

## Исследование изменений зарядового состава ионов Sn в плазме слаботочной вакуумной дуги на катоде из олова

Ю.А. Земсков\*, И.В. Уйманов

*Институт электрофизики, УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

*\*yurzem@mail.ru*

**Аннотация.** Зарядовый состав исследовался при помощи спектрометра Томсона с автоматической регистрацией и цифровой обработкой сигнала. Вакуумная дуга питалась от генератора импульсов на основе LC-линии с квазипрямоугольной формой импульса длительностью 3.5 мкс. Ток дуги варьировался в диапазоне от 2 до 125 А. Поведение зарядового состава ионов катодного материала в случае оловянного катода значительно отличалось от ранее исследованных материалов. Так, вместо снижения среднего заряда ионов с током дуги был обнаружен рост этого параметра. В плазме дуги при малых токах увеличивалась доля ионов Sn<sup>3+</sup>, а также появлялись ионы Sn<sup>4+</sup>, сигнал которых при токах разряда выше 40 А вообще не был заметен на фоне шумов.

**Ключевые слова:** дуга, олово, зарядовый состав.

### 1. Введение

Исследование изменения зарядового состава ионов при малых токах имеет и теоретическое и практическое значение. С точки зрения фундаментальных проблем физики вакуумного разряда такие данные помогают сформировать модель производства плазмы взрывоэмиссионными центрами на катоде вакуумного разряда. А для практических применений вакуумной дуги может быть полезной оценка предела применимости классических данных о зарядовом составе ионов дуговой плазмы, полученных для диапазона токов десятки и сотни ампер [1].

Снижение среднего заряда ионов катодного материала при уменьшении тока вакуумной дуги отмечалось несколькими исследователями, например, [2]. Этот эффект был детально исследован нами для медных катодов в ходе нескольких экспериментов при различных параметрах [3]. Также данный эффект был подтвержден для композитных катодов из материала CuCr и для тугоплавких катодов на примере молибдена [4]. В результате проведенных исследований была подтверждена гипотеза о том, что ионный состав дуговой плазмы не определяется однозначно процессами во взрывоэмиссионном центре на катоде, а продолжает изменяться в разрядном промежутке. Причем зарядовый состав зависит от величины разрядного тока. Для всех исследованных материалов средний заряд ионов оказывался заметно ниже классических данных при токах дуги, близких к пороговым, т.е. когда количество одновременно функционирующих ячеек катодного пятна мало.

В ходе данного исследования в качестве объекта был выбран катод из олова. Этот материал значительно отличается от упомянутых выше, как по теплофизическим свойствам, так и по зарядовому составу ионов в плазме для дуг с током выше 100 А. Средний заряд ионов олова по классическим данным составляет 1.53, в то время как для меди и хрома этот параметр превышает 2, а для молибдена – превышает 3. Наблюдение эффекта изменения зарядового состава с изменением тока дуги на более широком спектре материалов с различными свойствами может позволить формулирование более развернутых гипотез о процессах формирования плазмы в вакуумных разрядах.

### 2. Экспериментальная установка

В качестве импульсного источника тока была применена LC-линия. Данная линия подавала на разрядный промежуток импульс тока длительностью около 3.5 мкс с формой, близкой к прямоугольной. Это позволяло достаточно точно оценивать ток дуги, при котором

происходила генерация анализируемой плазмы. Ток разряда регулировался ограничивающим резистором в цепи анода. Дуга зажигалась плазмой триггерного разряда в зазоре между поджигающим электродом и катодом. Источником, питающим триггерный разряд, служил конденсатор емкостью 0.5 нФ. Ток разряда измерялся в цепи анода при помощи пояса Роговского.

