

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СИЛЬНОТОЧНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА СО СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ И НЕПРОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКОЙ

Ключевые слова: сильноточный высокочастотный емкостной разряд, слаботочный, стримерный разряд, электрод, электролитическая ячейка.

Представлены результаты экспериментального исследования сильноточного высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) между струйным электролитическим электродом и проточной электролитической ячейкой в диапазоне давления $P = 2 \cdot 10^3 - 10^5$ Па, а также погруженным в непроточный электролит с металлическим электродом при $P = 10^5$ Па. Изучен переход слаботочного в сильноточный ВЧЕР. Установлено существенное влияние давления на напряжение перехода слаботочного ВЧЕР в сильноточный. Выявлено, что в случае погружения стальной пластины в непроточный электролит величина напряжения перехода слаботочного в сильноточный ВЧЕР значительно возрастает. Обнаружено, что «стримерные разряды» способствуют переходу слаботочного в сильноточный ВЧЕР. Показано, что при $U \geq 3500$ В сильноточный ВЧЕР со струей электролита переходит в факельную форму разряда.

Keywords: high current high frequency capacitive discharge, low current, streamer discharge, electrode, electrolytic cell.

Presented are the results of experimental investigation of high current high frequency capacitance discharge (HFCD) between a jet electrolyte electrode and electrolytic cell with flowing electrolyte in the pressure range $2 \cdot 10^3 - 10^5$ Pa as well as a discharge between a metal electrode immersed in non-flowing electrolyte at 10^5 Pa. The transition of a low current HFCD to high current one is studied. The significant influence of pressure on the transition voltage is found. It is established that in the case of an immersed steel electrode the magnitude of the transition voltage from low current HFCD to high current one is significantly higher. The streamer discharges are found to facilitate to such transition. It is shown that at voltages $U \geq 3500$ V the high current HFCD transforms to a torch type discharge.

Введение

Известно, что эффективным методом модификации различных материалов является обработка в плазме высокочастотного емкостного разряда между твердыми электродами [1, 2]. Это вид разряда характеризуется следующими параметрами. В разряде концентрация электронов $n_e = 10^{17} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$, температура электронов $T_e = 1 - 3$ эВ, температура тяжелых частиц $T_i = 0,27$ эВ. Плазма высокочастотного емкостного разряда между твердыми электродами позволяет обрабатывать малогабаритные изделия, порошковые материалы, внутренние и наружные поверхности изделий сложной конфигурации, органические и неорганические материалы с различным внутренним составом и структурой [1, 2].

Известно, что если слаботочным ВЧЕР представляет идеальную возможность для создания простых, компактных и эффективных лазеров [3, 4], то сильноточный ВЧЕР является полезным для ионной обработки поверхности материалов и изделий. Однако в настоящее время воздействие неравновесной плазмы ВЧЕР с жидкими электродами на поверхности материалов практически не изучено. Не установлены физическая сущность процесса модификации и влияние структурно-фазовых изменений на свойства материала. Немногочисленные исследования ВЧЕР с жидкими электродами показывают, что этот вид разряда обладает большими возможностями по сравнению ВЧЕР между твердыми электродами [5, 6], а также тлеющего разряда постоянного тока с жидкими электродами [7-8]. Использование неравновесной плазмы слаботочного и сильноточного ВЧЕР с жидкими электродами несо-

мненно открывают новые возможности практического использования [5, 6].

Целью данной работы является изучение сильноточного ВЧЕР с жидкими электродами в широком диапазоне давления $P = 2 \cdot 10^3 - 10^5$ Па с струйным и непроточным электролитами, а также погруженным в электролит металлическим электродом при $P = 10^5$ Па.

Экспериментальная установка и обсуждение результатов экспериментальных исследований

Описание экспериментальной установки для исследования ВЧЕР со струйным электролитом приведено [5].

Разрядная камера для исследования ВЧЕР между металлическим электродом, погруженным в электролит состоит из непроточной электролитической ячейки и устройства для закрепления металлического электрода. Потенциалы от высокочастотного источника питания подаются на нижнюю медную пластину, которая находится в электролитической ячейке и металлический электрод, погруженный в электролит из раствора NaCl в технической воде. Глубина погружения стальной пластины 10 мм.

Исследования особенности ВЧЕР со струйным электролитическим электродом проводились в диапазоне $P = 2 \cdot 10^3 - 10^5$ Па, напряжения $U = 1,5 - 4$ кВ, тока разряда $I = 0,7 - 5$ А, длины струи электролита $l_e = 10 - 25$ мм, диаметра струи электролита $d_e = 3 - 5$ мм и скорости движения электролита $v = 0,9 - 2$ м/с. Размеры стальной пластинки $S = 40 \times 40 \text{ мм}^2$.

