

Институт физики металлов УрО РАН

Применение гадолиния в качестве опорного слоя в нейтронной рефлектометрии

Саламатов Ю. А., Кравцов Е. А.

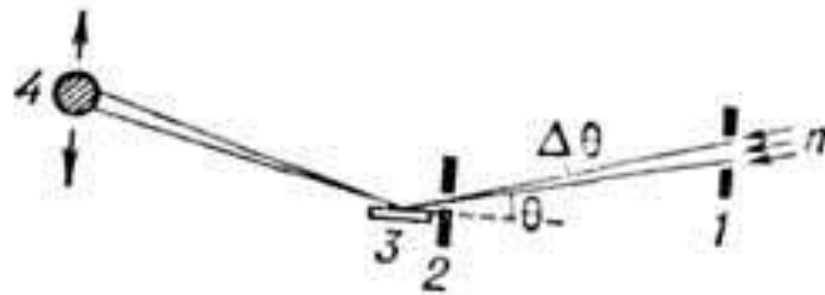
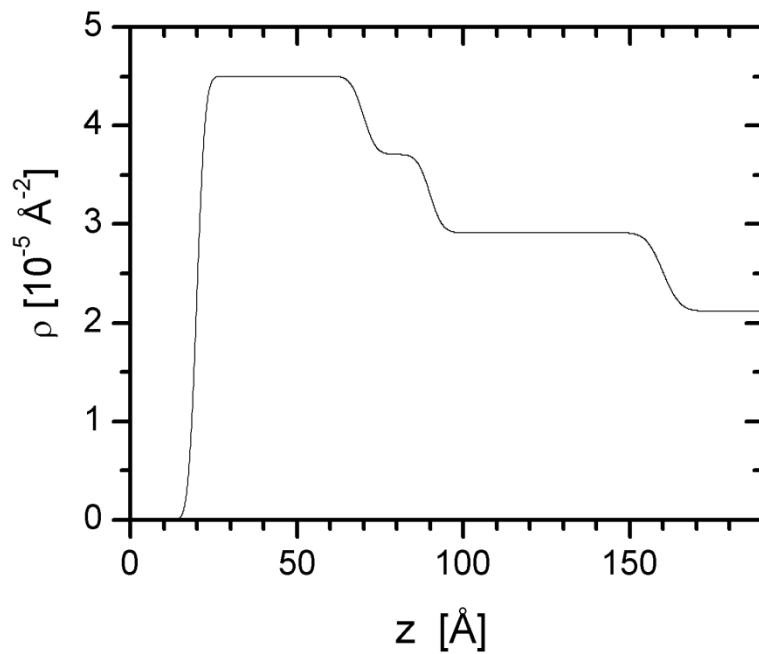
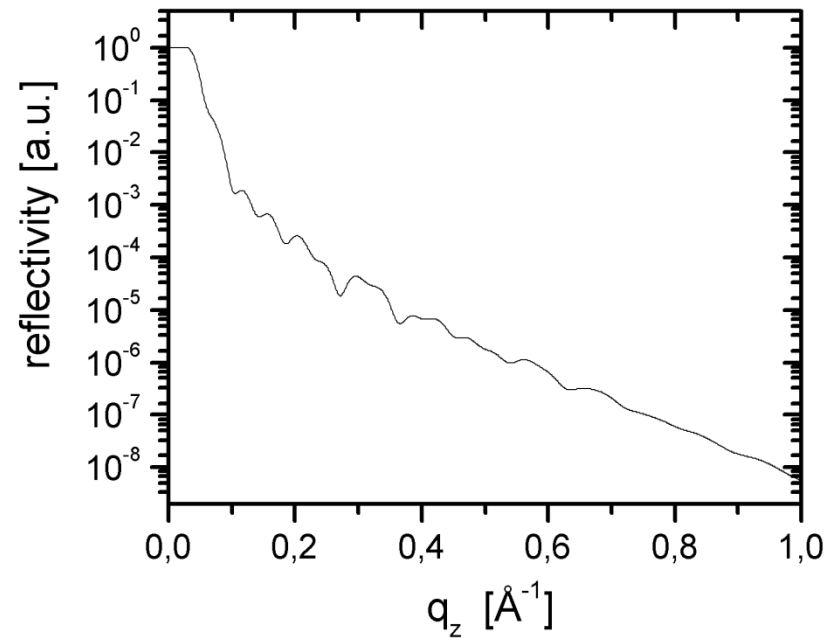


