

## Исследование энергетического распределения ионов в области катодного падения тлеющего разряда в аргоне, азоте и кислороде

В. Ф. Соколов, Ю. А. Соколова, И. А. Медведова

Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия

*Методом задерживающего потенциала измерены энергетические распределения положительных ионов, бомбардирующих катод, в тлеющем разряде аргона, азота и кислорода. Полученные функции распределения описаны модельными функциями, вычисленными в предположении преобладания столкновений с перезарядкой ионов на молекулах собственного газа с учетом реального распределения потенциала в темном катодном пространстве. Обсуждается механизм формирования энергетического распределения ионов в области катодного падения.*

Исследование характеристик катодных областей необходимо как для развития теории разряда, так и для решения технологических задач, связанных с травлением и модификацией поверхности неорганических и полимерных материалов и получением пленок и покрытий. Важнейшей из таких величин является энергетическое распределение положительных ионов, формирующееся в катодных областях разряда, поскольку знание этого распределения позволяет лучше понять механизм процессов, протекающих на поверхности катода или другого обрабатываемого материала, а также механизм образования и гибели ионов в объеме катодных областей. Исследованию этого вопроса посвящен ряд имеющихся в литературе работ. основополагающей среди них считается работа [1], в которой впервые были получены систематические экспериментальные данные об энергетических распределениях ионов, бомбардирующих катод, в тлеющем разряде в He, Ne, Ar и N<sub>2</sub>. Ионы детектировались через малое отверстие в катоде и анализировались по энергиям с помощью электростатического анализатора секторного типа; вид ионов определялся с помощью магнитного анализатора. На основании полученных результатов авторы [1] предположили, что основным процессом, формирующим энергетическое распределение, является процесс симметричной резонансной перезарядки ионов в собственном газе и предложили теоретическую модель для описания функции распределения. В работе [2] методом электростатического анализатора изучались функции распределения ионов по энергиям в области катодного падения потенциала в разряде Ar, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>. Были обнаружены острые максимумы в энергетических распределениях, по интерпретации авторов характеризующие ионы, пересекающие область катодного падения без реактивных столкновений. Было отмечено отклонение полученных результатов для азота от модели Дэвиса, а для кислорода вообще не удалось получить воспроизводимых данных из-за искажения распределения электрического поля вследствие реакции химически активных кислородных ионов с элементами анализатора. В работе [3] с помощью анализатора, помещенного в область отрицательного свечения, были измерены энергетические распределения ионов в Ar, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, бомбардирующих отрицательно за-

ряженную стенку, и теоретически исследовано влияние на функцию распределения столкновений в двойном электрическом слое перед стенкой и изменения потенциала слоя. В [4] было выполнено численное моделирование энергетического распределения ионов  $H_2^+$  в катодных областях разряда для произвольного профиля электрического поля с учетом процессов резонансной перезарядки и разрушения этих ионов при столкновениях с нейтральной молекулой водорода. Наконец, целая серия работ [5—8] посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию энергетических распределений ионов He, Ar,  $N_2$ ,  $O_2$ , генерируемых в области катодного падения аномального тлеющего разряда разработанным авторами специальным ионным источником высокой интенсивности.

Несмотря на достигнутые успехи, по мнению ряда авторов, проблема изучена недостаточно и ряд экспериментальных результатов не находит объяснения. В данной работе методом задерживающего потенциала измерены функции распределения по энергиям положительных ионов, прибывающих на катод, в тлеющем разряде кислорода, аргона и азота и вычислены модельные функции, учитывающие реальное распределение потенциала в области катодного падения.

### Методика эксперимента

Разряд зажигался в стеклянном цилиндрическом реакторе диаметром 125 мм при токах 5, 7, 10 мА в потоке газа при давлении в диапазоне 1,6—4,3 Па. Катод (К) и анод (А) изготовлялись из алюминия, катод находился под нулевым земляным потенциалом, расстояние между катодом и анодом составляло 175 мм. В центре катода (рис. 1) размещалась диафрагма (Д) толщиной 0,1 мм с диаметром отверстия 0,35 мм, за ней на расстоянии 3 мм располагался коллектор ионов (КИ), изолированный от катода с помощью керамического кольца (И). Тыльная сторона коллектора и подводящие проводники были изолированы специальным эпоксидным составом. Ионный ток измерялся усилителем ЭК1601, его величина не превышала 20 нА. Функции распределения ионов по энергиям получали дифференцированием (с последующим нормированием) зависимости тока коллектора от величины подаваемого на него задерживающего потенциала относительно катода в диапазоне от -10 до 400 В. Небольшой отрицательный потенциал был необходим для уменьшения искажений в начальный момент регистрации кривой. Распределение потенциала вблизи катода в разрядной зоне измерялось подвижным одиночным зондом (ПЗ) из вольфрам-рениевой проволоки диаметром 35 мкм с длиной неизолированной части 2 мм.

