

РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

П. А. Макаров (makarovpa@ipm.komisc.ru)

Физико-математический институт, ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

Мотивация

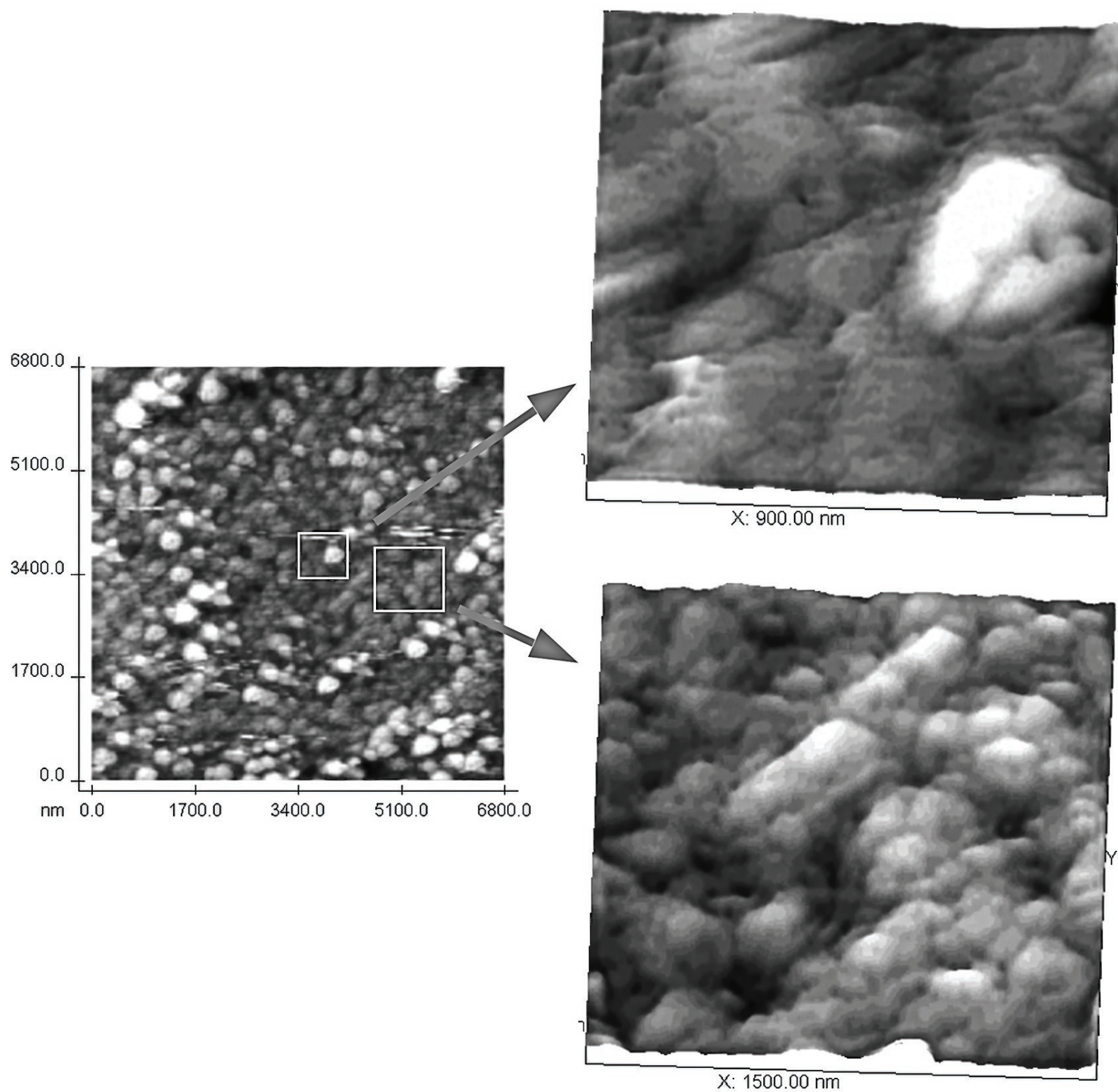


Рис. 1. Морфология поверхности плёнок $(\text{Fe})_x(\text{BaF}_2)_y$ по данным АСМ [1]

