



Russian Academy of Sciences
Institute of Electrophysics
Physical electronics Laboratory

Исследование влияния пробоев на эмиссионные свойства вольфрамового «пуха» и его электрическую прочность

Ю.И. Мамонтов*, Ю.А. Земсков, И.В. Уйманов

Лаборатория комплексных электрофизических исследований

Лаборатория физической электроники

**mamontov.ura.1994@yandex.ru*

XXIII Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург, Россия
2022

Содержание



1. О вольфрамовом «пухе»

2. Описание экспериментальных подходов

- Образцы вольфрамового «пуха»
- Схема исследуемого вакуумного диода
- Экспериментальная установка

3. Результаты измерений

- Нетипичное поведение эмиссионного тока вольфрамового «пуха»
- Результаты измерений эмиссионного тока
- Результаты измерений электрической прочности диода

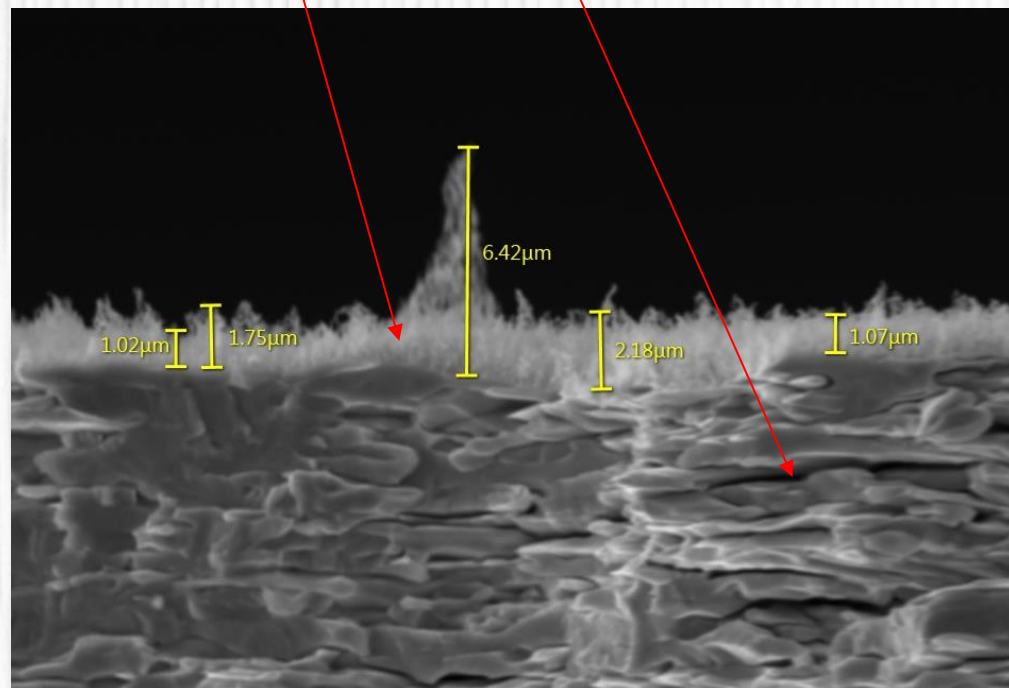
4. Заключение

1 - 0 вольфрамовом «пухе»

- В перспективных установках для осуществления УТС одно из негативных явлений – дугообразование между горячей плазмой и диверторами
- Вольфрамовый «пух» – одна из разновидностей наноструктур на поверхности вольфрама
- Наноструктуры обеспечивают большой коэффициент усиления поля
- Причина появления «пуха» – бомбардировка потоками ионов He⁺ с флюенсами $\sim 10^{25} \text{ м}^{-2}$

