

Изменения зарядового состава ионов в потоке плазмы под влиянием многократной обработки наноструктурированной поверхности вольфрамового катода микросекундной вакуумной дугой

Ю.А. Земсков^{1,*}, И.В. Уйманов¹, Ю.И. Мамонтов¹, С.А. 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

*yurzem@mail.ru

Аннотация. В работе исследовалось изменение зарядового состава ионов вольфрама по мере разрушения наноструктурированного слоя на поверхности вольфрамового образца многократными вакуумными дуговыми разрядами микросекундной длительности. Измерения состава плазмы проводились при помощи спектрометра Томсона с автоматической регистрацией сигнала и цифровой обработкой данных. Результаты анализа данных показали монотонное увеличение среднего заряда ионов вольфрама в ходе эксперимента с 1–1.5 до 2–2.5. Высокий разброс параметров состава плазмы от разряда к разряду, а также тот факт, что уровня среднего заряда, характерного для ординарного вольфрамового катода (3.07) достичь не удалось, объясняются периодическим вовлечением в разряд неэродированных участков наноструктурированной поверхности.

Ключевые слова: дуга, вольфрам, наноструктура, эрозия, зарядовый состав.

1. Введение

Так называемый “вольфрамовый пух” исследуется в течение последнего десятилетия. Эта наноструктура формируется на поверхности вольфрамовых диверторов в термоядерных установках в результате их бомбардировки ионами гелия. Этот вредный эффект считается одной из основных причин развития униполярных дуг, нарушающих работу таких установок.

Одной из сторон исследования выступают электрофизические свойства этой наноструктуры, в частности фундаментальные свойства ее поведения в вакуумных разрядах. Например, состав плазмы разряда на наноструктурированном электроде представляет интерес как с точки зрения фундаментальных вопросов физики разряда, так и с точки зрения прогнозирования взаимодействия потоков плазмы в термоядерных устройствах. Исследования состава плазмы дугового разряда на пуховой наноструктуре уже проводятся. Так в [1] было показано, что средний заряд ионов вольфрама в плазме вакуумной дуги с катодом, на поверхности которого есть развитая наноструктура в виде “пуха”, значительно отличается от среднего заряда ионов вольфрама в случае отсутствия наноструктурных образований. Средний заряд в случае наличия “пуха” был заметно ниже, чем без него. Кроме того, было показано, что средний заряд ионов вольфрама увеличивается по мере эрозии поверхности образца последовательными разрядами.

В данной работе была предпринята попытка подтвердить и уточнить результаты работы [1]. Для этого был выбран короткий дуговой разряд до 10 мкс, с целью достижения большей детализации измерений эволюции зарядового состава дуговой плазмы по мере разрушения наноструктурного слоя. В качестве референтного значения для сравнения с результатами [1] было взято значение электрического заряда перенесенного через зону разряда за все время эксперимента.

2. Экспериментальная установка и методика

Для определения зарядового состава ионов катодного материала в потоке плазмы из вакуумной дуги использовался энерго-масс анализатор на основе модифицированного

спектрометра Томсона с автоматической регистрацией и обработкой сигнала. Схема экспериментальной установки приведена на Рис.1.

