

ЛИТЕРАТУРА

1. Кнопфель Г. К. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
2. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Демчук А. Ф., Дерибас А. А., Куликов Б. И., Нестеризин Ю. Е., Соболев О. П. Эксперименты со взрывомагнитным генератором в лабораторных условиях. Докл. АН СССР, 1968, т. 183, № 6.
3. Биченков Е. И., Маточкин Е. П. Диффузия потока при магнитной кумуляции в узких полостях. ПМТФ, 1974, № 4.
4. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Лобанов В. А., Маточкин Е. П. Схема расчета и включение на нагрузку плоских взрывомагнитных генераторов. ПМТФ, 1973, № 2.

УДК 533.93

СВОЙСТВА КОНТАКТА МЕТАЛЛ — ПЛАЗМА

*И. Н. Острецов, В. А. Петросов, А. А. Поротников,
Б. Б. Родневич*

(Москва)

На основе анализа экспериментальных данных показано, что в присутствии плазмы эффективная работа выхода металла снижается по сравнению с величиной работы выхода в вакуум.

Изучение электродных процессов в распределенном (неконтрагированном) дуговом разряде в различных средах (инертные газы, щелочные металлы) [1-7] показывает, что в присутствии плазмы эффективная величина работы выхода металла снижается (по сравнению с работой выхода металла в вакуум Φ_w) на значительную величину. К такому выводу можно прийти, проводя анализ балансных соотношений на поверхности электрода.

Уравнение баланса тока на поверхности электрода (катода и анода) можно записать в виде

$$(1) \quad j_w = j_e^e + j^i - j^e \exp[-eU/kT]$$

Здесь j_w — экспериментально измеряемая плотность тока на электроде; j_e^e — плотность тока электронов эмиссии с горячего электрода; j^i и j^e — хаотические плотности токов ионов и электронов из плазмы, вычисляемые по параметрам плазмы на границе слоя приэлектродного падения потенциала (толщина слоя порядка дебаевской длины r_D); U — величина приэлектродного скачка потенциала; T — электронная температура плазмы; e — заряд электрона. Рассматривается случай, когда потенциал плазмы выше потенциала электрода на величину U , так что ионы идут на электрод свободно, а электроны частично задерживаются. Это учитывается экспонентой в последнем члене (1).

Баланс энергии на поверхности электрода можно представить в виде

$$(2) \quad q_w + j_e^e \Phi = j^i \left(U + U_i - \Phi + 2 \frac{k}{e} \Delta T_i \right) + \\ + j^e \exp \left(- \frac{eU}{kT} \right) \left(\Phi + 2 \frac{k}{e} \Delta T_e \right) + q$$

Здесь q_w — тепловой поток, снимаемый с электрода с помощью охлаждения; U_i — энергия ионизации рабочего тела; ΔT_i и ΔT_e — разности между температурами ионов и электронов плазмы и температурой электрода; Φ — работа выхода; q — тепловой поток, поступающий из плазмы на электрод благодаря излучению и наличию нейтральной компоненты; k — постоянная Больцмана.

В рассматриваемых экспериментах ток j_e^e обязан исключительно механизму термоэмиссии, т. е.

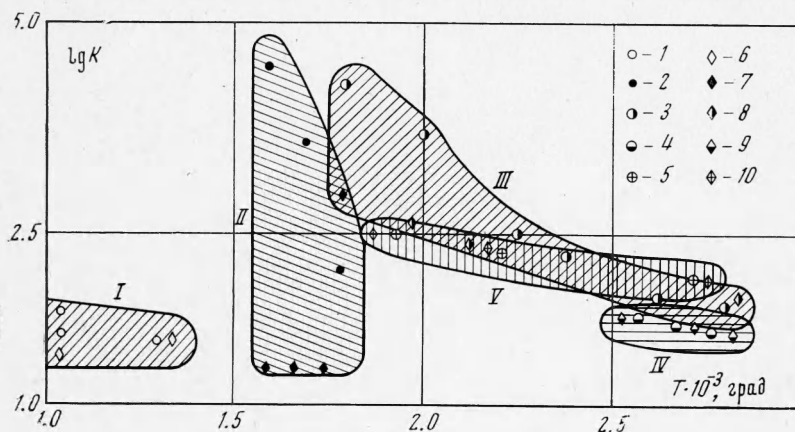
$$(3) \quad j_e^e = AT_w^2 \exp \left(- \frac{e\Phi}{kT_w} \right)$$

Здесь A — постоянная Ричардсона, T_w — температура электрода.

Анализ экспериментальных данных по катодам [1-4] показывает, что с учетом (3), где за величину Φ принимается работа выхода металла в вакуум Φ_w , левая часть соот-

ношения (1) на один-два порядка (а иногда и более) превышает правую. Для анодов [5-7] наблюдается такая же картина с той разницей, что правая часть по величине оказывается больше левой. Для уравнения (2) соотношение аналогичное.

Указанный дисбаланс в уравнениях (1), (2) исчезает, если ϕ снижается на величину ~ 1 эв (в данных экспериментах температура плазмы была на уровне $T \approx 1$ эв, давление $p \sim 1-10^2$ мм рт. ст.). Эту аномально высокую термоэмиссию нельзя объяснить возникновением пленок на поверхности электрода, снижающих работу выхода: аномальность наблюдается не только при работе со щелочными металлами, но и с благородными газами; кроме того, при температурах электрода $T_w \sim 3000^\circ \text{K}$ и давлениях $1-10^2$ мм рт. ст. вероятность появления эффективных покрытий мала. Не удается объяснить это рассогласование и эффектом полого катода, ошибками измерений и т. д.



