

Ионизованные потоки конденсированного вещества в вакуумной дуге с низкой плотностью тока на катоде

*Р.А. Усманов**, *А.Д. Мельников*, *В.П. Полищук*, *А.В. Гавриков*, *В.П. Смирнов*,
А.И. Белостоцкий

ОИВТ РАН, Москва, Россия
usmanov.r@ihed.ras.ru

Аннотация. Одним из перспективных типов вакуумных дуг, используемых в качестве источников интенсивных плазменных потоков является диффузный разряд с низкой катодной плотностью тока (10–100 А/см²). Последнее может быть достигнуто за счет дополнительного нагрева катода, усиливающего генерацию термоэлектронов и плазмообразующей среды (пара). Разряд отличается стабильностью напряжения горения и отсутствием капель катодного материала в плазменном потоке. Работа посвящена измерениям параметров диффузной вакуумной дуги, генерируемой на катоде из гадолиния в присутствии аксиального магнитного поля. Изучено влияние напряженности магнитного поля на вольтамперную характеристику разряда и на состав плазмы.

Ключевые слова: диффузная вакуумная дуга, плазменные потоки, гадолиний, магнитное поле.

1. Введение

Вакуумная дуга с подогреваемым катодом является перспективным источником плазмы катодного материала для применения в целом ряде прикладных задач. Этот разряд отличается стабильностью напряжения горения и отсутствием капель катодного материала, что достигается путем поддержания катода при достаточно высокой температуре, обеспечивающей его интенсивное испарение и/или генерацию интенсивного потока электронов термоэмиссии [1]. Последнее приводит к снижению плотности тока на катоде до 10–100 А/см².

Для управления плазменными потоками в приложениях часто используются магнитные поля, которые могут влиять и на свойства разряда. Не смотря на привлекательность диффузной вакуумной дуги как источника плазмы, ее поведение во внешнем магнитном поле, в отличие от широко изученного контрагированного разряда, прежде не исследовалось, хотя это актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Наложение внешнего магнитного поля изменяет условия движения заряженных частиц генерируемой плазмы и характер ее взаимодействия с поверхностью катода, что, следовательно, отражается на свойствах разряда.

Одним из возможных способов практического применения диффузной вакуумной дуги является плазменная сепарация веществ [2], идея которой основана на пространственном разделении плазменных потоков в специальной конфигурации электрического и магнитного полей. Данный разряд перспективен в качестве источника плазмы, так как позволяет генерировать плазменные потоки с высокой степенью ионизации, представленные однозарядными ионами [1]. Эти свойства разряда, однако, были обнаружены при исследованиях в отсутствие магнитного поля, поэтому возможность обеспечивать требуемые параметры плазменных потоков в магнитном поле должна быть отдельно изучена.

Данная работа посвящена исследованию параметров плазменных потоков, генерируемых в вакуумной дуге с подогреваемым катодом в присутствии продольного магнитного поля. В фокусе находятся такие параметры плазменного потока как степень ионизации и зарядовый состав. В качестве плазмообразующего вещества (катода) выступает гадолиний.

2. Установка

Схема эксперимента показана на Рис. 1. Дуговой разряд инициировался в промежутке длиной 50 мм. Анод разряда состоял из молибденового сердечника с центральным отверстием диаметром 14 мм, зажатого между пластинами из нержавеющей стали. Пластины были закреплены на водо-охлаждаемых ножках. Дополнительно анод не охлаждался. Расходуемый катод (гадолий) помещался в молибденовый тигель. Температура боковой поверхности тигля измерялась при помощи яркостного пирометра. Дно тигля разогревалось при помощи электронно-лучевой пушки, термоэмиссионным элементом в которой была таблетка LaB_6 диаметром 20 мм. Ускоряющий зазор составлял около 3 мм. Продольное магнитное поле генерировалось двумя водо-охлаждаемыми катушками Гельмгольца с внутренним диаметром 230 мм. Они создавали практически однородное поле в области существования разряда. Дуговой разряд инициировался при давлении остаточных газов вакуумной камере 10^{-5} Торр и температуре тигля порядка 1830 К. Далее его температура могла варьироваться путем изменения мощности электронно-лучевой пушки. Отметим, что из-за тепловых потерь за счет теплопроводности конструкционных элементов системы нагрева тигля и потерь на излучение, температура катода несколько отличалась от измеряемой температуры тигля. По оценкам оно составляло не более чем 100 К.