Схема эксперимента по рефлектометрии



Электронная плотность, отражающая характер потенциала рассеяния

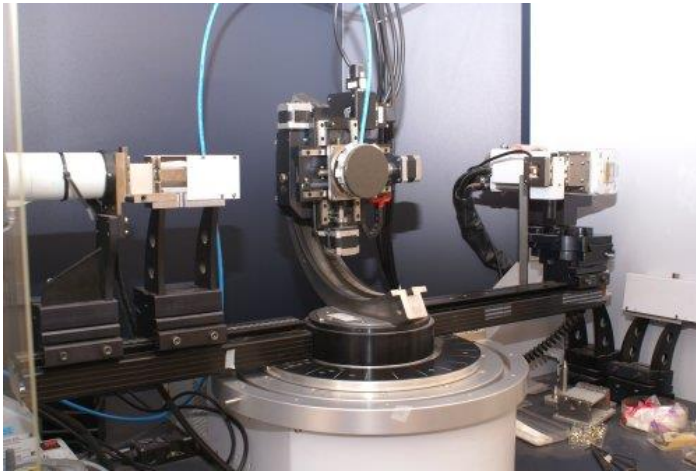


Вид рефлектометрической кривой

Рефлектометрия

Рентгеновская

- + Доступность в лабораторных условиях



Нейтронная

- Необходим реактор со специальным оборудованием
- + Возможность изучать магнитную структуру
- + Сечение рассеяния нейтронов не зависит от длины волны



Методы обработки данных



Модельно-зависимые

Параметры выбранной модели структуры варьируются так, чтобы получить максимально возможное совпадение расчёта с экспериментом

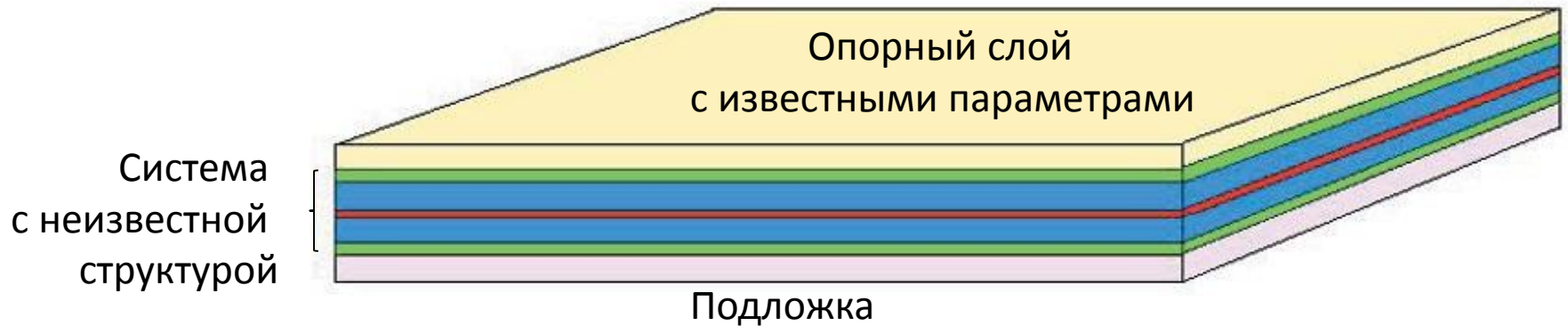
- + Математически простые
- + Не требуют специальной предобработки
- Зависимость вида решения от используемой модели
- Неприменимы, если априорной информации нет или она недостаточна

Модельно-независимые

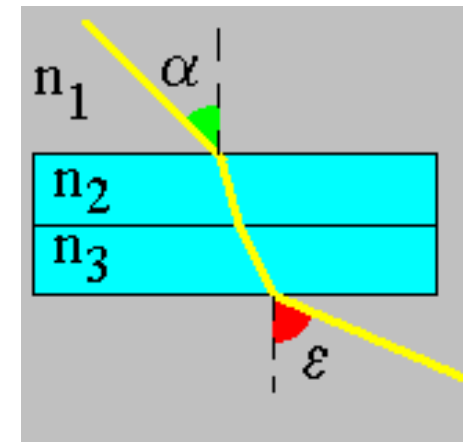
Решается уравнение, связывающее потенциал рассеяния образца с его коэффициентом отражения