Полагают, что работа выхода электрона из металла в вакуум ϕ_w представляется в виде суммы двух слагаемых, каждое из которых может рассматриваться отдельно [8, 9]. Первое слагаемое ϕ_{w1} определяется процессами, происходящими в объеме металла, второе ϕ_{w2} — поверхностными явлениями. Считают, что за границей металла в вакууме потенциал меняется как $1/r$ (учет сил изображения [10]).

По аналогии с металлом рассмотрим работу выхода плазмы ϕ_p , т. е. работу, которую необходимо затратить, чтобы извлечь электрон из плазмы в вакуум, — $\phi_p = \phi_{p1} + \phi_{p2}$.

Величину ϕ_{p1} можно представить в виде [11] $\phi_{p1} = \gamma kT / e$, где T — температура плазмы, γ — коэффициент неидеальности, $\gamma = e^2 / r_D kT$.

Величину ϕ_{p2} определить трудно, она зависит от характера и свойств поверхности, ограничивающей плазму. В частном случае, когда плазма ограничена магнитным полем, имеем [12] $\phi_{p2} = kT / e$. Величина ϕ_{p2} зависит от поляризационных сил, действующих на поверхности плазмы. Из энергетических соображений можно получить, что $\phi_{p2} \sim kT / e$. Тогда в первом приближении можно записать

$$(4) \quad \phi_p = (\gamma + 1) T \frac{k}{e}$$

Распределение потенциала на границе плазма — вакуум будет таким же, как на границе металл — вакуум.

Рассмотрим распределение потенциала в контакте металл — плазма по аналогии с контактами металл — металл, металл — полупроводник, полупроводник — полупроводник. Согласно [13] могут реализоваться два случая: а) совпадают нулевые уровни на распределении потенциала, когда контактирующие тела находятся на расстоянии d один от другого; б) совпадают уровни химического потенциала, когда контактирующие тела находятся достаточно близко друг от друга («тесный» контакт).

В случае контакта типа а) электрону для перехода из металла в плазму необходимо преодолеть потенциальный барьер, величина которого равна (является эффективной работой выхода)

$$(5) \quad \phi = \phi_w - e / d$$

Для контакта типа б) потенциальный барьер (или работа выхода) равен

$$(6) \quad \phi = \phi_w - \phi_p$$

На фигуре представлены результаты сравнения данных по плотностям тока термоэмиссии, полученные экспериментально и расчетным путем с использованием зависимостей (3) и (6); K — коэффициент аномальности — представляет собой отношение плотности тока (экспериментальной или расчетной) к величине, вычисленной по формуле (3) при $\varphi = \varphi_w$.

Заштрихованная область I — сравнение экспериментальных данных I и расчета 2 по данным работы [1]. Область II — 3 и 4 по данным [3]; III — 5 и 6 по данным [2]; IV — 7 и 8 по данным [4]; V — 9 и 10 по данным [5, 7]. Видно, что в области низких температур электрода T_w различие между расчетом и экспериментом значительное. Это объясняется тем, что в области низких температур сильное влияние на величину потенциального барьера оказывают пленки на поверхности электрода. В области высоких температур ($T_w > 2000^\circ \text{K}$), когда вероятность появления пленок мала, результаты расчетов по формулам (3) и (6) удовлетворительно совпадают с экспериментом.

Поступила 6 V 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман В. О., Любимов Г. А., Парфенов Б. В. Исследование приэлектродного падения потенциала на молибденовом электроде в потоке аргона с присадкой калия. ПМТФ, 1970, № 4.
2. Дороднов А. М., Козлов Н. П., Помелов Я. А. Об аномально высокой эмиссионной способности термокатода в дуговом разряде в средах инертных газов. Теплофизика высоких температур, 1971, т. 9, вып. 3.
3. Герман В. О., Кукота Ю. П., Любимов Г. А., Парфенов Б. В., Полтавцева И. С., Слепцов В. М., Щеголев Г. М. Экспериментальное исследование работы пористого электрода МГД-преобразователя при вдуве аргона с присадкой калия. Теплофизика высоких температур, 1973, т. 11, вып. 3.
4. Поротников А. А. Стационарные сильноточные ускорители плазмы. В сб. «Плазменные ускорители». М., «Машиностроение», 1973.
5. Меринов Н. С., Острцов И. Н., Петросов В. А., Поротников А. А. Измерения анодных падений потенциала в среде инертных газов при высоких температурах анода. Материалы 2-й Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. Минск, Ин-т физики АН БССР, 1973, стр. 386.
6. Поляков Л. М., Хлопкин К. С. Тепловой режим анода в сильноточном разряде при низком давлении. Материалы 2-й Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. Минск, Ин-т физики АН БССР, 1973, стр. 384.
7. Дороднов А. М., Козлов Н. П., Решетников П. П. Исследование энергетических характеристик радиационно-охлаждаемого анода. Материалы 2-й Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям. Минск, Ин-т физики АН БССР, 1973, стр. 388.
8. Wagner H. Work function of bare and coated metal surfaces. 3-rd Internat. Conf. on Thermionic Electrical Power Generation. Juelich., June 5—9, 1972, p. 1301.
9. Gyftopoulos E. P., Hatsopoulos G. N. Thermodynamic analysis of metal surfaces covered by electropositive adsorbates. 3-rd Internat. Conf. of Thermionic Electrical Power Generation Juelich. June 5—9, 1972, p. 1323.
10. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника М., «Наука», 1966.
11. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, т. 5. М., «Наука», 1964.
12. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. М., Физматгиз, 1961.
13. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.