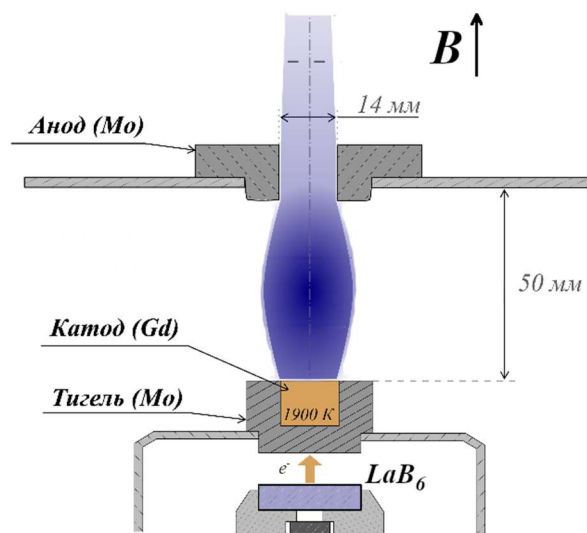


Рис. 1. Схема разряда.

Измерялись параметры плазменного потока, выходящего в пространство за анодом. На высоте около 25 мм над анодом располагался двойной зонд для измерения температуры электронов и концентрации ионов. При помощи конденсационного зонда измерялось отношение потоков ионов к потоку нейтральных частиц. Схема его работы подробно описана в [3]. Это отношение мы будем далее называть «средний заряд потока плазмы». Конденсационный зонд располагался на высоте 100 мм над анодом. Зарядовый состав потока плазмы измерялся при помощи времяпролетного масс-спектрометра [4]. Вход масс-спектрометра располагался на высоте 150 мм над анодом.

3. Результаты

На Рис. 2 представлена зарегистрированная вольтамперная характеристика (ВАХ) разрядного промежутка при фиксированных магнитном поле 50 Гс и мощности подогрева

катода 1150 Вт. Она имеет возрастающий вид. Подобный рост ВАХ при фиксированной мощности подогрева катода наблюдается при магнитных полях до 200 Гс.

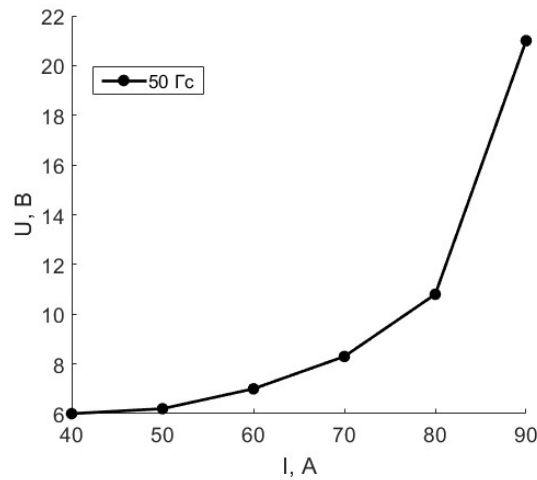


Рис. 2. ВАХ дуги в продольном магнитном поле.

Необходимо отметить, что увеличение мощности подогрева катода при фиксированном токе приводит к понижению напряжения разряда. Поэтому ВАХ при фиксированной средней температуре катода может иметь отличный, от представленного на Рис. 2, вид.

Низковольтные режимы разряда (5–15 В) характеризуются стационарным горением и незначительными колебаниями измеряемых параметров. Ионный состав плазмы по данным измерений масс-спектров в этих режимах представлен преимущественно однозарядными частицами Gd^+ . На Рис. 3 представлен пример зарегистрированного масс-спектра плазменного потока при напряжении 13 В. При увеличении напряжения до 20 В и более в плазме появляются двух и трехзарядные ионы. Масс-спектр такого режима представлен на Рис. 4.