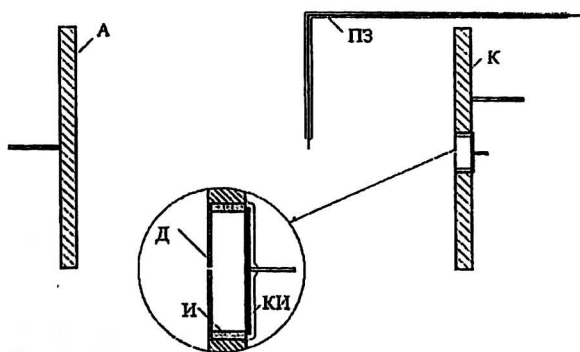


Рис. 1. Геометрия разрядного промежутка

## Результаты и обсуждение

Полученные нами функции распределения имели вид кривых с одним максимумом в области низких энергий ионов. Типичный вид экспериментальных зависимостей показан на рис. 2. Измеренные одиночным зондом распределения потенциала вблизи катода представлены на рис. 3. Реализующееся в наших экспериментальных условиях распределение приводит к характеру изменения напряженности электрического поля в катодном темном пространстве, показанному на рис. 4. Ионы, движущиеся к катоду из области отрицательного свечения с практически нулевым значением напряженности поля, сначала попадают в ускоряющее поле, а начиная с некоторого расстояния от катода, их движение замедляется. Это расстояние зависит от рода и давления газа и составляет 2—4 см.

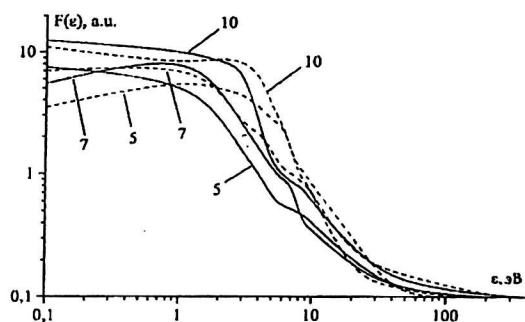


Рис. 2. Энергетические распределения ионов в азоте и аргоне (цифры у кривых означают ток разряда в мА):  
—  $N_2$ ; ---  $Ar$ ;  $P = 2,5$  Па

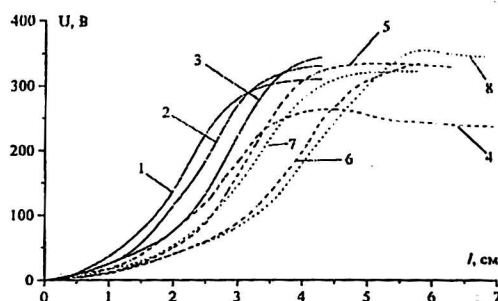


Рис. 3. Наблюдаемое распределение потенциала вблизи катода:  
1, 4 — 4,3 Па; 2, 5, 7 — 3, 4 Па; 3, 6, 8 — 2,9 Па;  
—  $O_2$ ; ---  $N_2$ ; ..... —  $Ar$ ;  $i = 5$  мА

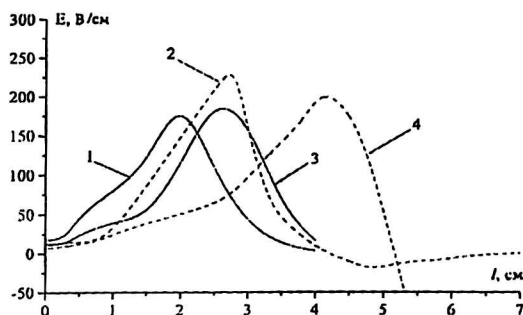


Рис. 4. Напряженность электрического поля вблизи катода:  
1, 2 — 4,3 Па; 3, 4 — 2,9 Па;  
—  $O_2$ ; ---  $N_2$ ;  $i = 5$  мА

