

М.С. КУКУШКИНА^{1, 2}, А.В. КАЗИЕВ², Д.В. КОЛОДКО^{1, 2, 3},
М.М. ХАРЬКОВ², И.Г. РЫКУНОВ^{1, 2}, М.М. ЦВЕНТУХ¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН),
Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СПОНТАННОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ СО СЛОЯМИ ВОЛЬФРАМОВЫХ НАНОВОЛОКОН

При повышении пристеночного потенциала гелиевой плазмы, воздействующей на поверхность вольфрама, рост наноструктуры волокон вольфрама сменяется распылением, при этом спонтанно (без внешнего триггера) инициируются «пробои» - импульсы взрывной электронной эмиссии [1-3].

Проведены обзорные измерения статистики возникновения дуговых разрядов на поверхности вольфрама при его облучении в гелиевой плазме. Выявлено, что образование дуг, в целом, отличается редкостью и спонтанностью и в большей части диапазона рабочих параметров не наблюдается. Поэтому было принято решение ограничить исходные пределы варьирования параметров облучения до тех областей, в которых хотя бы одно дуговое событие регистрировалось в течение разумного времени эксперимента (1 ч).

С наибольшей вероятностью наблюдалось образование дуг на образцах, обрабатываемых при температуре ~ 1200 К. При этом средний по времени поток ионов гелия мог варьироваться в пределах $2.5 \times 10^{20} - 2.0 \times 10^{21}$ 1/м²/с путем изменения коэффициента заполнения импульсов напряжения смещения в диапазоне 10–80%. Частота следования импульсов была постоянной (1 кГц), а их длительность, соответственно, выбиралась от 100 до 800 мкс. При различных значениях мощности разряда в диапазоне 500–2000 Вт изменение длительности импульса позволяло поддерживать одинаковый средний ток на образец и одинаковую температуру. Варьировалось также напряжение смещения на образце, которое задает энергию бомбардирующих поверхность ионов. Оно составляло от –150 В до –850 В. Определено, что для благоприятные условия для возникновения дуги реализуются при напряжении смещения –800 В и ниже, т.е. при повышенных значениях

энергии ионов гелия. Структуры, вырастающие при повышенном потенциале при фиксированной длительности эксперимента, характеризуются значительно меньшей высотой, однако толщина волокон сохраняется. В этих условиях проведены эксперименты по регистрации дуг во время облучения.

В экспериментах без подключения схемы ограничения тока дуги во время дугового пробоя срабатывала система дугозащиты блока питания, ограничивающая время жизни дуги до ~ 1 мкс. В экспериментах с подключением схемы ограничения тока дуги дугозащита не срабатывала, и временем жизни дуги можно было управлять путем изменения длительности подаваемого импульса. В нашем случае рассматривалась длительность 200 мкс. Таким образом, были измерены осциллограммы тока и напряжения дугового разряда на наноструктурированных W поверхностях с длительностями ~ 1 и 200 мкс.

В первом случае без подключения балластной схемы дуга возникла через 13.5 минут после начала облучения и длилась меньше 1 мкс, амплитуда тока составила ~ 24 А. Время жизни дуги соответствовало времени срабатывания системы дугозащиты. Осциллограмма тока и напряжения приведена на рис. 1.

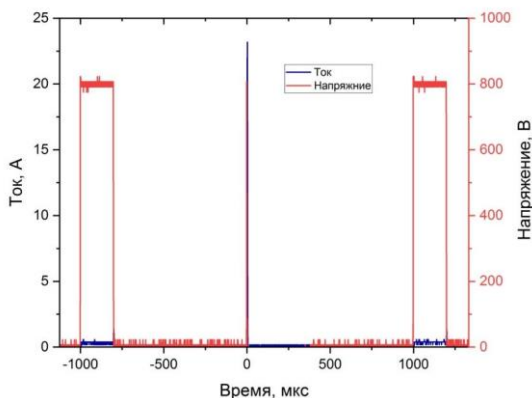


Рисунок 1 – Осциллограмма тока и напряжения «короткой» дуги

Во втором случае работа проводилась с подключенной балластной схемой, дугозащита не срабатывала, и дуга продолжалась целый импульс (~ 200 мкс), выходя на плато при амплитуде тока ~ 6.3 А (рис. 2). Выход тока на плато обусловлен тем, что блок питания работал в режиме стабилизации по току при своем максимально возможном стационарном значении.

