

Аналитическая теория отражения ионов низкой и средней энергии атомами поверхности мишени при распылении

А. Н. Пустовит

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия. E-mail: pustan@iptm.ru

53-я Международная Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами

Основной величиной, характеризующей любой процесс распыления, является экспериментальный выход распыления (SY) Y_{exp} , рассчитываемый как отношение количества частиц n , распыленных из мишени, к общему количеству ионов N_t , падающих на нее.

Доля ионов N_{ref} может варьироваться в зависимости от условий эксперимента (энергия E и угол падения β ионов), даже если соблюдаются условия для постоянства N_t . По этой причине постоянство числа ионов $N_t = N_{inv} + N_{ref}$, падающих на мишень, не обеспечивает постоянства N_{inv} при различных значениях E и β ионов. Используя это условие для N_t , можно записать:

$$Y_{exp} = \frac{n}{N_t} = \frac{n}{N_{inv} + N_{ref}} = \frac{n}{N_{inv} \left(1 + \frac{N_{ref}}{N_{inv}}\right)} = G \times Y \quad (1)$$

где введены Y – теоретический SY (который учитывает только ионы, участвующие в распылении) и G – поправочный коэффициент (CC) (который определяет долю ионов, участвующих в распылении, к общему количеству ионов, падающих на мишень):

$$Y = \frac{n}{N_{inv}} \quad G = \frac{N_{inv}}{N_t} \quad R_{Ns} = \frac{N_{ref}}{N_t} = 1 - G \quad R_N = \frac{N_{bs}}{N_t}$$

Цели работы:

- 1) поиск аналитического выражения для R_{Ns} ;
- 2) анализ влияния на значения R_{Ns} входящих в него параметров;
- 3) сравнение полученных результатов с экспериментальными и расчетными литературными данными.

$$d' = d \cos \beta \quad U(r) = Z_1 Z_2 q^2 \frac{k_z}{sa} \left(\frac{a}{r}\right)^s \quad b_s = \left(\frac{Z_1 Z_2 q^2 k_s}{saE_0}\right)^{1/s} a.$$

$$X(\alpha) = \rho_{ms} \times \cos \gamma = \rho_{ms} \times \cos(\alpha/2)$$

$$\rho_{ms} = b_s \left[\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{s} \left(\frac{\rho}{b_s}\right)^2} \right] \quad X\left(\frac{\pi}{2}\right) = R = \frac{\sqrt{2}}{4} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{s}}\right) \times b_s$$

$$G = \frac{N_{inv}}{N_t} = 1 - \frac{4}{\cos^2 \beta} \left(\frac{R}{d}\right)^2 = 1 - \frac{1}{2 \cos^2 \beta} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{s}}\right)^2 \left(\frac{Z_1 Z_2 q^2 k_z}{saE_0}\right)^{2/s} \left(\frac{a}{d}\right)^2$$

$$R_{Ns} = \frac{1}{2 \cos^2 \beta} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{s}}\right)^2 \left(\frac{Z_1 Z_2 q^2 k_z}{saE_0}\right)^{2/s} \left(\frac{a}{d}\right)^2 \quad (2)$$

$$E_{th}(\beta) = \frac{E_{th}(0)}{\cos^2 \beta} \rightarrow \beta_{max} = a \cos \left[\frac{E_{th}(0)}{E} \right]^{-2/s} \quad (3)$$

Таблица. Параметры, используемые в расчетах G и R_{Ns} .

Ion	Target	d (nm)	$E_{th}(0^\circ)$ (eV)	S
$^2D^+$	C	0.143	27.64	1.451
$^4He^+$	Ni	0.2492	20.67	2.118
$^{40}Ar^+$	C	0.34	60	1.855
$^{40}Ar^+$	Cu	0.2556	19.98	2.732
$^{85}Rb^+$	Mo	0.2725	38.6	2.77
$^{133}Cs^+$	Mo	0.2725	47.4	2.881