Результирующее распределение по энергиям положительных ионов, прибывающих на катод, должно формироваться в процессе приобретения ими энергии от электрического поля и потери в столкновениях с молекулами или атомами собственного газа. В модели Дэвиса [1] рассматриваются лишь те столкновения, в которых ионы теряют всю свою энергию при перезарядке, причем сечения таких столкновений не зависят от энергии, а также допускается, что электрическое поле в темном катодном пространстве линейно уменьшается от поверхности катода до края отрицательного свечения. Мы оставили в силе первое допущение, но использовали при вычислении модельной функции измеренное нами распределение потенциала. При движении ионов в области катодного падения величина тока положительных ионов, долетевших до катода без соударений, определяется выражением

$$i_1 = i_0 \exp\left(\frac{l_k - l}{\lambda}\right),$$

где  $i_0$  — величина ионного тока на границе слоя катодного падения потенциала;

$l_k$  — длина слоя катодного падения;

$l$  — расстояние до катода;

$\lambda$  — средняя длина свободного пробега иона в процессе резонансной перезарядки.

Эти ионы приобретают энергию, равную  $eU_k$ , где  $U_k$  — величина катодного падения потенциала. Оставшаяся часть ионов, равная  $i_2 = i_0 - i_1$ , на некотором расстоянии  $l$  от катода испытывает столкновения с перезарядкой, в которых полностью потеряет свою энергию. Вновь образованные ионы начнут свое движение к катоду уже с расстояния  $l_k - l$ , и в предельном случае смогут приобрести энергию, равную  $eU_l$ , где  $U_l$  — значение потенциала на расстоянии  $l$  от катода. Однако часть этих ионов вновь сталкивается с молекулами газа и теряет энергию и т. д. Таким образом, в зависимости от конкретного хода распределения потенциала в области катодного падения и величины  $\lambda$  будет формироваться функция распределения по энергиям ионов, бомбардирующих катод.

Эта итерационная процедура была реализована в виде программы, которая позволяла рассчитывать  $F(\epsilon)$  с использованием экспериментальной зависимости  $U = f(l)$  и варьируемого значения  $\lambda$ . Оказалось, что полученные таким образом модельные функции распределения хорошо описывают экспериментальные кривые. На рис. 5 в качестве примера представлены экспериментальная и расчетная нормированные функции для кислорода, а на рис. 6 — полученные из экспериментальных функций средние энергии ионов в кислороде и азоте в зависимости от давления газа, которые коррелируют с изменением величины катодного падения потенциала.

Практически во всех работах, посвященных измерению или расчету энергетических распределений положительных ионов в катодных областях разряда, делается попытка определить сечения резонансной перезарядки для исследуемых газов, причем результаты разных авторов сильно отличаются одно от другого. Мы оценили из подобранных в процессе численного моделирования значений  $\lambda$  макроскопическое сечение  $\tau = 1/\lambda$  и сечение перезарядки  $Q$  из выражения  $\tau = QN$  (где  $N$  — концентрация молекул газа) и сравнили наши результаты с приведенными в [9] экспериментальными данными, полученными методом пересекающихся пучков. Эти сечения составляют для кислорода  $1,3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ , а для азота  $9,9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  и находятся между значениями  $Q$

для перезарядки молекулярных и атомарных ионов на молекулах исходного газа, что свидетельствует о наличии в области катодного падения, по крайней мере, двух сортов ионов в каждом газе —  $O_2^+$ ,  $O^+$  и  $N_2^+$ ,  $N^+$ , соответственно.

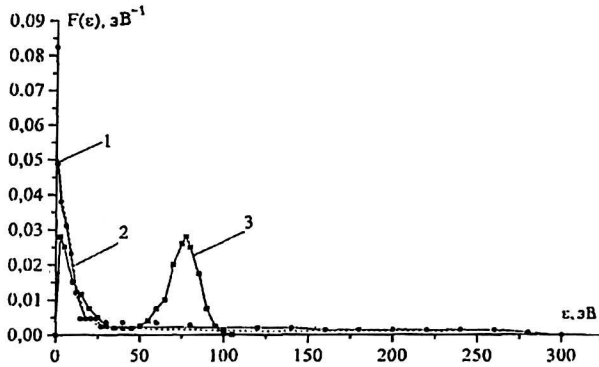


Рис. 5. Функции распределения ионов в кислороде при  $P = 2,2$  Па;  $i = 5$  мА:  
1, 2 — область катодного падения потенциала (1 — эксперимент; 2 — расчет);  
3 — область отрицательного свечения (эксперимент) [10]

