

Введение Известно, что эффективным методом модификации различных материалов является обработка в плазме высокочастотного емкостного разряда между твердыми электродами [1, 2]. Этот вид разряда характеризуется следующими параметрами. В разряде концентрация электронов $n_e = 10^{17}-10^{19}$ м³, 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 слаботорочным 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 слаботорочного и сильноточного ВЧЕР с жидкими электродами несомненно 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 $l_s = 10-25$ мм, диаметра струи электролита $d_s = 3-5$ мм и скорости движения электролита $v = 0,9-2$ м/с. Размеры стальной пластинки $S = 40 \times 40$ мм². В данной работе исследуются особенности перехода слаботорочного высокочастотного емкостного разряда в сильноточной ВЧЕР с электролитическими 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, $l_c = 20$ 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, $l_c = 20$ 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 слаботочного в сильноточный ВЧЕР с струйным электролитическим анодом при атмосферном давлении, $l_c = 20$ мм, $v = 0,9$ м/с, $U = 3000$ В. Электролит - 3%-й йодированный раствор NaCl в технической воде На рис. 3 представлен переход слаботочного ВЧЕР с стальной пластинкой, погруженным в непроточный электролит при $P = 105$ Па. При небольших $U = 2000$ В слаботочный 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 слаботочного 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 слаботочного в сильноточный ВЧЕР с стальным электродом, погруженным в непроточный электролит при $P = 105$ Па, $U = 6000$ В

Заключение 1. Изучен переход слаботочного 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 слаботочного ВЧЕР в

сильноточный, «стримерные разряды» способствуют переходу слаботочного в сильноточный ВЧЕР. 3. Обнаружено, что при обратном переходе сильноточного ВЧЕР в слаботочный «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.