

# Вакуумная дуга на поверхности вольфрама, покрытого наноструктурами FUZZ

И.Музюкин<sup>1,\*</sup>, П. Михайлов<sup>1</sup>, Ю. Мамонтов<sup>1</sup>, Ю.Земсков<sup>1</sup>, И.Уйманов<sup>1</sup>, С.Баренгольц<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт Электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

\**plasmon@mail.ru*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования слаботочной вакуумной дуги на вольфрамовом катоде, покрытом наноструктурами FUZZ. В процессе измерений были получены синхронные осциллограммы тока разряда, напряжения между электродами и свечения плазмы. В результате измерений было показано, что вакуумная дуга на покрытии FUZZ крайне нестабильна. Разряд может иметь несколько режимов тока и напряжения, которые могут произвольно переходить один в другой. При этом, в отличие от дугового разряда на чистых металлах, дуга на покрытии FUZZ фактически не имеет порогового тока.

**Ключевые слова:** Вакуумный разряд, катодное пятно, низкотемпературная плазма.

## 1. Введение

Вольфрам используется для создания стенок реакторов для управляемого термоядерного синтеза. Выбор вольфрама обусловлен его высокой теплоустойчивостью, а также хорошими светоотражающими свойствами в широком диапазоне длин волн [1]. В будущих промышленных термоядерных реакторах вольфрамовые стенки будут подвергаться воздействию теплового излучения и бомбардировке ионами дейтерия трития и гелия в течение долгого времени. Установлено, что в этих условиях вольфрамовая поверхность покрывается черным налетом. Черное покрытие было исследовано [1–3] и были сделаны следующие выводы: покрытие представляет собой систему нитей диаметром в несколько нанометров; толщина покрытия растет со временем по закону  $\sim t^{1/2}$ . Были также исследованы эмиссионные свойства покрытия [4, 5]. В результате исследования и получены вольтамперные характеристики автоэлектронной эмиссии с поверхности FUZZ. В частности, параметр геометрического усиления поля составлял от десятков [4] до тысяч [5]. Исследования переходных процессов автоэлектронной эмиссии показало, что в процессе изменения вытягивающего электроны напряжения изменяется количество эмиссионных центров, при этом фактор усиления поля остается примерно одинаковым. При исследовании процессов, предшествующих пробой [5] было выяснено, что перед пробоем начинается рост эмиссионного тока, который длится несколько микросекунд. При этом могут возникать новые эмитирующие центры или исчезать уже работающие. Пробой может возникнуть внезапно через длительное время после установления напряжения до нескольких минут.

Пробой и последующее развитие дугового разряда между плазменным шнуром и стенками реактора несет большую опасность для стабильности плазменного шнура и ведет к разрушению стенок реактора. Необходимо выяснить условия возникновения и поддержания дугового разряда на поверхности вольфрама, покрытого FUZZ. Данная статья посвящена исследованию дугового разряда на поверхности FUZZ при наименьших возможных токах.

## 2. Экспериментальная установка

### 2.1. Электродная система

Эксперименты проводились в безмаслянном вакууме с остаточным давлением  $1^{-8}$  мм рт. ст. Электродная система представлена на Рис.1. Все основные электроды вводились в вакуумную камеру с помощью подвижных вводов. Разряд поджигался на катоде К с помощью острейного поджигающего электрода П. Непосредственно перед острием поджигающего электрода был установлен ограничивающий резистор 4 кОм. Катод

представлял собой держатель, в который вставлялся плоский образец с нанесенным покрытием FUZZ. Толщина катодной пластины 0.5 мм.

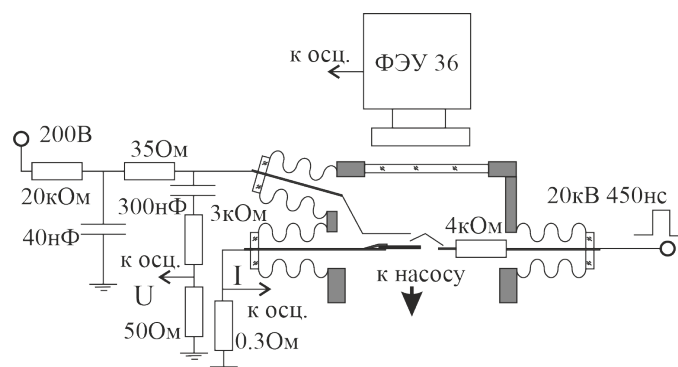


Рис.1. Схема эксперимента.

Катод ориентирован покрытой FUZZ стороной на фотодетектор ФЭУ-36. Сверху катода на расстоянии 1 мм располагается проволоочный анод. Диаметр анода 0.3 мм. Система подвижных электродов позволяла перемещать место разряда в область нетронутого FUZZ. Перед проведением эксперимента катод разогревался в вакууме в течение 10 минут при температуре 500 °С.

