

# ПОВЕДЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ПАДЕНИИ ИОНОВ НА МИШЕНЬ

А. И. Толмачев<sup>1)</sup>, Л. Форлано<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Российский новый университет, Москва, Россия

<sup>2)</sup> Университет Калабрии, Козенца, Италия

**Введение.** Одной из важных характеристик распыления является зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов. Для легких ионов эта зависимость является монотонно убывающей. Для тяжелых ионов коэффициент распыления сначала растет от своего значения при нормальном падении  $Y(0)$  до максимального значения, а затем убывает до величины  $Y(90^0)$  при скользющем падении [1]. Расчеты по программе SRIM [2,3] дают конечные значения  $Y(90^0)$ , но в работе [4] были получены нулевые значения  $Y(90^0)$  при моделировании распыления кремния и германия ионами инертных газов.

В настоящей работе задача о зависимости коэффициента распыления от угла падения ионов рассматривается теоретически [5] и методами компьютерного моделирования [6]. Показано, что коэффициент распыления при угле падения  $90^0$  (предельное скользющее падение) всегда принимает конечные значения.

**Теоретический анализ** основан на решении двух уравнений переноса – для рассеянных ионов и каскадных атомов. После преобразования Меллина по энергетической переменной, полученная система уравнений решается методом дискретных потоков, при котором область изменения направляющего косинуса в интеграле столкновений разбивается на  $N$  равных частей. и рассматриваются неизвестные значения функции распределения в  $N + 1$  дискретной точке. Для вычисления неизвестных значений, мы разложили решение в ряд экспоненциально убывающих функций и решили задачу о собственных

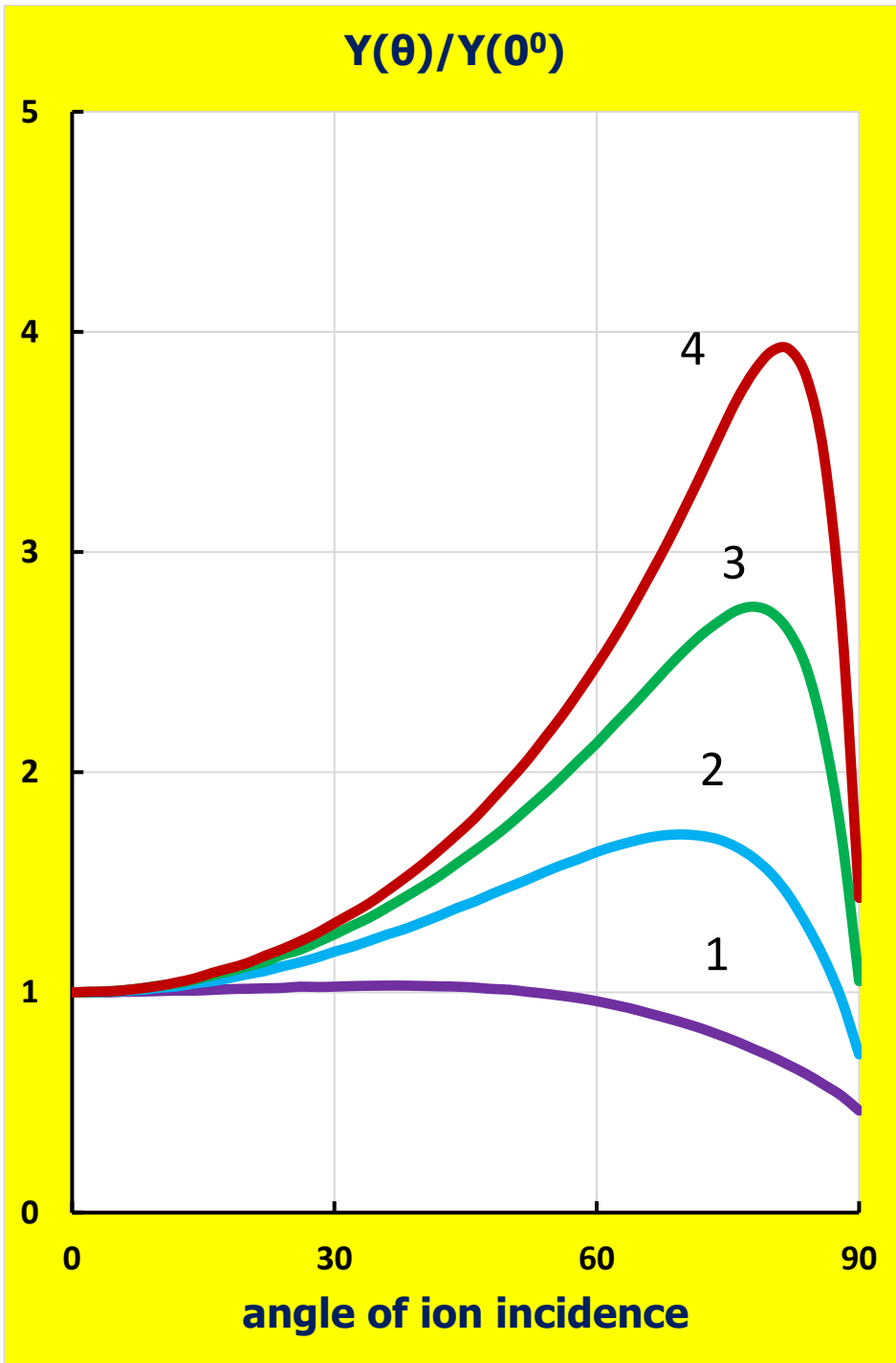
значениях и собственных векторах квадратной матрицы. Постоянные разложения были получены из граничных условий, и обратное преобразование Меллина привело к окончательному результату. Численное решение было проведено при возрастании числа дискретных потоков вплоть до максимального значения  $N = 500$ .