- + Не требуют априорной информации о строении образца
- + Вид решения практически ничем не ограничен
- Сложный математический аппарат
- **Требуют знания комплексного коэффициента отражения**

Метод опорного слоя



В традиционной оптике известен метод определения показателя преломления при помощи пластинки с известным значением. Аналогично, можно нанести поверх исследуемой наногетероструктуры опорный слой с известными параметрами и, проведя серию экспериментов, найти комплексный показатель преломления многослойного образца.



Матричный формализм в рефлектометрии

Абель [1] связал коэффициенты отражения и преломления посредством полной оптической матрицы M :

$$\begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} 1 \\ r \end{pmatrix},$$

которая представляет собой произведение оптических матриц для каждого слоя в образце:

$$M = \prod_{j=0}^K \left[\frac{1 + \frac{q_j}{q_{j+1}}}{2} \cdot \begin{pmatrix} e^{iq_j d_j} & -r_j e^{-iq_j d_j} \\ -r_j e^{iq_j d_j} & e^{-iq_j d_j} \end{pmatrix} \right] = M_0 \cdot M_1 \cdot \dots \cdot M_K$$

[1] F. Abeles, *Recherches sur la propagation des ondes electromagnetiques sinusoidales dans les milieux stratifies*. Ann. Physique (Paris), 5 (1950), p. 596.

Определение коэффициента отражения

Если на образце G с неизвестной структурой расположен известный опорный слой H , то данную систему можно рассматривать, как двухслойную:

$$M = G \cdot H$$

Коэффициент отражения r_g неизвестной структуры лежит в комплексной плоскости, на круге с центром y и радиусом ρ :

$$\gamma = \frac{Rh_{22}h_{12}^* - h_{21}h_{11}^*}{Rh_{12}h_{12}^* - h_{11}h_{11}^*}; \quad \rho = \sqrt{R} \frac{|h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}|}{Rh_{12}h_{12}^* - h_{11}h_{11}^*}$$

Если провести три измерения интенсивности отражения R_i ($i=1,2,3$), то r_g может быть однозначно определён, как точка пересечения трёх кругов:

$$r_g = \frac{A_1(\gamma_2 - \gamma_3) + A_2(\gamma_3 - \gamma_1) + A_3(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1^*(\gamma_2 - \gamma_3) + \gamma_2^*(\gamma_3 - \gamma_1) + \gamma_3^*(\gamma_1 - \gamma_2)}$$

