

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

13-88-620

А.Лятушински, Д.Мончка*, Ю.В.Юшкевич

О РОЛИ ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Направлено в журнал "Приборы
и техника эксперимента"

* Институт физики УМКС, Люблин, ПНР

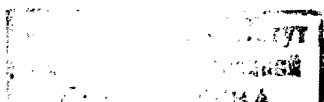
ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет для получения ионов в электромагнитных масс-сепараторах используются ионные источники, принцип действия которых основан на дуговом разряде низкого давления. Несмотря на то, что существует ряд работ, посвященных этому типу источников, проблема оптимизации условий их работы до конца не решена. Причиной этого является наличие многих процессов, происходящих в разряде, взаимосвязь которых трудно определить. Как правило, принимается, что главным процессом, ведущим к ионизации, является соударение атомов с первичными и вторичными электронами. Также возможна ионизация атомов в возбужденных состояниях, особенно метастабильных, время жизни которых в дуговом разряде относительно велико^{1/1}. При разряде с большим анодным напряжением возможна многозарядная ионизация в процессе Оже. Хотя все указанные выше процессы хорошо изучены, совокупность их действий в плазме дуги не объяснена. Это связано с отсутствием количественных экспериментальных данных об относительном вкладе каждого процесса в разряд. Так, например, очень часто не определены постоянные однократной и многократной ионизации, хотя известны сечения в функции энергии электронов. Эти трудности вызваны тем, что, как правило, не достаточно изучена функция распределения скоростей первичных и вторичных электронов, а также ионов в плазме разряда.

Данная работа касается проблем, связанных с ионизацией в дуговом источнике, и в особенности определения вклада вторичных электронов в общий процесс образования положительных ионов. Для этой цели использованы результаты измерений ионных токов, извлекаемых из источника, в случае, когда разряд горит в смеси двух разных газов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 приведена упрощенная схема ионного источника, который используется на электромагнитных масс-сепараторах в ЛЯП ОИАИ и ИФ УМКС /СРВР 01.06, г.Люблин/^{1/2-4/}. В разрядную камеру источника Р вводятся два газа: основной А (Ar, Kr, Xe) и



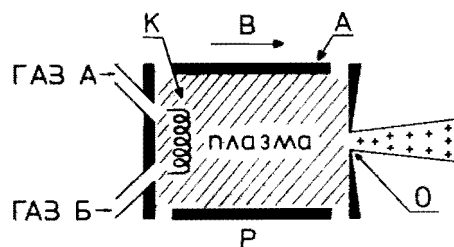


Рис. 1. Схема ионного источника. Р - разрядная камера; К - катод; А - цилиндрический анод; О - отверстие для извлечения ионов; В - вектор индукции магнитного поля.

носитель Б (He). Если суммарное давление обоих газов в разрядной камере достаточно высокое, там зажигается разряд, и образующаяся плазма занимает практически весь объем камеры. Положительные ионы вытягиваются из источника через отверстие О. Измерение ионных токов, попадающих на коллектор сепаратора, и количества поступающих в разрядную камеру газов позволяет определить относительную эффективность процесса их ионизации η_A/η_B . Как показано в работах^{5,6/}, это соотношение находится по формуле

$$\eta_A/\eta_B = \sqrt{\frac{m_A}{m_B} \left[\frac{\kappa_A}{\kappa_B} + \left(\frac{Q_A}{Q_B} \sqrt{\frac{m_A}{m_B}} \cdot V + C \right)^{-1} \right]}, \quad /1/$$

где m_A и m_B - массы газов А и Б; Q_A и Q_B - скорость подачи газов А и Б, поступающих в источник; В и С - постоянные, характеризующие эффект Пеннинга; κ_A и κ_B - постоянные процесса ионизации в электронных соударениях с атомами газов А и Б.



Величина κ определяется выражением

$$\kappa = \int v f(v) \sigma(v) dv, \quad /3/$$

где $f(v)$ - функция распределения скорости электронов в плазме; $\sigma(v)$ - сечение ионизации атомов электронами.

Из уравнения /1/, зная отношения η_A/η_B , можно получить κ_A/κ_B . На рис. 2 /а, б и в/ кривые 1 показывают вычисленные /с точностью 5%/ отношения κ_A/κ_B в зависимости от анодного напряжения для разряда, горящего в смеси Ar-He, Kr-He и Xe-He.

