Отличие от часто наблюдающейся структуры типа стоячей волны было в том, что плазменное образование, находящееся на штыре имело форму шара того же размера и совершенно аналогичную первому структуре свечения (ярко светящаяся пленка на поверхности штыря в центре шара и резкая граница со стороны подвода энергии по штырю).

Зонд, расположенный в окрестности разряда, может изменять структуру электромагнитного поля и в ряде случаев провести зондовые измерения не удалось, поскольку любое перемещение зонда даже вне светящейся области приводило к изменению свечения разряда и даже его погасанию.

В режимах, когда перемещение зондов вне разряда не приводило к видимым его изменениям, разряд вел себя по отношению к зондам как капля жидкости. Когда зонды касались светящейся зоны, разряд начинал отодвигаться от них и прогибался внутрь. При протыкании светящейся области зондами плазма обволакивала их и при выдвигении зондов наружу тянулась за ними (как на смачиваемой поверхности). При некотором расстоянии от центра плазма отрывалась от зондов, принимала форму шара, однако размеры устанавливались не сразу, а после нескольких колебаний (за несколько секунд).

В зависимости от электродинамических характеристик узла передачи СВЧ энергии в газ существуют два типа разряда. Один возникает при больших значениях коэффициента отражения в СВЧ тракте, существует только при одном положении согласующих поршней, давлении и мощности и характеризуется малыми энергокладами в плазму. Другой характеризуется меньшими уровнями отражения от разрядной секции и при неизменной геометрии системы возможно изменение энергоклада в плазму.

Результаты зондовых измерений

Концентрация заряженных частиц может быть оценена по ионному току насыщения с помощью известного соотношения

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

где N_i — концентрация заряженных частиц, e — заряд электрона, $S_p = \pi dl = 4.7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$, $v_i \approx 10^4 (T_e/A)^{1/2}$ —

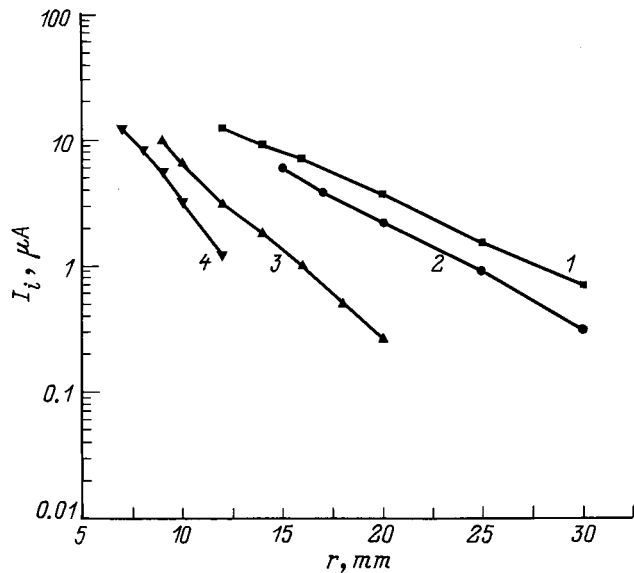


Рис. 2. Зависимость ионного тока насыщения зонда от расстояния от центра разряда при давлениях 1 (1), 3 (2), 8 (3), 15 Торр (4).

средняя скорость иона в плазме с учетом ускорения их в предслое, A — массовое число иона.

Приведенные на рис. 2 значения ионного тока насыщения соответствуют напряжениям на зондах 50 В и усреднились по значениям, вычисленным по обем ветвям двухзондовой характеристики. В ряде случаев использовалась и однозондовая схема, в которой противозондом являлась металлическая разрядная камера. Погрешность определения ионного тока $\sim 10\%$. При вычислениях концентрации заряженных частиц важно знать ионный состав плазмы. В водородной плазме при степенях диссоциации менее 50% основным ионом является ион H_3^+ , образующийся в результате ионной конверсии [10], и для оценок порядка концентрации заряженных частиц ($n_e \approx n_i$) по ионному току насыщения можно воспользоваться соотношением $N_i [cm^{-3}] \approx 2 \cdot 10^9 I_i [\mu A]$ (здесь считалось, что $T_e \sim 3 eV$). Температура электронов определялась по вольт-амперной характеристике двойного зонда при плавающем потенциале по обычной методике (см., например, [11]).

