

11;12

К оценке работы выхода по времени запаздывания пробоя в вакууме

© А.А. Емельянов

Орловский государственный технический университет
E-mail: orelrce@ostu.ru

Поступило в Редакцию 11 июня 2002 г.
В окончательной редакции 7 августа 2002 г.

Исследовано время запаздывания пробоя в вакууме. Предложена методика оценки работы выхода катода с протяженной рабочей поверхностью из экспериментов по времени запаздывания пробоя на прямоугольных импульсах напряжения и косоугольной волне.

При контроле состояния поверхности катода вакуумного промежутка, образованного электродами с протяженной рабочей поверхностью, работу выхода, как правило, предполагают известной, тогда как ее значения, определенные из экспериментов с автоэлектронной эмиссией, имеют существенный разброс. Так, в экспериментах с автоэлектронной эмиссией значение работы выхода алюминия не определено, а при наличии оксидов составляет $\varphi_{Al} = 3.8 \div 4.7$ eV, значение работы выхода меди составляет $\varphi_{Cu} = 4.55$ eV, а при наличии оксидов — $\varphi_{Cu} = 2 \div 5.15$ eV [1].

Для определения работы выхода в экспериментах с автоэлектронной эмиссией подают высокое напряжение постоянного тока на вакуумный промежуток с катодом в виде нити или острья, определяют напряженность электрического поля на катоде и по тангенсу угла наклона токовой характеристики, построенной в координатах Фаулера–Нордгейма, рассчитывают величину работы выхода.

Данная методика определения работы выхода предполагает использование катода известной геометрической формы для расчета микронапряженности электрического поля и неприменима для катодов с протяженной рабочей поверхностью, на которой присутствуют микровыступы неизвестной геометрии.

С целью оценки работы выхода катода с протяженной рабочей поверхностью исследовано время запаздывания пробоя в вакууме на прямоугольных импульсах напряжения и косоугольной волне.

Использование джоулева механизма разогрева микроэмиттера произвольной геометрии при инициировании вакуумного пробоя высоковольтными импульсами длительностью [2]

$$t_r \ll t_p \ll h^2 \rho c \lambda^{-1}, \quad (1)$$

где t_r — время термической релаксации; h — высота микроэмиттера; ρ , c , λ — соответственно плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала эмиттера, — позволило получить аналитические выражения для времени запаздывания пробоя:

на прямоугольных импульсах напряжения с бесконечно коротким фронтом

$$t_{d0} = 1.57 \cdot 10^{-25} \frac{a \rho c \varphi^2}{\kappa_0} \cdot \exp\{-21.6 \varphi^{-1/2}\} \frac{\exp\{10.3 \varphi^{3/2} E^{-0.1}\}}{E^{0.4}} \quad (2)$$

и на косоугольной волне напряжения

$$t_{d2} = 1.32 \cdot 10^{10} \varphi^{3/2} E^{-1} t_{d0}, \quad (3)$$

где κ_0 — коэффициент пропорциональности в зависимости удельного сопротивления κ от температуры $\kappa(T) = \kappa_0 T$; a — величина, медленно изменяющаяся с изменением E .

В случае известной геометрии эмиттера можно, определив напряженность E электрического поля на его вершине, оценить из выражений (2) и (3) величину работы выхода по результатам измерения t_1 и t_2 — времени запаздывания при различных напряженностях E_1 и E_2 соответственно

на прямоугольных импульсах

$$\varphi = 1.79 \cdot 10^{-7} \left(\frac{E_1 E_2}{E_2 - E_1} \ln \frac{t_1 E_1^4}{t_2 E_2^4} \right)^{2/3} \quad (4)$$

и косоугольной волне напряжения

$$\varphi = 1.79 \cdot 10^{-7} \left(\frac{E_1 E_2}{E_2 - E_1} \ln \frac{t_1 E_1^5}{t_2 E_2^5} \right)^{2/3}. \quad (5)$$

Из экспериментальной зависимости $t_d = f(E)$ для монокристаллического вольфрамового острья, полученной в [3] на прямоугольных импульсах напряжения ($t_f = 10^{-9}$ s), следует, что при $E_1 = 7.2 \cdot 10^9$ V/m время запаздывания составляет $t_1 = 10^{-6}$ s, а при $E_2 = 9 \cdot 10^9$ V/m — $t_2 = 10^{-8}$ s. Для этих величин, согласно (4), находим $\varphi_W = 4.7$ eV, что соответствует известному значению $\varphi_W = 4.54$ eV [4] с погрешностью менее 4%.