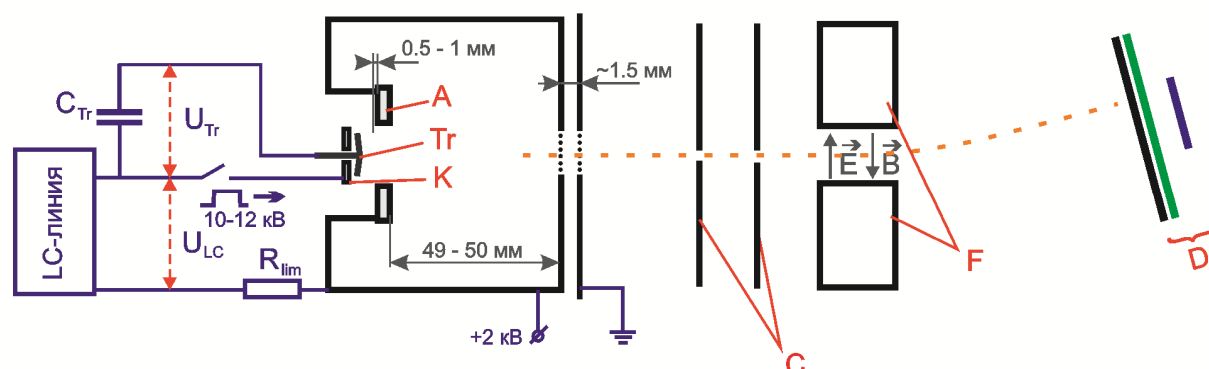


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки. А – входной диск анода, Tr – поджигающий электрод, К – катод (образец с наноструктурой), С – коллиматор, F – полюса полевого дискриминатора, D – детектор заряженных частиц (включающий усилитель, экран и матрицу цифровой камеры), U_{LC} – напряжение на LC-линии, U_{Tr} – напряжение на батарее поджигающего разрядника.

Для определения пропорций различных зарядовых компонент в потоке ионов катодного материала используется метод измерения интегральной интенсивности всего сигнала, ассоциированного с ионами конкретной массы и заряда. Для этого в программе обработки изображений экрана детектора задаются области измерения яркости изображения, соответствующие определенным масс-зарядовым компонентам ионного потока, и суммируются сигналы внутри каждой области.

Для анализа состава дуговой плазмы используется система экстракции ионов. Ускоряющий потенциал, положительный относительно земли, подается на анод. Это ограничивает применение омических шунтов для измерения протекающего тока. Поэтому для регистрации импульсов тока используется датчик с гальванической развязкой на основе индуктивной петли. Сигнал датчика регистрируется цифровым осциллографом, автоматически передается на компьютер и интегрируется программными средствами. Пример полученной формы импульса тока приведен на Рис.2.

Источником импульсов высокого напряжения для дугового разрядника служила LC-линия из нескольких звеньев с конденсатором и соленоидом в каждой. Такая линия создает импульс с формой, близкой к прямоугольной и длительностью, определяемой электрическими параметрами звеньев. В ходе эксперимента использовались две различных линии с длительностями импульсов 3.5 и 9.5 мкс. Ток разряда регулировался ограничивающим резистором в цепи анода. Дуга зажигалась плазмой триггерного разряда в зазоре между поджигающим электродом и катодом. Емкостной источник импульсов напряжения, питающий поджигающий промежуток, имел емкость 0.25 нФ и временной параметр разряда – 9 нс.

Установка была собрана на основе высоковакуумной камеры, обеспечивающей остаточное давление до 10^{-6} Па. Узел разрядника был собран внутри полого анода. Входная часть анода, на которой зажигалась дуга, представляла собой алюминиевый диск толщиной 2.5 мм с центральным отверстием диаметром 9 мм. Полость анода цилиндрическая, с внутренним диаметром 75 мм и расстоянием по оси от входа до выхода около 50 мм. Детально схема разрядника в разрезе приведена на Рис.3.

Исследуемый образец служил катодом разрядника. Вольфрамовый образец имел форму пластинки 14×17 мм, толщиной 100 мкм, экспонированной в потоке гелия в течении 4 часов.

Типичная толщина наноструктур на поверхности таких образцов составляла 700–1100 нм. Поджигающий электрод был расположен между анодом и катодом на расстоянии 150–200 мкм от поверхности катода. Расстояние между катодом и анодом составляло около 3.4 мм.

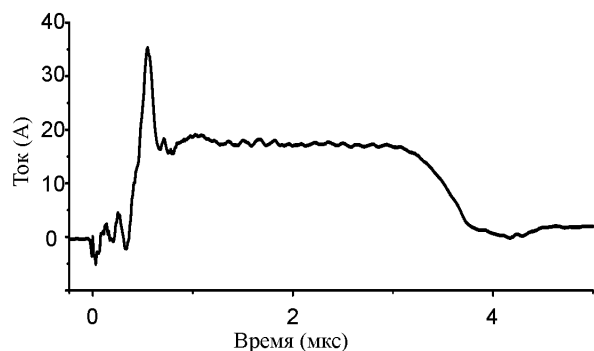


Рис.2. Пример осциллограммы тока, полученной интегрированием сигнала индуктивного датчика. Длительность импульса LC-линии – 3.5 мкс.