Схема установки приведена на Рис.1. Эксперимент проводился в высоковакуумной камере при остаточном давлении  $10^{-6}$  Па. Дуговой источник плазмы был аналогичен таковому в наших предыдущих экспериментах [3, 4], и состоял из катода триггерного электрода и полого анода. Катод представлял собой диск диаметром 8 мм и был выполнен из химически чистого олова. Входная часть анода, на которой зажигалась дуга, представляла собой алюминиевый диск толщиной 2.3 мм с отверстием диаметром 9 мм. Полость анода цилиндрическая, с внутренним диаметром 75 мм и расстоянием по оси от входа до выхода около 50 мм. Триггерный электрод представлял собой несколько вольфрамовых проволочек, расположенных между анодом и катодом. Проволочки были закреплены на штоке, введенном через отверстие в центре катодного диска. Концы проволочек располагались на расстоянии 100–150 мкм от поверхности катода. Расстояние между катодом и анодом составляло около 1 мм. На расстоянии 1.5 мм от выхода полого анода была установлена заземленная сетка. Анод находился под потенциалом 2–3 кВ относительно земли. Ионы, ускоренные в промежутке между сетками, попадали в спектрометр после обрезки пучка коллиматором.

Ток дуги дискретно изменялся в диапазоне от 2.5 до 125 А. При каждом значении тока дуги было получено около 200 кадров со следами ионов дугового разряда на экране спектрометра. Интенсивность сигнала в области кадра, соответствующей конкретной ионной компоненте, суммировалась. Из этого значения вычитался уровень шума. Для каждого кадра уровень вычитаемого фонового шума определялся отдельно как среднее значение интенсивности сигнала в значительной области кадра, не занятой изображением люминофорного экрана. Оценка относительного количества ионов каждой компоненты производилась путем сравнения суммарных интенсивностей сигналов различных компонент. Методика количественного анализа состава ионного потока более подробно представлена в [5].

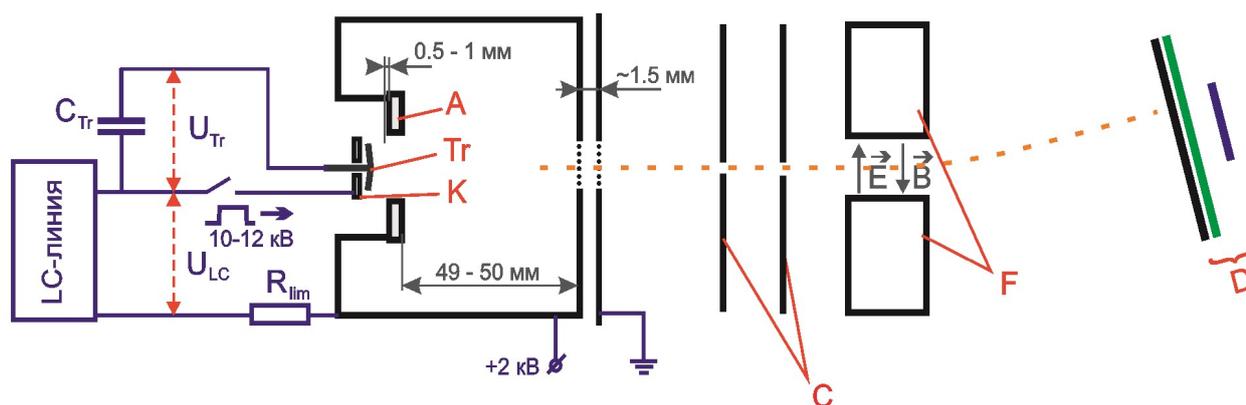


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки. А – входной диск анода, Tr – поджигающий электрод, К – катод, С – коллиматор, F – полюса полевого дискриминатора, D – детектор заряженных частиц (включающий усилитель, экран и матрицу цифровой камеры),  $U_{LC}$  – напряжение на LC-линии,  $U_{Tr}$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

### 3. Результаты

В ходе эксперимента ток дугового разряда принимал значения 2.5, 5.5, 11, 20, 36, 60, 91 и 125 А с погрешностью не более 10%, обусловленной необходимостью корректировки напряжений на промежутках для устойчивого зажигания разрядов. Для каждого акта запуска разрядника фиксировался кадр с ионным сигналом. Результаты измерений зарядового состава ионов олова в потоке плазмы и значения их среднего заряда, усредненные по всем кадрам для каждого дискретного значения тока, приведенного выше, показаны на Рис.2 и Рис.3.

