

Измерение порогового тока вакуумной дуги для наноструктурированного вольфрама

П. Михайлов^{1,*}, И. Музюкин¹, Ю. Мамонтов¹, И. Уйманов¹, Ю. Земсков¹, С. Баренгольц^{2,3}

¹Институт Электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

*gmgm01@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты измерения порогового тока вакуумной дуги для наноструктурированного вольфрама (вольфрамовый пух, fuzz). Для измерений использовалась слаботочная вакуумная дуга (максимальная амплитуда 4.5 А, длительность до 10 мкс). В качестве порогового тока принималось значение тока горения дуги перед резким самопроизвольным погасанием. Полученные значения для вольфрамового пуха значительно меньше, чем для чистого вольфрама.

Ключевые слова: вакуумный разряд, наноматериалы, пороговый ток, fuzz, вольфрамовый пух.

1. Введение

Вольфрам выступает в качестве перспективного материала для изготовления стенок и диверторов в экспериментальных термоядерных реакторах из-за его термических свойств и низкой эрозии при взаимодействии с плазмой. Во время предварительных лабораторных испытаний, обнаружилось, что при взаимодействии гелиевой плазмы с вольфрамовыми стенками, образуются различные наноструктуры, которые называются вольфрамовым пухом (fuzz) [1, 2] этот эффект так же был обнаружен на токамаке Alcator C-Mod [3]. Эти структуры представляют собой тонкие нити металла (толщина – десятки нм), которые хаотически образуются на поверхности вольфрама под воздействием потоков низкоэнергетических (< 60 эВ) ионов гелия при температурах выше 1000 К [4]. Механизм образования таких структур, возможно, связан с проникновением атомов гелия в поверхностный слой вольфрама и последующим вздутием поверхности. Этот эффект характерен не только для вольфрама, но и для других тугоплавких металлов таких как тантал и молибден. Так же, в зависимости от условий, можно получить не только тонкие нити, но и другие структуры такие как «пузырьки», «усики», «завитки» (bubble, loop, tendril) [5].

Главными побочными негативными свойствами наноструктур на поверхности вольфрама являются повышенная вероятность образования униполярных дуг, что приводит к быстрой эрозии стенок ректора [6]. Для понимания механизма образования униполярных дуг необходимо исследовать электрофизические свойства вольфрамового пуха. Автоэмиссионные свойства пуха широко исследованы и получены значения усиления поля от 100–200 до 2000–3000 [7, 8]. При горении дуги, важным параметром является пороговый ток – это минимальный ток, при котором горит дуга. Данная работа посвящена получению значения порогового тока для вольфрамового пуха.

2. Экспериментальное оборудование и методика исследования

На основе универсальной вакуумной камеры была собрана установка для исследования горения дуги на образцах с вольфрамовым пухом. Все эксперименты проводились в безмаслянном вакууме с остаточным давлением не хуже $1 \cdot 10^{-8}$ мм.рт.ст. На Рис.1 показана схема установки. В данной работе был реализован триггерный метод поджига вакуумной дуги. Для этого между анодом и катодом устанавливался триггерный электрод, на который подавался импульс напряжения (500 нс; 15–25 кВ; ~ 3.5 А), достаточный для пробития промежутка триггер-катод (несколько десятков микрон). Образовавшейся плазмы было

достаточно для замыкания анод-катодного промежутка и поджигания дуги. Для точного определения порогового тока необходимо, чтобы момент самопроизвольного погасания дуги, наступил через время существенно большее по сравнению с длительностью импульса поджига. В данном эксперименте питание вакуумной дуги осуществлялось RC-цепью заряженной до 200 В, $R = 35.5 \text{ Ом}$; $C = 40 \text{ нф}$; $\tau = R \cdot C = 1.42 \text{ мкс}$. Параметры питания дуги были выбраны с таким расчетом, чтобы в течение времени существования катодного пятна (десятки нс), ток разряда менялся несущественно. При этом единичный разряд должен производить минимальную эрозию, что позволит провести большое количество измерений на одном участке на поверхности катода. Начальный ток дуги составляет порядка 5.6 А. В качестве анода и триггера выступала вольфрамовая проволока диаметром 400 и 90 мкм соответственно. Анод, катод и триггерный электрод установлены на подвижных вакуумных вводах, что позволило «просканировать» поверхность при определении порогового тока. Для измерения тока дуги использовался шунт 0.33 Ом.

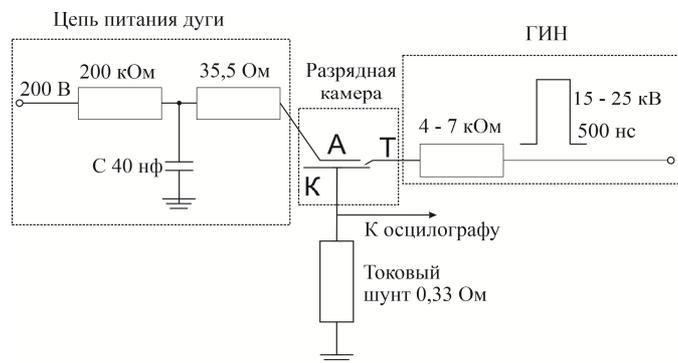


Рис.1. Схема эксперимента. Т – триггерный электрод, А – вольфрамовый анод, К – катод с вольфрамовым пухом.