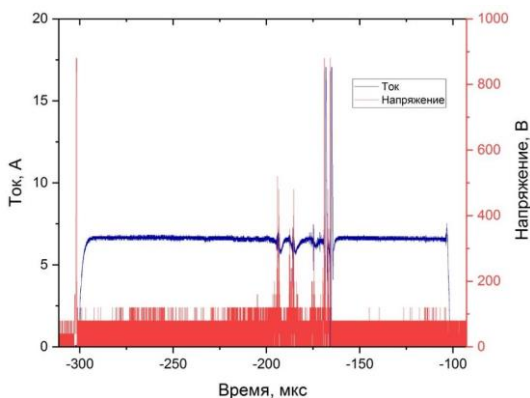


Рисунок 2 – Осциллограмма тока и напряжения «долгой» дуги

До и после обработки образцов в ВЧ-плазме их поверхность анализировалась с помощью СЭМ. Изображения поверхности образца до и после протекания короткого дугового разряда показаны на рис. 3.

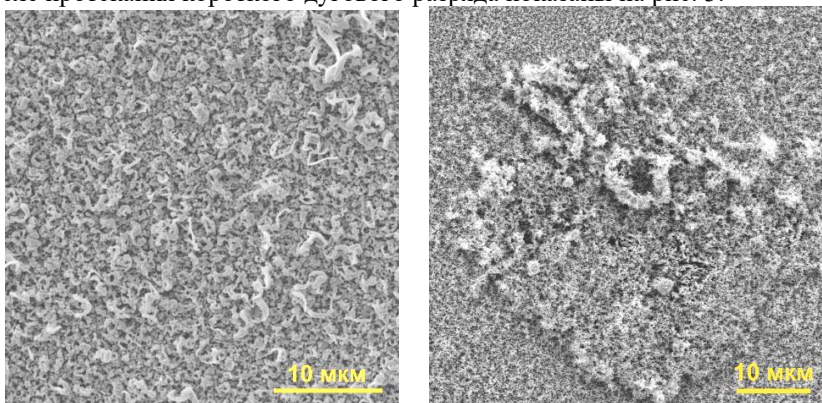


Рисунок 3 – СЭМ изображения поверхности образца до и после протекания короткой дуги (~ 1 мкс)

В первом случае, когда время жизни дуги ограничивалось 1 мкс, после облучения структуры ионами гелия наблюдается характерный кратер диаметром ~ 50 мкм, покрытый вольфрамовым «пухом» в процессе дальнейшего облучения.

Изображение поверхности образца после протекания длинного дугового

разряда показано на рис. 4.

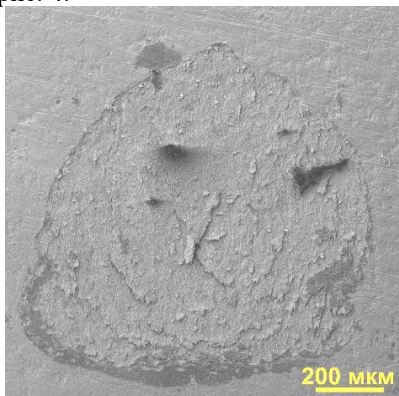


Рисунок 4 – СЭМ изображение поверхности образца после протекания длинной дуги (~ 200 мкс)

Во втором случае на поверхности образца после дугового пробоя масштаб разрушенной области составляет ~ 1 мм.

В отличие от результатов работ на линейном симуляторе NAGDIS-II, в настоящем исследовании дуги возникали гораздо реже, что может объясняться отсутствием в плазме разряда примесей (азот, кислород) в условиях наших экспериментов.

Таким образом, впервые в режиме одиночных импульсов проведены согласованные экспериментальные исследования тока и напряжения в гелиево-вольфрамовой плазме со спонтанным инициированием дугового разряда и микроструктуры возникающего в результате взаимодействия с поверхностью рельефа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00274.

Литература:

- [1] Kajita S., Noiri Y., Ohno N. 2015 *Phys. Scr.* **90** 095604
- [2] Rongshi Zhang, *et al* 2022 *Nuclear Materials and Energy* **31** 101178
- [3] Tsvetoukh M M 2023 *Phys. Plasmas* **30** 092511