

04;12

Измерение плотности плазмы в пространственно распределенном электрическом разряде в жидкой среде

© Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, И.В. Буравилов, А.Н. Пономарев

Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт,
61108 Харьков, Украина
e-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 31 января 2006 г.)

Предпринята попытка непосредственного измерения плотности плазмы, образующейся в электрическом разряде в жидкой среде. Впервые в исследованиях подобного рода применены СВЧ-методы диагностики плазмы. Установлено, что измеренная скорость нарастания плотности плазмы сравнима со скоростью нарастания плотности при ионизации электронным ударом.

PACS: 52.25-b, 52.80.Wg

На базе интенсивных исследований электрических зарядов в жидкости [1] родилась новая отрасль науки, техники и технологии — электрогидравлика, в основе которой лежит так называемый электрогидровлический эффект (ЭГЭ). Основными факторами, сопровождающими ЭГЭ, являются:

- высокие и сверхвысокие импульсные гидравлические давления и связанные с ними ударные волны со скоростью звукового и сверхзвукового диапазонов;
- перемещение значительных объемов жидкости со скоростью $\sim 10^4$ см/с;
- мощные кавитационные процессы;
- инфразвук и ультразвук;
- мощные механические напряжения, приводящие к разрушению материалов;
- сильные магнитные поля $\sim 10^4$ Ое;
- интенсивное импульсное тепловое, световое, ультрафиолетовое и рентгеновское излучение;
- импульсное γ - и n -излучение;
- многократная ионизация соединений и элементов, содержащихся в жидкости.

В то же время, несмотря на весьма обширный экспериментальный и теоретический материал [2–5] и практическое применение ЭГЭ [6,7], физика межэлектродного пробоя в жидкой среде (например, водной) остается не выясненной до конца. В частности, это относится к вопросу определения природы механизма, вызывающего начало разряда. Предполагается, что пробой осуществляется с использованием либо тепловых, либо ионизационных эффектов. В работе [5] на основании проведенных экспериментов по регистрации УФ-излучения, коррелирующего с наведенной проводимостью среды, высказано предположение о возможном появлении электрической или „дырочной“ проводимости.

В данной работе предпринята попытка непосредственного измерения плотности плазмы, возникающей в электрическом разряде в жидкой среде. Эксперименты проводились на установке, состоящей из разрядной кюветы, импульсной многоканальной системы электро-

питания [8], средств диагностики. Разрядная кювета объемом 590 см^3 , изображенная на рис. 1, изготавливается из органического стекла толщиной 8 мм. В центре каждой из боковых стенок были сделаны проточки для центровки СВЧ-рупоров, размещаемых снаружи кюветы нормально к ее поверхности. Внутри кюветы на противоположных торцах каркаса располагалось 8 пар острых (игольчатых) электродов.

Кювета заполнялась водой, в которую добавлялось 40–50 г поваренной соли (NaCl). Внутреннее расстояние между боковыми стенками составляло 2.3 см. Одиночный емкостной накопитель имел следующие параметры: емкость — $0.4\text{ }\mu\text{F}$, индуктивность — 10^{-6} Н, длительность импульса $T = 2\pi\sqrt{LC} \approx 100\text{ }\mu\text{s}$, запасенная энергия при напряжении 20 кВ — 80 Дж.

В качестве метода диагностики образующейся плазмы выбран метод СВЧ-зондирования, позволяющий напрямую измерять плотность электронной компоненты, а в качестве средства измерения — СВЧ-интерферометр с рабочей длиной волны $\lambda = 0.8$ см. Для определения величины разрядного тока использовался пояс Роговского.