Образец с вольфрамовым пухом представлял собой тонкий вольфрамовый диск диаметром 2.5 см. На Рис.2 показаны снимки поверхности при помощи сканирующего электронного микроскопа. Из них видно, что толщина слоя составляет 0.8–1.3 мкм. Образцы были изготовлены в МИФИ [9].

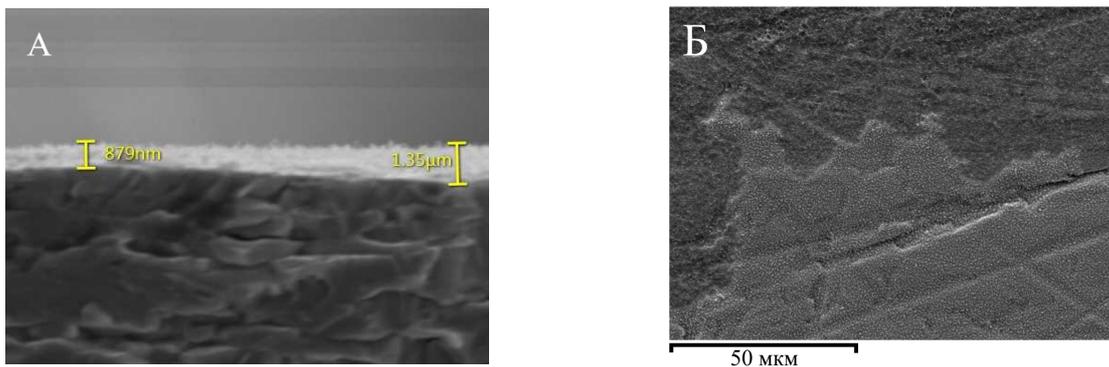


Рис.2. Изображение поверхности СЭМ. А – срез образца, Б – граница вольфрамовой пуха и области с эрозией.

3. Результаты экспериментов

Для образца было выполнено 10 серий измерений порогового тока, каждая серия была на чистой незэродированной поверхности на расстоянии 1–1.5 от другой серии и 3 мм от границы образца и состояла из 5 дуговых разрядов. На Рис.2Б показана граница

эродированной поверхности: темным цветом область эрозии, светлым вольфрамовый пух. На Рис.3 показана типичная осциллограмма тока дуги. В районе 4.8 мкс дуга резко гаснет, ток перед погасанием дуги в данной работе будет приниматься за пороговый.

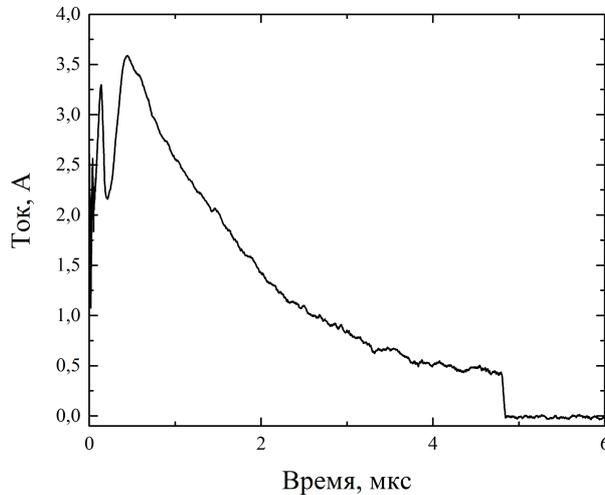


Рис.3. Типичная осциллограмма дуги на вольфрамовом пухе.

На Рис.4 представлена гистограмма со статистикой пороговых токов. На ней показаны общие данные по 10 сериям измерений одновременно. Шаг на гистограмме составляет 0.05 А. На рисунке виден максимум в окне 0.2–0.25 А. Остальные значения равномерно распределены в промежутке от 0.05 до 0.5 А. В отдельных случаях пороговый ток может составлять 1.2 А.

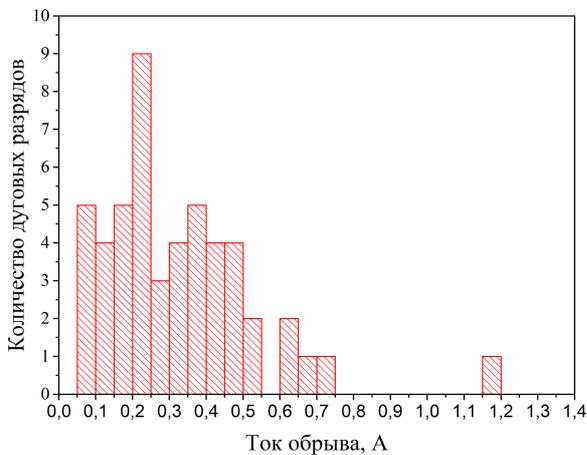


Рис.4. Статистическое распределение порогового тока для вольфрамового пуха.