Рисунки 1 и 2 показывают зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов как функции массы ионов и энергии ионов. Все коэффициенты распыления нормированы на свои значения при нормальном падении. Можно видеть, что отношение коэффициентов распыления при скользящем и нормальном падении,  $Y(90^\circ)/Y(0^\circ)$ , уменьшается с уменьшением массы ионов, и также уменьшается при увеличении отношения энергии ионов  $E_0$  к энергии отсечки  $E_{min}$ . Корректность метода была подтверждена путем сравнения полученных результатов с известными аналитическими решениями, а также с результатами моделирования.

**Компьютерное моделирование** было выполнено с помощью программы PAOLA, основанной на модели бинарных столкновений и экранированном кулоновском потенциале. Расхождение между теоретическими результатами и результатами моделирования не превысило 2%, что делает их визуально неразличимыми.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А.М., Машкова Е.С. Физические основы ионно-лучевых технологий. Распыление поверхности твердых тел. Москва, МАКС Пресс, 2013.
2. W. Eckstein. Computer Simulation of Ion-Solid Interactions. Springer, 1991.
3. R. Berisch, W. Eckstein. Sputtering by Particle Bombardment. Springer, 2007.
4. Shulga V.I. // Applied Surface Science, 2018, v. 439, p. 456.
5. Толмачев А.И., Форлано Л. // ЖТФ, 2020, т. 90, с. 884.
6. Толмачев А.И., Форлано Л. // ЖТФ, 2018, т. 88, с. 1502.