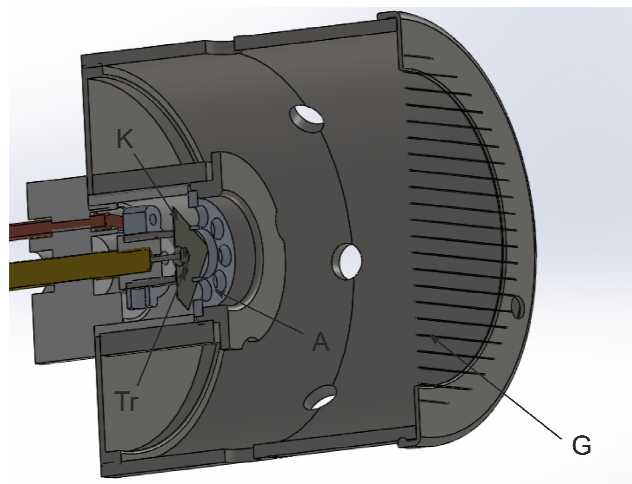


Рис.3. Схема источника плазмы в разрезе. К – катод (образец с наноструктурой), Тг – поджигающий электрод, А – входной диск анода, G – выходная сетка полого анода.

3. Результаты

Типичная удельная эрозия поверхности катодов с развитыми наноструктурами на них остается недостаточно исследованной, поэтому прямую количественную оценку эрозии образца по протекающему электрическому заряду провести сложно. Однако для сравнения с другими исследованиями можно опираться на само значение перенесенного через зону разряда электрического заряда. В качестве опорного значения были взяты параметры из эксперимента [1], где заметное изменение зарядового состава ионов вольфрама в дуге было обнаружено в течение 20 актов разряда с длительностью 250 мкс и амплитудой тока 40 А, что дает значение перенесенного заряда 10 мКл на один разряд и 200 мКл до значительной эрозии поверхности.

В качестве начальных параметров эксперимента была выбрана небольшая длина импульса (3.5 мкс) и амплитуда около 15 А. Такие значения обеспечивали достаточно медленную эрозию поверхности образца и потенциальную возможность детализации изменения зарядового состава ионов вольфрама по мере разрушения наноструктурного слоя. Проведенные ранее исследования плазмы дуговых разрядов показали, что при еще меньших токах горение дуги становится весьма неустойчивым и параметры плазмы характеризуются существенным разбросом [2, 3], поэтому более низкие уровни разрядного тока не рассматривались. В ходе эксперимента увеличивалась электрическая прочность разрядных промежутков. Это, по-видимому, является характерной чертой исследуемой наноструктуры [4]. В следствие этого эффекта межэлектродное напряжение приходилось увеличивать, что при неизменном ограничивающем сопротивлении вело к росту разрядного тока. Таким образом в конце первой сессии эксперимента ток разряда составлял уже около 20 А. При данных параметрах было получено 106 масс-зарядовых спектрограмм. Перенесенный с момента начала эксперимента заряд к этому моменту достиг 16.7 мКл.

На первых этапах эксперимента было очевидно преобладание в зарядовом спектре ионов вольфрама однозарядной компоненты. В течение нескольких десятков разрядов заметно увеличилась доля ионов W^{2+} , а также появилось различное количество ионов W^{3+} . В

дальнейшем изменения стали гораздо менее заметными, учитывая сравнительно малую эрозию на один акт разряда, и было принято решение изменить параметры эксперимента.

Второй набор параметров отличался увеличенным током дугового разряда (до 100 А) при той же длительности (3.5 мкс). При этих параметрах было получено еще 110 спектрограмм. Их анализ показал продолжение тенденции постепенного увеличения среднего заряда ионов вольфрама в плазме дуги. Перенесенный заряд составил 78.4 мКл на момент завершения второй сессии эксперимента. Заметная разница между опорным и достигнутым значениями перенесенного заряда (и, следовательно, эрозии) и замедлившиеся изменения измеряемых параметров сделали обоснованным дальнейшее ускорение эрозии поверхности образца. Для этого была установлена LC-линия с длительностью импульса 9.5 мкс. Ток разряда в третьей сессии эксперимента достигал 150–160 А.

