

04;11

Исследование влияния адсорбата на ток предвзрывной автоэлектронной эмиссии в условиях высоковольтного газового разряда

© Ю.А. Баренгольц, С.И. Берил

Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,
Тирасполь, Молдова
E-mail: barengolts@list.ru

Поступило в Редакцию 27 января 2012 г.

Исследуется влияние адсорбированных атомов, полярных и неполярных молекул на величину тока автоэлектронной эмиссии, предшествующей газовому (в частности, пикосекундному) разряду. Показано, что во всех рассматриваемых случаях применимо уравнение Фаулера–Нордгейма. Приводятся результаты расчета тока автоэлектронной эмиссии с учетом адсорбата.

Влияние адсорбированных атомов или слоев на начальную стадию высоковольтного импульсного газового разряда (включая наносекундный интервал) впервые обобщены в монографии Г.А. Месяца и Ю.Д. Королева [1]. Экспериментальные исследования пикосекундных импульсов [2–6] показали, что для данного диапазона требуются иные подходы к описанию физических процессов, предшествующих газовому разряду. Разрабатываемые в настоящее время модели субнаносекундного газового разряда основаны на предположении о том, что центрами автоэлектронной эмиссии (АЭЭ), предшествующей взрывной эмиссии электронов, являются имеющиеся на катоде микронеоднородности геометрического характера — микроострия или микровыступы [3,4,6]. Проведенные нами оценки различных моделей этих процессов [7] показали, что существенную роль в начальной стадии пикосекундного газового разряда могут играть микронеоднородности, появляющиеся на катоде в результате адсорбции атомов или молекул, составляющих газовую атмосферу, либо „собственные“ включения или слои, появляющиеся в процессе изготовления катода.

В применении к чистым металлическим поверхностям для нахождения плотности тока АЭЭ j_0 используется классическое уравнение Фаулера–Нордгейма:

$$j_0 = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \varphi t^2(y)} \exp \left[-\frac{8}{3eh} \frac{\sqrt{2\pi m \varphi^3}}{E} v(y) \right]. \quad (1)$$

Здесь e — элементарный заряд, E — напряженность электрического поля, h — постоянная Планка, φ — работа выхода материала катода, m — масса электрона, $t(y)$ и $v(y)$ — табулируемые функции, аргумент которых находится из соотношения

$$y = \frac{e}{2\varphi} \sqrt{\frac{eE}{\pi\epsilon_0}}, \quad (2)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная.

При наличии адсорбированных полярных молекул в отсутствие электрического поля потенциальный барьер снижается на величину $\Delta\varphi$, для оценки которой, следуя [7], можно воспользоваться соотношением

$$\Delta\varphi = \frac{e}{\epsilon_0} n\mu\theta, \quad (3)$$

в котором n — число молекул на единичную площадь (поверхностная концентрация адсорбированных молекул), μ — величина, имеющая размерность дипольного момента и пропорциональная ему, θ — степень покрытия ($\theta = 0$ при отсутствии адсорбированных молекул и $\theta = 1$ для монослоя). Формула (3) получена в приближении малых покрытий ($\theta \ll 1$). Например, для адсорбированных молекул воды ($\mu = 6.14 \cdot 10^{-28} \text{ С} \cdot \text{см}$ [8]), полагая $\theta = 0.1$ и принимая как и везде далее, усредненное значение $n = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, из (3) получаем $\Delta\varphi = 0.4 \text{ eV}$, т.е. величину, существенно влияющую на амплитуду эмиссионного тока.

С учетом понижения потенциального барьера (3) работа выхода φ_a материала катода может быть представлена в виде

$$\varphi_a = \varphi - \frac{e}{\epsilon_0} n\mu\theta. \quad (4)$$

Тогда плотность тока АЭЭ вычисляется по формуле (1) с использованием скорректированного значения параметра \tilde{y} :