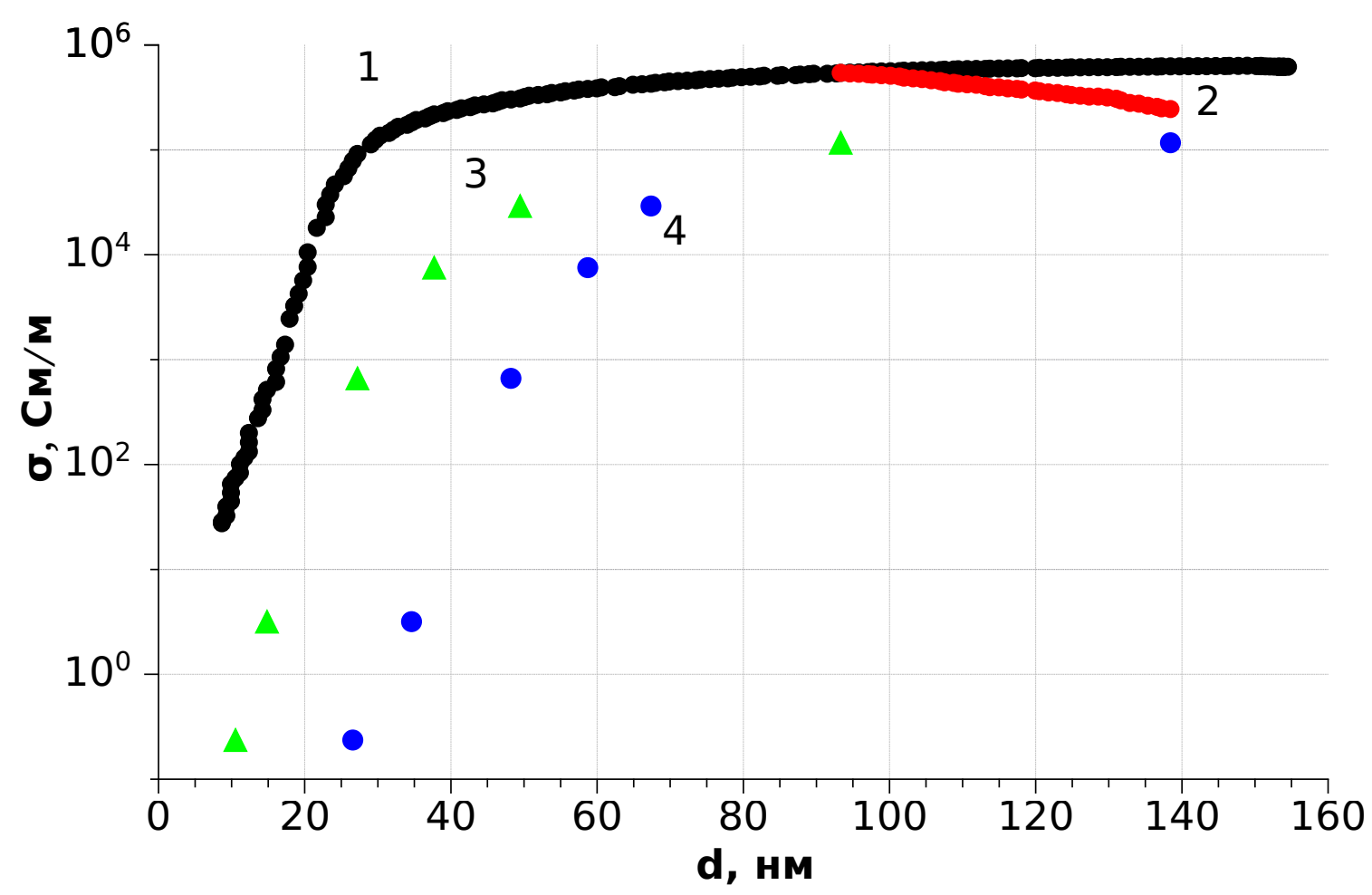


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости от толщины [1] для: 1 — плёнка Fe в вакууме; 2 — слой $(\text{BaF}_2)_y$ из плёнки $(\text{Fe})_x(\text{BaF}_2)_y$; 3 — слой $(\text{Fe})_x$ из состава $(\text{Fe})_x(\text{BaF}_2)_y$; 4 — плёнка $(\text{Fe})_x(\text{BaF}_2)_y$

Цель работы

Разработка и апробация эффективного расчётного метода для определения отражающих, пропускающих и поглощающих характеристик многокомпонентных неоднородных слоистых структур.

