

УДК 539.9 : [537.52 : 621.3 : 032.2]

**ВЗАИМОСВЯЗЬ АДсорбЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА И ПРОЦЕССОВ
В ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ОБЛАСТИ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА
В ПЛАЗМЕ**

*В. Н. Карасев, А. В. Минятов, В. Г. Панкратов,
В. Н. Степанов*

(Москва)

В работе [1] отмечено, что влияние паров щелочного металла на работу выхода материала катода для ряда МГД устройств в настоящее время фактически не изучено. Не исследовано также взаимное влияние адсорбционных процессов на поверхности катода и процессов в прикатодной области разряда в плазме, которое весьма существенно для правильного определения эмиссионных характеристик катодов в плазме.

Характеристики покрытия электрода веществом плазмы определяют величину работы выхода электрода, а тем самым плотность тока в разряде и величину прикатодного падения потенциала ϕ_s . С другой стороны, степень покрытия катода адсорбированными частицами существенно зависит от величины ϕ_s .

В данной работе предлагается методика расчета эмиссионных характеристик катодов при сильноточном разряде в плазме с учетом указанного выше взаимного влияния процессов. Задача решается в одномерной постановке для термоэмиссионного авторазряда (разряд «без пятна»).

С использованием основного уравнения адсорбции [2] и формулы Френкеля [3] для времени пребывания частиц на поверхности адсорбента может быть получено уравнение для определения степени покрытия поверхности катода адсорбированным веществом

$$\theta = \frac{Nh}{\sigma_m k T_w} \exp \left\{ \frac{Q(\theta)}{k T_w} \right\} \quad (1)$$

где $\theta = \sigma / \sigma_m$ — безразмерная степень покрытия; σ — плотность покрытия, т. е. число атомов (или ионов) адсорбата, приходящееся на единицу поверхности подложки; σ_m — плотность покрытия, соответствующая наличию монослоя вещества плазмы на поверхности катода; T_w — температура поверхности катода; N — поток тяжелых частиц из плазмы на единицу поверхности катода в единицу времени; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; q — элементарный электрический заряд; $Q(\theta)$ — теплота сорбции адатомов.

В том случае, когда адсорбция частиц плазмы имеет место главным образом в виде ионов, для определения зависимости величины Q от θ могут быть использованы формулы работы [4].

Численное или графическое решение уравнения (1) дает зависимость $\theta = \theta(T_w, N)$. Отсюда на основании [5] можно найти изменение работы выхода для заданной пары веществ (адсорбат — подложка) в функции температуры T_w и величины N . Для определения влияния величины θ на константу Ричардсона может быть использована формула Цвиккера [5].

Когда плазма содержит частицы двух и более веществ, при $\theta \ll 1$ приближенно можно считать, что результирующее изменение работы выхода является суммой изменений работ выхода от отдельных компонент плазмы.

Далее для решения задачи необходимы соотношения, описывающие процессы в прикатодной области, и соотношение для определения температуры T_w .

В качестве первых могут быть использованы соотношения, приведенные в работах [6,7], с тем отличием, что входящее в формулы работ [6,7] значение работы выхода Φ заменяется величиной $\Phi - \Delta\Phi(T_w, N)$, где $\Delta\Phi(T_w, N)$ определяется как указано выше.

Температура поверхности катода приближенно определялась из уравнения баланса энергии на поверхности катода, которое имеет вид

$$Q_i + Q_a^+ + Q_e - Q_t - Q_a^- - Q_p - Q_{ra} - Q_c - Q_v = 0 \quad (2)$$

Здесь Q_i — энергия, приносимая потоком ионов из плазмы на катод; Q_a^+ — энергия, приносимая на катод нейтральными атомами плазмы; Q_e — энергия, поступающая на катод за счет электронов плазмы; Q_t — унос тепла с катода эмиссионным потоком; Q_a^- — унос тепла отраженными нейтральными атомами; Q_p — унос тепла за счет поверхностной ионизации; Q_{ra} — унос тепла с катода излучением; Q_c — унос тепла в конструкцию (предполагается известной величиной); Q_v — унос тепла за счет испарения материала катода.