Анодное напряжение, в основном, определяет кинетическую энергию первичных электронов, эмитируемых с катода. Согласно теории дугового разряда низкого давления, первичные электроны получают всю свою энергию при прохождении биполярного прикатодного слоя толщиной радиуса Дебая, в котором происходит па-

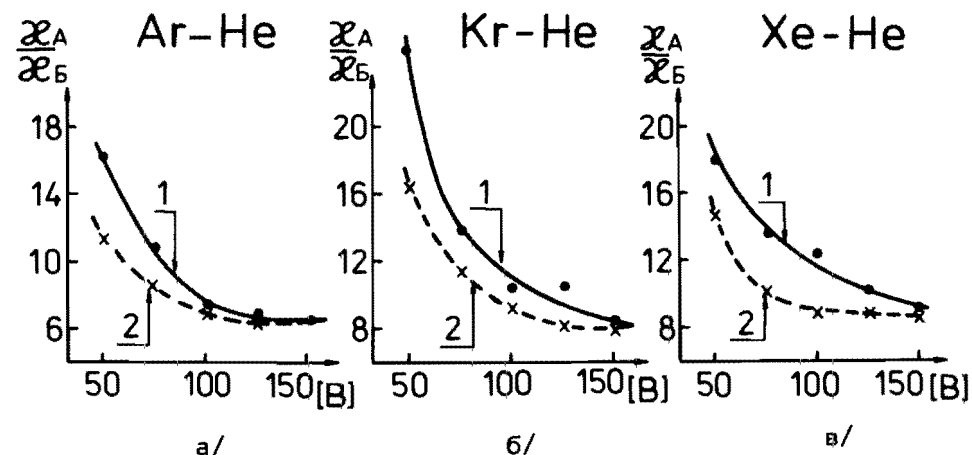


Рис. 2. Зависимость соотношений постоянных κ_A/κ_B /кривые 1/ и сечений σ_A/σ_B /кривые 2/ при ионизации атомов электронами от анодного напряжения /энергии электронов/.

дение практически всего анодного напряжения. Из этого следует, что если бы за процесс ионизации в плазме отвечали только первичные малоэнергетичные электроны, то отношения постоянных ионизации κ_A/κ_B были бы равны отношениям σ_A/σ_B /кривые 1 и 2 на рис. 2а,б,в совпали бы/. Как видно из рис. 2, существует явная разница в ходе обеих кривых, причем она уменьшается с ростом анодного напряжения. Этот факт можно объяснить участием в процессе ионизации вторичных электронов, образующихся при соударениях первичных электронов с атомами газа.

Наличие вторичных электронов в плазме дугового разряда низкого давления и их участие в общем процессе ионизации до сих пор не нашло в литературе достаточного объяснения. Существующие работы по этой теме дают только приблизительные теоретические расчеты^{7,8/}. Полученные нами экспериментальные данные позволяют оценить относительную концентрацию вторичных электронов в плазме дуги в функции их температур. Для этого введем параметр Р:

$$P = \frac{n_{eB}}{n_e} \approx \frac{n_{eB}}{n_{e\eta} + n_{eB}}, \quad /4/$$

где n_e - общая концентрация электронов в плазме; $n_{e\eta}$, n_{eB} - концентрация первичных и вторичных электронов в плазме. Про-

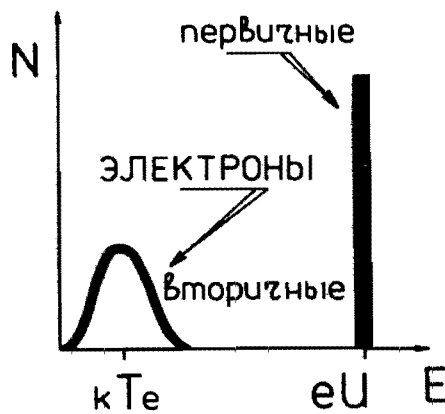


Рис. 3. Энергетическое распределение электронов в плазме дугового разряда.

Процесс электронной ионизации газов А и Б можно описать:

$$\frac{dn_A^+}{dt} = n_A \kappa_A n_e;$$

$$\frac{dn_B^+}{dt} = n_B \kappa_B n_e; \quad /5/$$

здесь n_A и n_B - концентрация атомов газов А и Б. Примем, что первичные электроны моноэнергетические, а распределение по скорости вторичных электронов - максвелловское /рис. 3/.

Тогда из уравнений /5/ получаем

$$\kappa_A n_e = n_{eп} \cdot \sigma_A \cdot v_n + n_{ев} \cdot \kappa_{Ав}, \quad /6а/$$

$$\kappa_B n_e = n_{eп} \cdot \sigma_B \cdot v_n + n_{ев} \cdot \kappa_{Бв}, \quad /6б/$$

где $\kappa_{Ав}$ и $\kappa_{Бв}$ - постоянные процесса ионизации вторичными электронами газов А и Б; v_n - скорость первичных электронов:

$$v_n = \left(\frac{2eU}{m_e} \right)^{1/2},$$

где U - падение потенциала в биполярном слое, практически равное анодному напряжению U_a .