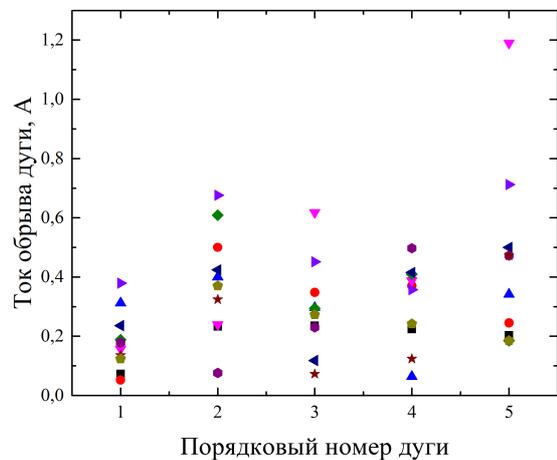


Рис.5. Результаты измерения порогового тока на 10 различных участках образца.

На Рис.5 показаны результаты измерения порогового тока для каждой серии и порядкового номера разряда. Видно, что с эрозией разброс значений порогового тока увеличивается. При дуге на неэродированной поверхности пороговый ток не превышает 0.4 А, после 4 разрядов разброс значений увеличивается и в отдельных случаях достигает 1.2 А, что близко к обычному вольфраму. Из данных можно сделать вывод, что для данного образца пороговый ток составляет 0.3 ± 0.05 А.

Пороговый ток – это минимальный ток необходимый для горения дуги, поэтому для проверки результатов схема эксперимента была переделана для того, чтобы обеспечить

малый и стабильный ток дуги (порядка 300 мА), для этого ограничивающее сопротивление и конденсаторы были увеличены. На Рис.6 показана осциллограмма с результатом.

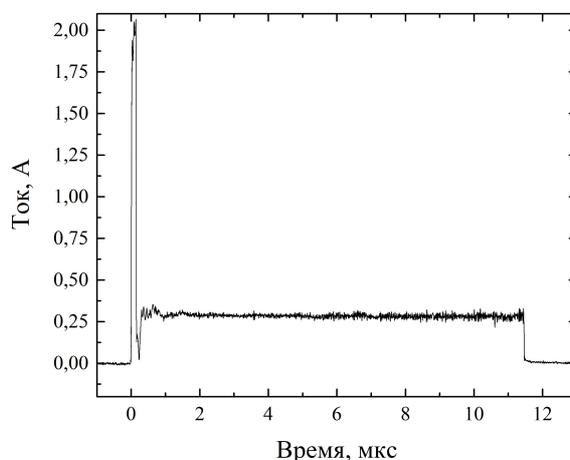


Рис.6. Осциллограмма дуги на вольфрамовом пухе при постоянном токе 0.3 А.

4. Заключение

В результате проделанной работы был исследован процесс горения слаботочной вакуумной дуги на поверхности вольфрамового катода с наноструктурированным покрытием. Одной из особенностей горения дуги является медленное разгорание разряда, от триггерного разряда до максимума тока горения дуги может проходить до 2 мкс. Получившиеся значения порогового тока 0.3 ± 0.05 А значительно меньше, чем для чистого вольфрама. В отдельных случаях пороговый ток меньше 100 мА или практически отсутствует. Для проверки результатов на вольфрамовом пухе удалось зажечь стабильную дугу при токе около 300 мА и длительностью 11 мкс.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00323).

5. Литература

- [1] Takamura S., Ohno N., Nishijima D., Kajita S., *J. Plas. and Fus. Res.*, **1**, 051, 2006; doi: 10.1585/pfr.1.051
- [2] Baldwin M.J., Doerner R.P., *Nucl. Fus.*, **48**, 035001, 2008; doi: 10.1088/0029-5515/48/3/035001
- [3] Wright G.M., et al., *Nucl. Fus.*, **52**, 042003, 2012; doi: 10.1088/0029-5515/52/4/042003
- [4] Kajita S., et al., *Nucl. Fus.*, **49**, 095005, 2009; doi: 10.1088/0029-5515/49/9/095005
- [5] Hwangbo D., Kajita S., Ohno N., Sinelnikov D., *IEEE Tran. Plas. Sci.*, **45**, 2080, 2017; doi: 10.1109/TPS.2017.2679211
- [6] Kajitaa S., Yoshida N., Ohno N., *Nuc. Mater. Ener.*, **25**, 100828, 2022; doi: 10.1016/j.nme.2020.100828
- [7] Hwangbo D., et al., *Plas. Sour. Sci. Technol.*, **29**, 125015, 2020; doi: 10.1088/1361-6595/abc817
- [8] Mikhailov P.S., Muzyukin I.L., *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2064**, 012059, 2021; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012059
- [9] Ogorodnikova O.C., et al., *J. Nuc. Mater.*, **512**, 150, 2019; doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.12.023