В данной работе исследуются особенности перехода слаботочного высокочастотного емкостного разряда в сильноточной ВЧЕР с электролитиче-

скими электродами. Поэтому для сравнения следует отметить особенности горения ВЧЕР между твердыми электродами. В случае сильноточного ВЧЕР между твердыми электродами возникает диффузионное свечение промежутка, а около электродов газ практически не светится [3]. Главной особенностью сильноточного ВЧЕР является то, что на твердом электроде происходит кратковременная вторичная электронная эмиссия электронов. Около катода возникает катодный слой, как и в тлеющем разряде. Факт существования двух форм ВЧЕР между твердыми электродами, их свойства, закономерности перехода из одной формы в другую при $P = 10-100$ Тор подвергалась детальному исследованию [3, 4].

Ниже представлены результаты экспериментального исследования перехода слаботочного в сильноточный ВЧЕР с струйным и непроточным электролитом. Из фотографии рис. 1 видно, что при $P = 2000$ Па и $U = 1000$ В горит слаботочный ВЧЕР, где пятно охватывает медную трубку и струю электролита. С ростом напряжения от 1000 до 1500 В форма разряда меняется. Горит диффузный ВЧЕР с неоднородным темно-сиреневым цветом между U-образным пятном на поверхности медной трубки струи электролита и проточным электролитом. В плазменном столбе (ПС) наблюдаются точечные пятна. С увеличением напряжения от 1500 до 2000 В неоднородность ПС диффузного ВЧЕР существенно увеличивается. Это объясняется тем, что на поверхности медной трубки появляются «стримерные разряды», которые имеют белые концентрированные пятна с диаметром 2-3 мм на поверхности медной трубки и хвост зеленого цвета [6]. Это название принято условно в связи с тем, что они очень похожи на стримеры в процессе развития электрического пробоя как и в [6]. Эти разряды разрывают U-образное пятно на поверхности медной трубки (фотографии рис. 2). Выявлено, что «стримерные разряды» в данном случае в отличие от [6] наблюдаются без фона с другими медными элементами разрядной камеры. Установлено, что «стримерные разряды» способствуют переходу в сильноточный ВЧЕР. Переход в сильноточный ВЧЕР происходит при $U = 2500$ В. Обнаружено, что «стримерные разряды» наблюдаются так же в случае сильноточного ВЧЕР.

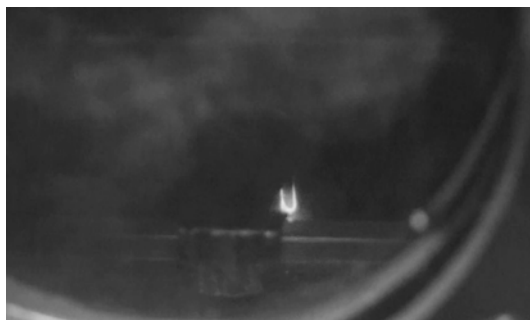


Рис. 1 – Фотография перехода слаботочного в сильноточный ВЧЕР с струйным электролитическим электродом при $P = 2000$ Па, $U = 1000$ В, $I_c = 20$ мм, $v = 0,9$ м/с. Электролит – 3%-й йодированный раствор NaCl в технической воде

В данном случае «стримерные разряды» существенно отличаются размерами, чем в слаботочном ВЧЕР. Диффузный хвост «стримерного разряда» расслаивается с различными интенсивностями излучения и имеет белый, желтый и зеленый цвета. Если в случае слаботочного белое пятно на поверхности медной трубки составляет $\sim 2-3$ мм, то в случае сильноточного ВЧЕР достигает до $\sim 5-6$ мм. Если происходит обратный переход от сильноточного ВЧЕР в слаботочный «стримерный разряд» отделяется от поверхности медной трубки и струйного электролита.