Наноструктурированный слой

Обычный вольфрам

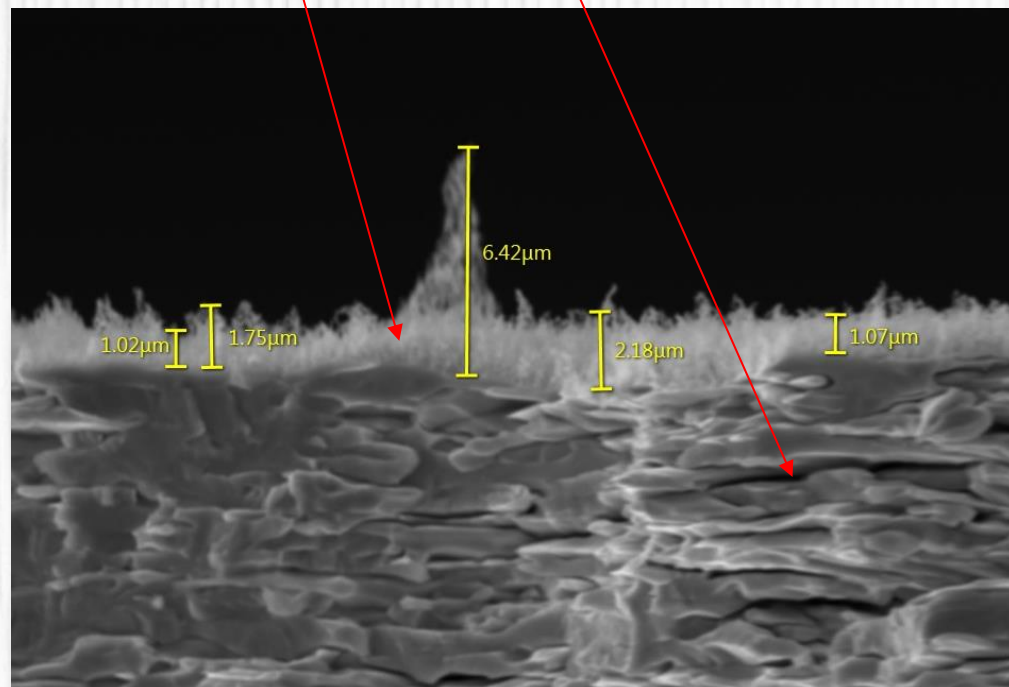


Скол образца вольфрамового «пуха» после экспозиции в гелиевой плазме в течение 8 часов

- Флюенс ионов He^+ , при котором наблюдается формирование «пуха», – $\sim 10^{25} \text{ м}^{-2}$
- Температура бомбардируемой поверхности – $\sim 1000 \text{ К}$
- Толщина наноструктурированного слоя – $\sim 1 \text{ мкм}$
- Диаметр «нитей» – $\sim 10 \text{ нм}$
- При меньших флюенсах могут образовываться и другие типы структур: «завитки» (tendrils), пузырьки (bubbles), петли (loops)

Наноструктурированный слой

Обычный вольфрам



Скол образца вольфрамового «пуха» после экспозиции в гелиевой плазме в течение 8 часов

