

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ В ПРИКАТОДНЫХ ОБЛАСТЯХ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСИ O_2+Ar

*ГОУВПО Ивановский государственный химико-технологический университет,
пр. Ф. Энгельса, 7, г. Иваново, 153000, Россия, kholodkov@isuct.ru*

Катодные области разряда с технологической точки зрения имеют важное значение для травления и очистки материалов, нанесения пленок различного назначения. При этом большую роль играют реакции, вызванные бомбардировкой ионов. Одним из возможных путей оптимизации процессов травления и очистки является использование в качестве плазмообразующего газа смесей химически активных газов с аргоном. Для прогнозирования эффективности проведения подобных технологических процессов должны быть сведения о сорте ионов, величине их потока и функции распределения ионов по энергии (ФРИЭ). С этой точки зрения катодные области разряда гораздо менее изучены, чем область положительного столба [1–2], так как проводятся исследования или для чистых газов [3–4], или используются модельные системы с ионными источниками высокой интенсивности [5].

Методика эксперимента. Исследования проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1.

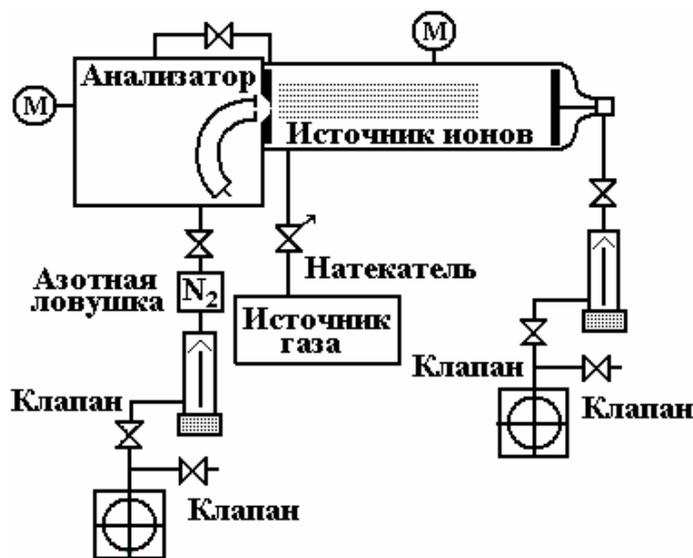


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для измерения распределения ионов по энергии использовался цилиндрический электростатический анализатор секторного типа с фокусировкой на 127° , помещенный непосредственно за катодом [6]. Разряд зажигался в цилиндрическом реакторе с внутренним диаметром 125 мм, изготовленном из электровакуумного молибденового стекла марки С-52. Распределение потенциала вблизи катода измерялось одиночным зондом (общее расстояние между электродами – 250 мм).

Диапазон давлений газовой смеси составлял 1–3 Па, ток разряда изменялся в пределах 10–30 мА. Плазмообразующий газ готовился путем смешения известных объемов аргона и кислорода (чистота газов 99,9%), точность приготовления смесей контролировалась масс-спектрометрически.

Результаты измерений и их обсуждение. Полученные функции распределения ионов имели вид кривых с одним максимумом в области высоких энергий ионов (рис. 2).

В результате проведенных опытов была выявлена зависимость положения максимума ФРИЭ от давления и состава плазмообразующего газа (рис. 3). Наиболее существенное влияние оказывает добавка кислорода в пределах 20 %. Следует отметить, что при давлении 1,8 Па энергия ионов в максимуме практически не зависит от состава смеси.