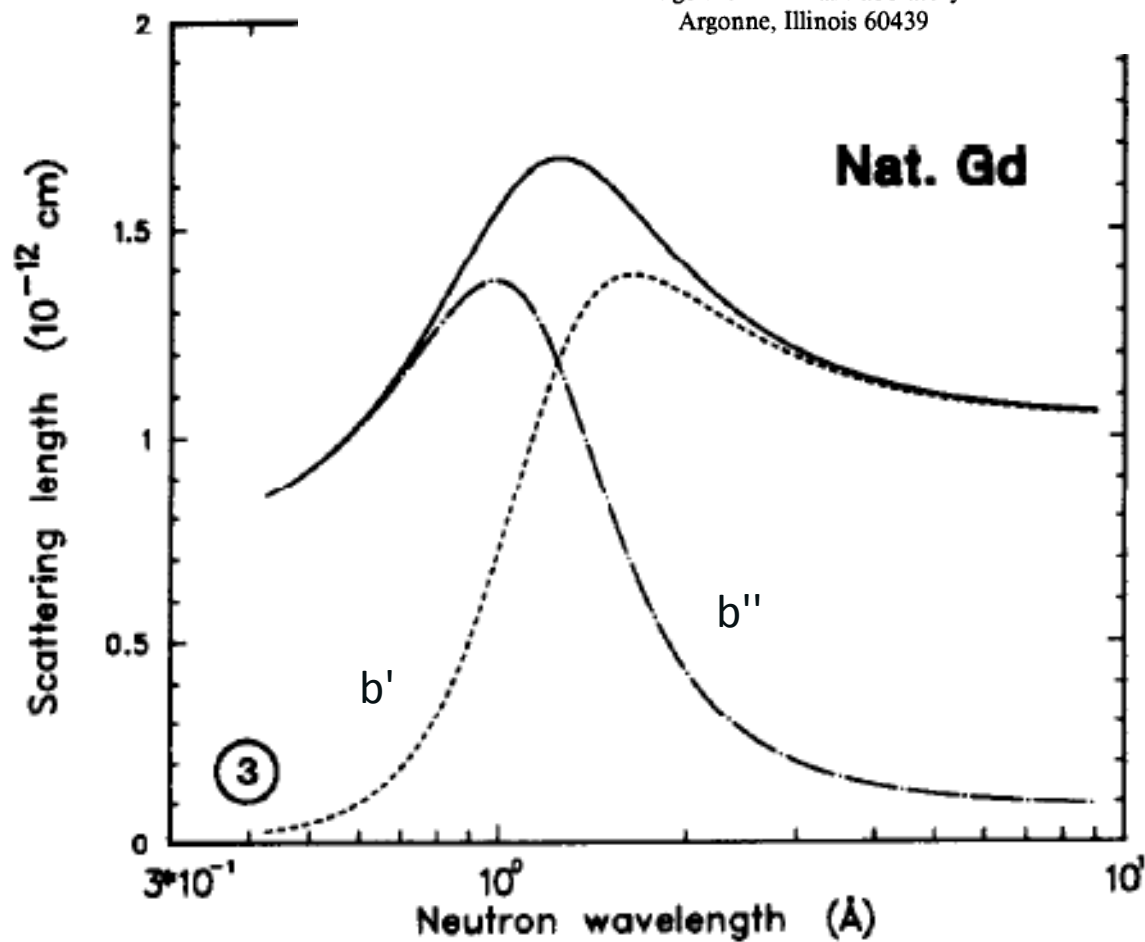
RESONANCE EFFECTS IN NEUTRON SCATTERING LENGTHS OF RARE-EARTH NUCLIDES

J. E. LYNN* and P. A. SEEGER

Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico 87545

and

Argonne National Laboratory