В эксперименте фиксировались интерферограмма, т. е. изменение величины фазового сдвига (набега фазы) $\frac{\varphi}{2\pi}$ СВЧ-сигнала во времени от начала развития разряда до

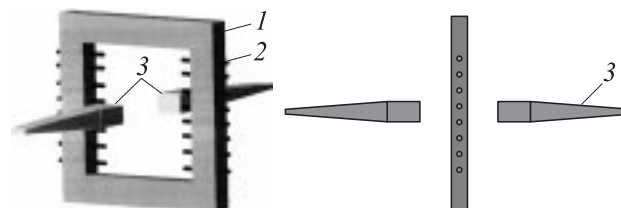


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментального устройства: 1 — разрядная кювета; 2 — электроды; 3 — СВЧ-рупорные антенны.

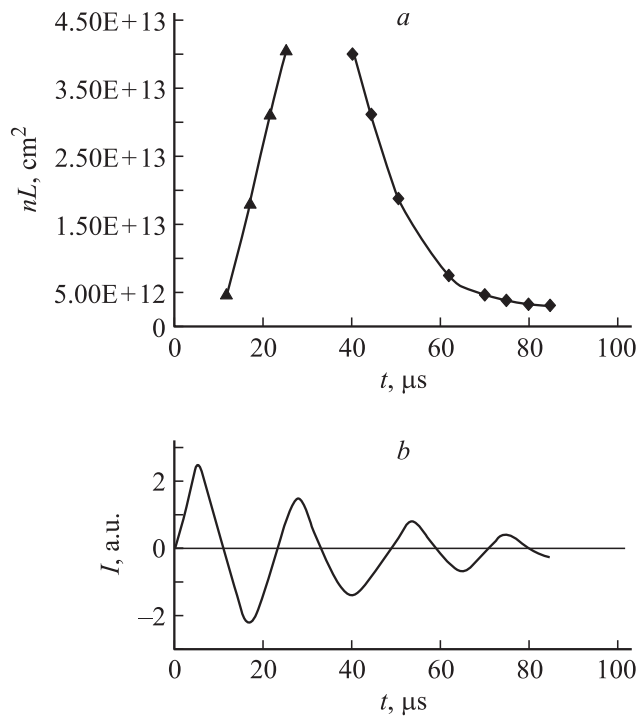


Рис. 2. Зависимости плотности плазмы (а) и разрядного тока (b) от времени.

его окончания. Это позволяет с помощью уравнения [9]:

$$\frac{\varnothing}{2\pi} = \frac{L}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{n}{n_{\text{cr}}}} \right) = \frac{nL}{2\lambda n_{\text{cr}}}$$

определить в данный момент времени плотность плазмы n . Принятые обозначения: λ — рабочая длина волны; n_{cr} — критическая плотность плазмы для данной длины волны; L — поперечный размер плазменного образования, а nL — его толщина, cm^{-2} .

На рис. 2,а приведена зависимость плотности, возникающей в разряде плазмы во времени. Указанную зависимость можно условно разделить на три участка. Сначала идет участок роста плотности плазмы в течение $12.5 \mu\text{s}$ в диапазоне толщин плазменного образования nL (плотности плазмы) $4.6 \cdot 10^{12} (2 \cdot 10^{12}) - 4.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} (1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3})$. Далее следует участок достижения максимальных значений $nL \geq 4.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ($n \geq 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) и возможного существования некоторых стационарных условий в течение $18 \mu\text{s}$. Третий участок — это участок спада толщины плазменного образования от $4.0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ (плотность $1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) до $3.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ($1.3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$) и распада плазменного образования общей продолжительностью $20 \mu\text{s}$. На рис. 2,б приведена временная зависимость разрядного тока. Видно, что спад плотности плазмы начинается при уменьшении его величины примерно на 50% и более от номинала.

Проведенные измерения плотности плазмы многоэлектродного разряда в жидкой среде позволяют сделать некоторые выводы и высказать несколько соображений относительно этого.

1. Впервые в практике исследований электрических разрядов в жидких средах проведено измерение микропараметров разряда с помощью СВЧ-методов диагностики плазмы, в частности, плотности плазмы и ее динамики во времени.

2. Измеренная в эксперименте скорость нарастания плотности плазмы в начальный период разряда сравнима со скоростью нарастания плотности при ионизации электронным ударом и может, таким образом, являться подтверждением ионизационного механизма пробоя в жидкости при подаче импульсного напряжения [10,11].