## 2.2. Схема измерения и питания

Иницирующий импульс формировался с помощью кабельного генератора. Прямоугольный поджигающий импульс 10–20 кВ подавался на острый электрод П через резистор 4 кОм. Максимальный иницирующий ток составлял 5 А. Длительность поджигающего импульса составляла 450 нс.

Ток разряда измерялся с помощью шунтирующего резистора 0.3 Ом. Сигнал резистора подавался на 50 Ом вход осциллографа. Напряжение на разряде измерялось с помощью делителя 5 кОм–50 Ом.

Разряд питался с помощью конденсатора 40 нФ, который заряжался до напряжения 200 В. Ток разряда ограничивался резистором 8–35 Ом.

Свечение плазмы регистрировалось с помощью фотодетектора на основе ФЭУ-36. При анализе осциллограмм необходимо было учитывать задержку усиливающих каскадов фотодетектора, которая составляла 45 нс.

## 3. Результаты экспериментов

### 3.1. Следы эрозии на поверхности FUZZ

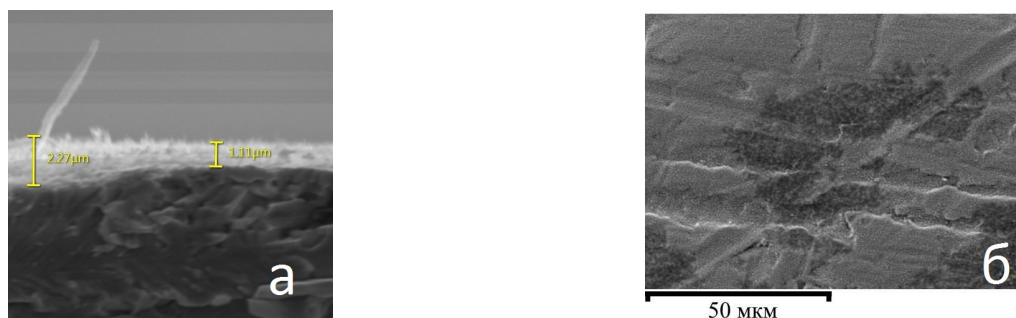


Рис.2. СЭМ фотографии поверхности FUZZ: а – срез поверхности, б – области эрозии вид сверху.

Следы эрозии на поверхности FUZZ были получены с помощью электронного микроскопа. Изображения поверхности, покрытой FUZZ представлены на Рис.2. На Рис.2а представлен срез покрытия. Толщина покрытия составляет 1–2 мкм. Также на поверхности видны отдельные волокна, имеющие существенно большую длину. На Рис.2б видны следы эрозии (относительно темные участки). Видно, что следы эрозии на поверхности FUZZ существенно отличаются от следов эрозии на поверхности чистых металлов. Здесь не видно явно выраженных кратеров с брустверами из расплава и капель. Таким образом, не наблюдается явная порционность эрозионного процесса характерная для чистых металлов.

### 3.2. Измерения параметров разряда

Измерения тока, напряжения и свечения плазмы показывают крайнюю нестабильность параметров разряда. Разряд может произвольно увеличивать или уменьшать свой ток. При этом увеличению тока соответствует уменьшение напряжения и наоборот. Характерные осциллограммы тока, напряжения и свечения плазмы представлены на Рис.3 и Рис.4.

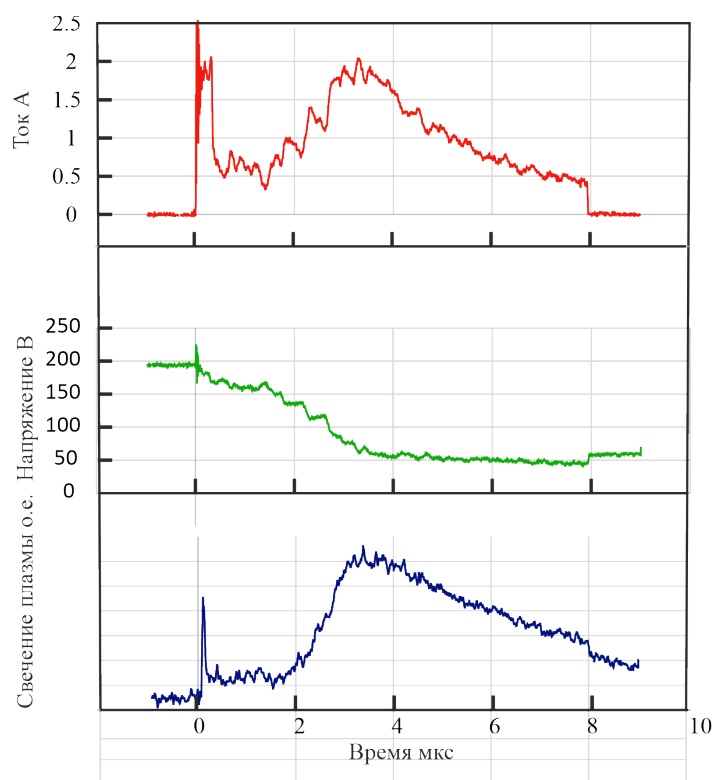


Рис.3. Совместные осциллограммы тока, напряжения и свечения разряда.

