

04;11

Динамика работы выхода электронов активированного термоэмиссионного катода

© Б.Д. Цыдыпов

Отдел физических проблем Бурятского научного центра СО РАН,
Улан-Удэ
E-mail: lmf@pres.bscnet.ru

Поступило в Редакцию 9 февраля 2010 г.

Методом контактной разности потенциалов впервые измерены распределения работы выхода электронов по длине и на горячем торце цилиндрического активированного термокатода, а также их временные зависимости в течение 20 h горения дугового разряда при различных токовых нагрузках. Результаты, полученные для катодного пятна, совпадают с данными термоэлектронного метода. Подтверждено существование явления рециклинга атомов и ионов металла в прикатодной зоне разряда.

В большинстве применяемых в научных исследованиях и инновационных технологиях генераторов низкотемпературной плазмы в качестве материалов для термокатодов используются тугоплавкие металлы (W, Mo, Ta и др.), легированные окислами редкоземельных металлов [1]. Активирующие элементы, обладая меньшей работой выхода электронов, чем основной металл, улучшают его эмиссионные характеристики, что позволяет значительно снизить уровень рабочих температур и расширить токовый диапазон функционирования катода. Реализуется термоэмиссионный режим с исключительно малой удельной эрозией, повышаются чистота генерируемой плазмы и ресурс работы электрода. Однако в процессе работы из-за диффузии и испарения легирующего компонента и повышения работы выхода электронов $e\phi$ происходит ухудшение эмиссионных и прочностных свойств материала катода, что приводит к существенному снижению его работоспособности. В [2] на основе эволюционной модели теоретически показано, что $e\phi$ является основным параметром, определяющим динамику всей замкнутой системы катодных и прикатодных процессов и в конечном счете ресурс работы сильноточного активированного катода.

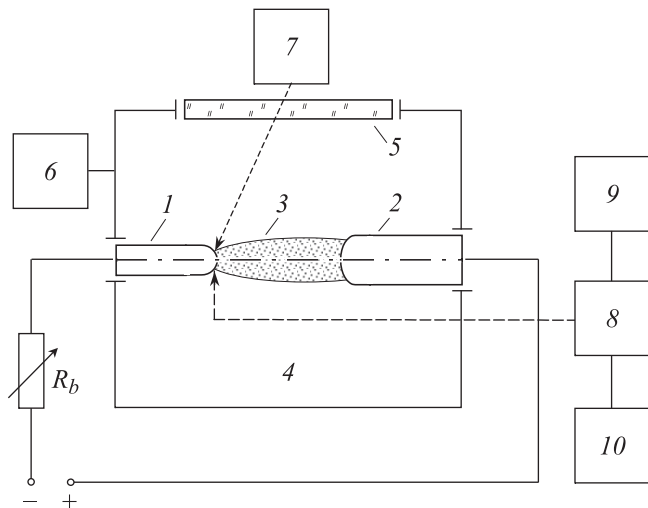


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — катод, 2 — анод, 3 — дуговой разряд, 4 — вакуумная камера, 5 — кварцевое окно, 6 — система вакуумирования и напуска газа, 7 — оптический микропиrometer, 8 — блок для измерения работы выхода электронов, 9 — звуковой генератор, 10 — осциллограф.

В предлагаемой работе экспериментально исследованы распределение работы выхода электронов на активной поверхности и его динамика в процессе длительного функционирования стержневого катода на различных токовых режимах в среде аргона. Проведено сравнение экспериментальных результатов с данными расчета [2,3].

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В охлаждаемой водой вакуумной камере 4 с наполнением аргона между катодом 1 из торированного вольфрама ВТ-15 диаметром $d = 4$ mm, длиной $L = 20$ mm и анодом 2 из чистого поликристаллического вольфрама ($d = 10$ mm, $L = 25$ mm) инициировался свободно горящий дуговой разряд 3. Рабочие торцы электродов заточены в виде полусфер. Давление среды и токовые нагрузки варьировались в пределах $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$ Pa и 20–150 A соответственно. Основная серия экспериментов проведена при давлении $p = 1.33 \cdot 10^4$ Pa с оптимальным температурным режимом и минимальным уровнем удельной эрозии катода [4].

Измерения проводились по следующей методике. Методом контактной разности потенциалов (КРП) определялся начальный профиль работы выхода $e\varphi(z)$ по длине электрода. Затем в процессе работы катода через определенный интервал времени (15–60 min) в зависимости от давления среды измерялись профиль температуры, размер опорного пятна дуги и тепловой поток в электрод. После этого ток отключался, катод снимался с держателя и определялось новое распределение работы выхода $e\varphi(z, t)$. Такие циклы повторялись до суммарного времени $t \geq 20$ h на каждом токовом режиме в диапазоне 20–150 А. Измерения профилей температуры и работы выхода производились вдоль всей длины вылета электрода из держателя с пространственным шагом 1 mm. Переход от измеренной яркостной температуры к истинной осуществлялся учетом соответствующего значения монохроматической излучательной способности поверхности электрода. Погрешность измерения температуры складывалась из инструментальной погрешности микропиromетра, погрешностей, обусловленных переходом от яркостных температур к истинным и ослаблением принимаемого излучения смотровым кварцевым окном, и составляла величину $\sim 2\%$.