Сравнение с опытом

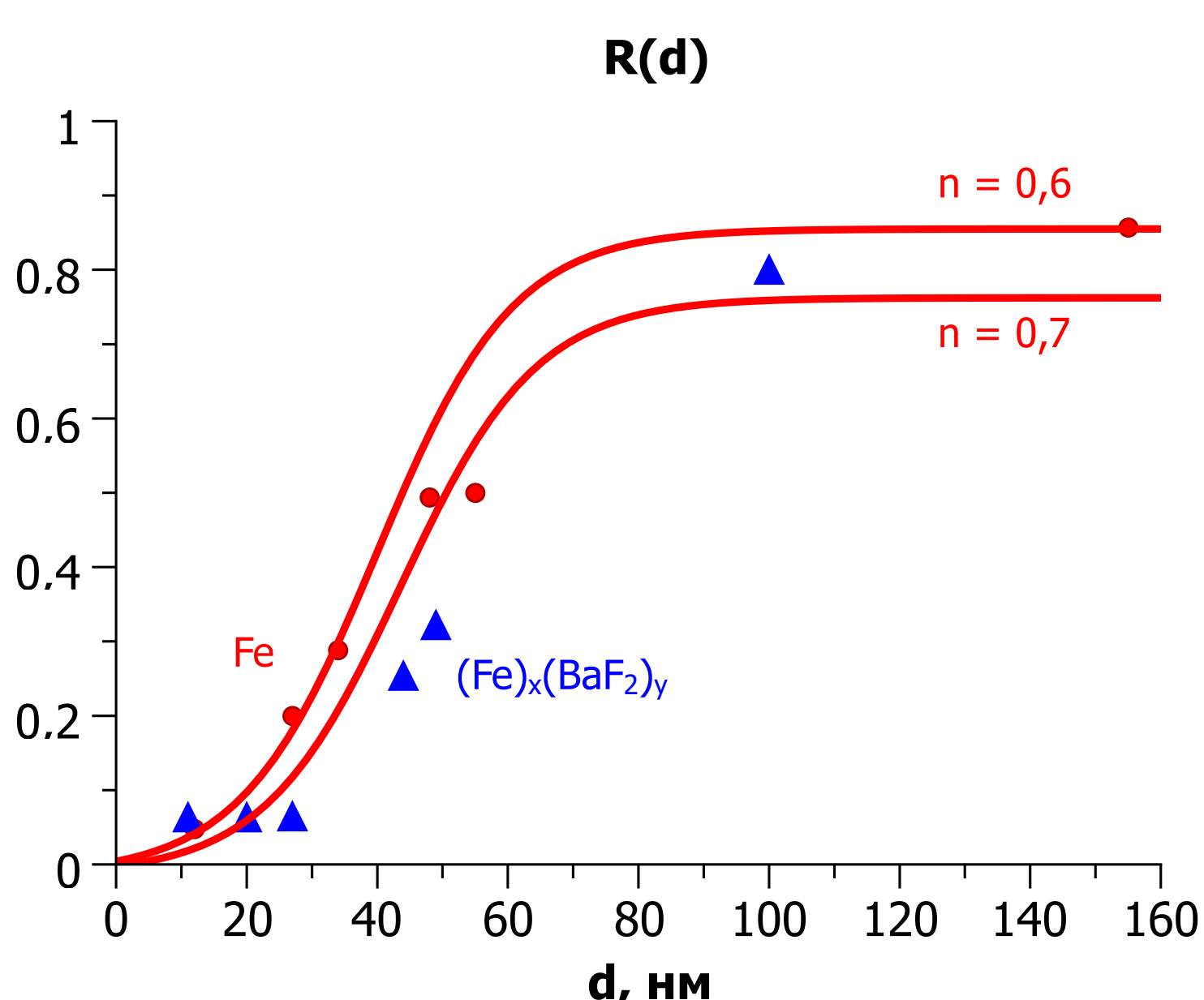


Рис. 12. Теоретические и экспериментальные зависимости коэффициента отражения от толщины слоя Fe при различных концентрациях включений