На Рис.3 представлена характерная осциллограмма дугового разряда на FUZZ. Отличие от типовой осциллограммы на чистом вольфраме заключается в том, что зависимость тока от времени существенно отличается от временной зависимости тока разрядки конденсатора. В разных частях разряда дуга может перейти в режим большого напряжения и малого тока (режим тления). При этом ток разряда существенно меньше порогового для вольфрама. Напряжение разряда в таком режиме (150 В) существенно выше напряжения в обычном режиме (40–50 В). Для того чтобы выяснить что является причиной перехода в режим тления необходимо понять, что является причиной ограничения тока разряда. В качестве таких причин можно рассматривать процессы в прикатодной области и в столбе разряда.

В прикатодной области условия разряда определяются распределением тока в катодных пятнах. При этом при возможности источника тока отдать больше тока количество пятен увеличивается и ток возрастает фактически до уровня, определяемого формулой:

$$I = (U_{ch} - U_{cat}) / R_s, \quad (1)$$

где  $I$  – ток разряда,  $U_{ch}$  – зарядное напряжение,  $U_{cat}$  – катодное падение,  $R_s$  – сопротивление источника тока. Если материал однороден, тогда катодное падение должно быть примерно одинаково для всей поверхности. В противном случае катодные пятна вероятнее всего будут перемещаться в область наименьшего катодного падения. Следовательно, переход в тлеющий режим маловероятно связан с увеличением в несколько раз катодного падения.

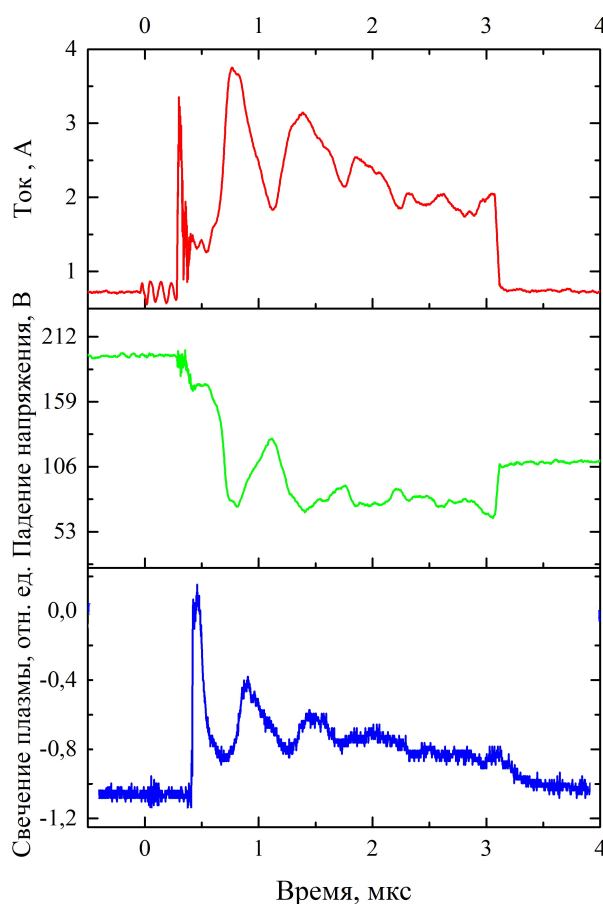


Рис.4. Совместные осциллограммы тока, напряжения и свечения разряда в неустойчивом режиме.