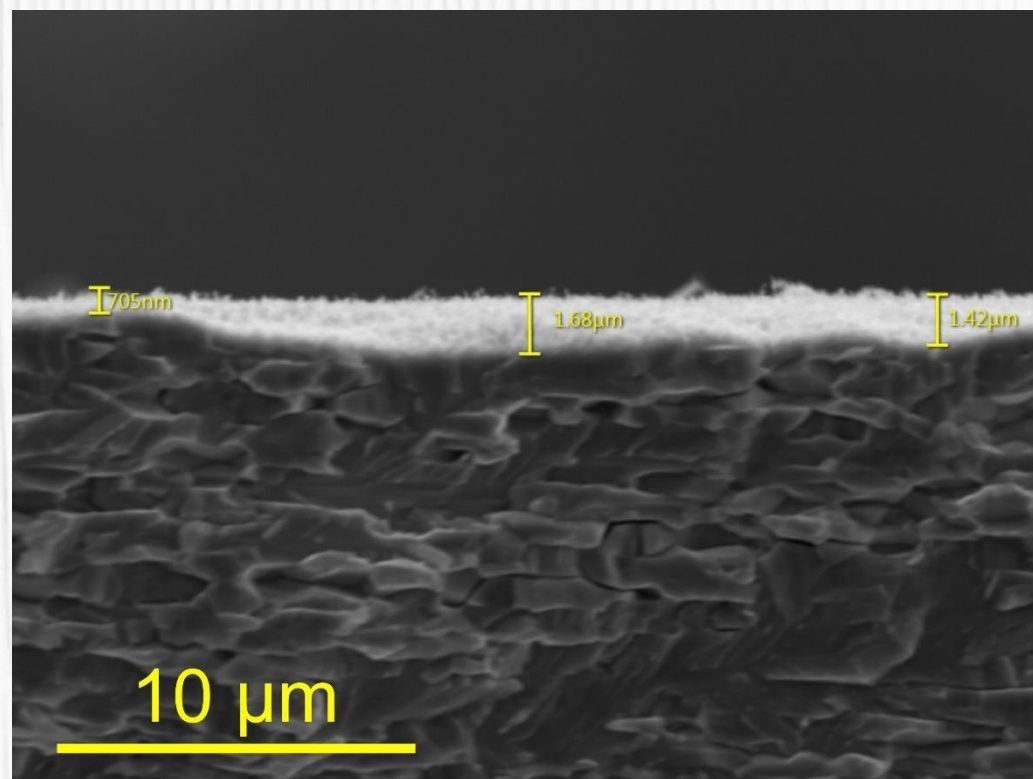
Цель работы

Исследование свойств вольфрамового катода
с наноструктурированной поверхностью в
предпробойном и пробивном режимах

2 - Описание экспериментальных подходов

Образцы вольфрамового «пуха»*

- Подготовка образцов производилась в установке с индуктивно связанной плазмой «ВЧИ разряд»* в течение 4 часов
- Мощность разряда – 2000 Вт
- Давление He – $1,24 \times 10^{-2}$ мбар
- Напряжение смещения, подаваемое на образец – -150 В
- Поток ионов He^+ – $1,2 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$
- Температура образца (100 мкм) – 1300 К
- Размеры исследованного образца – 12 мм×12 мм×3 мм



Скол образца вольфрамового «пуха» после экспозиции в гелиевой плазме в течение 4 часов (толщина образца 100 мкм)

*Выражаем благодарность кафедре физики плазмы НИЯУ МИФИ, подготовившей и предоставившей образцы

Схема исследуемого вакуумного диода

Основные особенности диода:

- Возможность «сканирования» поверхности образца
- Люминесцентный экран, позволяющий визуально регистрировать протекание эмиссионного тока и наступление пробоя
- Изменяемое межэлектродное расстояние – от 0 до единиц мм (типичное - ~200 мкм)
- Слабая неоднородность электрического поля
- Напряженность поля вблизи катода*:

$$E \approx \frac{U}{d} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{d}{R_A} \right)$$