3. Показано, что реализация высоковольтного пробоя средней интенсивности [1] в жидкой среде пространственно распределенного разряда возможна при длительности токового импульса до $100 \mu\text{s}$, в то время как в литературе [1] указывается длительность менее $1 \mu\text{s}$.

4. Полученный результат отличается от данных [1–7] тем, что ранее исследовались сильно сжатые разряды с поперечными размерами $10-30 \mu\text{m}$. В нашем случае имеем разряд, распределенный в пространстве, с активным ионизованным объемом около $100-300 \text{ cm}^3$ при рабочем объеме разрядной кюветы $\sim 600 \text{ cm}^{-3}$.

Наряду с этим следует отметить, что разряды в жидкости существенно отличаются от аналогичных разрядов в газовой среде, особенно в однородных газовых средах. При развитии разрядов в жидкой среде, скорее всего, образуются не моноионы, а конгломераты молекул (кластеры), имеющие положительную или отрицательную полярность. В случае образования отрицательно заряженных кластеров в плазме разряда должен образовываться дефицит электронов. Исходя из сравнения удельных плотностей исходного материала среды (например, воды) и образующейся плазмы, можно предположить, что количество молекул в кластере может достигать значений 10^3-10^4 и более. В случае воды возможно образование ионов OH_2^- , OH^- с последующей их диссоциацией и возможной рекомбинацией. В развитии разряда в жидкости условно можно выделить несколько стадий: тепловую, когда вкладываемая в разряд энергия идет на процесс локального парообразования; ионизационную, когда часть энергии тратится на образование свободных электронов и соответственно отрицательно заряженных кластеров; и, наконец, стадию поддержания плазменного баланса в течение протекания разрядного тока.

Интерес к исследованию разрядов в жидкости, с одной стороны, связан с научно-производственной необходимостью подобных исследований с использованием СВЧ-методик диагностики образующейся плазмы, а также практическим использованием подобных разрядов для модификации свойств жидких сред, применяемых в технологиях очистки различных материалов и изделий от примесей и загрязнений в переменном-импульсных полях высокой интенсивности, например, акустических.

Достаточно хорошо известна и исследована задача модификации поверхностных слоев металлов с помощью корпускулярного (e^- , i^+ , i^0), лазерного, СВЧ-излучений [12]. Подобная модификация (направленное изменение свойств), по-видимому, может быть реализована и в отношении жидкостей, тем более что подобная постановка задачи и ее реализация обуславливаются практическими потребностями различных отраслей науки, техники и технологии.

Некоторые выводы, изложенные в данном материале, на настоящем этапе предварительных исследований носят скорее постановочный характер, и ответы на них могут быть найдены только в процессе последующих исследований.

Список литературы

- [1] Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
- [2] Импульсный разряд в диэлектриках. Новосибирск: Наука, 1985.
- [3] Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972.
- [4] Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск: Изд-во ТГУ, 1975.
- [5] Антилов А.М., Бархударов Э.М., Копьев В.А. и др. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 7. С. 683.
- [6] Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрический разряд в воде. М.: Наука, 1971.
- [7] Горячев В.Л., Коробочко В.Ю., Кулишевич А.И. и др. // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1999. Т. 63. № 11. С. 2294.
- [8] Юферов В.Б., Ткачев В.И., Буравиков И.В. и др. // Физические и компьютерные технологии. Тр. 11 Междунар. конф. Харьков: ХНПК „ФЭД“, 2005. 386 с.
- [9] Голант В.Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. Наука, 1968. 328 с.
- [10] Хастед Дж. Физика атомных столкновений. М.: Мир, 1965. 710 с.
- [11] Скибенко Е.И. Автореф. канд. дис. Харьков, 1973.
- [12] Калинин Б.А. // Вопросы атомной науки и техники. Харьков, 1998. Вып. 1–2. 122 с.