

ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТЫ ВЫХОДА ОТ РАЗМЕРОВ И ЗАРЯДА ЧАСТИЦ

Бородин В. И.

Петрозаводский государственный университет, borvi@karelia.ru

При тепловом взаимодействии частицы вещества с высокоионизованной средой необходимо учитывать энергообмен за счет столкновений частицы с электронами и ионами и выделение дополнительной энергии связи (работы выхода). Знание величины работы выхода с достаточной точностью является необходимым и зачастую определяет успешность проводимых расчетов.

Определению величины работы выхода веществ посвящено большое число работ [1], однако их результаты получены для достаточно больших по размерам образцов и не могут быть прямо перенесены на мелкодисперсные системы.

Одно из первых объяснений физической природы работы выхода металлов было предложено Дебаем и Шоттки, считавшими ее как работу, совершаемую против сил взаимодействия электрона с индуцированными им на поверхности металла зарядами, то есть против поляризационной силы (силы электрического изображения):

$$F = e^2/4x^2, \quad (1)$$

где x – расстояние от поверхности металла.

Полагал, что работа выхода и есть работа против этих сил, Шоттки и Ленгмюр получили для нее выражение [2]:

$$W = e\varphi = e^2/2\ell, \quad (2)$$

где ℓ – критическая длина, порядка атомного размера, до которой выполняется (1). Квантово-механическое рассмотрение Бардиным поляризационных изменений энергии электронов в металле привело к выражению, совпадающему с формулой (2) [2].

Однако, как показали исследования, работа против поляризационных сил является только частью работы выхода, к которой приводила теория металлов Зоммерфельда. Дополнительной причиной, вызывающей скачек потенциала на границе металла, является двойной электрический слой на его поверхности. Возникновение его объясняется как с классической, так и с квантово-механической точки зрения [2].

Предпринималось много попыток теоретических расчетов работы выхода, однако как показывает анализ [1], рассчитать работу с удовлетворительной точностью не удастся. В сложившейся ситуации часто при анализе изменения работы выхода оперируют только с ее поляризационной частью, которая составляет основную часть работы выхода, и которая хорошо моделируется с помощью сил электрического изображения.

При переходе к дисперсным средам добавляются сложности, связанные с их размерными свойствами. Рассмотрим вопрос об изменении работы выхода частиц металлов от их размеров, используя только поляризационную часть работы выхода с использованием формулы (2). В качестве ℓ выберем среднее расстояние между атомами d . Именно до таких расстояний ($\sim 0,3$ нм) было экспериментально проверена формула (1) [3]. Поскольку сила изображения (1), строго говоря, справедлива только для взаимодействия заряда с плоской поверхностью, то при расчетах использовалась также точное выражение для силы взаимодействия точечного заряда с проводящей сферой [4]:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left\{ \frac{Qq}{a^2} - \frac{q^2 R^3 (2a^2 - R^2)}{a^3 (a^2 - R^2)^2} \right\}, \quad (3)$$

где q , Q – точечный заряд и заряд сферы соответственно, R – радиус сферы, a – расстояние от точечного заряда до центра сферы.

Из формулы (2) видно, что работа выхода равна удвоенному потенциалу силы изображения в точке ℓ (в системе СИ): $U_{из} = -e^2/(16\pi\epsilon\epsilon_0\ell)$ (4)

Аналогичным образом для определения работы выхода с использованием силы (3) будем брать ее удвоенный потенциал, который определяется формулой:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{Qq}{a} - \frac{q^2 R^3}{2a^2(a^2 - R^2)} \right\}. \quad (5)$$

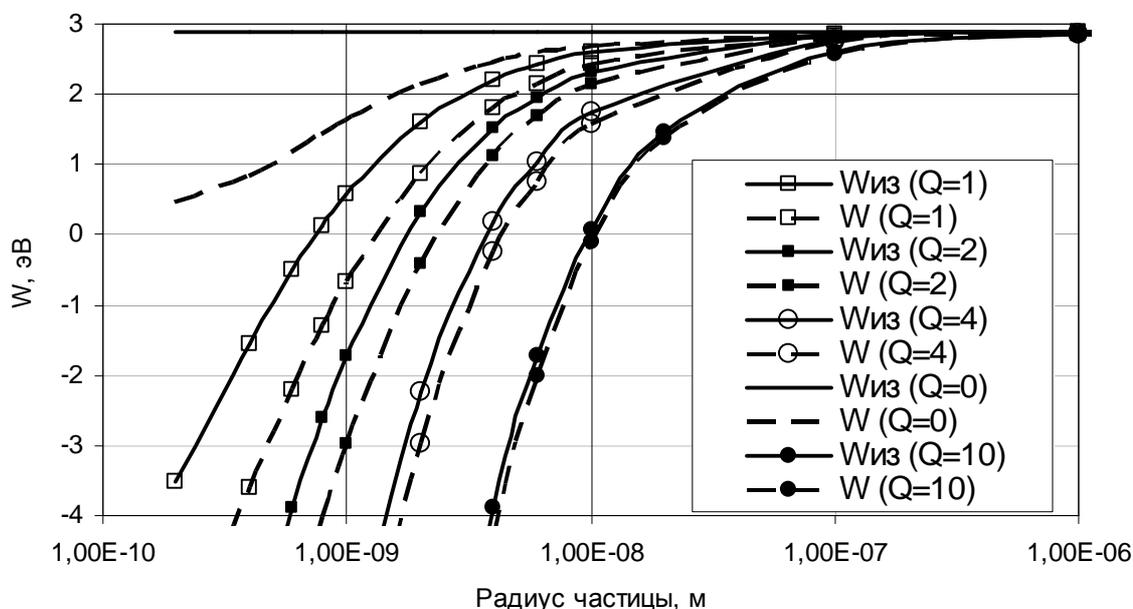
При этом имеет место соотношение: $\ell = a - R$.

Поскольку, вводимые в плазму частицы материала заряжаются и участвуют в теплообмене с плазмой в заряженном состоянии, то необходимо рассмотреть вопрос об изменении работы выхода с изменением заряда частицы. Заряженная частица создает вокруг себя электрическое поле, и в потенциале (4) появится дополнительно кулоновский потенциал:

$$U_{из} = -\frac{e^2}{16\pi\epsilon_0 \mathbf{l}} - \frac{eQ}{4\pi\epsilon_0 (R + \mathbf{l})}. \quad (6)$$

Была рассчитана зависимость работы выхода металла от радиуса частицы для $d = 0.25$ нм. Соответствующие результаты приведены на рисунке (при $Q = 0$). Из рисунка видно, что заметный размерный эффект изменения работы выхода (в данном случае, ее уменьшение) появляется для частиц радиуса $R < 10$ нм, а формула для силы изображения (1) точно описывает силовое взаимодействие электрона с частицами радиуса $R > 0.1$ мкм.

Зависимость поляризационной части работы выхода W частиц от их размеров и заряда Q



При отрицательном заряде частиц их работа выхода уменьшается. Начиная с заряда частиц $Q = 10e$ и выше в расчетных формулах превалируют кулоновские члены, и они дают практически одинаковые результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фоменко В. С., Подчерняева И. А. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов. М.: Атомиздат, 1975. 320 с.
2. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.
3. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / Под. ред. Б. Я. Мойжеса и Г. Е. Пикуса. М.: Наука, 1973. 480 с.
4. Смайт В. Электростатика и электродинамика. М.: ИЛ, 1954. 604 с.