Есть ли механизмы, резко изменяющие сопротивление плазмы дугового столба? В литературе [6] известен эффект аномального сопротивления плазмы при возбуждении плазменной турбулентности. При этом электроны рассеиваются на турбулентных колебаниях. Для оценки вероятности такого механизма нужно выяснить является ли плазма турбулентной. Одним из возможных признаков турбулентности является зависимость количества осцилляций параметров разряда от частоты. Для плазменной турбулентности эта зависимость имеет характер [7]

$$n_{\omega} = aP^{1/2} / \omega^{\nu}, \quad (2)$$

где  $n_\omega$  – количество колебаний с частотой  $\omega$ ,  $P$  – поток энергии от меньших частот к высшим,  $a$ ,  $\nu$  коэффициенты, зависящие от размерности и масштаба задачи. Стандартным Фурье спектром мощности является спектр Колмогорова [8] с зависимостью мощности  $\sim f^{5/3}$ . Если сделать Фурье анализ колебаний тока напряжения и свечения плазмы, то получается, что зависимость мощности колебаний для тока и напряжения является близкой к зависимости для Колмогоровского спектра. На Рис.4 показаны осциллограммы тока, напряжения и свечения плазмы, а на Рис.5 представлены мощностные Фурье спектры этих сигналов.

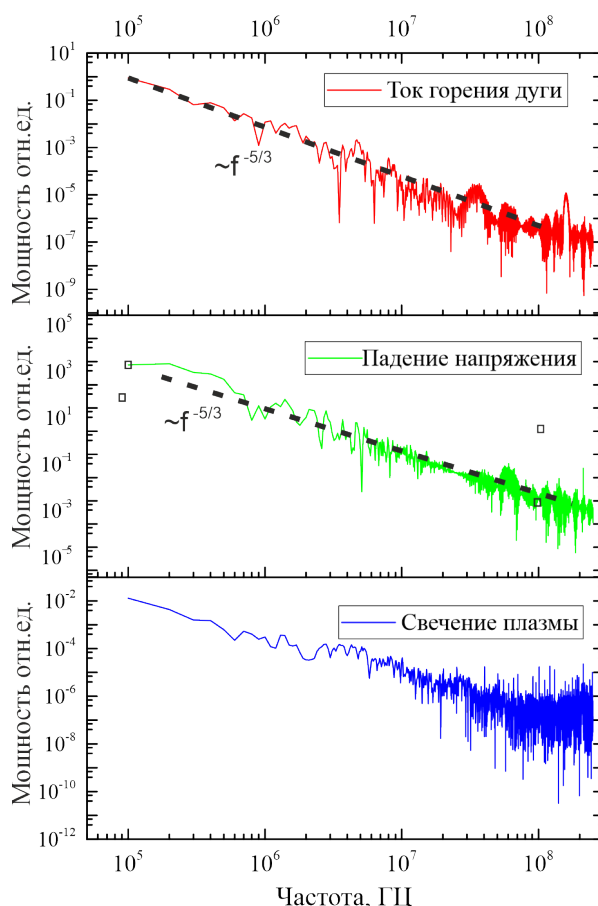


Рис.5. Фурье спектры сигналов тока, напряжения и свечения разряда.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований были выявлены особенности горения вакуумной дуги на поверхности FUZZ. Горение дугового разряда является крайне неустойчивым. Разряд в некоторых случаях переходит в режим тления, с малым током и большим напряжением. Режим тления может реализовываться и в том случае, когда источник тока может обеспечить гораздо больший ток. Было сделано предположение, что такой режим может поддерживаться благодаря двум факторам: 1 – отсутствие порогового тока у покрытия FUZZ; 2 – переход плазменного столба в состояние с развитой турбулентности. Состояние турбулентности косвенно подтверждается мощностными Фурье спектрами, близкими к спектрам Колмогорова для турбулентности.

#### Благодарности

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

## 5. Литература

- [1] Shin Kajita, Wataru Sakaguchi, Noriyasu Ohno, Naoaki Yoshida, Tsubasa Saeki, *Nucl. Fusion*, **49**, 095005, 2009; doi: 10.1088/0029-5515/49/9/095005
- [2] Baldwin M., and Doerner R., *Nucl. Fusion*, **48**, 035001, 2008; doi: 10.1088/0029-5515/48/3/035001
- [3] Takamura S., Ohno N., Nishijima D., Kajita S., *Plasma Fusion Res.*, **1**, 051, 2006; doi: 10.1585/pfr.1.051
- [4] Zemskov Yu.A., Mamontov Yu.I., Uimanov I.V., Zubarev N.M., Kaziev A.V., Kharkov M.M., Barengolts S.A., *J. Phys. Conf. Ser.*, *15th International Conference on "Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP 2021)*, 012004, 2021; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012004
- [5] Mikhailov P.S., Muzyukin I.L., *J. Phys. Conf. Ser.*, *15th International Conference on "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" (GDP 2021)*, 012059, 2021; doi: 10.1088/1742-6596/2064/1/012059
- [6] Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З., *Физика плазмы для физиков*. (Москва: Ленанд, 2018).
- [7] Галеев А., Судан Р., *Основы физики плазмы Т.2*. (Москва: Энергоатомиздат, 1983).
- [8] Колмогоров А.Н., *Докл. АН СССР*, **30**(4), 299, 1941.