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что в процессе распыления участвуют не все частицы первичного пучка, т.к. часть ионов отражается атомами поверхности мишени. Эта часть ионов может быть учтена с помощью коэффициента отражения R_{Ns} атомами поверхности мишени.
2. Выполнен расчет R_{Ns} и определена его зависимость от параметров системы ион-мишень (включая энергию и угол падения первичного пучка). Расчеты R_{Ns} могут быть использованы как для случаев $m_2/m_1 > 1$, так и для случаев $m_2/m_1 < 1$.
3. Сравнение E - и β -зависимостей R_{Ns} с экспериментальными значениями R_N для пар Cs^+ -Mo, Rb^+ -Mo и D^+ -C показало удовлетворительное соответствие даже в случае $m_2/m_1 < 1$.
4. Проведено сравнение E - и β -зависимостей R_{Ns} с результатами расчетов для компьютерных программ R_N для пар Ar^+ -C и Ar^+ -Cu. Установлено, что результаты расчетов R_{Ns} и R_N редко совпадают друг с другом, особенно в областях $m_2/m_1 < 1$ и близких к пороговым энергиям $E_{th}(\beta)$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.Lindhard, M. Scharff, H.E. Schiott, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. **33**(l4), 1 (1968).
- [2] A. N. Pustovit, J. Surf. Invest.: X-ray, Synchr Neutr Tech., **15**, S204 (2021).
- [3] A. N. Pustovit., Tech. Phys. Lett., **49** (1), 28 (2023).
- [4] C. Brunne, Z. Physik, **147**, 161 (1957) (in German).
- [5] M. Mayer, W. Eckstein, B. M. U. Scherzer, J. Appl. Phys. **77**, 6609 (1995).
- [6] G. Al-Malkawi, A.-M. B. Al-Ajlony, K. Al-Shboul, A. Hassanein., Nucl. Eng. Technol., **55**, 1287 (2023).
- [7] W. Eckstein, "Computer simulation of ion-solid interactions," Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, (1991) pp 1-296.

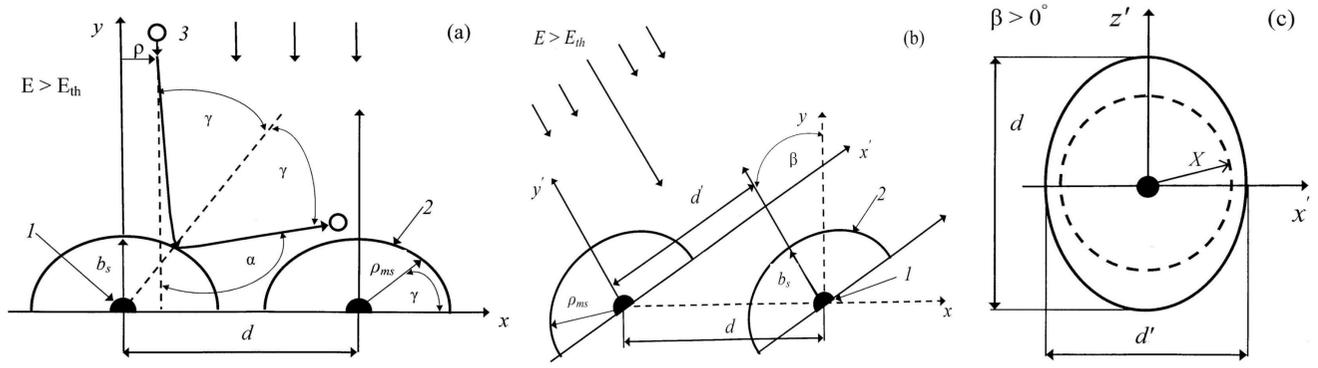


Рис. 1. Схемы: (а) – рассеяния иона (3) атомом поверхности мишени (2) при $\beta = 0$ для первичного пучка; (б) – изменения геометрии ионно-атомной системы при $\beta > 0$ для ионного пучка; (в) – поперечного сечения вершины конуса затенения в плоскости xz при $\beta > 0$. 1 - атом-мишень, 2 - вершина затеняющего конуса, 3 - ион. оси z и z' перпендикулярны плоскости фигуры для систем xy и $x'y'$ соответственно.