Argonne, Illinois 60439



Теоретические значения длин рассеяния для Gd

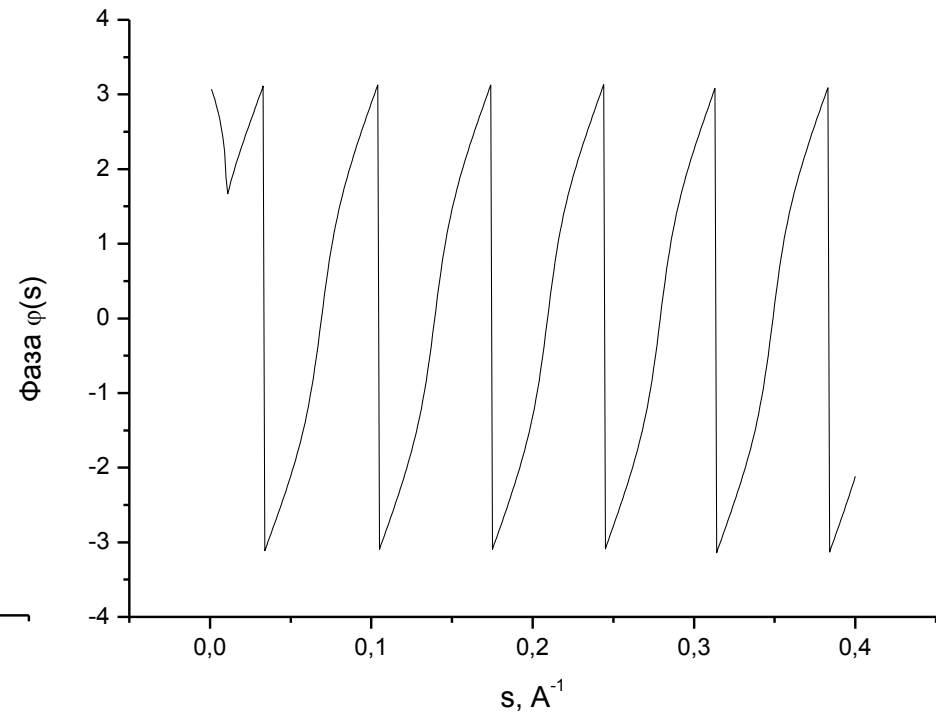
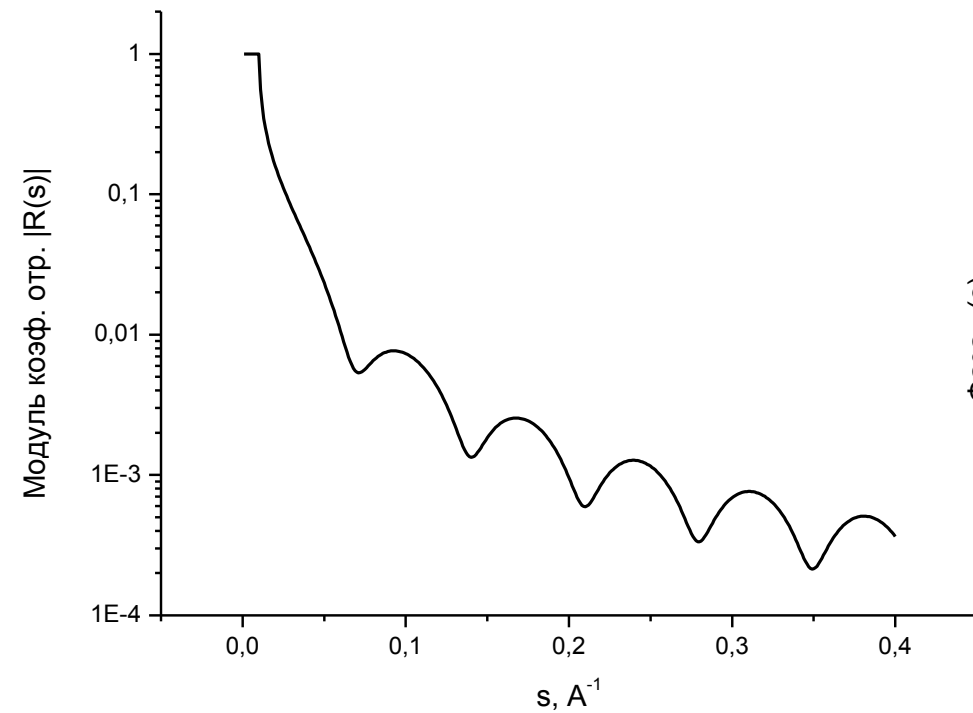
$$\lambda = 1 \text{ \AA} \quad Nb = (5.96 - i 2.32) \times 10^{-6}$$