При этих параметрах было получено 150 спектрограмм и был достигнут уровень перенесенного заряда 325 мКл, что уже заметно превышало опорное значение 200 мКл. В составе потока ионов вольфрама в этой сессии чаще всего преобладали ионы W^{2+} , вклад ионов W^{+} уменьшился, и значительную долю потока стали составлять ионы W^{3+} и W^{4+} . Сигнал ионов W^{5+} регистрировался в единичных случаях и не включался в анализ.

Значительный объем полученных данных позволил выделить заметную зависимость зарядового состава зарегистрированных ионов вольфрама из плазмы вакуумной дуги от оценочной величины эрозии. На Рис.4. представлены результаты измерений среднего заряда ионов вольфрама (от +1 до +4) плазмы вакуумной дуги с наноструктурированным вольфрамовым катодом в зависимости от перенесенного заряда с начала эксперимента.

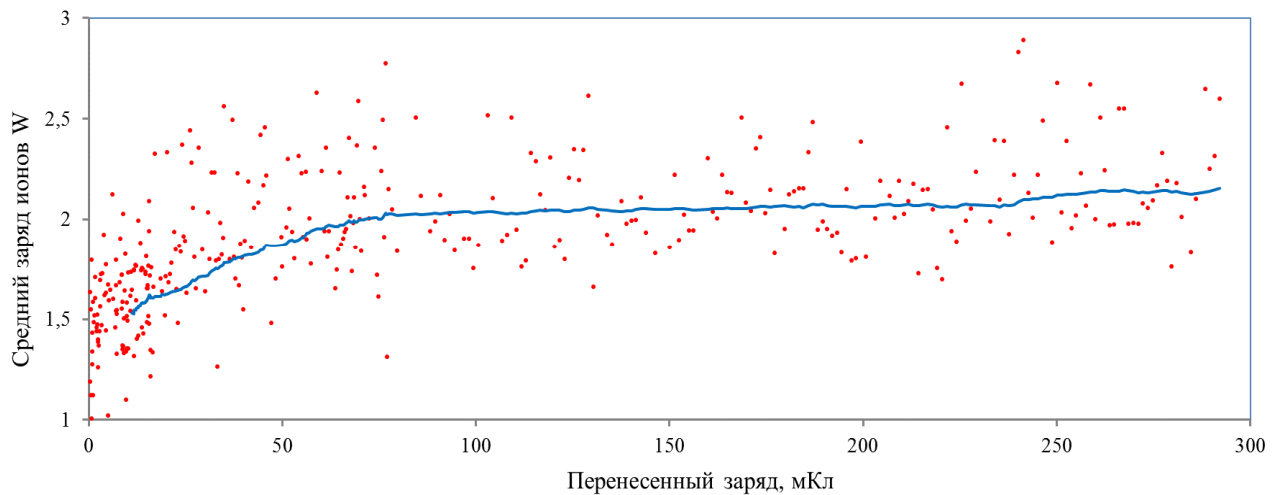


Рис.4. Результаты измерений среднего заряда ионов вольфрама (от +1 до +4) в зависимости от перенесенного заряда. Сплошная линия представляет скользящее усреднение.

Заметно, что средний заряд ионов вольфрама монотонно возрастает по мере эродирования поверхности образца. В первых разрядах на наноструктурном слое средний заряд ионов преимущественно находится в диапазоне 1–1.5, тогда как после нескольких сотен разрядов его значения, как правило, попадают в диапазон 1.7–2.5. Также можно отметить, что скорость изменений параметров плазмы неравномерна: средний заряд ионов быстро растет с первыми 50–60 мКл перенесенного заряда, а с дальнейшим эродированием изменяется достаточно слабо. Изменение среднего заряда ионов вольфрама определяется изменением пропорции различных зарядовых компонент в потоке этих ионов. На Рис.5 представлены результаты измерений компонентного зарядового состава плазмы вакуумной дуги, полученные лишь с учетом регистрируемых ионов W^{+} – W^{4+} , в зависимости от

перенесенного заряда. Эти диаграммы, как и диаграмма для среднего заряда, приведенные выше, показывают, что наибольшая динамика изменения компонентного зарядового состава ионов вольфрама наблюдалась в течении первых ~ 100 разрядов первой сессии эксперимента.