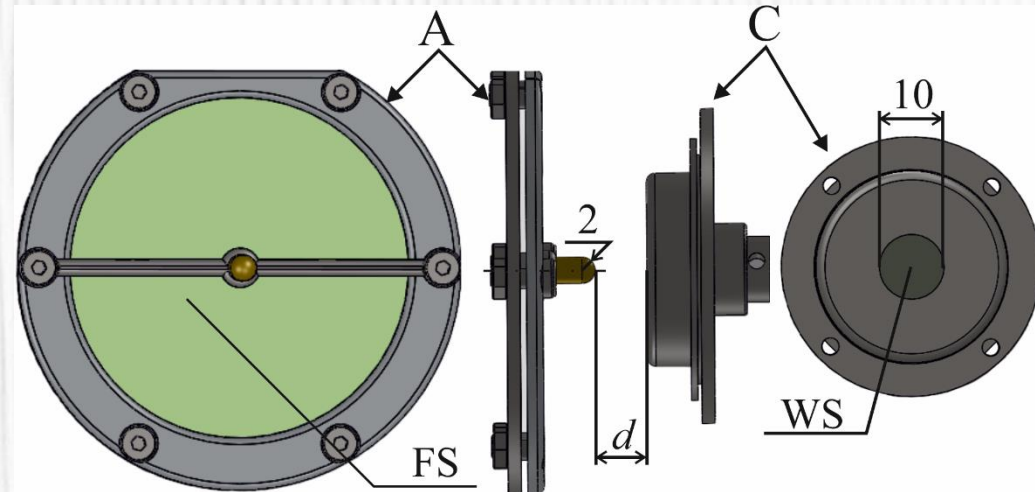
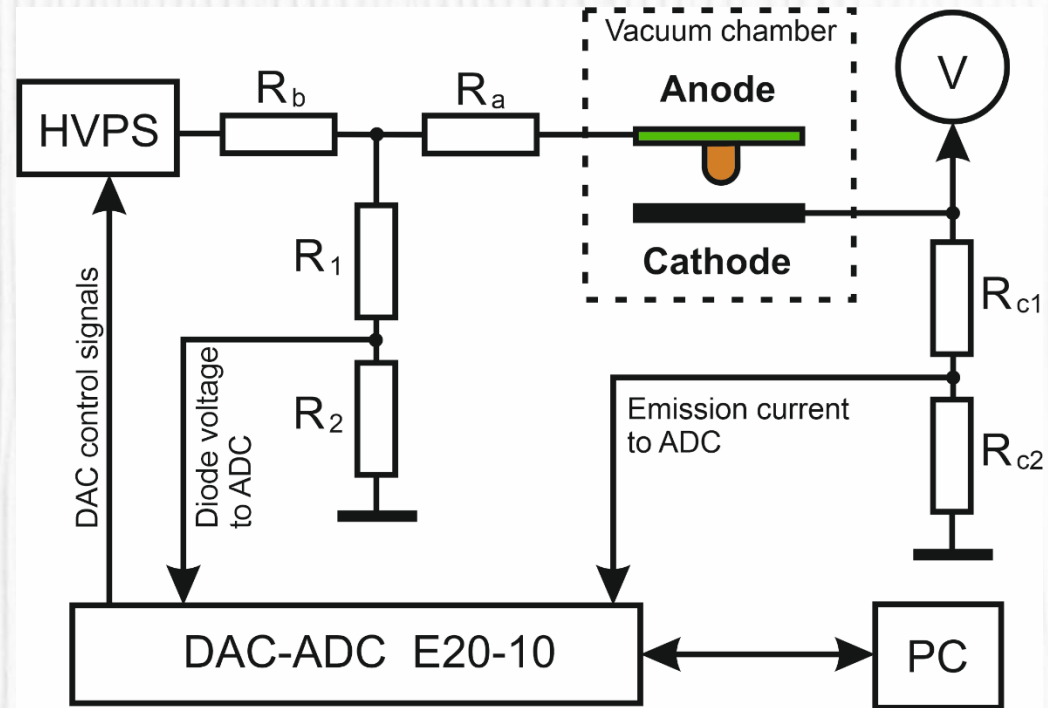


Схема вакуумного диода с наноструктурированным вольфрамовым катодом. Здесь FS – люминесцентный экран, WS – образец вольфрамового «пуха», A – анод, C – катод, d – межэлектродное расстояние. Единицы измерения – миллиметры.