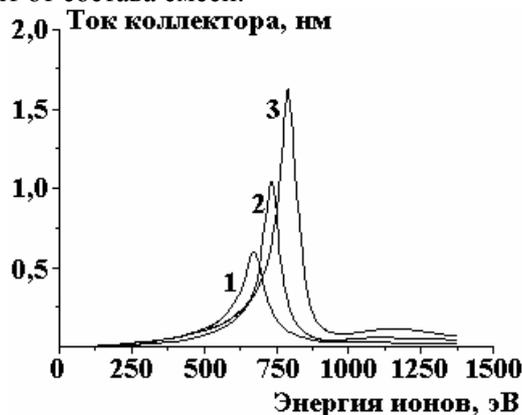


Рис. 2. Функции распределения по энергиям ионов: 1 – 100% O₂, 2 – 10% O₂, 3 – 100% Ar (1,5 Па, 20 мА)

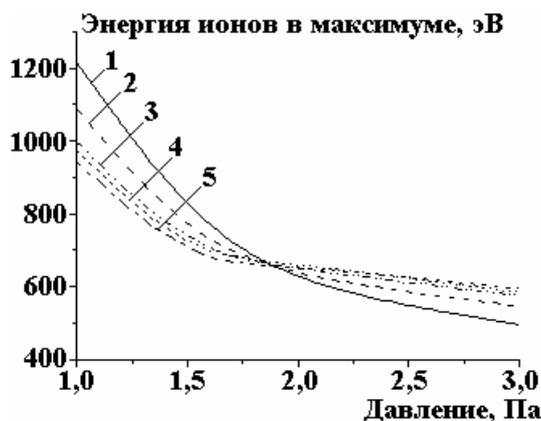


Рис. 3. Зависимость энергии максимума от давления плазмообразующего газа (20 мА): 1 – 100% Ar, 2 – 10% O₂, 3 – 60% O₂, 4 – 80% O₂, 5 – 100% O₂

Вид наблюдаемых зависимостей можно объяснить, если предположить, что резкий максимум кривой определяется ионами, прошедшими без столкновений область катодного падения потенциала и получившими наибольшую энергию, а плавный спад кривой в сторону малых энергий обусловливается ионами, претерпевшими столкновения внутри области катодного падения потенциала в процессах перезарядки [7]. На рис. 4 представлены результаты расчета ФРИЭ на основании модели резонансной перезарядки Дэвиса [3] и данных о сечениях резонансной перезарядки [8, 9] в предположении, что все ионы заключены между двух границ, за границами ионов нет, а общий поток ионов одинаков. Величина катодного падения потенциала полагалась постоянной и равной 500 В.

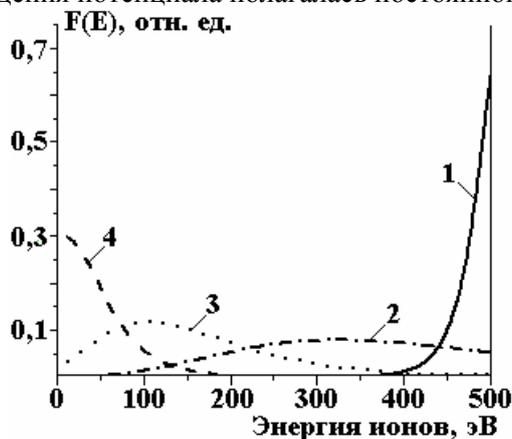


Рис. 4. ФРИЭ, вычисленные в рамках упрощенной модели движения положительных ионов в катодном пространстве при давлении, Па: 1 – 1,5, 2 – 10, 3 – 20, 4 – 50; катодное падение потенциала составляет 500 В

Проведенные расчеты подтверждают, что в нашем случае ионы, образованные в результате перезарядки, формируют незначительное плато вблизи основного максимума, а вид ФРИЭ фактически определяется распределением потенциала вблизи катода.

Для того чтобы сделать выводы об ионном составе, на основе измерений распределения потенциала в катодной области были оценены энергии, которые может приобрести ион, пройдя всю катодную область без столкновений (рис. 5). Из сравнения рис. 3 и 5 можно сделать вывод о том, что в чистом аргоне при давлении 1 Па преобладают двухзарядные ионы, в то время как в чистом кислороде и его смесях с аргонном при давлении более 1,5 Па максимум функции распределения соответствует однозарядным ионам.