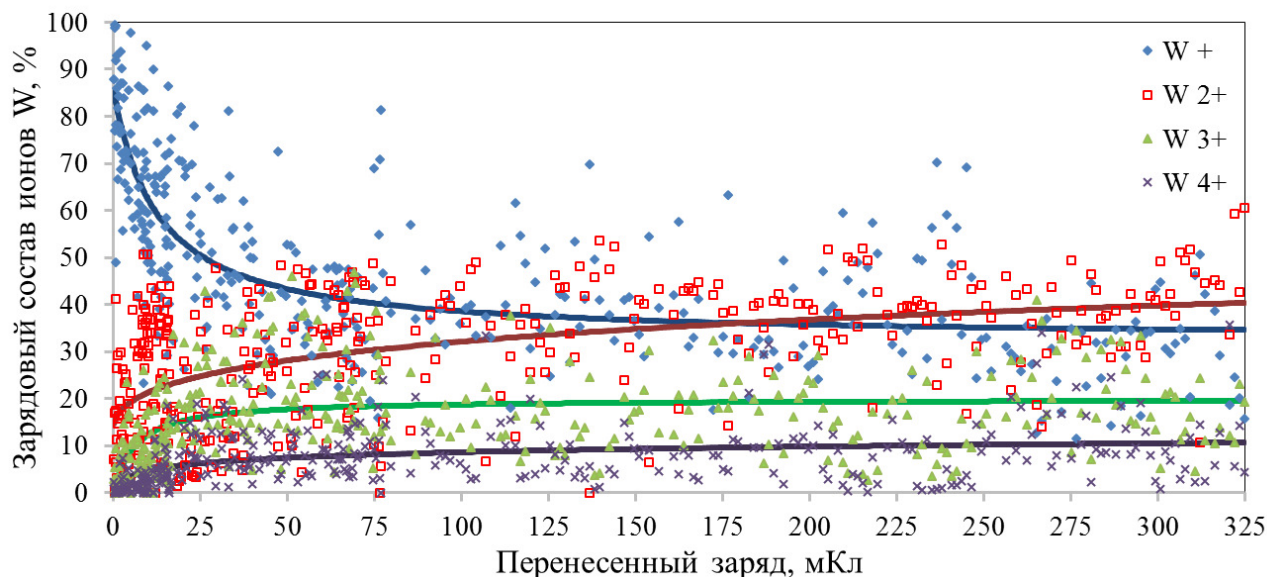


Рис.5. Результаты измерений компонентного зарядового состава ионов вольфрама (от +1 до +4) в зависимости от перенесенного заряда. За 100% взята сумма сигналов всех ионов вольфрама.

Согласно полученным данным, ионы W^+ составляли значительную долю ионного потока. В течение всего эксперимента их доля заметно превышала уровень классических результатов измерений состава плазмы на вольфрамовых катодах [5]. Однако, доля однократно ионизированного вольфрама очень сильно изменялась по мере эродирования поверхности: в первых разрядах она достигала 100%, затем быстро снижалась до 40–50% и в конце эксперимента могла быть менее 40% и меньше доли ионов W^{2+} . Доля ионов W^{2+} быстро нарастала на первых этапах эксперимента, а затем оказывалась сравнимой с долей W^+ , превышая ее в конце эксперимента. Ионы W^{3+} , как правило, составляли небольшую, но заметную долю потока ионов катодного материала со средним значением около 20%, а сигнал ионов W^{4+} в большинстве случаев слабо выделялся на фоне шумов, а в первой сессии эксперимента практически не фиксировался.