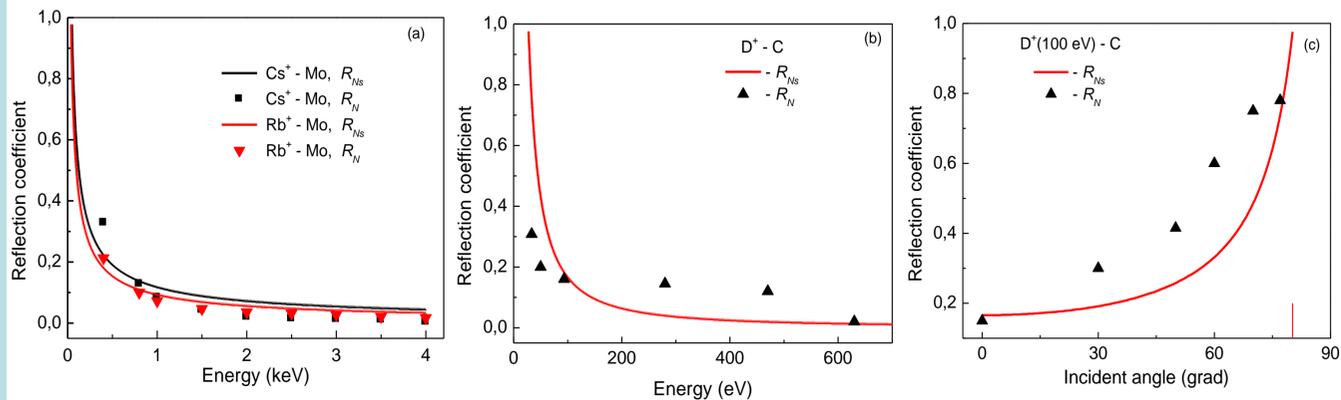


Рис. 2. Сравнение рассчитанных R_{Ns} (формула (2)) и экспериментальных значений коэффициентов отражения R_N : (а) энергетические зависимости R_{Ns} и R_N для пар Cs^+ - Mo и Rb^+ - Mo (сплошные линии - R_{Ns} , фигуры - R_N [4]); (б) энергетические зависимости R_{Ns} и R_N для пары D^+ - C (сплошная линия – рассчитано, рисунки – экспериментальные данные [5]); (в) угловые зависимости R_{Ns} и R_N для пары D^+ - C при энергии иона D^+ 100 эВ (сплошная линия – R_{Ns} , фигуры – R_N [5]). На рис. 2с красная метка на угловой оси с координатой $\beta = 80,214^\circ$ соответствует $E_{th}(\beta) = 100$ эВ.

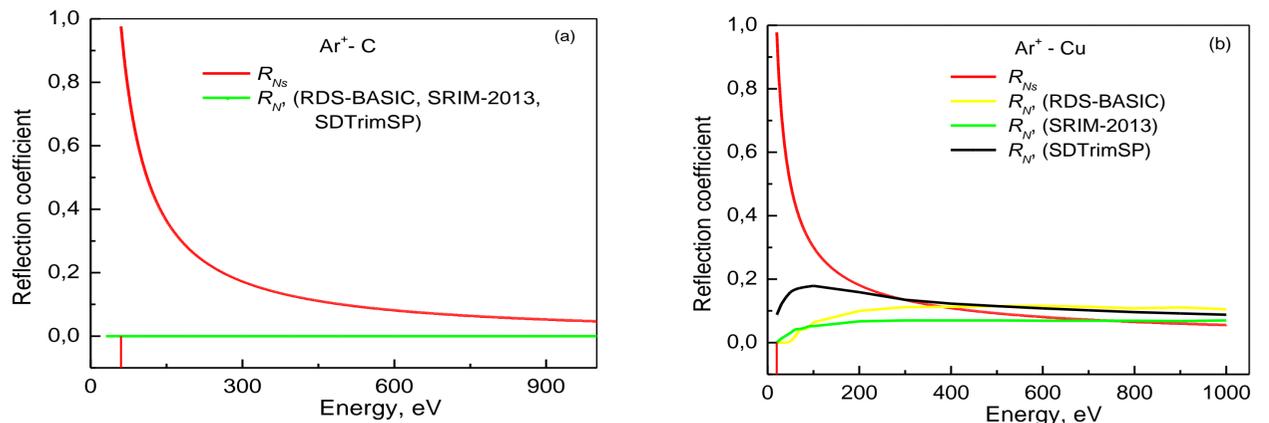


Рис. 3. Сравнение расчетных значений энергетических зависимостей коэффициента отражения R_{Ns} (формула (2)) и с использованием программ компьютерного моделирования R_N [6]: (а) для пары Ar^+ - C; (б) для пары Ar^+ - Cu. Красные метки на E -осях с координатами 60 эВ (а) и 19,98 эВ (б) соответствуют $E_{th}(0^\circ)$ для соответствующих пар.