$$\lambda = 1.8 \text{ \AA} \quad Nb = (2.87 - i 4.18) \times 10^{-6}$$

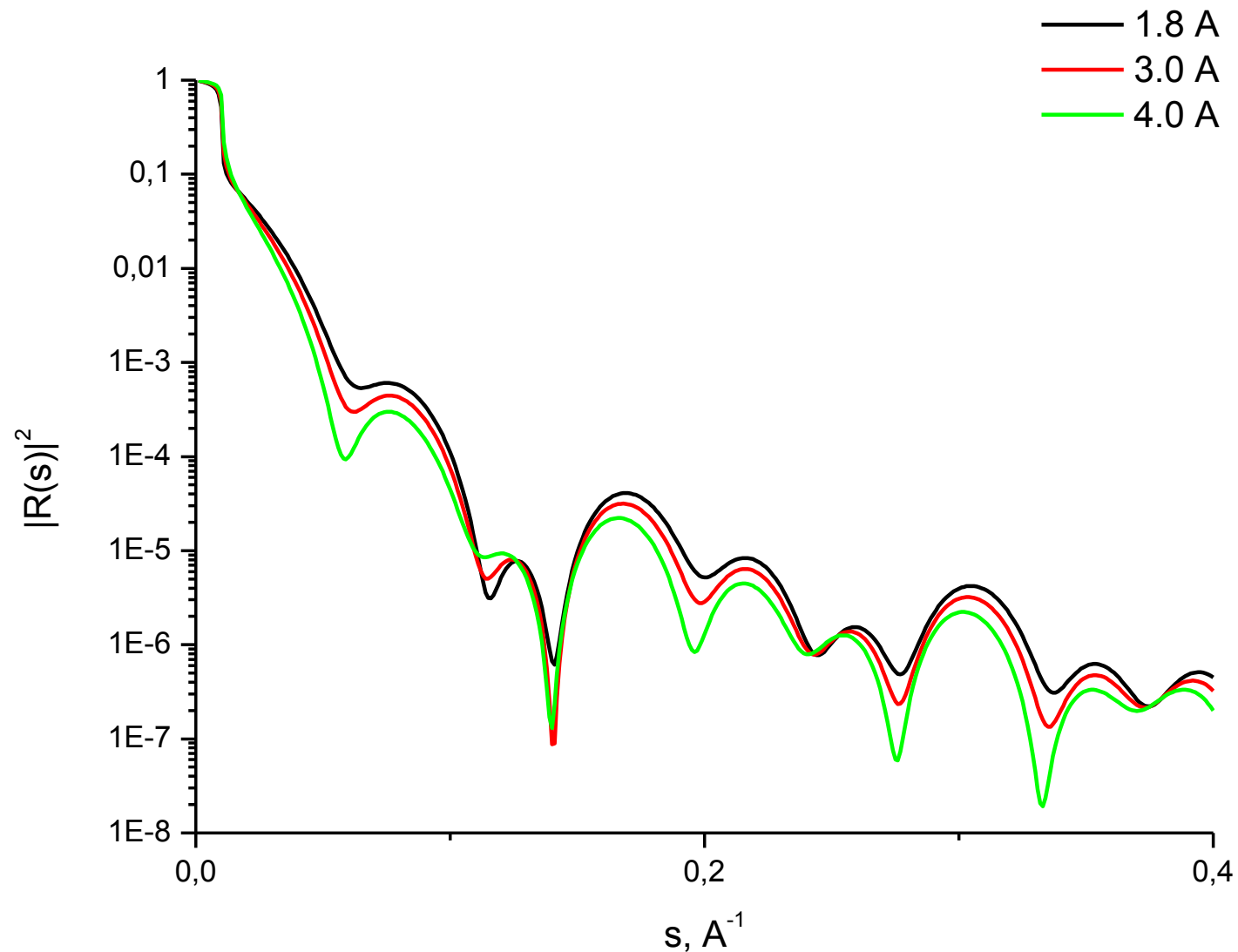
$$\lambda = 3 \text{ \AA} \quad Nb = (1.72 - i 3.73) \times 10^{-6}$$