Полученные результаты демонстрируют значительный разброс зарядового состава от разряда к разряду, в отличие от дуги на металлах без наноструктурного слоя, например, молибдена, весьма близкого к вольфраму по электрофизическим свойствам. Вероятно, это связано с возможностью горения дуги на участках с очень различными свойствами: как на нетронutom наноструктурном слое, так и на эродированной поверхности. Малая длительность разряда по сравнению с экспериментом [1] позволяет выделить этот эффект, т.к. при большой длительности дугового разряда условия его горения могут многократно измениться, что дает более "усредненный" результат зарядового состава. В целом же компонентный состав потока ионов вольфрама, по приблизительной оценке, в среднем изменялся от 80–20–0–0 % (для ионов W^+ , W^{2+} , W^{3+} , W^{4+} соответственно) до приблизительно 30–40–20–10 %. Сочетание большой площади образца с малой длительностью разрядов может объяснять также и меньшее значение среднего заряда ионов вольфрама в финальной стадии эксперимента по сравнению с исследованием [1]. По-видимому, в нашем случае на

образце сохранился значительный участок неэродированной поверхности, который продолжал вносить свой вклад в зарядовый состав ионов вольфрама в плазме.

Полученная зависимость качественно подтверждает результат исследования [1] и, по-видимому, связана с разрушением наноструктур на поверхности образца. Достигнутая детализация подтверждает и отсутствие резких качественных скачков на графике полученной зависимости. Это позволяет уверенно подтвердить наблюдение [1] о монотонности и бесступенчатости изменений состава плазмы с ростом уровня эрозии наноструктуры. По-видимому, это происходит за счет вовлечения все большей площади поверхности в разрядные процессы, и дуга горит как на эродированной, так и на неэродированной поверхности. Поскольку удельная эрозия на единицу перенесенного заряда заметно выше для наноструктурированных участков, можно предположить, что в начале эксперимента разрушение поверхности происходило быстрее. В таком случае, зависимость зарядового состава от массы унесенного с катода материала может иметь характер намного более близкий к линейному по сравнению с зависимостью от перенесенного заряда.

4. Заключение

В условиях высокого вакуума проведено исследование эволюции зарядового состава ионов вольфрама в дуговой плазме по мере эродирования катода и разрушения наноструктур на его поверхности. Измерения проводились методом модифицированной томсоновской масс-зарядовой спектрометрии с интегрированием сигналов различных компонент ионного потока. На основе значительного объема собранных данных получены зависимости среднего заряда ионов вольфрама и зарядового состава этого потока ионов от уровня эрозии поверхности катода. Для оценки эрозии поверхности использовалась величина электрического заряда, перенесенного через зону разряда, которая контролировалась в течении всего эксперимента. Полученные зависимости демонстрируют рост среднего заряда по мере разрушения наноструктурного слоя за счет снижения доли однократно ионизованного вольфрама и роста долей ионов вольфрама с большими степенями ионизации. В отличие от результатов эксперимента [1], параметры зарядового состава, характерные для дуг на обычных вольфрамовых катодах, не были достигнуты. По-видимому, короткими дуговыми разрядами не удалось уничтожить весь наноструктурированный слой. Поэтому дуга продолжала гореть как на уже эродированных, так и на нетронутых участках поверхности. Этим также может объясняться и наблюдаемый значительный разброс параметров плазмы от разряда к разряду.

Благодарности

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

5. Литература

- [1] Barengolts S.A., et al., *Nucl. Fusion*, **60**, 044001, 2020; doi: 10.1088/1741-4326/ab73c3
- [2] Zemskov Yu.A., Uimanov I.V., *Proc. 27th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, Suzhou, China, 368, 2016; doi: 10.1109/DEIV.2016.7748754
- [3] Zemskov Yu.A., Uimanov I.V., *Proc. 7th Int. Congr. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 185, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242131
- [4] Mamontov Y.I. et al., *Proc. 29th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, Padova, Italy, 69, 2021; doi: 10.1109/ISDEIV46977.2021.9587227
- [5] Anders A., *Phys. Review E*, **55**, 969, 1997; doi: 10.1103/PhysRevE.55.969