Базируясь на наблюдениях поведения состава плазмы при малых токах для трех различных металлов (меди, хрома и молибдена), можно было ожидать снижения среднего заряда при снижении уровня дугового тока и для олова. Однако, как видно из диаграммы среднего заряда, приведенной на Рис.2, для олова при снижении тока средний заряд, наоборот, растет очень заметно. В нашем эксперименте зафиксирован рост примерно на 0.6 единиц с 1.8 до 2.4. Рис.3 детализирует наблюдаемый эффект, демонстрируя поведение различных наблюдаемых компонент потока ионов катодного материала при изменении тока дуги. Заметно, что при снижении тока дуги выражено снижается доля ионов  $\text{Sn}^{2+}$  с 60 до 20%. Доля ионов  $\text{Sn}^{3+}$ , не превышающая 10% при больших токах, в это же время растет до 40%. Более того, при токах ниже 30–40 А в регистрируемом потоке ионов появляются ионы  $\text{Sn}^{4+}$ , сигнал которых при больших токах вообще не выделялся на фоне шумов системы детектирования. При токах 11 А и ниже на эти ионы приходилось до 10% потока. На фоне таких заметных относительных изменений долю ионов  $\text{Sn}^+$  можно считать условно постоянной.

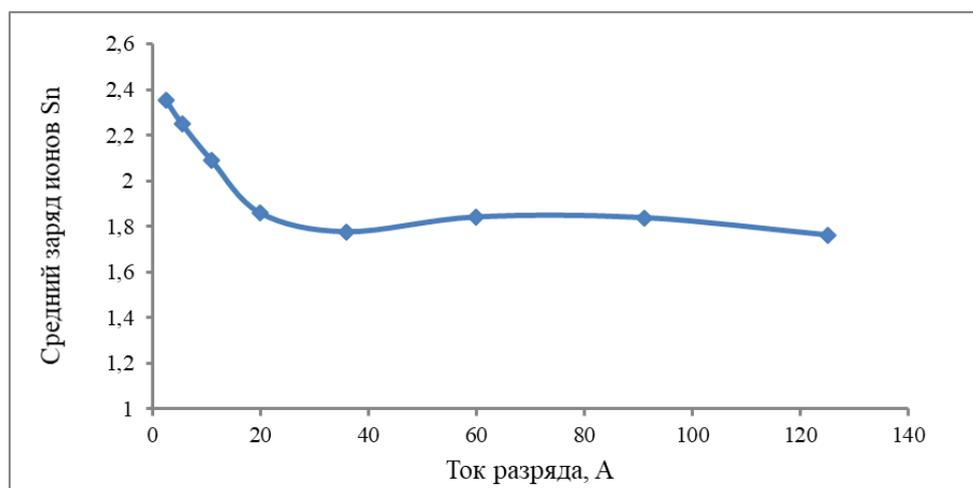


Рис.2. Результаты измерений среднего заряда ионов олова в зависимости от тока дугового разряда.

Следует отметить, что в случае оловянного катода значение среднего заряда при токах, близких к пороговым, оказывается близким к таковому для катода из молибдена (2.2–2.3) [4] и заметно превышает аналогичное значение для меди (1.5–1.6) [3]. Зато диапазон токов, в котором начинаются заметные изменения для олова совпадает с катодами из меди и хрома (20–40 А), в то время как для молибдена это значение несколько выше (60–80 А).

Возможно, в случае легкоплавкого олова процессы во взрывоэмиссионном центре приводят к более высокому уровню ионизации паров материала. При дальнейшем распространении плазмы в промежуток количество одновременно функционирующих ячеек катодного пятна и взаимодействие их плазменных струй, вероятно, влияют на эффективность рекомбинации ионов. Какой бы механизм не был в основе обнаруженного эффекта, по-

видимому, в случае легкоплавких и тугоплавких металлов факторы направлены противоположным образом.