Экспериментальная установка

- Вакуумная камера с безмасляной системой откачки ($\lesssim 10^{-7}$ Па)
- Автоматизированное управление установкой и проведение измерений с помощью модуля ЦАП/АЦП «LCard™ E20-10» (разрядность АЦП – 16 бит, частота дискретизации – 10 МГц, полоса пропускания – 1 МГц)
- Подаваемое напряжение – 0 - 10 кВ
- Типичный измеряемый ток эмиссии – от 10 нА до 10 мкА



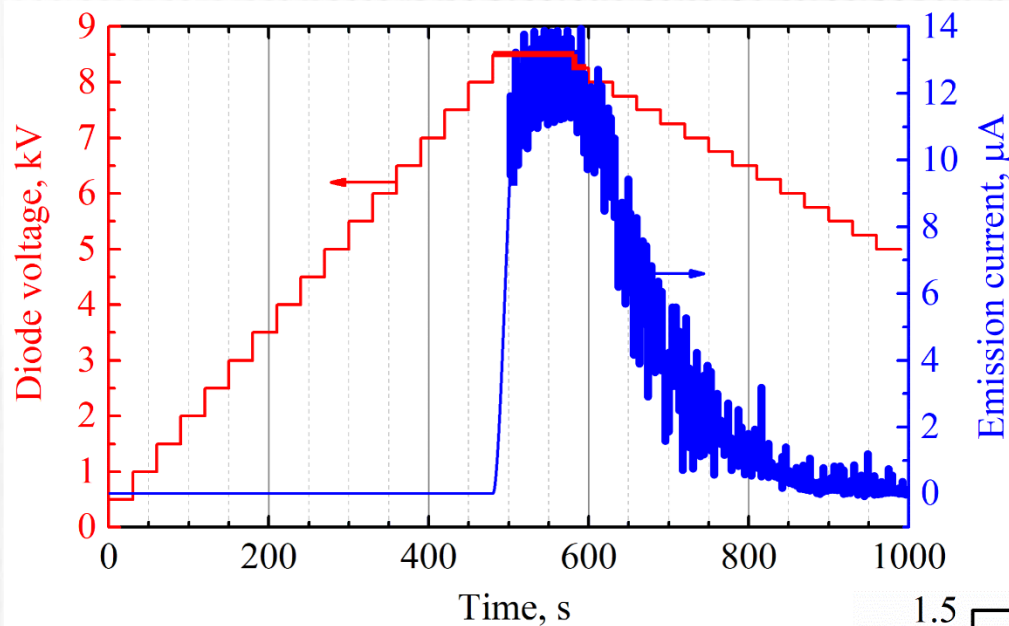
Принципиальная схема установки. $R_b = 11,3 \text{ МОм}$, $R_1 = 25 \text{ МОм}$, $R_2 = 2,4 \text{ кОм}$, $R_{c1} = 0,7 \text{ МОм}$, $R_{c2} = 0,3 \text{ МОм}$, $R_a = 0,75 \text{ МОм}$.

3 – Результаты измерений

Нетипичное поведение эмиссионного тока вольфрамового «пуха»