Модель объекта и используемые предположения

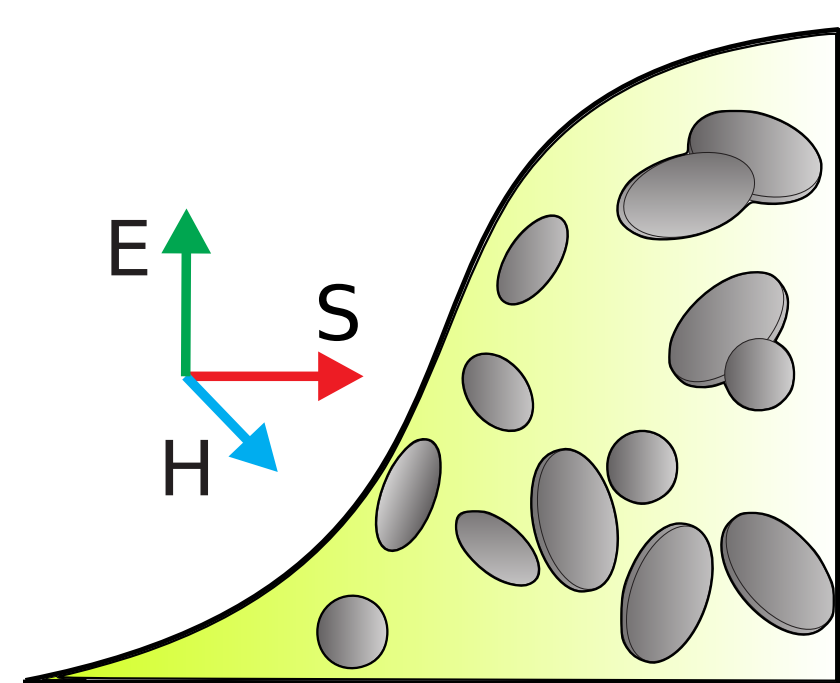


Рис. 3. Распространение электромагнитной волны в среде с неоднородностями

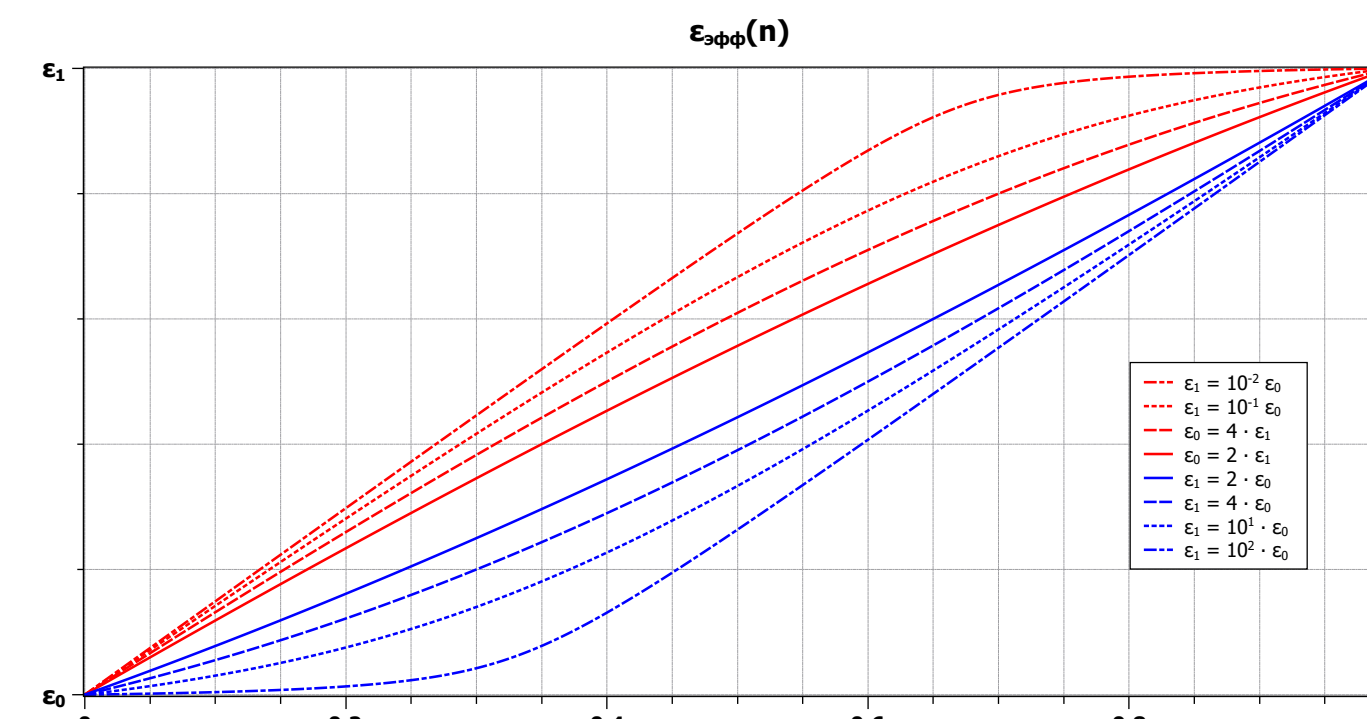


Рис. 4. Концентрационная зависимость эффективной диэлектрической проницаемости среды со сферическими неоднородностями в моделях Полдера — ван Сантена и фон Бруггемана