$$\lambda = 4 \text{ \AA} \quad Nb = (0.44 - i 3.04) \times 10^{-6}$$

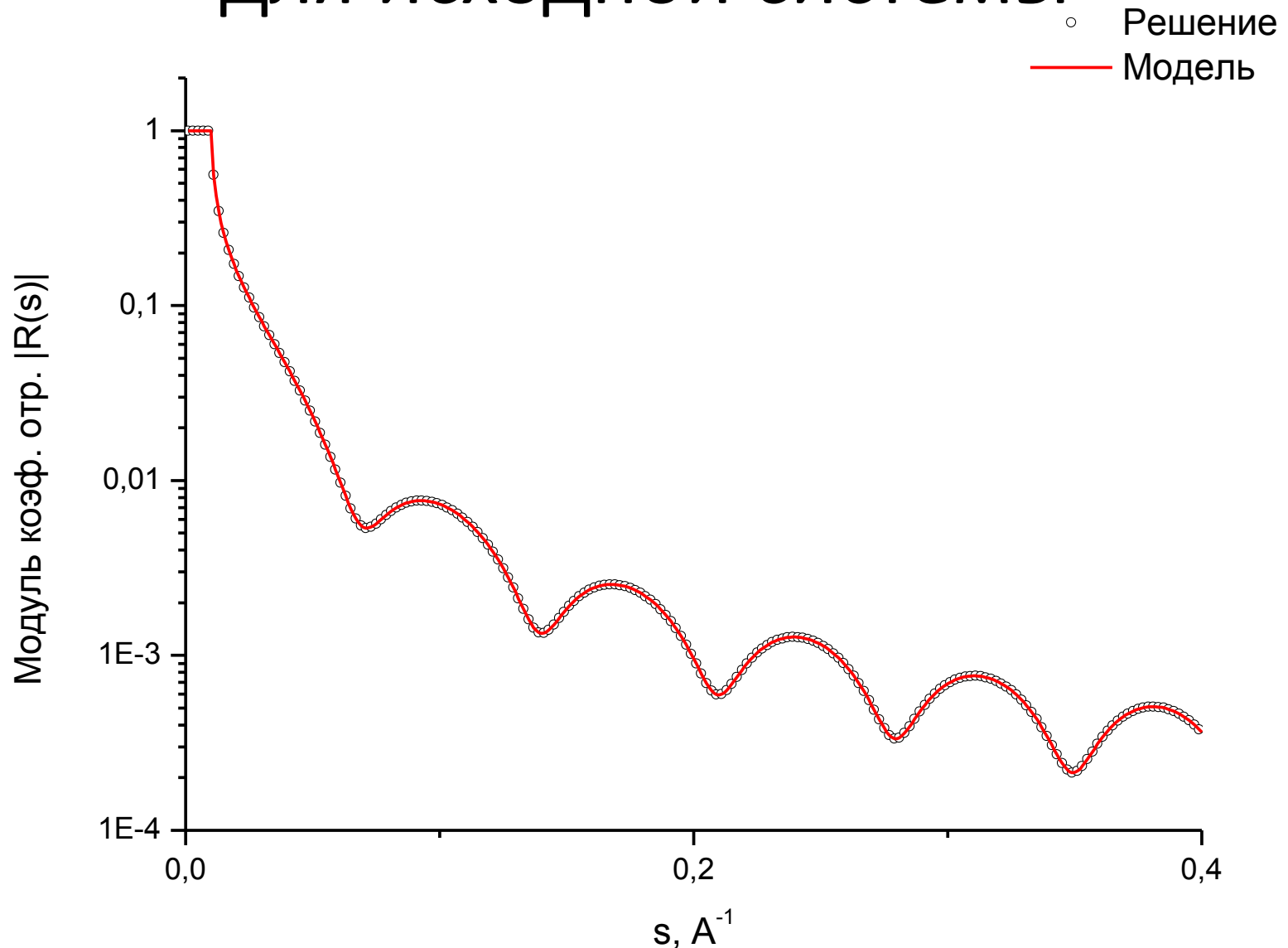
Система Si//Ti(90 Å)