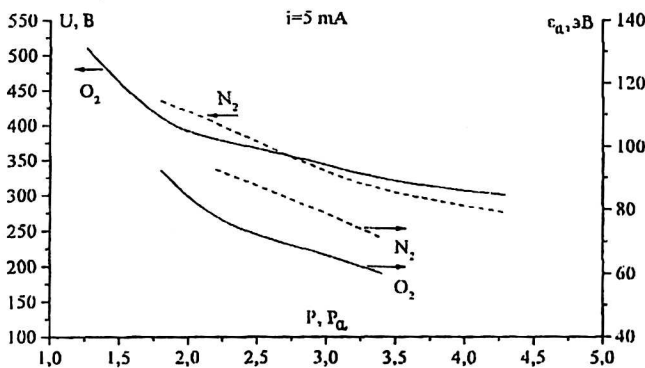


Рис. 6. Катодное падение потенциала и средняя энергия ионов в кислороде и азоте

В литературе существуют различные мнения относительно того, в какой области разряда рождается основная масса ионов и где происходит их гибель вследствие перезарядки — в отрицательном свечении, в области катодного падения или на границе этих областей. На рис. 5 полученные в данной работе ФРИ сравниваются с функцией, измеренной нами ранее [10] в той же разрядной системе с помощью плоского зонда, размещенного на расстоянии 75 мм от катода у края зоны отрицательного свечения, прилегающего к области катодного падения потенциала. Эта функция имеет два максимума, второй из которых обусловлен ионами, не претерпевшими столкновений до попадания на коллектор зонда. Таким образом, получается, что основная масса ионов перезарядается и теряет энергию в области катодного падения потенциала и в непосредственной близости от катода, как и предполагалось в описанной выше модели движения ионов. Это приводит к совершенно иному наблюдаемому виду функции распределения положительных ионов в темном

катодном пространстве по сравнению с функцией в области отрицательного свечения разряда.

### Заключение

Экспериментально установлено, что энергетические распределения положительных ионов, прибывающих на катод, в тлеющем разряде азота, кислорода и аргона при давлении газа менее 5 Па и токе 5–10 мА представляют собой кривые с одним максимумом при нулевой или близкой к нулю энергии. Средняя энергия ионов  $\epsilon_a$  в кислороде составляет 60–90 эВ, а в азоте — 75–105 эВ, что согласуется с полученным нами более низким значением сечения перезарядки для азота. Показано, что модель резонансной перезарядки Дэвиса с учетом измеренного распределения потенциала в темном катодном пространстве неплохо описывает экспериментальные функции распределения. Из полученных данных следует, что в области катодного падения могут присутствовать как молекулярные, так и атомарные ионы азота и кислорода, и что большая их часть рождается в этой зоне. Дальнейший прогресс в понимании протекающих здесь процессов должен быть связан с определением доли ионов разного типа, а также с анализом влияния движения электронов в области извлекающего ионы отверстия на результаты измерений.

### Литература

1. Davis W. D., Vanderslice T. A. // Phys. Rev., 1963. V. 131. № 1. P. 219.
2. Healey D., Brandt W. W. // Int. J. Mass. Spectrom. Ion. Proc., 1986. V. 70. № 3. P. 267.
3. Riemann K.-U., Ehemann U., Wiesemann K. // J. Phys. D: Appl. Phys., 1992. V. 25. № 4. P. 620.
4. Konovalov V. P., Bretagne J., Gousset G. // Ibid, 1992. V. 25. № 7. P. 1073.
5. Wronski Z. // Vacuum. 1985. V. 35. № 7. P. 271.
6. Wronski Z., Pilat M. // Ibid, 1988. V. 38. № 7. P. 547.
7. Wronski Z. // Ibid, 1990. V. 40. № 7. P. 387.
8. Wronski Z., Sullivan J. L., Saled S. O. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1992. V. 25. № 11. P. 1607.
12. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах. — М.: Мир, 1967. — 832 с.
13. Соколов В. Ф., Соколова Ю. А., Мусинова О. А. // Известия вузов. Сер. Физика, 1998. № 2. С. 55.

## The investigation of the ion energy distribution at the cathode fall region of glow discharge in argon, nitrogen and oxygen

V. F. Sokolov, Yu. A. Sokolova, I. A. Medvedeva  
Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia

*The energy distribution of positive ions striking the cathode in glow discharge has been measured for argon, nitrogen and oxygen. The model of charge-transfer collisions for the motion of ions in the cathode fall region was discussed. The model functions calculated with measured potential distribution were compared with experimental.*