Основной объем измерений выполнен в области разряда за пределами плазменного образования. В особенности это относится к измерениям температуры электронов (погрешность определения абсолютных величин $\sim 25\%$). Это обусловлено тем, что, как известно, зондовые измерения подвержены воздействию СВЧ поля [11], причем ионная часть вольт-амперной характеристики зонда искажается значительно слабее. Таким образом, если концентрация заряженных частиц может быть определена достаточно надежно, средняя энергия электронов (температура) может быть существенно завышена. Первое положение было проверено экспериментально: измеренные двухзондовая и однозондовая характери-

ки в ионных частях совпадали. Поскольку СВЧ поле в призондовом слое при этом различалось (в первом случае оно определялось разностью напряженностей СВЧ поля в местах близко расположенных зондов, а во втором — действующим СВЧ полем между зондом и противозондом — камерой), то это свидетельствует о нечувствительности ионной части вольт-амперной характеристики к СВЧ воздействию в условиях экспериментов, представленных в работе.

Пространство вне светящейся области является изотропным по потенциалу и двухзондовая характеристика проходит через нуль тока при нулевом потенциале. В разряде двухзондовая характеристика смещалась по оси напряжений, что указывает на неоднородность плазмы и существование разности потенциалов плазмы в местах расположения зондов.

На рис. 2 показаны зависимости ионного тока насыщения от радиального положения зонда. Основной массив данных относится к области вне светящейся зоны разряда (первая точка на спадающем участке приблизительно соответствует границе светящейся области и этот размер можно использовать для оценки радиуса разряда).

Проведенные оценки показали, что концентрация электронов ($n_i \approx n_e$) на оси разряда при давлениях 1 и 3 Торр близка к критической (для частоты 2.45 GHz $n_{ec} \approx 7 \cdot 10^{10} cm^{-3}$). При больших давлениях подобные измерения провести не удалось, поскольку зонд настолько сильно искажал плазму и электродинамику системы, что изменялось отражение от разрядной секции. В ряде случаев искажалась и ионная часть вольт-амперной характеристики зонда и она имела характерный вид, описанный в [12].

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать оценки поглощенной плазмой мощности P . Для этого можно воспользоваться известным соотношением

$$P = P_{ab}V = n_c \bar{\epsilon} \delta \nu_{ef} V,$$

где $\bar{\epsilon}$ — средняя энергия электронов; δ — средняя доля энергии, теряемая электроном в одном столкновении; ν_{ef} — эффективная частота столкновений электронов с тяжелыми частицами, P_{ab} — поглощенная плазмой удельная мощность, V — объем плазмы. Значения δ и ν_{ef} находились самосогласованным моделированием плазмы в водороде [10].

Оценки, проведенные для давлений 1 и 3 Торр ($\delta \nu_{ef} \sim 3 \cdot 10^7$ и $6 \cdot 10^7 s^{-1}$ соответственно) с учетом размеров плазмы (определенных по рис. 2), показали, что измеренная поглощенная мощность согласуется с рассчитанной в пределах 20%. Это находится внутри коридора ошибок для оценки и можно сказать, что диссипированная в системе мощность представляет собой поглощенную плазмой мощность. Аналогичных оценок для давлений 8 и 15 Торр сделать не удалось из-за отсутствия данных о концентрациях заряженных частиц на оси разряда (см. выше), но можно предполагать, что и в этих случаях потери энергии в элементах СВЧ тракта малы.

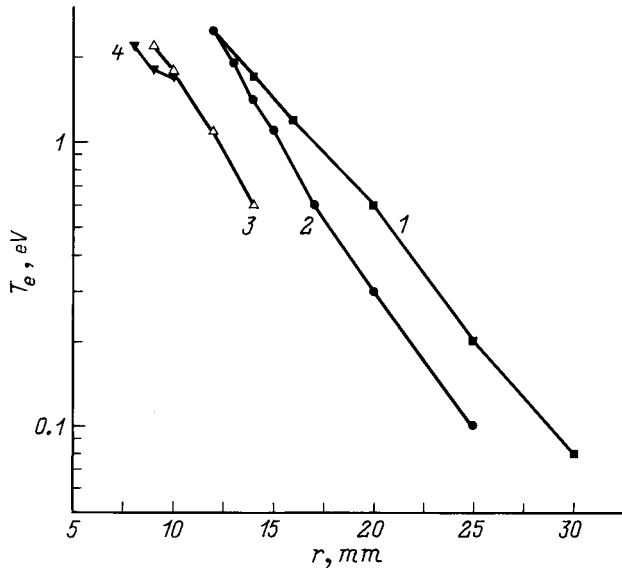


Рис. 3. Зависимость температуры электронов от расстояния от центра разряда (1–4 — то же, что и на рис. 2).