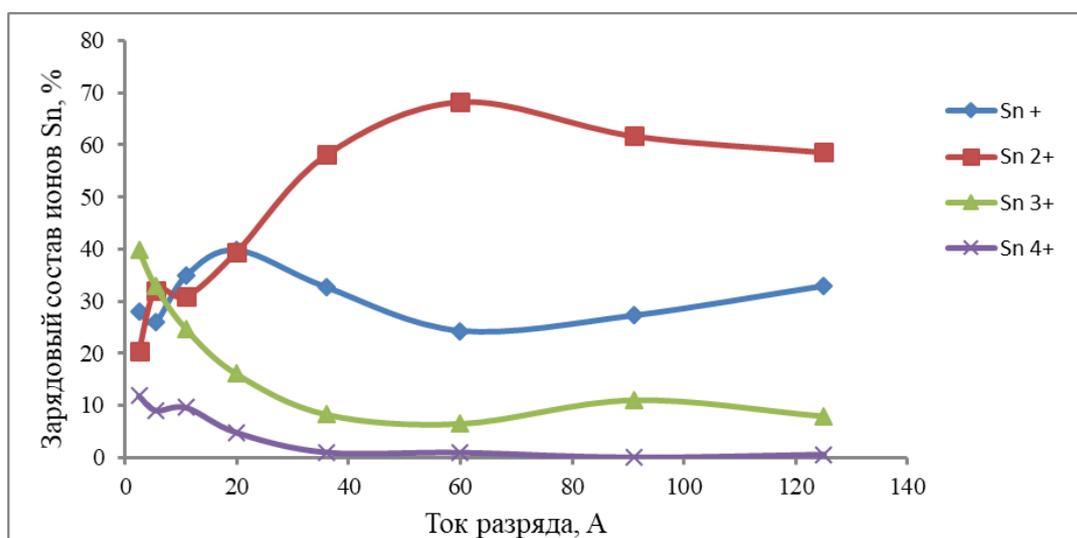


Рис.3. Результаты измерений компонентного зарядового состава ионов олова в зависимости от тока дугового разряда. За 100% взята сумма сигналов всех ионов олова.

#### 4. Заключение

Эффект влияния уровня тока вакуумного дугового разряда на зарядовый состав потока ионов катодного материала, наблюдавшийся ранее для катодов из меди, медно-хромового композита и молибдена, обнаружен и для случая оловянного катода. Однако, в данном случае эффект направлен противоположным образом. В отличие от ранее исследованных материалов, на оловянном катоде при снижении тока до уровня, близкого к пороговому, средний заряд ионов Sn не падает, а наоборот растет. Рост обусловлен главным образом увеличением в потоке плазмы доли ионов с высокими степенями ионизации. Так при токах ниже 40 А начинают регистрироваться ионы  $\text{Sn}^{4+}$ , которых не было замечено и в данном эксперименте при больших токах, и не отмечалось в классических данных о составе плазмы вакуумных дуг при токах выше 100 А. Данный эффект требует дополнительного изучения и расширения спектра исследуемых материалов.

#### 5. Литература

- [1] Anders A., *Phys. Review E*, **55**, 969, 1997; doi: 10.1103/PhysRevE.55.969
- [2] Mesyats G.A., Oks. E.M., *Technical Phys. Lett.*, **39**, 687, 2013; doi: 10.1134/S1063785013080105
- [3] Zemskov Yu.A., Uimanov I.V., *Proc. 28th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, Greifswald, Germany, 381, 2018; doi: 10.1109/DEIV.2018.8537095
- [4] Zemskov Yu.A., Uimanov I.V., *Proc. 29th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, Padova, Italy, 249, 2021; doi: 10.1109/ISDEIV46977.2021.9587170
- [5] Zemskov Yu.A., Uimanov I.V., *Proc. 28th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, Greifswald, Germany, 415, 2018; doi: 10.1109/DEIV.2018.8536893