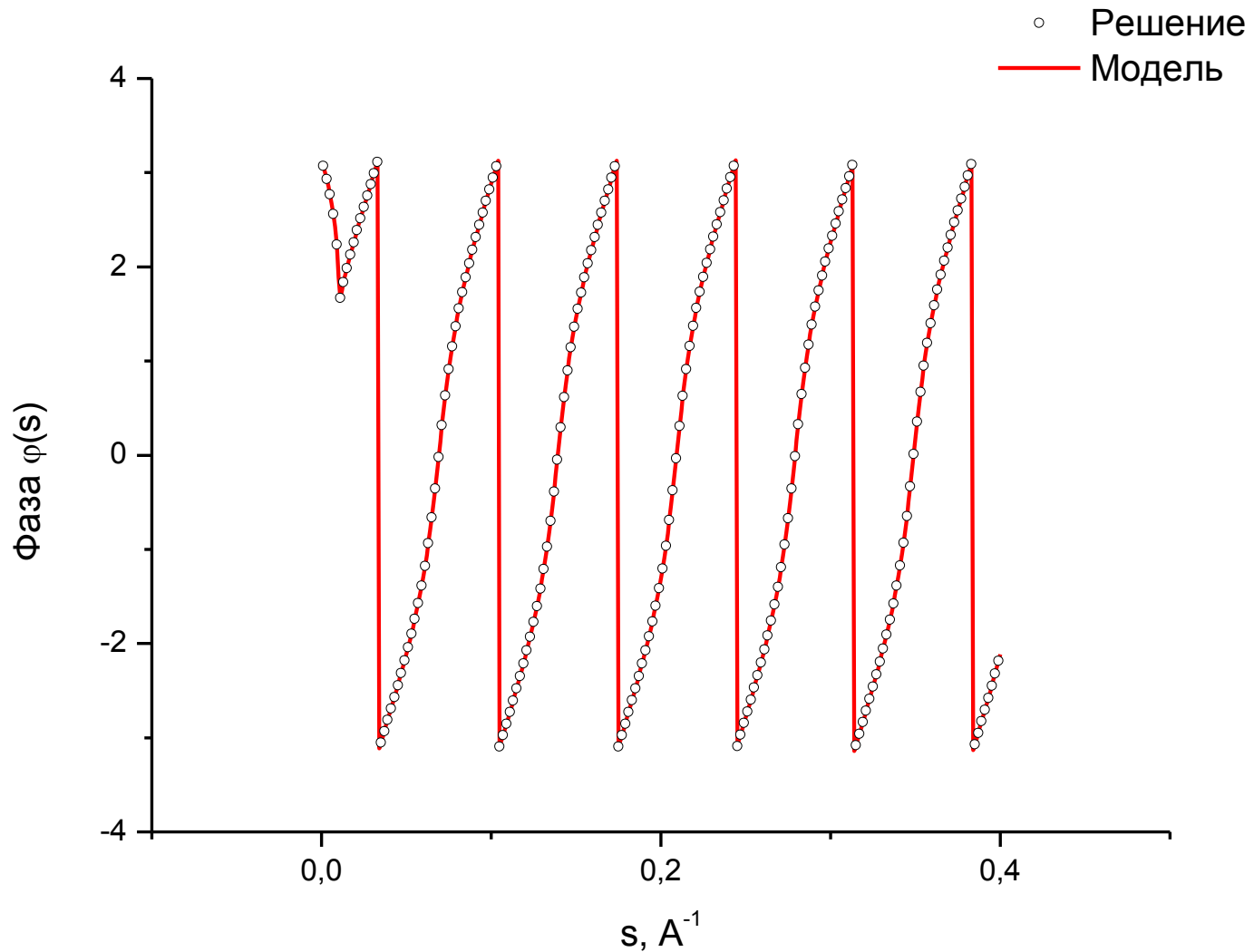
Система Si//Ti(90 Å)/Gd(50 Å)/V(20 Å)



Восстановление коэф. отражения для исходной системы



Восстановление коэф. отражения для исходной системы



Определение потенциала рассеяния

Для нахождения потенциала необходимо решить уравнение Гелфанда-Левитана-Марченко и найти функцию $u(z, t)$:

$$u(z, t) + g(z + t) + \int_{-z}^{+z} u(z, \tau) g(\tau + t) d\tau = 0$$

$$g(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(s) e^{isz} ds$$

Затем зависимость потенциала рассеяния от глубины определяется по формуле:

$$V(z) = 2 \frac{d}{dz} u(z, z)$$

Z. S. Agranovich and V. A. Marchenkow, *The inverse Problem of Scattering Theory*, Gordon and Breach, New York, 1963.

Решение уравнения Г-Л-М

Для решения уравнения используется метод Галёркина-Бубнова.
Искомая функция представляется в виде ряда:

$$u(z, z) = \sum_{i=0}^N \alpha_i F_i(z)$$

Затем подставляется в исходное уравнение:

$$\sum_{i=0}^N \alpha_i \left(F_i(\tilde{z}) + \int_{-z}^{+z} F_i(\tau) g(\tau + \tilde{z}) d\tau \right) = -g(2\tilde{z})$$

Коэффициенты разложения ищутся из решения системы линейных уравнений:

$$\sum_{i=0}^N \alpha_i \left[\int_{-z}^{+z} \left(F_i(\tilde{z}) + \int_{-z}^{+z} F_i(\tau) g(\tau + \tilde{z}) d\tau \right) F_j(\tilde{z}) d\tilde{z} \right] = - \int_{-z}^{+z} g(2\tilde{z}) F_j(\tilde{z}) d\tilde{z}$$

Потенциал рассеяния для системы Si//Ti(90 Å)