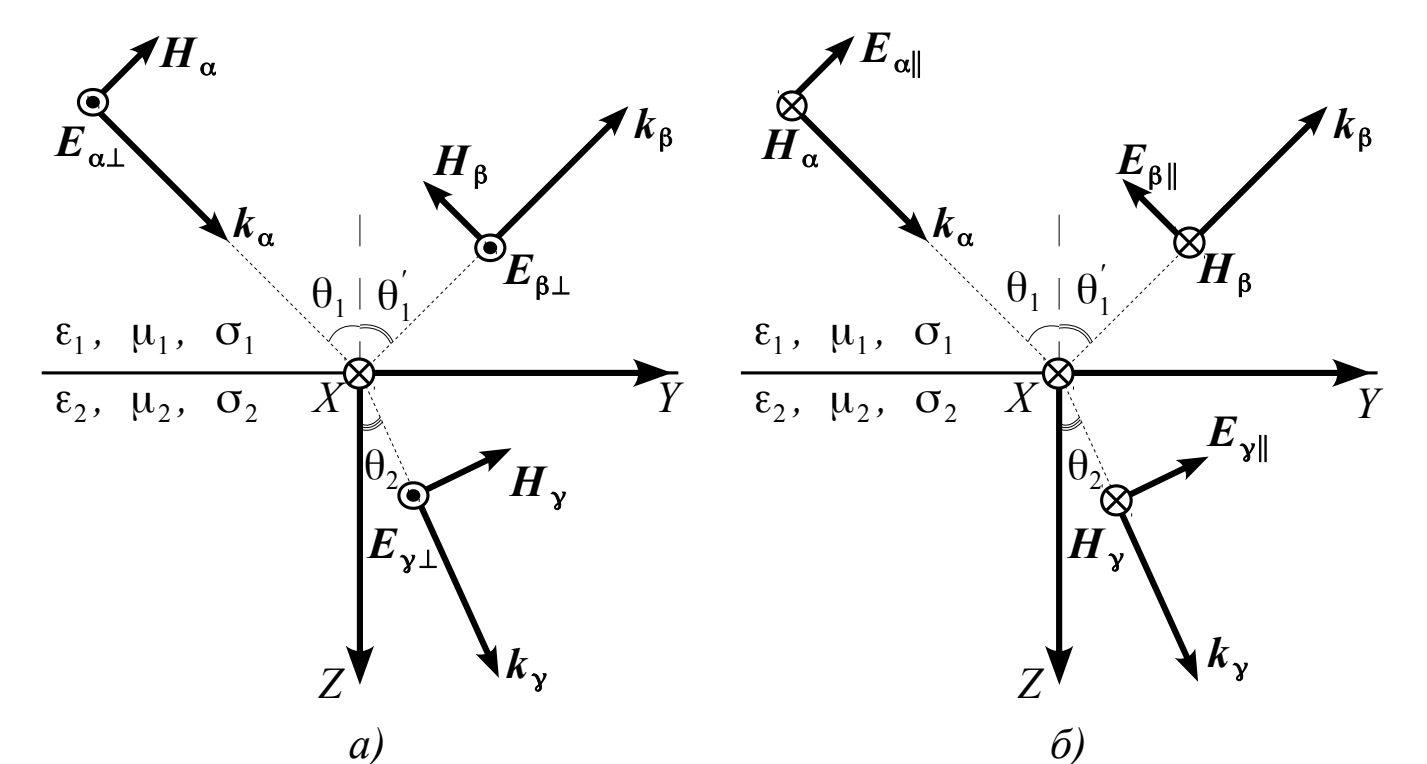


Рис. 5. Граница раздела двух сред

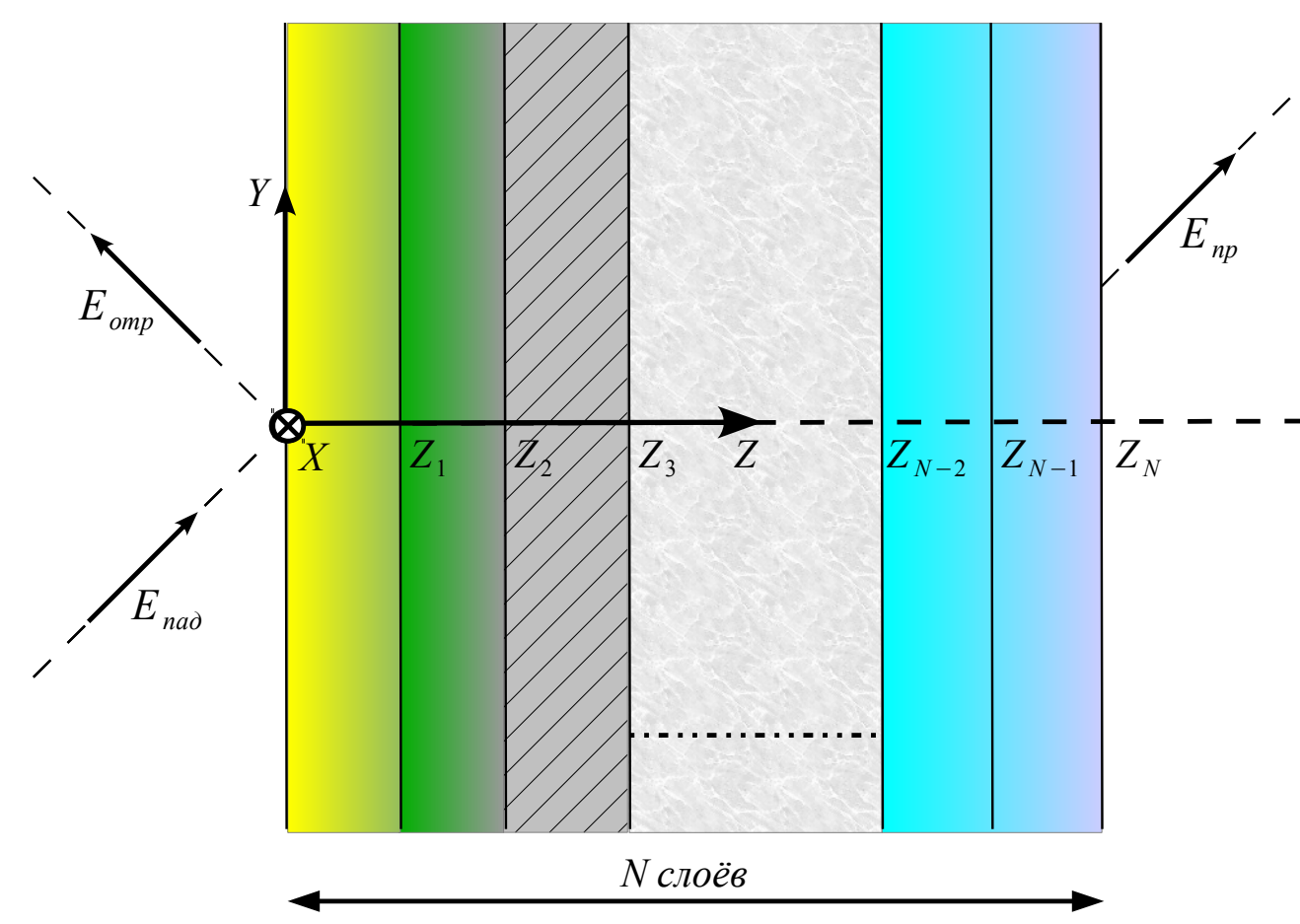


Рис. 6. Многослойная структура