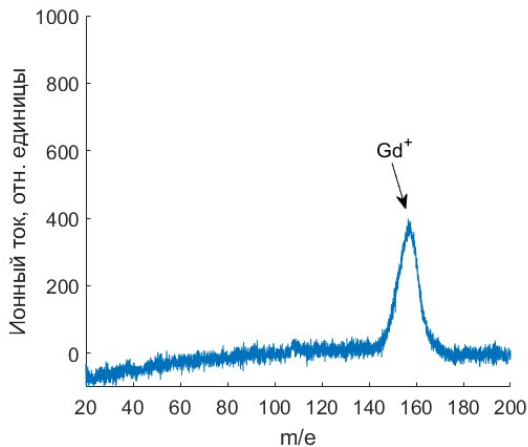


Рис. 3. Масс-спектр ионов плазмы дуги $U = 13$ В, $I = 50$ А, $B = 50$ Гс.

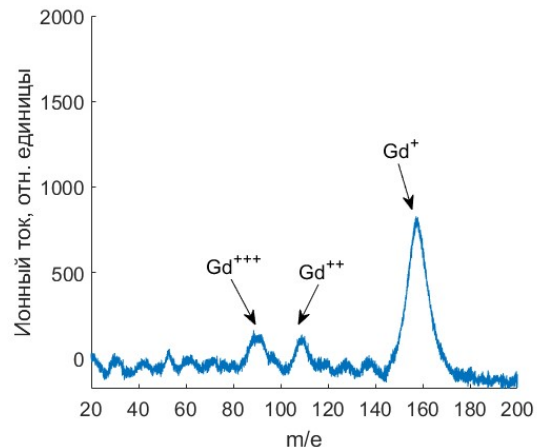


Рис. 4. Масс-спектр ионов плазмы дуги $U \approx 25$ В, $I = 40$ А, $B = 50$ Гс.

В низковольтных режимах проводились измерения параметров плазменного потока. Температура электронов потока плазмы, проходящей в пространство за анодом, измеренная двойным зондом, при токе 50 А и магнитном поле 50–200 Гс возрастала от 2.5 до 5.5 эВ. Также возрастала и концентрация ионов от $0.6 \cdot 10^{12}$ до $1.5 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Напряжение разряда при этом находилось в диапазоне 5–7 В. Средний заряд потока плазмы при токе 40 А при увеличении

магнитного поля также возрастал с 0.6 до 0.9. Приведенные данные свидетельствуют о том, что магнитное поле приводит к повышению степени ионизации генерируемой плазмы.

4. Выводы

Исследованы параметры плазменного потока вакуумной дуги с подогреваемым катодом из Gd в присутствии продольного магнитного поля величиной 50–200 Гс. Показано, что стационарный плазменный поток может быть реализован при мощности подогрева катода, обеспечивающей низкое напряжение разряда на уровне 5–15 В. Средняя температура катода при этом находится на уровне 1900 К. Ионы в составе потока в этих условиях преимущественно однозарядные. Средний заряд потока, то есть отношение потока ионов к потоку нейтралов, превышает 0.6 и возрастает с увеличением магнитного поля, что свидетельствует о высокой степени ионизации. Концентрация ионов плазмы в заанодном пространстве составляет $\sim 10^{12}$ см⁻³. При увеличении напряжения разряда его стационарность нарушается, что приводит к появлению в плазменном потоке многозарядных ионов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10073, <https://rscf.ru/project/23-72-10073/>

5. Список литературы

- [1] V.P. Polishchuk, et al., Vacuum Arcs with Diffuse Cathode Attachment (Review), *High Temperature*, vol. **58**, 476, 2020, doi: 10.1134/S0018151X20040124
- [2] G.D. Liziakin, et al., On the Concept of Plasma Mass-Separation in Crossed $E \times B$ Fields with a Potential Well (a Review), *Plasma Physics Reports*, vol. **48**, 1251, 2022, doi: 10.1134/S1063780X22601912
- [3] R.K. Amirov, et al., Vacuum arc with a distributed cathode spot as a plasma source for plasma separation of spent nuclear fuel and radioactive waste, *Plasma Physics Reports*, vol. **41**, 808, 2015, doi: 10.1134/s1063780x15100013
- [4] R. Usmanov, A. Melnikov, A. Gavrikov, N. Antonov, and V. Polistchook, Time-of-flight mass spectrometer for diagnostics of continuous plasma flow, *Review of Scientific Instruments*, vol. **93**, 73505, 2022, doi: 10.1063/5.0096621