Работа выхода электронов катода методом КРП определялась по формуле

$$e\varphi = e\varphi_k \pm eV_k, \quad (1)$$

где $e\varphi_k$ — работа выхода эталонного электрода; V_k — контактная разность потенциалов. Для измерения использовалась усовершенствованная установка, аналогичная [5], погрешность не превышала величину 0.02 eV. Наряду с методом КРП работа выхода на горячем торце электрода измерялась термоэлектронным (ТЕ) методом. В данном случае $e\varphi$ определяется по температурной зависимости плотности тока эмиссии j_{em} из уравнения Ричардсона–Дешмана. Из этой зависимости по измеренным значениям j_{em} и температуры рабочей поверхности катода T находится эффективная работа выхода

$$e\varphi_{eff} = kT \ln \frac{AT^2}{j_{em}}. \quad (2)$$

В условиях дугового разряда измеряемая в эксперименте плотность тока на катоде j_c включает в себя наряду с током термоэмиссии j_{em} токи ионов j_i и „обратных“ электронов j_{er} :

$$j_c = j_{em} + j_i - j_{er}.$$

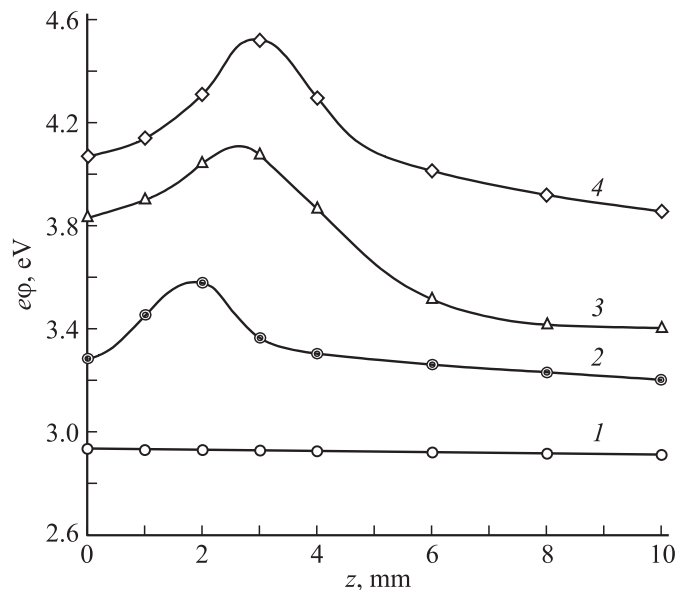


Рис. 2. Зависимость работы выхода электронов по длине катода от времени. $I = 20$ А, $p = 1.33 \cdot 10^4$ Па. 1 — $t = 0$, 2 — 2 h, 3 — 10 h, 4 — 20 h.

Составляющие суммарного тока j_i и j_{er} вычисляются из решения уравнений катодных и прикатодных процессов [2]. Ошибка в измерении j_{em} в 20% приводит к погрешности в значении $e\varphi_{eff}$ порядка 2%. Основную погрешность вносит метод измерения температуры, например при $e\varphi = 4.5$ eV составляет 0.14 eV.

При определении $e\varphi$ необходимо учитывать ее температурную зависимость. Снижение работы выхода металла за счет увеличения температуры вычисляется по формуле:

$$\Delta(e\varphi) = \alpha_T \Delta T, \quad (3)$$

где α_T — коэффициент температурной зависимости. Для монокристаллического вольфрама ориентации (100) $\alpha_T = 6 \cdot 10^{-5}$ eV/K [6]. В пределах температурного диапазона, реализуемого на катоде дугового разряда, значение $\Delta(e\varphi)$ не превышает 0.2 eV [7].

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие изменение профиля работы выхода электронов катода из ВТ-15 в течение 20 h цикла испытаний. По оси абсцисс интервал 0–2 mm занимает боковая проекция полусферического рабочего торца, 2–10 mm — цилиндрическая часть длины вылета электрода. Исходное распределение $e\varphi(z)$ по катоду равномерное и равно 2.9 eV. В процессе функционирования катода $e\varphi$ растет по всей длине вылета, что связано с испарением и обеднением активирующей присадкой его поверхности.

Из графиков хорошо видно, что в течение всего опыта работы входа электронов в месте контакта дуги меньше, чем в ближайшей периферии. Этот экспериментальный факт подтверждает механизм рециклинга атомов и ионов металла в прикатодной области разряда [8] и хорошо согласуется с выводами теории [2,3]. Феноменология явления в следующем. Испарившиеся атомы металла, попадая в приэлектродную область, легко ионизируются электронами, так как вероятность их ионизации больше вероятности ионизации рабочего газа. Под действием электрического поля ионы возвращаются обратно на поверхность, где восстанавливаются до атома. В результате этого скорость испарения активатора в области пятна и соответственно $e\varphi$ получается ниже, чем за ее пределами. Наиболее интенсивно обедняется торием поверхность катода в 2–3 mm от центра рабочего торца, т. е. область, непосредственно прилегающая к пятну.