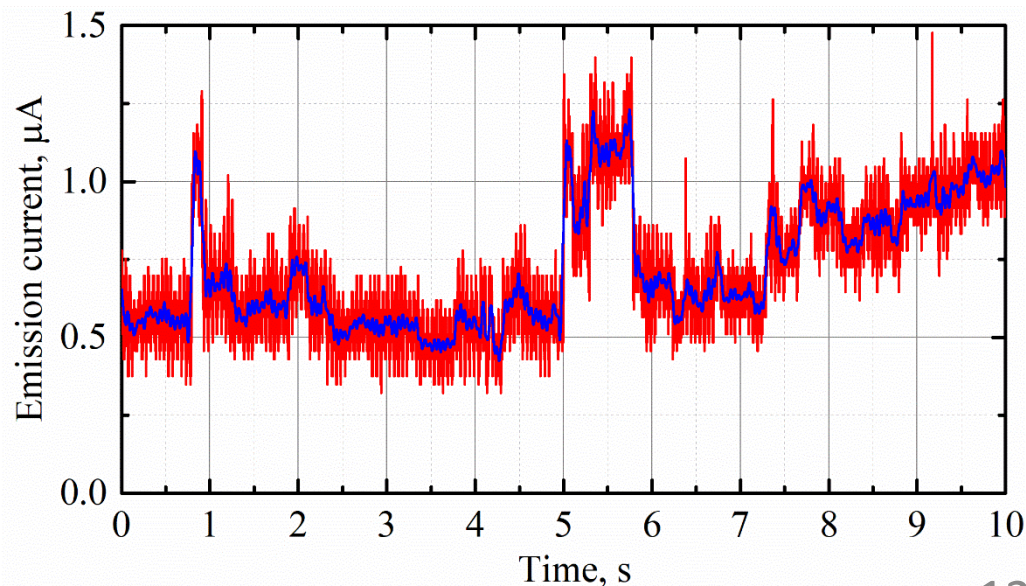


IEP UB RAS

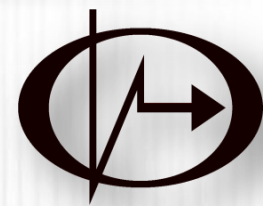


Схематичное изображение типичного поведения эмиссионного тока в начале эксперимента: отсутствие экспоненциального роста тока по мере увеличения напряжения и затем резкий скачок тока. После такой «инициации» эмиссии для данной исследуемой точки на поверхности образца во всех последующих экспериментах вместо скачка наблюдался плавный рост тока.

Апериодические спонтанные изменения эмиссионного тока при постоянном напряжении, приложенном к диоду. Из-за ярко выраженной нестабильности тока каждая точка ВАХ диода представляла собой результат усреднения тока за время порядка 1 с. Также на осциллограмме эмиссионного тока видно наложение шума на частоте 20 Гц, вызванного, по всей видимости, механической вибрацией установки.