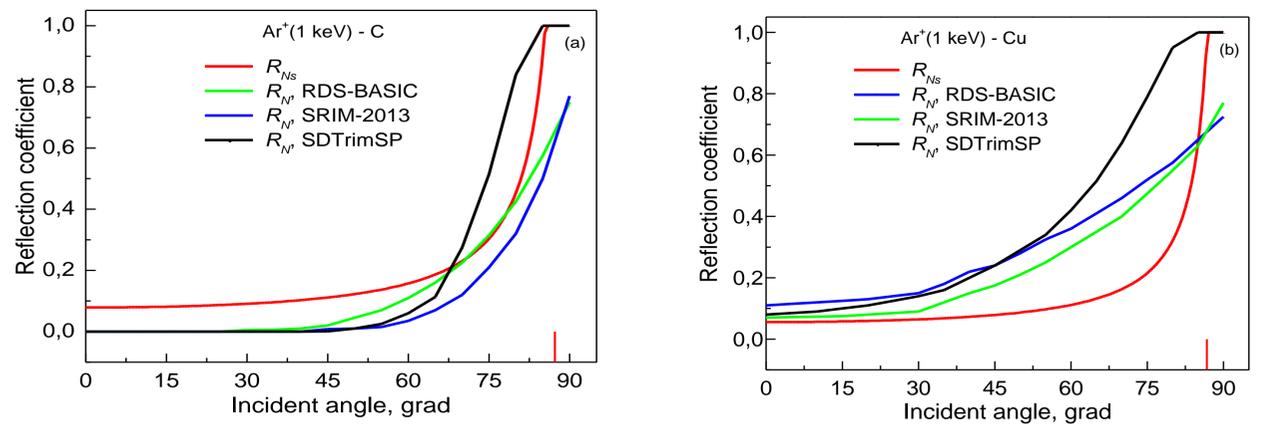


Рис. 4. Сравнение расчетных значений угловых зависимостей коэффициента отражения, выполненных с использованием программ компьютерного моделирования R_N [6] и в данной работе R_{Ns} (формула (2)): (а) для пары Ar^+ - C; (б) для пары Ar^+ - Cu. Энергия ионов Ar^+ равна 1 кэВ. Красные метки на β -осях с координатами $\beta_{max} = 87,24^\circ$ (а) и $\beta_{max} = 86,732^\circ$ (б) соответствуют $E_{th}(\beta) = 1$ кэВ для соответствующих пар.

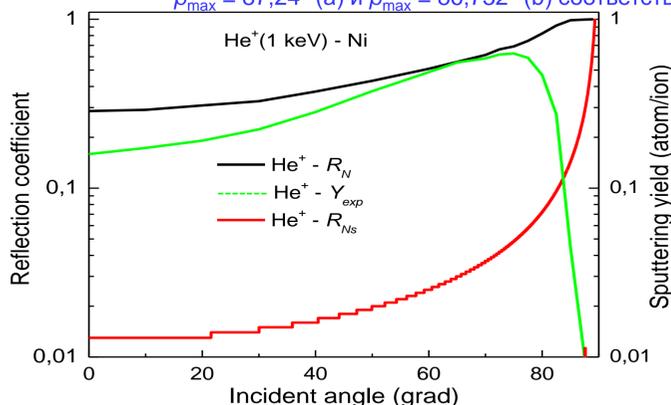


Рис. 5. Угловые зависимости коэффициентов отражения R_{Ns} (формула (2), красная линия), R_N и Y_{exp} для пары He^+ (1 кэВ) – Ni. Данные для R_N и Y_{exp} (черные и зеленые линии) взяты из [7] (рис. 12.5). Красные отметки на β -оси с координатами $\beta = 87,6^\circ$ соответствуют $E_{th}(\beta) = 1000$ эВ.