Скорость изменения $d(e\varphi)/dt$ зависит от профиля температуры катода, значит от тока разряда. По теории быстрый рост $e\varphi(t)$ следует ожидать при токе $I = 20$ А, где на фоне низкой средней интегральной температуры катода наибольший градиент $dT(z)/dz$ в области привязки разряда. Действительно, на данном токовом режиме наблюдается максимальное увеличение $e\varphi$ во время всех 20 h эксперимента (рис. 3, распределение 4). Наименьшее изменение $e\varphi(t)$ получено при оптимальном токе $I = 50$ А (распределение 1). Здесь работа выхода на горячем торце $e\varphi_c$ повысилась до 3.4 eV, а на расстоянии 2 mm от него — до 3.7 eV. Причем если профиль на боковой поверхности растет достаточно равномерно, то величина $e\varphi_c(t)$ после 10 h функционирования катода практически не изменяется. В данном случае устанавливается динамический баланс, когда в пределах пятна эффективно действует механизм рециклинга, а уход части испарившегося материала электрода в дугу из областей вне пятна и с боковых поверхностей компенсируется диффузионным потоком присадки из объема катода. Из рис. 3 видно, что такой стабилизации уровня $e\varphi_c(t)$ на других токах не наблюдается,

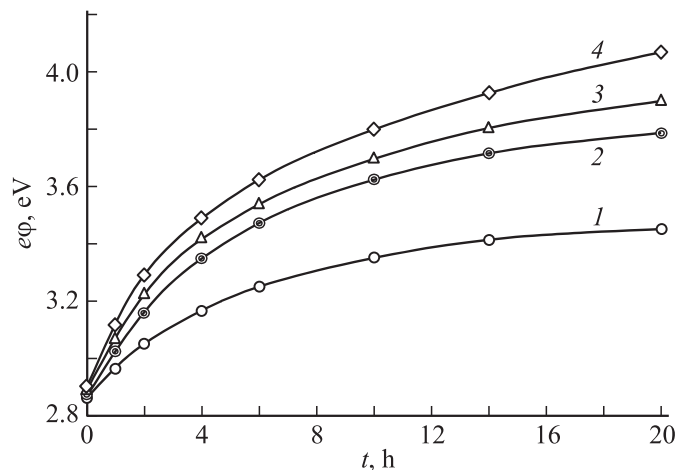


Рис. 3. Зависимость работы выхода электронов в катодном пятне от времени. $p = 1.33 \cdot 10^4$ Па, 1 — $I = 50$ А, 2 — 100 А, 3 — 150 А, 4 — 20 А.

что связано с недостаточно эффективной подпиткой поверхности активатором из более удаленных слоев и процессом перестройки структуры материала катода из-за рекристаллизации [9].

Данные $e\phi_c(t)$ хорошо согласуются с результатами по динамике температуры и эрозии катода [4]. С увеличением $e\phi_c$ соответственно растут интегральная температура и удельная эрозия катода. Связь между результатами измерения температуры и работы выхода электронов на боковой поверхности электрода не столь очевидна. Например, при токовой нагрузке $I = 20$ А наблюдается существенное повышение работы выхода $e\phi(z)$ до значений чистого вольфрама 4.6 эВ, хотя температурный профиль $T(z)$ изменялся незначительно ~ 200 К. Следует отметить, что результаты измерения $e\phi_c$ двумя способами совпадают, расхождение укладывается в погрешность определения работы выхода электронов ТЕ методом (~ 0.2 эВ).

Таким образом, в работе впервые получены временные зависимости распределений $e\phi(z, t)$ и $e\phi_c(t)$ активированного термоэмиссионного катода в процессе длительного функционирования. Показано, что $e\phi_c(t)$ является основным параметром, определяющим динамику катодных процессов. Экспериментально подтверждено существование механизма

ионно-атомного рециклинга в прикатодной зоне стационарного дугового разряда.

Список литературы

- [1] Даутов Г.Ю., Тимошевский А.Н., Урюков Б.А. и др. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: проблемы и перспективы. Новосибирск: Наука, 2004. 464 с.
- [2] Цыдыпов Б.Д. // Материалы Всерос. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Петрозаводск, 2007. Т. 2. С. 58–61.
- [3] Цыдыпов Б.Д. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 18. С. 87–94.
- [4] Цыдыпов Б.Д. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 4. С. 135–137.
- [5] Савицкий Е.М., Буров И.В., Корольков В.А. и др. // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 2. С. 121–123.
- [6] Фоменко В.С., Подчерняева И.А. Эмиссионные свойства веществ и материалов: Справочник. М.: Атомиздат, 1975. 339 с.
- [7] Кучеров Я.Р., Пустогаров А.В., Халбошин А.П. // ТВТ. 1980. Т. 18. № 3. С. 620–624.
- [8] Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Гужков В.В. и др. // ДАН СССР. 1981. Т. 260. № 6. С. 1354–1356.
- [9] Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В. Термоэмиссионные дуговые катоды. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.