Исследование режимов высоковольтного кондиционирования электродов в вакууме [5] показало, что обработка электродов импульсами длительностью, равной времени запаздывания пробоя $t_p = t_d$, сопровождается формированием микрорельефа катодной поверхности, характеризуемого коэффициентом усиления поля, величина которого

$$\beta = 1.28 \cdot 10^9 E_0^{-0.9} \quad (6)$$

определяется макронапряженностью E_0 электрического поля, инициирующего пробой.

С учетом (6) из выражений (2) и (3) получаем соотношения для оценки работы выхода катода по результатам измерения t_1 и t_2 времени запаздывания при различных значениях E_1 и E_2 макронапряженности соответственно

на прямоугольных импульсах

$$\varphi = 0.21 \left(\frac{(E_1 E_2)^{0.1}}{E_2^{0.1} - E_1^{0.1}} \ln \frac{t_1 E_1^{0.4}}{t_2 E_2^{0.4}} \right)^{2/3} \quad (7)$$

и косоугольной волне напряжения

$$\varphi = 0.21 \left(\frac{(E_1 E_2)^{0.1}}{E_2^{0.1} - E_1^{0.1}} \ln \frac{t_1 E_1^{0.5}}{t_2 E_2^{0.5}} \right)^{2/3} . \quad (8)$$

Соотношения (7) и (8) позволяют по результатам измерения времени запаздывания при различных значениях макронапряженности электрического поля, инициирующего пробой, оценивать работу выхода катода с протяженной рабочей поверхностью, обработанной высоковольтными импульсами длительностью $t_p = t_d$.

Из экспериментальных результатов по времени запаздывания пробоя в вакууме [6], полученных нами на прямоугольных высоковольтных импульсах ($t_f = 4 \cdot 10^{-9}$ s) в однородном поле, образованном электродами из хрома ($S = 500$ mm²), определены значения $t_1 = 1.3 \cdot 10^{-7}$ s,

$t_2 = 10^{-8}$ s времени запаздывания и соответствующие им величины $E_1 = 2.1 \cdot 10^7$ V/m, $E_2 = 6.4 \cdot 10^7$ V/m макронапряженности электрического поля. Согласно (7), работа выхода для хрома равна $\varphi_{Cr} = 4.6$ eV, что соответствует известному значению $\varphi_{Cr} = 4.58$ eV [4].

Работу выхода для электродов с протяженной рабочей поверхностью, обработанной высоковольтными импульсами длительностью $t_p = t_d$, можно оценить, сопоставив при $E_0 = \text{const}$ значения времени запаздывания на импульсах напряжения разной формы.

С учетом соотношения (6) из (2) и (3) получаем при $E_0 = \text{const}$ выражения для оценки работы выхода их экспериментов по времени запаздывания пробоя в вакууме для прямоугольных импульсов и косугольной волны напряжения

$$\varphi = 0.21E_0^{1/15}(t_{d2}/t_{d0})^{2/3}. \quad (9)$$

Из экспериментальных результатов для электродов (катод — сфера $R = 75$ mm, анод — плоский диск $R = 100$ mm) из алюминия, полученных нами на установке [7], следует, что при $E_0 = 9 \cdot 10^7$ V/m время запаздывания на косугольной волне напряжения составляет $t_{d2} = 1.3 \cdot 10^{-5}$ s, а на прямоугольном импульсе ($t_f = 4 \cdot 10^{-9}$ s) — $t_{d0} = 7.4 \cdot 10^{-7}$ s. Согласно (9), работа выхода равна $\varphi_{Al} = 4.4$ eV, что соответствует известному значению $\varphi_{Al} = 4.25$ eV [4].

Таким образом, предложен метод оценки работы выхода из экспериментов по времени запаздывания пробоя в вакууме. Данный метод позволяет оценивать величину φ катода с протяженной рабочей поверхностью и может быть полезным при изучении электрических явлений в вакууме.

Список литературы

- [1] Сливков И.Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. М., 1986. 256 с.
- [2] Емельянов А.А., Кассиров Г.М. // Изв. вузов. Физика. 1976. № 9. С. 105–110.
- [3] Карцев Г.К., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. и др. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192. № 2. С. 309–312.
- [4] Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., 1991. 1232 с.
- [5] Емельянов А.А. // ПТЭ. 1997. № 5. С. 68–71.
- [6] Емельянов А.А. // ПТЭ. 1996. № 2. С. 109–111.
- [7] Каляцкий И.И., Кассиров Г.М., Смирнов Г.В. // ПТЭ. 1974. № 4. С. 84–86.