

03;04;09;12

## **Определение концентрации электронов в разряде с жидкими неметаллическими электродами в воздухе при атмосферном давлении по поглощению зондирующего СВЧ излучения**

© Ю.А. Баринов, В.Б. Каплан, В.В. Рождественский,  
С.М. Школьник

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 июня 1998 г.

Проведены измерения поглощения СВЧ мощности в плазме разряда с электродами из водопроводной воды в воздухе при атмосферном давлении с целью определения концентрации электронов. Разряд горел в объемной (диффузной) форме с низкой по сравнению с дугой плотностью тока и высоким напряжением. Такой разряд с жидкими неметаллическими электродами (РЖНЭ) является чрезвычайно перспективным для различных технических применений. Исследовались режимы с  $I = (50-60)$  mA и напряжением  $U = (2.9 - 3.1)$  kV. Измерения проводились на частотах зондирующего излучения  $F = 29.6$  и  $35.2$  GHz. Для локализации СВЧ мощности в плазме использовалась двухпроводная линия передачи. Получена оценка средней концентрации электронов в центральной части разряда:  $(4 \cdot 10^{11} < n_e < 7 \cdot 10^{11})$  cm<sup>-3</sup>. Этот результат находится в хорошем согласии с результатами выполненных ранее зондовых измерений.

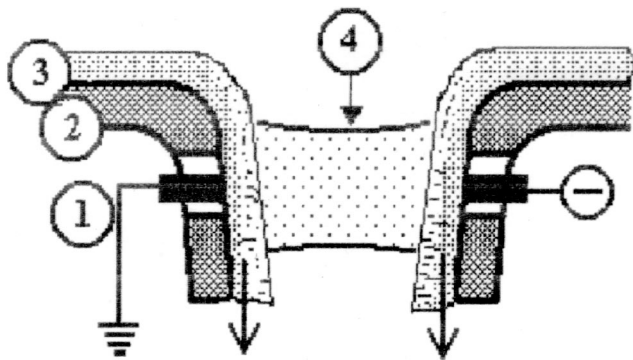
1. Самостоятельный разряд между жидкими неметаллическими электродами (РЖНЭ), устойчиво горящий на постоянном токе в воздухе при атмосферном давлении в диффузном (объемном) виде, является весьма интересным физическим объектом. В качестве электродов обычно используются электролиты, водные растворы и просто водопроводная вода. Хотя РЖНЭ известен около ста лет, физические процессы, состав и свойства разрядной плазмы изучены мало [1]. Ранее нами были выполнены спектроскопические и зондовые исследования РЖНЭ с электродами из водопроводной воды [2,3]. С помощью одиночного электрического зонда измерялись распределения вдоль оси разряда потенциала и кон-

центрации электронов  $n_e$ . Учитывая сложность интерпретации результатов зондовых измерений в таких условиях, представляется необходимым сопоставить полученные сведения с результатами измерений  $n_e$  иным, желателен бесконтактным, методом.

Анализ имеющихся расчетных и экспериментальных данных [2,3], а также возможностей различных диагностик показал, что для этой цели применим метод определения  $n_e$ , основанный на измерении поглощения зондирующего СВЧ излучения плазмой, когда его частота меньше частоты столкновений электронов [4]. Очевидно, что использование подобного метода в наших условиях (высокое давление газа, относительно низкая концентрация электронов, малый размер плазмы и ее пространственная неоднородность) вызывает определенные трудности.

2. Измерения поглощения зондирующего СВЧ излучения проводились в плазме разряда постоянного тока в воздухе при атмосферном давлении между двумя потоками водопроводной воды. Толщина слоя воды, покрывающего металлические токоподводы, составляла  $4 \div 5$  мм. Расстояние между водяными электродами  $\approx 7$  мм. Измерения в [2,3] проводились в аналогичных условиях. Конструкция разрядного узла представлена на рис. 1. Один из металлических электродов заземлен, на другой — через балластный резистор с сопротивлением  $10 \text{ k}\Omega$  подается напряжение  $\approx 4 \text{ kV}$ . Разряд устойчиво горит при токе  $I \approx 60 \div 80 \text{ mA}$  и напряжении между металлическими токоподводами  $V \approx 2.9 \div 3.1 \text{ kV}$ .

