

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⁻³. 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 ≈ 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 ν значительно превосходит частоту электрон-электронных столкновений и составляет $\nu \sim 10^2 \text{ GHz}$, а плазменная частота — $f_0 \leq 10 \text{ GHz}$.

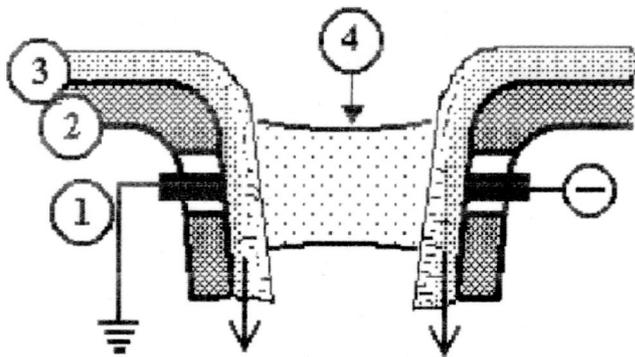


Рис. 1. Схематическое изображение разрядного узла: 1 — металлические токоподводы; 2 — керамики; 3 — водопроводная вода; 4 — разрядная плазма; I — разряд.

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, α — 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 7.2×3.4 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 ≈ 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 ≈ 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

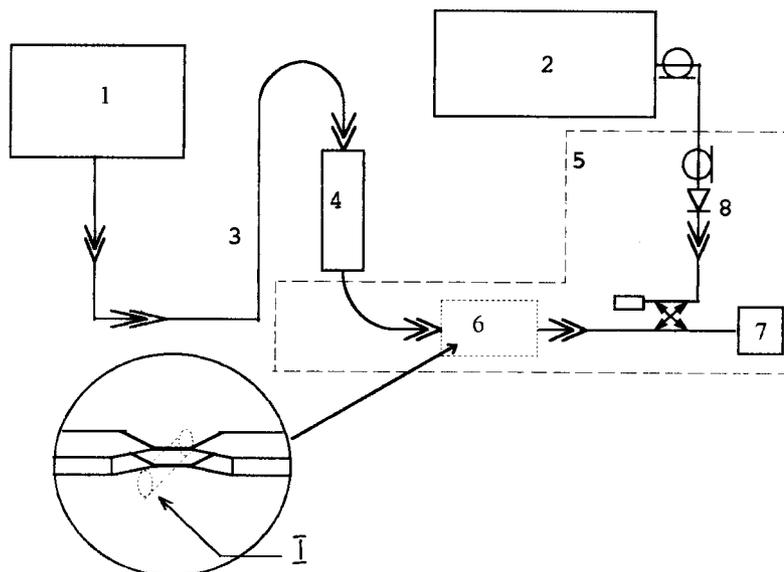


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — СВЧ генератор; 2 — осциллограф; 3 — неподвижная часть волноводного тракта; 4 — муфта; 5 — подвижная часть волноводного тракта; 6 — двухпроводная линия передачи с согласующими элементами; 7 — поглотитель; 8 — направленный ответвитель с детектором СВЧ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

размер плазменного образования L . Расчеты с различными значениями ν в пределах ($100 < \nu < 200$) GHz, что соответствует температуре газа ($2000 > T > 1000$) K, показывают, что неопределенность значения ν 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^{-3} . 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.