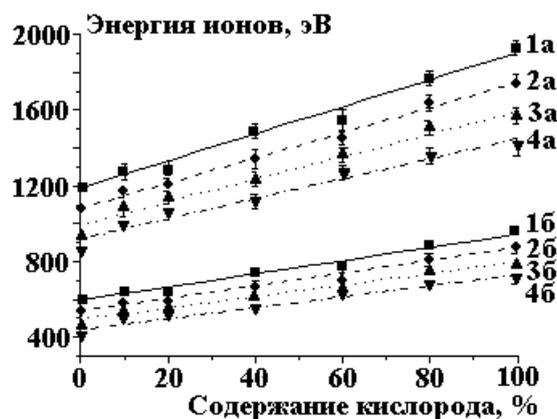


Рис. 5. Зависимость энергии, приобретаемой одно- и двухзарядными ионами в катодной области, от содержания кислорода в смеси. Двухзарядные ионы: 1а – 1 Па, 2а – 1,5 Па, 3а – 2 Па, 4а – 3 Па, однозарядные ионы: 1б – 1 Па, 2б – 1,5 Па, 3б – 2 Па, 4б – 3 Па; ток разряда составляет 20 мА

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные об энергетическом распределении положительных ионов, прибывающих на катод, в тлеющем разряде в смеси O_2+Ar . Показано, что модель резонансной перезарядки Девиса с учетом измеренного распределения потенциала в темном катодном пространстве удовлетворительно описывает экспериментальные функции распределения, представляющие собой кривые с одним максимумом при энергии в несколько сотен эВ. Из полученных данных следует, что в области катодного падения в смеси аргон-кислород могут присутствовать как однозарядные, так и двухзарядные ионы, причем последние преобладают при содержании кислорода менее 20% и давлении плазмообразующей смеси менее 1,5 Па.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smirnov S.A., Rybkin V.V., Ivanov A.N., Titov V.A. The Simulation of the Processes of Formation and Decay of Neutral Particles in DC Discharge Plasma in an Argon-Oxygen Mixture // High Temperature. 2007. V. 45. № 3. P. 291–297.
2. Morscheidt W., Hassouni K., Bauduin N., Arefi-Khonsari F. and Amouroux J. On the Use of Global Kinetics Models for the Investigation of Energy Deposition and Chemistry in RF Argon–Oxygen Plasmas Working in the Torr Regime // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. V. 23. № 1. P. 117–140.
3. Davis W.D., Vanderslice T.A Ion Energies at the Cathode of a Glow Discharge // Physical Review. 1963. V. 131. № 4. P. 219–228.
4. Healy D., Brandt W.W. Ion extraction from the cathode-fall region of Ar, N_2 and O_2 discharges // Int. J. Mass. Spectrom. Ion Proc. 1986. V. 70. P. 267–275.
5. Wroncki Z. Energy distributions of cathode fall ions in the light of Boltzmann equation. // Vacuum. 1990. V. 40. № 4. P. 387–394.
6. Соколов В.Ф., Соколова Ю.А. Измерение энергетического распределения положительных ионов, бомбардирующих катод // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 8. С. 77–80.
7. Райзер Ю.П. Современный уровень понимания явлений в катодных частях тлеющего разряда // Теплофизика высоких температур. 1986. Т. 24. № 5. С. 984–994.

8. Федоренко Н.В. Ионизация при столкновении ионов с атомами // Успехи физических наук. 1959. Т. 118. Вып. 3. С. 481–511.
9. Thomson J.B. Electron energy distribution in plasmas. IY. Oxygen and nitrogen // Proc. Roy. Soc. 1961. A 262. P. 503–518.

Поступила 23.04.09

Summary

The results of investigation of ion energy distribution in cathode region of direct current discharge in O₂+Ar (0–100%) mixture are presented at different plasma parameters (1–3 Pa pressure, 10–30 mA discharge current). It is shown that Ar percentage more than 20% results to ion of Ar²⁺ formation and shifting distribution maximum to higher energies.