$$\tilde{y} = \frac{e}{2\varphi_a} \sqrt{\frac{eE}{\pi\epsilon_0}}. \quad (5)$$

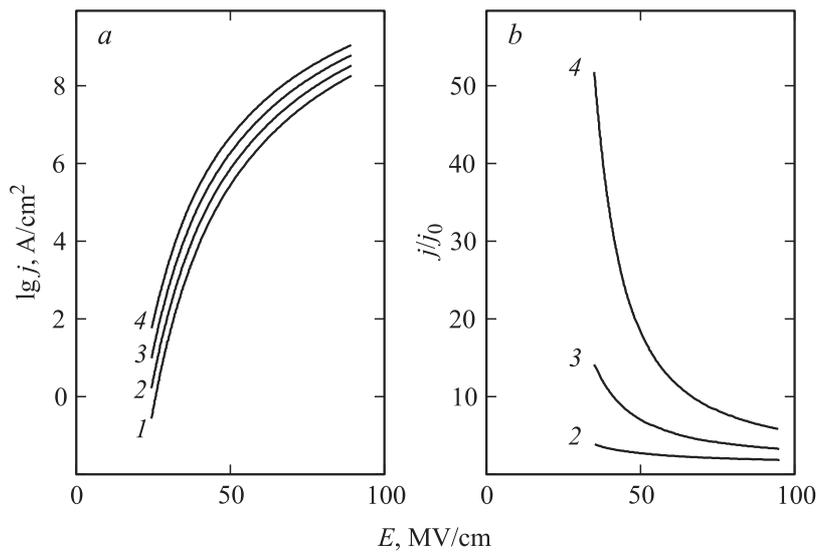


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики тока АЭЭ из катода с работой выхода $\varphi = 4.5$ eV при различной степени покрытия адсорбированными молекулами воды: 1 — $\theta = 0$; 2 — $\theta = 0.05$; 3 — $\theta = 0.1$; 4 — $\theta = 0.15$. *a* — абсолютные значения плотности тока; *b* — отношение плотности тока АЭЭ, рассчитанной по формуле (7), к значению плотности тока j_0 (кривая 1), полученному без учета влияния адсорбата.

Для оценки величины плотности тока воспользуемся известными расчетными формулами (см., например, [9]), взяв в качестве аргумента \tilde{y} из (5):

$$t^2(\tilde{y}) \approx 1.1, \quad \nu(\tilde{y}) \approx 0.95 - 1.03\tilde{y}^2. \quad (6)$$

Тогда в соответствии с (1) можем записать:

$$\lg j = 6.15 + \frac{4.39}{\sqrt{\varphi_a}} + \lg \frac{E^2}{\varphi_a} - 28.2 \frac{\varphi_a^{3/2}}{E}. \quad (7)$$

Здесь плотность тока выражена в A/cm^2 , работа выхода — в eV, напряженность электрического поля — в MV/cm .

На рис. 1 воспроизведены зависимости, рассчитанные по формуле (7), для адсорбированных молекул атмосферной воды на эмиттере

с работой выхода $\varphi = 4.5 \text{ eV}$ (например, медь или вольфрам) при различных значениях θ .

Как видно из рис. 1, присутствие полярных адсорбированных молекул может привести к росту тока АЭЭ на порядок и более. Интересно, что с ростом напряженности приложенного поля этот эффект становится менее значимым.

При наличии на поверхности катода неполярных адсорбированных молекул, как показано в работе [7], поправка $\Delta\varphi$ оказывается зависящей от напряженности приложенного электрического поля:

$$\Delta\varphi = e\beta E, \quad (8)$$

где $\beta = 4\pi\alpha n\theta$ (α — коэффициент поляризуемости). В этом случае для работы выхода имеет место выражение

$$\varphi_a = \varphi - e\beta E, \quad (9)$$

с учетом которого плотность тока вновь может быть вычислена по формуле (7). В частности, для молекул азота ($\alpha = 1.74 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$ [10]) имеем:

$$\varphi_a = \varphi - 1.28 \cdot 10^{-2}\theta E. \quad (10)$$

Результаты расчетов тока АЭЭ для системы эмиттер–адсорбированный слой молекул азота приведены на рис. 2.

