

**ТЕОРИЯ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ВИДЕ  
СТАБИЛЬНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ И ЗАРЯЖЕННЫХ КЛАСТЕРОВ ДЛЯ  
РАЗРАБОТОК ЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ КЛАСТЕРОВ И  
КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ**

Матвеев В.И., Капустин С.Н.

Северный Арктический Федеральный Университет им. М.В. Ломоносова,  
г. Архангельск, Россия

\*E-mail: [mezon98@mail.ru](mailto:mezon98@mail.ru)

**THE THEORY OF ION SPUTTERING OF METAL IN FORM OF STABLE  
NEUTRAL AND CHARGED CLUSTERS FOR DEVELOPMENT OF  
EFFECTIVE SOURCES OF CLUSTERS AND CLUSTER IONS**

Matveev V.I., Kapustin S.N.

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,  
Arkhangelsk, Russia

We have developed a theory of sputtering metal in the form of excited neutral and charged clusters and their subsequent fragmentation to a stable state. Our theory is based on simple physical assumptions and is in good agreement with experiment. The result are presented in the form suitable for the use of formulas. As an example of the calculation of the total yields of stable neutral and charged clusters of silver.

Нами разработана модель ионного распыления [1], основанная на простых физических предположениях, позволяющая при помощи нескольких аналитических выражений получить относительный выход кластеров разного размера и зарядовые распределения при различных температурах мишени. Явление распыления рассматривалось при бомбардировке ионами небольших зарядов с энергиями от сотен эВ до сотен кэВ. Результатом нашего рассмотрения являются следующие формулы.

Вероятность появления стабильного  $N$  – атомного кластера с зарядом  $Q$ :

$$\bar{W}_N^{(Q)} = \sum_{Q_0} \sum_{n=0}^{N_0-N} \frac{N_0}{(N+n)} W_{N+n}^n(Q_0, Q_0 - Q), \quad (1)$$

где  $n$  – число испарившихся из перегретого кластера атомов,  $N_0$  – размер зоны возбуждения, возникающей при падении иона. Вероятность вылета  $N+n$  атомного кластера, который потеряет  $n$  атомов,  $W_{N+n}^n$ , определяется интегрированием спектра внутренней энергии кластера

$$W_N^n = \int_{\delta}^{\delta^{(n+1)}} \frac{d\omega_n}{dE_t} dE_t, \quad \frac{d\omega_n}{dE_t} = \sqrt{\frac{E - E_t}{U_N}} \exp\left(\frac{E - U_N - E_t}{U_N}\right), \quad (2)$$

где  $\delta$  – энергия испарения одного атома,  $U_N$  – энергия связи кластера с решеткой. Вероятность найти в объеме кластера  $V$  определенное число электронов при

вылете из решетки можно, используя стандартное выражение для флуктуации числа частиц [2] ферми-газа. Отклонение числа электронов от среднего и определяет заряд кластера  $Q$ . Вероятность получения заряда  $Q$  при вылете:

$$P_N(Q) = D_N^{-1} \exp\left(-2^{-1} Q^2 / \overline{\Delta Q_N^2}\right), \quad \overline{\Delta Q_N^2} = e^2 \frac{3^{1/3}}{\pi^{5/3}} \frac{m_e T}{\hbar^2} \left(\frac{N_e}{V}\right)^{1/3} \gamma^{1/3} N, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – число валентных электронов в атоме,  $T$  – температура решетки, а  $D_N$  – нормирующий множитель. Тогда вероятность покинуть решетку с определенной внутренней энергией и зарядом  $Q$ :

$$\frac{dW_N}{dE_{\text{int}}} P_N(Q)$$

Аналогичная процедура производится, чтобы узнать какой заряд  $g$  из кластера унесут испаряющиеся мономеры. При этом, температура вылетевшего кластера определяется через его внутреннюю энергию как  $T_k = E_{\text{int}} / (3N - 6)$ .

$$W_N^n(Q_0, g) = P_N(Q) \int_n^{(n+1)\delta} \frac{dW_N}{dE_{\text{int}}} P_n(g) dE_{\text{int}}$$

Суммируя это выражение по всем возможным значениям  $Q$  и  $g$ , получим выражение (1). Модель имеет хорошее согласие в области  $4 < N < 80$  для  $N$ -атомных металлических кластеров и ряда неметаллов.

1. Матвеев В. И., Капустин С.Н. Эмиссия заряженных и стабильных кластеров при ионном распылении металла // Известия РАН, Серия физическая, Т. 80, №2. - С. 131-135 (2016)
2. Матвеев В.И., Кочкин С.А. // ЖЭТФ. Т. 137. С. 820. (2010)
3. Staudt C., Wucher A. // Phys. Rev. B. V. 66. P. 419 (2002)

## PROTECTION MECHANISM OF METAL SURFACE OXIDATION BY GRAPHENE

Zhidkova N.G.<sup>1\*</sup>, Bazylewski P.F.<sup>2</sup>, Kukharenko A.I.<sup>1</sup>, Zhidkov I.S.<sup>1</sup>, Skorikov N.A.<sup>3</sup>,  
Ponosov Yu.S.<sup>3</sup>, Kurmaev E.Z.<sup>3</sup>, Cholakh S.O.<sup>1</sup>, Cang G.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>) University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada

<sup>3</sup>) Institute of Metal Physics, Russian Academy of Sciences-Ural Division,  
Yekaterinburg, Russia

\*E-mail: [i.s.zhidkov@urfu.ru](mailto:i.s.zhidkov@urfu.ru)

Copper is widely used in electronics as an interconnecting material due to its high thermal and electrical conductivity. However, the formation of an oxide layer on the copper surface even at room temperature and resulting creation of trap states result in