## Рисунок 1

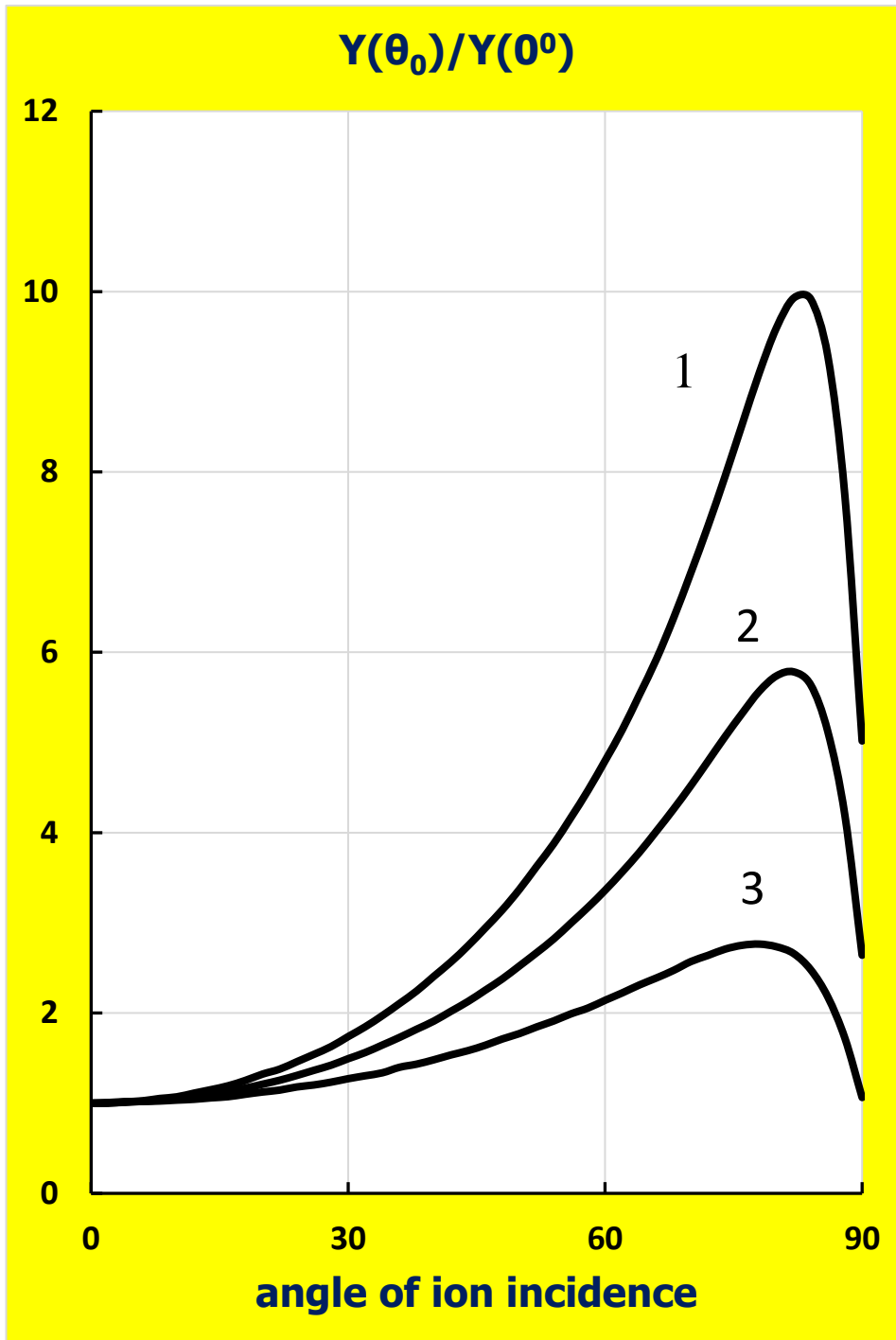
Зависимость коэффициента распыления  $Y$  от угла падения ионов  $\theta$

для различных отношений масс  $M_1/M_2=1$  (кривая 1), 5 (2), 10 (3), 15 (4).

$E_0/E_{min} = 1000$ .

$M_1$  – масса иона,  $M_2$  – масса атома мишени

$E_0$  – энергия иона,  $E_{min}$  – энергия отсечки



## Рисунок 2

Зависимость коэффициента распыления  $Y$  от угла падения ионов  $\theta$  для различных энергий ионов  $E_0/E_{\min} = 100$  (кривая 1), 200 (2), 1000 (3).  $M_1/M_2 = 10$ .