Расчеты показывают, что неполярные адсорбированные молекулы (или адатомы) оказывают на величину тока АЭЭ существенно меньшее влияние по сравнению с полярными. Увеличение степени покрытия от $\theta = 0$ до $\theta = 0.15$ приводит к росту плотности тока не более чем в полтора раза (хотя и таким изменением пренебрегать не следует). Заметим, что снижение потенциального барьера (формула (10)) должно наблюдаться и в рассмотренном ранее случае наличия на катоде полярных молекул, дипольный момент которых с ростом напряженности поля также возрастает. В результате значение φ_a при их адсорбции будет несколько меньше величины, определяемой формулами (3) и (4). Следует учесть также, что в сильных электрических полях ($E \geq 10 \text{ MV/cm}$) в правой части уравнений (9)–(10) появляется дополнительное отрицательное слагаемое, содержащее слабую квадратичную зависимость от напряженности, что приводит к еще большему снижению величины φ_a .

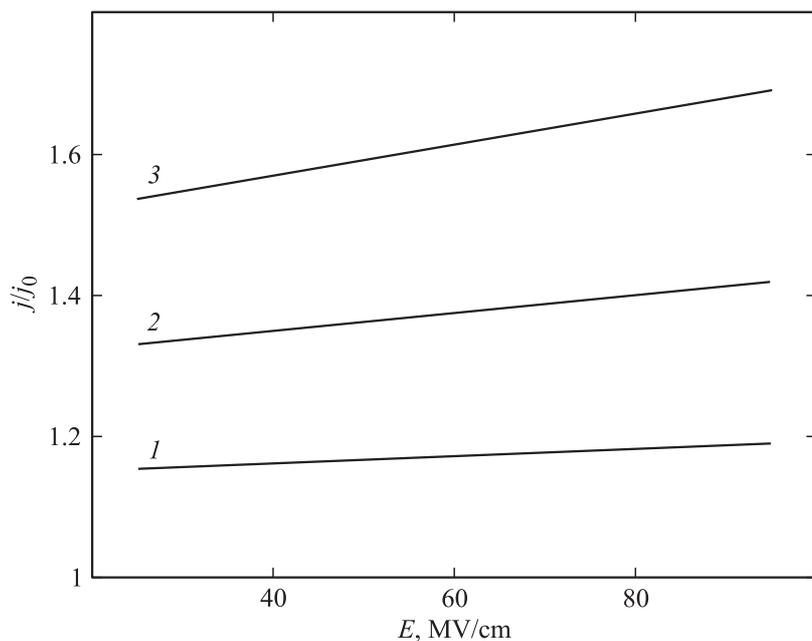


Рис. 2. Отношение плотности тока АЭЭ из катода с работой выхода $\varphi = 4.5 \text{ eV}$ при различной степени покрытия θ адсорбированными молекулами азота к значению плотности тока j_0 , полученному без учета влияния адсорбата (кривая 1 на рис. 1, а): 1 — $\theta = 0.05$; 2 — $\theta = 0.1$; 3 — $\theta = 0.15$.

Таким образом, при высоких напряжениях присутствие на катоде островковых пленок или кластеров адсорбированных атомов, а также любых по своей структуре (полярных, неполярных) молекул может приводить к возрастанию туннельного тока, вызывающего взрывную электронную эмиссию. Данный механизм, по-видимому, работает параллельно с инициированием газового разряда взрывоэмиссионными процессами в области локальных микроострий на кромке катода.

Список литературы

- [1] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [2] *Месяц Г.А., Яландин М.И.* // УФН. 2005. Т. 175. № 3. С. 225–246.
- [3] *Месяц Г.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. В. 2. С. 119–122.
- [4] *Месяц Г.А., Яландин М.И.* // ДАН. 2009. Т. 424. № 6. С. 755–759.
- [5] *Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Месяц Г.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 18. С. 1–8.
- [6] *Яландин М.И., Месяц Г.А., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 8. С. 56–65.
- [7] *Баренгольц Ю.А.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 5. С. 35–40.
- [8] *Осипов О.А., Минкин В.И., Гарновский А.Д.* Справочник по дипольным моментам. М.: Наука, 1971. 416 с.
- [9] *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [10] *Краткий справочник физико-химических величин* / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. СПб.: Иван Федоров, 2003. 242 с.