3. Рассмотрим, опираясь на результаты работ [2,3], условия в плазме РЖНЭ при токе  $I \approx 60 \text{ mA}$ . Диаметр разряда вблизи электродов составляет  $2r \approx 4 \div 5 \text{ mm}$ , а в центре межэлектродного промежутка  $2r \approx 3 \text{ mm}$ . Диаметр плазмы оценивался по полуширине радиального распределения интенсивности излучения на длине волны  $\lambda = 380.4 \text{ nm}$  (вторая положительная система полос  $N_2$ , секвенция  $\Delta\nu = -2$ ). Из зондовых измерений следует, что электрическое поле неоднородно: в катодной области  $E \approx 4 \text{ kV/cm}$ , в анодной —  $E \approx 2 \text{ kV/cm}$ , в центральной части межэлектродного промежутка  $E \approx 0.7 \text{ kV/cm}$ . Оценка концентрации электронов по электронной ветви зондовой характеристики дает значение  $n_e \approx (4 \div 6) \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ . Как следует из спектральных измерений, температура газа вблизи катода достигает  $\approx 2000 \text{ K}$  и уменьшается к аноду до  $\approx 1000 \text{ K}$ , средняя энергия электронов  $0.35 \div 0.4 \text{ eV}$ . В плазме с такими параметрами частота электрон-атомных столкновений  $\nu$  значительно превосходит частоту электрон-электронных столкновений и составляет  $\nu \sim 10^2 \text{ GHz}$ , а плазменная частота —  $f_0 \leq 10 \text{ GHz}$ .



**Рис. 1.** Схематическое изображение разрядного узла: 1 — металлические токоподводы; 2 — керамики; 3 — водопроводная вода; 4 — разрядная плазма; I — разряд.

Чтобы в данном эксперименте выполнить условия применимости метода открытого пространства [4] и обеспечить необходимое пространственное разрешение, нужно зондировать плазму СВЧ излучением с длиной волны  $\lambda \approx 10^{-1}$  см. В этом случае частота зондирующего СВЧ излучения  $F$  будет почти на два порядка больше плазменной частоты  $f_0$ . При таком соотношении частот поглощение СВЧ излучения в плазме оказывается весьма слабым. Ослабление принимаемого СВЧ излучения, обусловленное таким поглощением, описывается выражением

$$P/P_0 = 1 - 2 \cdot \langle \alpha \rangle \cdot L, \quad (1)$$

где  $P_0$  и  $P$  — мощность принимаемого СВЧ излучения, соответственно без плазмы и с плазмой  $\langle \alpha \rangle \cdot L = \int_0^L \alpha \cdot dl$ ,  $L$  — расстояние, пройденное СВЧ волной в плазме,  $\alpha$  — постоянная затухания, определяемая соотношением [4]:

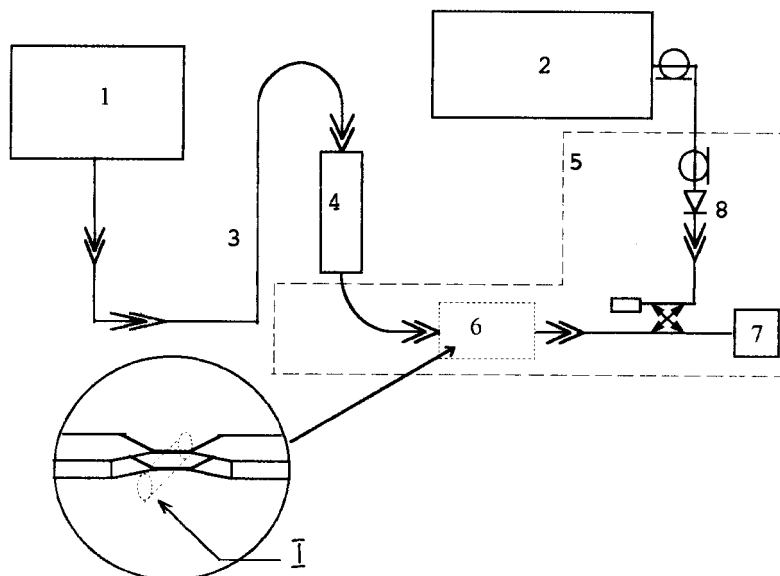
$$\alpha^2 = \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \left\{ \left[ \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \frac{\nu^2}{\omega^2} \left( \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right]^{1/2} - \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) \right\}, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi F$ ;  $\omega_0 = 2\pi f_0 = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2}$ .

Коэффициент поглощения СВЧ излучения с  $\lambda \approx 10^{-1}$  см, оцененный с помощью (1) и (2) для наших условий, столь мал,  $2 \cdot \langle \alpha \rangle \cdot L \leq 10^{-3}$ , что измерение небольшого ослабления, обусловленного таким поглощением, становится технически сложным. Применение резонаторных методов, обеспечивающих большую чувствительность, практически невозможно из-за конструктивных особенностей разрядного узла. Поэтому для зондирования плазмы целесообразно использовать СВЧ излучение с большей длиной волны:  $\lambda \approx 1$  см. В этом случае ослабление СВЧ излучения, по нашим оценкам, оказывается существенно большим и составляет несколько процентов. В нашем эксперименте с помощью двухпроводной линии СВЧ мощность была локализована в области с поперечными размерами  $l \sim 5$  мм. Если возникающее при этом ослабление СВЧ излучения обусловлено в основном поглощением в плазме, то из измерений ослабления можно определить концентрацию электронов, усредненную по области, поперечным размером  $\sim l$  и длиной  $L$ . С учетом упомянутых выше трудностей даже такая оценка представлет определенный интерес на данном этапе исследований.