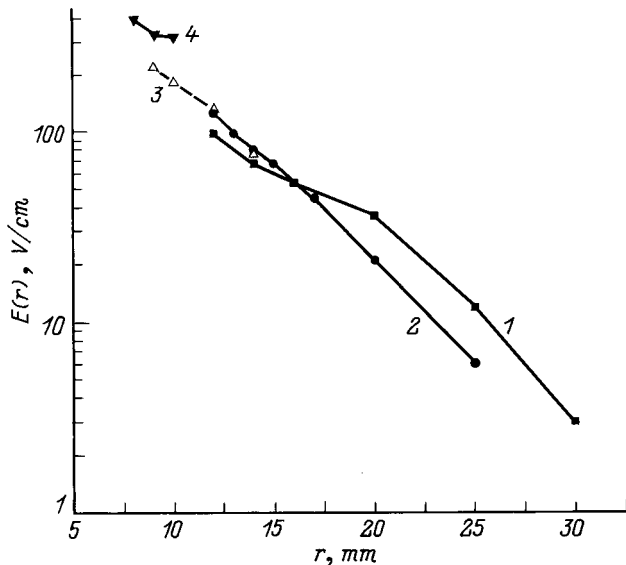


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля в окрестности плазменного образования (1–4 — то же, что и на рис. 2).

Полученные результаты позволяют сделать заключения о структуре электромагнитного поля в пространстве, окружающем светящуюся область разряда. Действительно, если предположить, что электрическое поле вне светящейся области отсутствует, то характерный масштаб изменения средней энергии электрона определяется соотношением $v/\delta\nu_{ef}$, где v — скорость движения электрона в рассматриваемом направлении. Электрон движется к стенке в результате амбиполярной диффузии и для давления 1 Torr $v_{dif} \sim 10^4$ cm/s. С учетом приведенных выше значений $\delta\nu_{ef}$ характерный масштаб изменения

средней энергии в радиальном направлении $\sim 10^{-3}$ см. Из рис. 3 видно, что температура электронов изменяется значительно медленнее из-за нагрева электронов в электромагнитном поле.

Напряженность электрического поля $E(r)$, соответствующая измеренной температуре электронов ($T_e = 2\bar{\varepsilon}/3$), может быть определена с помощью уравнения Больцмана. Уравнение Больцмана решалось численным методом, детально описанным в [10], с учетом упругих и неупругих столкновений электронов с тяжелыми частицами. Методом последовательных приближений находилось значение $E(r)$ и результаты расчетов показаны на рис. 4. Видно, что напряженность электрического поля экспоненциально уменьшается при увеличении r . Единственным типом волны, имеющим такую структуру является поверхностная волна [13]. Следовательно, вдоль поверхности плазменного образования распространяется поверхностная волна, сосредоточенная в приповерхностном слое. Этим, по-видимому, объясняется увеличение интенсивности излучения в этой области разряда.

Роль поверхностной волны в поддержании разряда неясна. Является ли ее существование необходимым или ее присутствие является просто следствием того, что при нарушении однородности СВЧ передающей линии в области плазмы возникают различные пространственные моды электромагнитных волн, в том числе и поверхностные? Ответ на этот вопрос могут дать дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Scientific Exchange Programme of the Poyal Swedish Academy of Sciences и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 96-02-184609).

Авторы признательны Ю.Ф. Колесниченко, В.Г. Бровкину и Г.С. Солнцева за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Голубев С.В., Грицинин С.И., Зорин В.Г. и др. // Высокочастотный разряд в волновых полях. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 136–197.
- [2] Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф., Хмара Д.В. // Шаровая молния в лаборатории. М.: Химия, 1994. С. 119–135.
- [3] Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Bol'shakov E.F. et al. // Plasma Sources Sci. & Technol. 1993. Vol. 2. N 1. P. 164–172.
- [4] Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф., Хмара Д.В. // Прикладная физика. 1994. Вып. 4. С. 5–10.
- [5] Федосеев В.И., Аристов Ю.И., Танащев Ю.Ю. и др. // Кинетика и катализ. 1997. Т. 37. № 6. С. 869–872.
- [6] Bardos L., Varankova H., Lebedev Yu.A. et al. // VII European Conf. on Diamond, Diamond-like and Related Materials. 1996. P. 4.1.
- [7] Lebedev Yu.A. // Plasma Sources Sci.&Technol. 1995. Vol. 4. P. 4740.
- [8] Лебедев Ю.А. // ТВТ. 1995. Т. 33. С. 850.
- [9] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостной разряд: физика, техника, приложения. М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та; Наука; Физматлит, 1995.

- [10] *Lebedev Yu.A., Epstein I.L.* // J. Moscow Phys. Soc. 1995. Vol. 5. N 1. P. 103–120.
- [11] *Иванов Ю.А., Лебедев Ю.А., Полак Л.С.* Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. М.: Наука, 1981. 142 с.
- [12] *Довженко В.А., Кузнецов С.И., Мельниченко П.П., Солнцев Г.С.* // ЖТФ. 1997. Т. 47. С. 2506–2511.
- [13] *Moisan M., Shivarova A., Trivelpiece A.W.* // Plasma Phys. 1982. Vol. 24. N 11. P. 1331–1400.