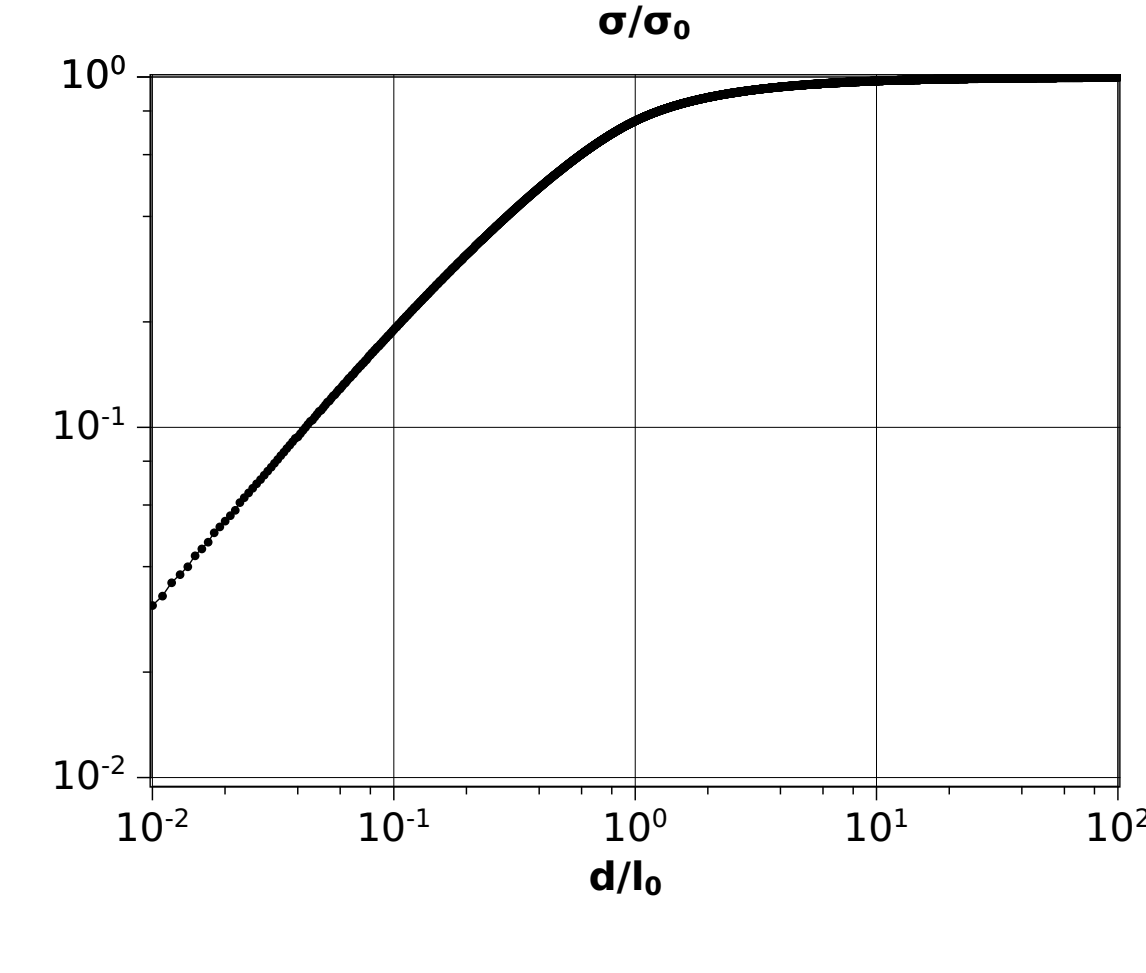


Рис. 7. Модель Каплана, учитывающая вклад рассеяния электронов на свободной поверхности в удельную проводимость плёнки