4. Блок-схема измерений представлена на рис. 2. Для СВЧ зондирования плазмы разряда использовался волноводный тракт сечением  $7.2 \times 3.4$  мм, состоявший из неподвижной и подвижной частей. Подвижная часть содержала волноводные элементы, двухпроводную линию передачи, направленный ответвитель с детектором СВЧ излучения и поглотителем, подавляющим отражения от конца волновода. Волновые сопротивления волновода и двухпроводной линии согласовались плавными треугольными волноводными переходами длиной  $\approx 40$  мм без узких стенок. Двухпроводная линия представляла собой две параллельные медные проволоки  $\varnothing 0.5$  мм, длиной 25 мм при расстоянии между их центрами  $\approx 4$  мм, соединенные электрически с острыми концами согласующих переходов. Сигнал с детектора, пропорциональный мощности прошедшего через тракт СВЧ излучения, регистрировался на запоминающем осциллографе С9-8 при длительности развертки 10 с.

Измерения проводились следующим образом. После зажигания разряда двухпроводная линия вводилась в разрядный промежуток посередине между электродами так, что разрядный канал оказывался между проволоками (рис. 2). Сигналы с СВЧ детектора регистрировались при включенном и выключенном разряде. Было обнаружено, что разогрев проволок, возникающий за секундные времена, влияет на величину регистрируемого сигнала. Поэтому через 5 с после запуска развертки



**Рис. 2.** Блок-схема экспериментальной установки: 1 — СВЧ генератор; 2 — осциллограф; 3 — неподвижная часть волноводного тракта; 4 — муфта; 5 — подвижная часть волноводного тракта; 6 — двухпроводная линия передачи с согласующими элементами; 7 — поглотитель; 8 — направленный ответвитель с детектором СВЧ излучения.

разряд выключался. Величина сигнала, пропорциональная мощности принимаемого СВЧ излучения, измерялась непосредственно перед гашением и сразу после гашения разряда. Шумы сглаживались интегратором с постоянной времени  $\sim 10^{-2}$  с. На двух частотах, 29.6 и 35.2 GHz, проведено несколько десятков измерений с последующим усреднением полученных результатов.

5. Измерения при токе разряда  $I = 60$  mA дали следующие значения коэффициента поглощения зондирующего СВЧ излучения:  $2 \cdot \langle \alpha \rangle \cdot L = 0.056$  (среднее квадратичное отклонение  $\Delta = 0.004$ ) при  $F = 29.6$  GHz и  $2 \cdot \langle \alpha \rangle \cdot L = 0.034$  ( $\Delta = 0.003$ ) при  $F = 35.2$  GHz. Для определения средней концентрации с помощью соотношения (1) и (2) необходимо знать значение  $\nu$  и характерный

размер плазменного образования  $L$ . Расчеты с различными значениями  $\nu$  в пределах ( $100 < \nu < 200$ ) GHz, что соответствует температуре газа ( $2000 > T > 1000$ ) K, показывают, что неопределенность значения  $\nu$  в указанных пределах обуславливает погрешность определения  $n_e$ , не превышающую 30%. Неточное значение размера плазменного образования, оцениваемого по результатам спектроскопических измерений, дает примерно такой же вклад в погрешность. С учетом перечисленных источников погрешности среднюю концентрацию электронов в РЖНЭ при  $I = 60$  mA можно оценить как ( $4 \cdot 10^{11} < n_e < 7 \cdot 10^{11}$ ) cm<sup>-3</sup>. Полученные данные находятся в удовлетворительном согласии с результатами зондовых измерений.

В дальнейшем предполагается применить описанную выше СВЧ методику для исследования РЖНЭ на переменном токе, используя технику стробируемого интегрирования.

## Список литературы

- [1] Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. Уральский университет. 1989. С. 357–376.
- [2] Afanas'ev V.P., Andre P., Barinov Yu.A., Faure G., Kaplan V.B., Lefort A., Shkol'nik S.M. // Proc. XXIII ICPIG. 1997. V. III. P. 104–105. Toulouse, France.
- [3] Faure G., Shkol'nik S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. P. 1212–1218.
- [4] Голант В.Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 328 с.