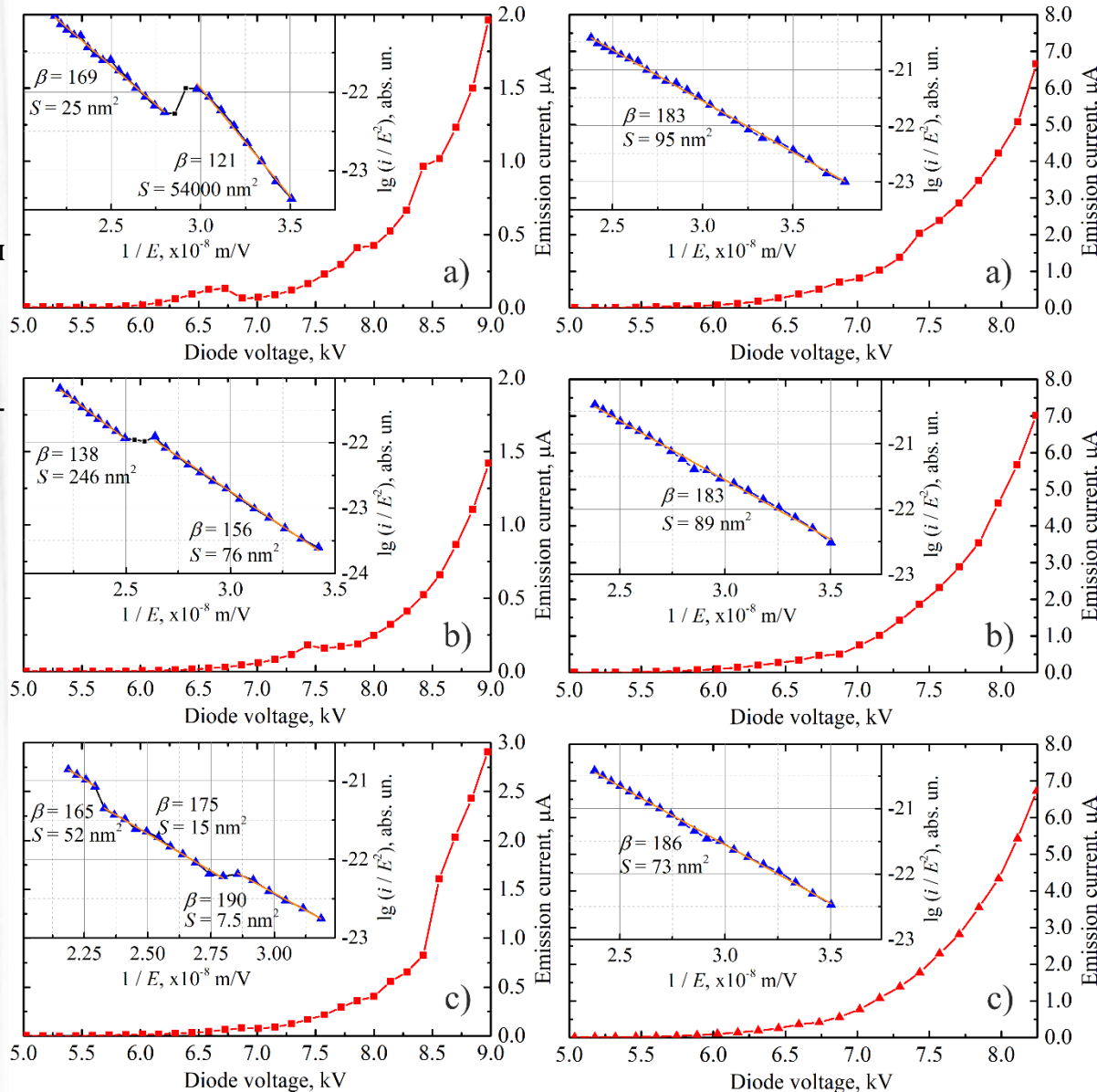
Результаты измерений эмиссионного тока



IEP UB RAS

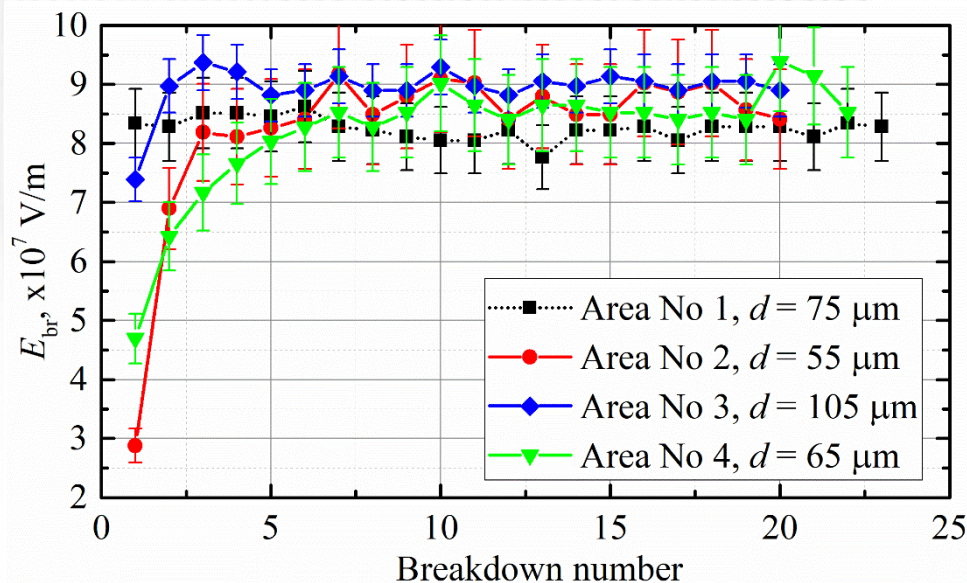
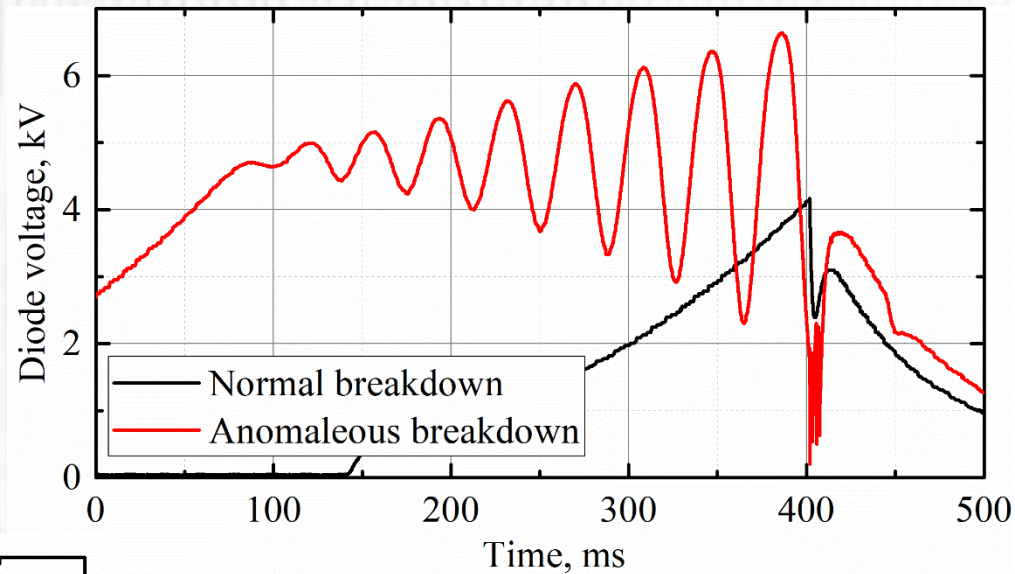
ВАХи диода с наноструктурированным катодом, полученные до воздействия одиночного пробоя на исследуемую точку на поверхности образца. ВАХи, построенные в логарифмическом масштабе, имеют по несколько линейных участков, что необычно для автоэммиттеров.

ВАХи диода с наноструктурированным катодом после воздействия одиночного пробоя на исследуемую точку на поверхности образца. Наблюдается значительная стабилизация эмиссионных свойств.



Результаты измерений электрической прочности диода

Влияние механических вибраций экспериментальной установки на осциллограмму пробоя диода. В данном режиме работы установки скорость роста напряжения на диоде ограничена только мощностью высоковольтного источника и паразитными емкостями установки.



Зависимость пробивной напряженности поля от числа пробоев в четырех различных точках на поверхности образца. Для более чем пяти пробоев во всех точках пробивная напряженность оказывается в диапазоне $8-9 \times 10^7$ В/м, что хорошо согласуется с электрической прочностью диодов с обычными вольфрамовыми катодами.

4 – Заключение

Основные выводы

Эмиссионные свойства вольфрамового «пуха» отличаются ярко выраженной временной нестабильностью

После серии пробоев наблюдается рост электрической прочности диода с наноструктурированным катодом до величины, сопоставимой с таковой для диода с обычным вольфрамовым диодом

Пробои ведут к стабилизации эмиссионных свойств и росту электрической прочности диода, что говорит о разрушении наноструктуры

Задачи на ближайшее будущее – устранение механических вибраций установки и исследование причин необходимости «активации» эмиссии из вольфрамового «пуха»



Russian Academy of Sciences
Institute of Electrophysics
Physical electronics Laboratory

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Работа поддержана Российским научным
фондом, грант №20-19-00323

XXIII Конференция молодых ученых ИЭФ УрО РАН
Екатеринбург, Россия
2022