При проведении расчетов величина Q_i определялась по формуле

$$Q_i = q^{-1} j_{ic} [2kT_i + q(\Phi_s + V_i)]$$

Здесь V_i — потенциал ионизации плазмы; j_{ic} — плотность тока ионов, идущих из плазмы на катод; T_i — температура ионов плазмы.

Для величины Q_a^+ с использованием результатов работы [8] имеем

$$Q_a^+ = 4n_0 \sqrt{\frac{kT_a}{2\pi m_a}} kT_a$$

где n_a , T_a , m_a — концентрация, температура и масса нейтральных атомов. Остальные члены имеют вид

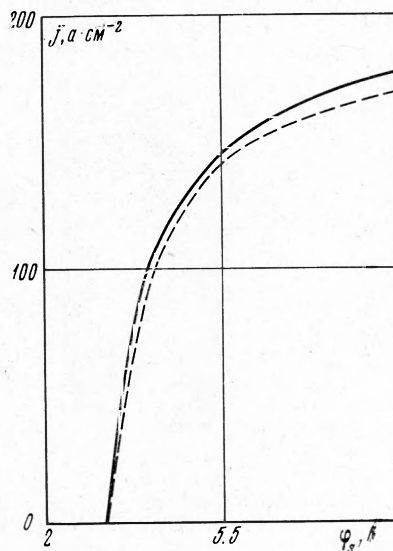
$$Q_e = q^{-1} j_e [2kT_e + q\Phi - \Delta\Phi(T_w, N)], \quad Q_a^- = n_a \left[\sqrt{\frac{2kT_a}{\pi m_a}} - \beta \exp\left(-\frac{q\Phi_s}{kT_w}\right) \right] kT_w, \\ Q_p = n_a \sqrt{\frac{2kT_a}{\pi m_a}} \beta \exp\left(-\frac{q\Phi_s}{kT_w}\right) qV_i \\ Q_{ra} = \varepsilon \sigma T_w^4, \quad Q_v = m^\circ W$$

Здесь ε — степень черноты катода, σ — постоянная Стефана — Больцмана, m° — скорость испарения материала катода, W — теплота испарения материала катода, j_e — ток электронов из плазмы на катод, T_e — температура электронов плазмы.

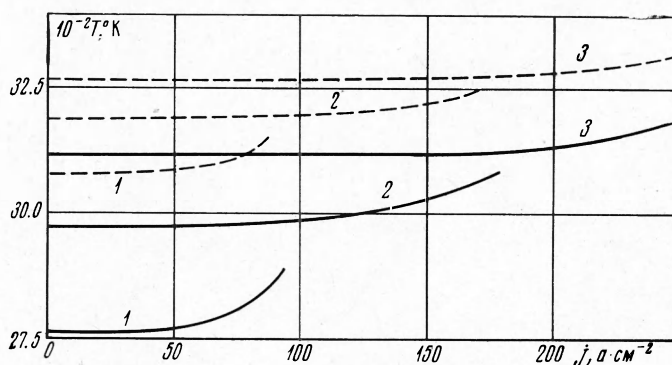
Совместное решение уравнений прикатодной области и уравнений (1) и (2) итерационным методом дает возможность определить все представляющие интерес характеристики прикатодной области адсорбционных процессов на поверхности катода.