Разделив уравнения 6а и 6б, учитывая /3/ и /4/, получаем

$$\frac{\kappa_{Ав}}{\kappa_{Бв}} = \frac{\frac{\kappa_A}{\kappa_B} - \frac{v_n \sigma_A}{\kappa_B} (1 - P)}{1 - \frac{v_n \sigma_B}{\kappa_B} (1 - P)}, \quad /7/$$

Используя уравнение /7/, можно рассчитать соотношения $\kappa_{Ав}/\kappa_{Бв}$ в функции параметра P . Для вычисления величин сечения ионизации σ_A и σ_B была использована формула Бете - Борна:

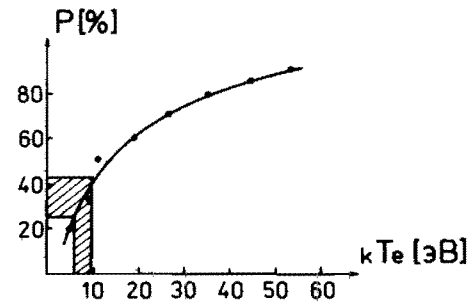


Рис. 4. Зависимость относительной концентрации вторичных электронов в плазме дугового разряда (Ag-He) от их энергии при анодном напряжении $U_a = 100$ В.

$$\sigma = \frac{N}{E_K E_{и}} \ln F \frac{E_K}{E_{и}},$$

где E_K - кинетическая энергия электрона; $E_{и}$ - энергия ионизации атомов; N и F - экспериментальные величины, взятые из работ /9,10/. Коэффициент κ_B вычислен по формуле /3/ для температуры электронов T_e , определенной из величины экспериментальных соотношений постоянных κ_A/κ_B /рис. 2/. Согласно /3/, величины $\kappa_{Ав}$ и $\kappa_{Бв}$ определяются температурой вторичных электронов, следовательно, уравнение /7/ показывает связь между параметром P и этой температурой. На рис. 4 представлен пример такой зависимости для разряда, горящего в смеси Ag-He при $U_a = 100$ В. Кривая на рис. 4 дает возможность оценить вклад вторичных электронов в суммарный процесс ионизации в разряде, если известна их энергия. Согласно /11/, энергия вторичных электронов в соударениях типа первичный электрон - атом в дуге равна $6 \pm 10\%$ энергии первичных электронов. Тогда получаем, что вклад вторичных электронов в общий процесс ионизации газов в смеси Ag-He составляет около 35% /заштрихованная область рис. 4/. Как видно из рис. 2, этот вклад существенно растет с уменьшением анодного напряжения. Приблизительно такие же результаты получены для разрядов, горящих в смесях газов: Kr-He и Xe-He.

Полученные нами данные согласуются с теоретической оценкой, приведенной в работе /12/, где вклад вторичных электронов определен в пределах $30 \pm 70\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Massey H.S.W., Budhop E.H.S., Gikbody H.B. Electronic and Ionic Impact Phenomena, Oxford, Clarendon Press, 1971.
2. Zuk W., Maczka D., Pomorsky J. - NIM, 1965, 37, p.249.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

3. Афанасьев В.П. и др. ОИЯИ, 13-4763, Дубна, 1969.
4. Latuszynski A. et al. - NIM, 1987, B26, p.240.
5. Maczka D. et al. - NIM, 1981, 186, p.335.
6. Мончка Д., Лятушински А., Васяк А. - ПТЭ, 1983, №4, с.168.
7. Fuchs G. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-19/2, 1970, p.160.
8. Darling R.L., Davies R.H. - Rev. Sci. Instr., 1973, 44, p.375.
9. Bleakney W. - Phys. Rev., 1930, 36, p.1303.
10. Adamczyk B. Annales UMCS, vol. XXIX/XXV, 21, sec. AA, 1970, 157, p.70.
11. Bohm D. The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields. New York, A. Guthrie and R.K. Wakerling, 1949.
12. Gautherin G., Lejeune C. Proceed. of the 8th Intern. EMIS Conf., Srövde, Sweden, 1973, p.17.

| Индекс | Тематика |
|--------|--|
| 1. | Экспериментальная физика высоких энергий |
| 2. | Теоретическая физика высоких энергий |
| 3. | Экспериментальная нейтронная физика |
| 4. | Теоретическая физика низких энергий |
| 5. | Математика |
| 6. | Ядерная спектроскопия и радиохимия |
| 7. | Физика тяжелых ионов |
| 8. | Криогеника |
| 9. | Ускорители |
| 10. | Автоматизация обработки экспериментальных данных |
| 11. | Вычислительная математика и техника |
| 12. | Химия |
| 13. | Техника физического эксперимента |
| 14. | Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами |
| 15. | Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях |
| 16. | Дозиметрия и физика защиты |
| 17. | Теория конденсированного состояния |
| 18. | Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники |
| 19. | Биофизика |

Рукопись поступила в издательский отдел
11 августа 1988 года.