Рис. 2 – Фотография перехода слаботочного в сильноточный ВЧЕР с струйным электролитическим электродом при $P = 2100$ Па, $U = 1000$ В, $I_c = 20$ мм, $v = 0,9$ м/с. Электролит – 3%-й йодированный раствор NaCl в технической воде

На фотографии рис. 3 представлен переход слаботочного ВЧЕР в сильноточный с струйным электролитическим электродом при атмосферном давлении. Струя электролита из 3% раствора NaCl служит электродом. Вдоль поверхности верхней половины струи наблюдаются точечные пятна, а в месте пересечения струйного электролита с воронкой электролита, который образует сама струя горит слаботочный ВЧЕР. В данном случае горит ВЧЕР между струей электролита и поверхностью электролита внутри воронки. С ростом величины U от 1000 до 1500 В появляются пульсирующие струи плазмы с края воронки электролита. Это объясняется тем, что слаботочный ВЧЕР начинает гореть между струей электролита и медной поверхностью внутри воронки. Если величину U увеличить еще больше от 1500 до 2000 В поверхность медной пластинки начинает распыляться. Это приводит к одновременной очистки и полировки поверхности медной пластины внутри воронки с использованием слаботочной ВЧЕР с струйным электролитом. Распыление поверхности меди подтверждается тем, что наблюдается интенсивное зеленое свечение в плазменных струях. С дальнейшим ростом напряжения от 2000 до 2500 В происходит переход слаботочного ВЧЕР с струйным электролитом в сильноточный ВЧЕР. Сильноточный ВЧЕР горит между струей электролита и проточным электролитом. С увеличением величины напряжения от 2500 до 3500 В наблюдается переход сильноточного ВЧЕР со струей электролита в факельную форму (фотографии рис. 3).



Рис. 3 – Фотография перехода слабotoчного в сильноточный ВЧЕР с струйным электролитическим анодом при атмосферном давлении, $I_c = 20$ мм, $v = 0,9$ м/с, $U = 3000$ В. Электролит – 3%-й йодированный раствор NaCl в технической воде

На рис. 3 представлен переход слабotoчного ВЧЕР с стальной пластинкой, погруженным в непроточный электролит при $P = 10^5$ Па. При небольших $U = 2000$ В слабotoчный ВЧЕР наблюдаются с правой стороны стальной пластинки с образованием поперечных волн на поверхности электролита. С ростом величины U от 2000 до 5500 В происходит скачкообразный переход слабotoчного разряда с нижней части стальной пластины в сильноточный ВЧЕР. Если увеличить напряжение еще больше от 5500 до 6000 В, то сильноточный ВЧЕР между стальной пластинкой и непроточным электролитом охватывает всю поверхность пластины (рис. 4). Такой сильноточный разряд можно использовать для модификации поверхности материалов.



Рис. 4 – Фотография перехода слабotoчного в сильноточный ВЧЕР с стальным электродом, погруженным в непроточный электролит при $P = 10^5$ Па, $U = 6000$ В

Заклучение

1. Изучен переход слабotoчного высокочастотного емкостного разряда в сильноточный ВЧЕР с струйным электролитическим электродом диапазоне $P = 2 \cdot 10^3 - 10^5$ Па, а также погруженным в непроточный электролит стальной пластиной при атмосферном давлении.

2. Установлено, что давление существенно влияет на напряжение перехода слабotoчного ВЧЕР в сильноточный, «стримерные разряды» способствуют переходу слабotoчного в сильноточный ВЧЕР.

3. Обнаружено, что при обратном переходе сильноточного ВЧЕР в слабotoчный «стримерные разряды» отделяются от поверхности медной трубки для подачи струи электролита. Показано, что при $U \geq 3500$ В сильноточный ВЧЕР со струей электролита переходит в факельную форму.

Литература

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. *Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления*. Казань: Казан. гос. технол. ун-т, 2007. 354 с.
2. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. *Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения*. Казань: Казан. гос. технол. ун-т, 2000. 348 с.
3. Райзер Ю.П. *Основы современной физики газоразрядных процессов*. М.: Наука, 1980. 414 с.
4. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 588 с.
5. Bruggeman P, Christophe L. *Non-thermal plasma in liquids and in contact with liquids (topical review)* // J. Phys.D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 053001 (28pp).
6. Гайсин А.Ф. *Некоторые особенности развития высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) между капельно-струйным электролитическим электродом и проточной электролитической ячейкой* // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 6. С. 945.
7. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш. *Особенности высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) при пониженных давлениях с металлическим электродом, погруженным в электролит* // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. № 19. С. 301-304.
8. Садриев Р.Ш., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Аз.Ф., Басыров Р.Ш., Гайсин Ф.М. *Особенности высокочастотного разряда между твердым и электролитическим электродами* // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. № 23. С. 216-218.
9. Гайсин Ал.Ф. *Электрические разряды вдоль струи электролита* // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. № 19. С. 307-310.