При проведении расчетов в качестве материала катода (подложки) был взят вольфрам с $A = \text{const} = 70 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \text{град}^{-2}$, в качестве адсорбата — литий. Температура электронов в плазме T_e полагалась равной $10^4 \text{ }^\circ\text{К}$, $T_i = T_a = 4 \cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{К}$. При определении потоков ионов из плазмы на катод учитывались результаты работы [8]. На фиг. 1 приведены типичные графики вольт-амперных характеристик прикатодной области с учетом (сплошная линия) и без учета (штриховая линия) динамической адсорбции вещества плазмы на поверхности катода при $n_i = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На фиг. 2 изображена зависимость температуры поверхности катода в

функции плотности тока на катоде с учетом (сплошные линии) и без учета (штриховые линии) динамической адсорбции при различных концентрациях ионов в плазме (кривые 1 соответствуют $n_i = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, кривые 2 — $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, кривые 3 — $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Из рассмотрения графиков видно, что учет наличия динамической адсорбции приводит к тому, что для фиксированного падения напряжения в прикатодном слое наряду с некоторым увеличением плотности тока имеет место значительное (порядка 200°) снижение температуры катода. Этот результат легко объяснить. Действительно, оценка членов уравнения баланса энергии для рассмотренных режимов показывает, что основное поступление энергии на катод осуществляется за счет бомбардировки поверхности катода ионами плазмы, ускоренными на участке падения потенциала. Основной унос энергии с катода происходит вследствие термоэлектронной эмиссии. Так, как величина Q_i не зависит от работы выхода материала катода, то унос энергии электронами эмиссии в первом приближении должен оставаться неизменным при изменении величины Φ . При убывании Φ на величину $\Delta\Phi$ энергия, необходимая для высвобождения одного электрона, убывает на величину, пропорциональную $\Delta\Phi$. С другой стороны, на основании формулы Ричардсона — Дешмана поток электронов эмиссии растет экспоненциально с ростом $\Delta\Phi$. Сохранение суммарного уноса энергии электронами эмис-



Фиг. 1



Фиг. 2

сии может быть достигнуто за счет снижения интенсивности роста плотности тока эмиссии, т. е. за счет снижения температуры поверхности катода.

Из рассмотрения графика $T_w = f(j)$ и вольт-амперных характеристик следует, что увеличение концентрации ионов в плазме приводит к повышению температуры катода и снижению падения напряжения в прикатодном слое. Увеличение концентрации ионов приводит также к снижению влияния адсорбции на характеристики прикатодных процессов. Кроме

очевидной причины — увеличения температуры T_w , это является следствием увеличения в суммарном токе доли ионного тока, на который адсорбционные процессы не оказывают влияния.

Наличие зависимости температуры T_w от плотности тока j говорит о том, что на величину степени покрытия θ существенное влияние оказывают процессы в приэлектродной области. И наоборот, расчет приэлектродной области без учета влияния адсорбционных процессов может привести к ошибочным результатам.

Таким образом, даже при рассмотренных режимах разряда, для которых свойственна высокая температура поверхности катода T_w , адсорбционные процессы и их взаимосвязь с процессами, происходящими на поверхности катода и вблизи нее, играют существенную роль и их необходимо учитывать при расчете характеристик разряда в плазме.

Поступила 19 I 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В. Н. К расчету приэлектродной области в плазме с присадкой щелочного металла. ПМТФ, 1971, № 4.
2. Де Бур Я. Динамический характер адсорбции. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
3. Frenkel J. Theorie der Adsorption und Verwandter Erscheinungen. Zt. Phys., 1924, Bd 26, H. 1.
4. Gadsuk J. W., Carabateas E. N. Penetration of an ion through a monolayer of similar ions adsorbed on a metal. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 2.
5. Бур Ж. Г. де. Электронная эмиссия и явления адсорбции. М.—Л., ОНТИ, Глав. ред. общетехн. лит. и номографии, 1936.
6. Минятов А. В., Панкратов В. Г. Прикатодный слой в плазме распределенного разряда в магнитном поле с учетом взаимодействия частиц плазмы с поверхностью катода. Ж. техн. физ., 1971, т. 41, вып. 4.
7. Минятов А. В., Панкратов В. Г. Прикатодный слой в плазме распределенного разряда с учетом влияния магнитного поля. Тр., 4-й Всес. конференции по физике и генераторам низкотемпературной плазмы, Алма-Ата, 1970.
8. Маев С. А. Граничные условия для одномерных уравнений кинетических моментов. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 3, № 2.