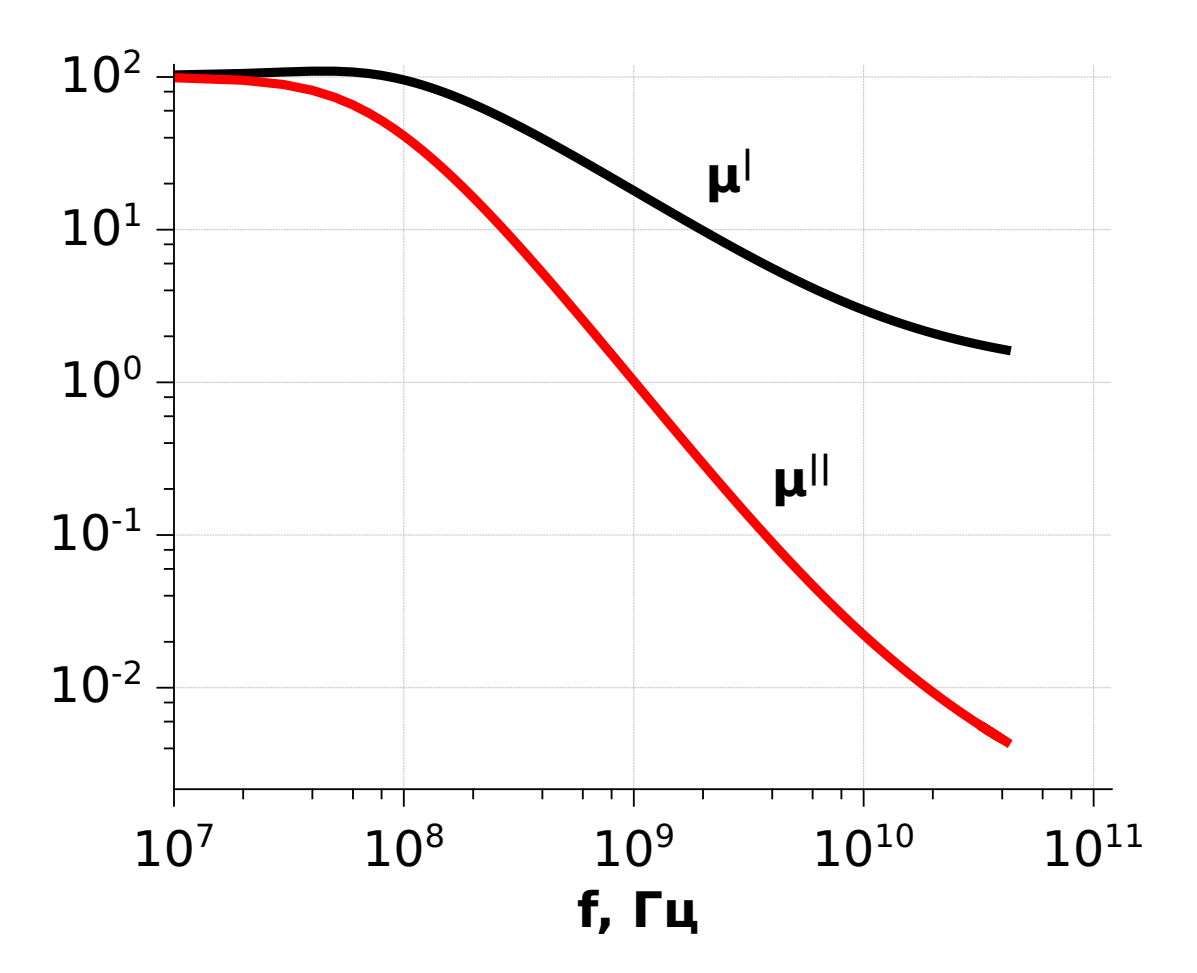


Рис. 8. Частотная дисперсия проницаемости в модели Киттеля

Расчётный метод и примеры вычислений

Первый этап. Определение волновых чисел k_j и углов преломления θ_j во всех $N + 1$ средах.

$$\begin{cases} k_j = \sqrt{\epsilon_j \mu_j} \frac{\omega}{c}, \\ \theta_j = \arcsin \left(\sqrt{\frac{\epsilon_{j-1} \mu_{j-1}}{\epsilon_j \mu_j}} \sin \theta_{j-1} \right), \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N + 1. \quad (1)$$

Второй этап. Вычисление коэффициентов r_j и t_j на каждой из $N + 1$ границ раздела $j = N, N - 1, \dots, 0$.

$$\begin{cases} r_j^{\perp, \parallel} = \frac{\zeta_{j+1}^{\perp, \parallel} - \chi_{j+1}^{\perp, \parallel} \zeta_j^{\perp, \parallel}}{\zeta_{j+1}^{\perp, \parallel} + \chi_{j+1}^{\perp, \parallel} \zeta_j^{\perp, \parallel}} e^{i2k_j d_j \cos \theta_j}, \\ t_j^{\perp, \parallel} = \frac{2\zeta_{j+1}^{\perp, \parallel}}{\zeta_{j+1}^{\perp, \parallel} + \chi_{j+1}^{\perp, \parallel} \zeta_j^{\perp, \parallel}} e^{ik_j d_j \cos \theta_j}, \\ r_j^{\perp, \parallel} = \frac{2\zeta_j^{\perp, \parallel}}{\zeta_j^{\perp, \parallel} + \chi_{j+1}^{\perp, \parallel} \zeta_{j+1}^{\perp, \parallel}} e^{ik_j d_j \cos \theta_j}, \\ t_j^{\perp, \parallel} = \frac{2\zeta_j^{\perp, \parallel}}{\zeta_j^{\perp, \parallel} + \chi_{j+1}^{\perp, \parallel} \zeta_{j+1}^{\perp, \parallel}} e^{ik_j d_j \cos \theta_j}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\zeta_j = \sqrt{\frac{\mu_j}{\epsilon_j}}, \quad \zeta_j^{\perp} = \frac{\zeta_j}{\cos \theta_j}, \quad \zeta_j^{\parallel} = \zeta_j \cos \theta_j.$$

$$R = |r_0|^2, \quad T = \frac{k_{N+1}}{k_0} |t_0|^2, \quad Q = 1 - (R + T).$$

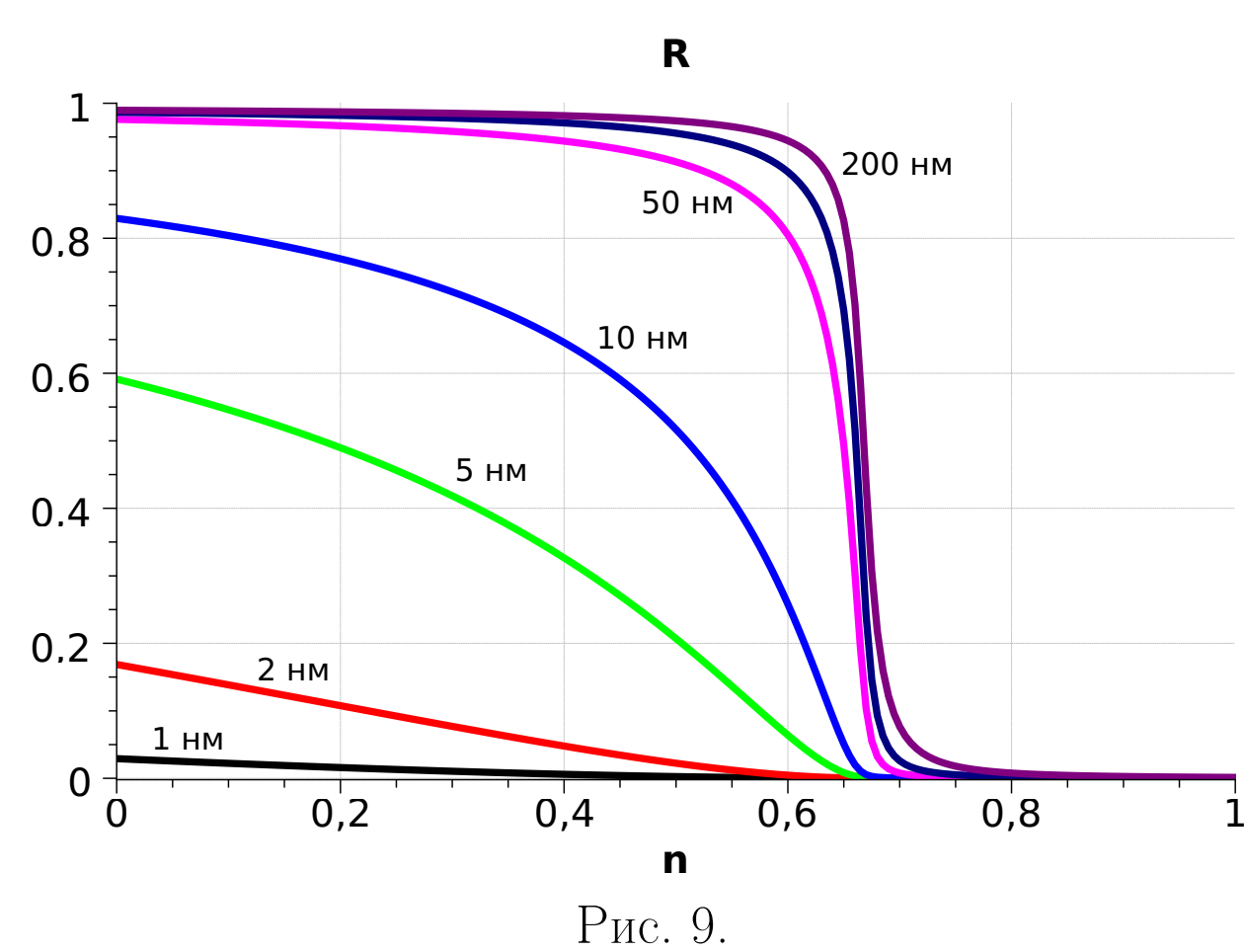


Рис. 9.

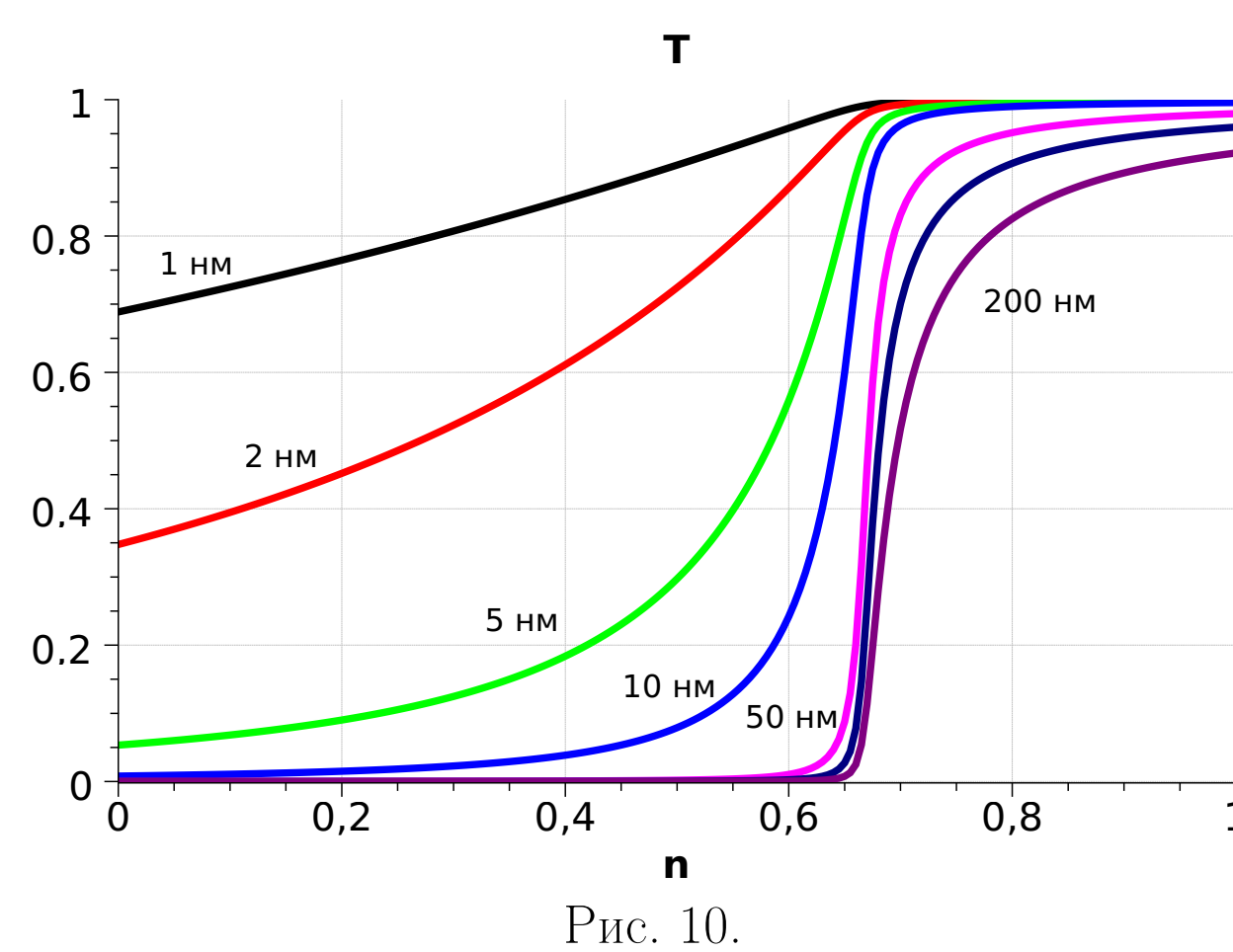


Рис. 10.

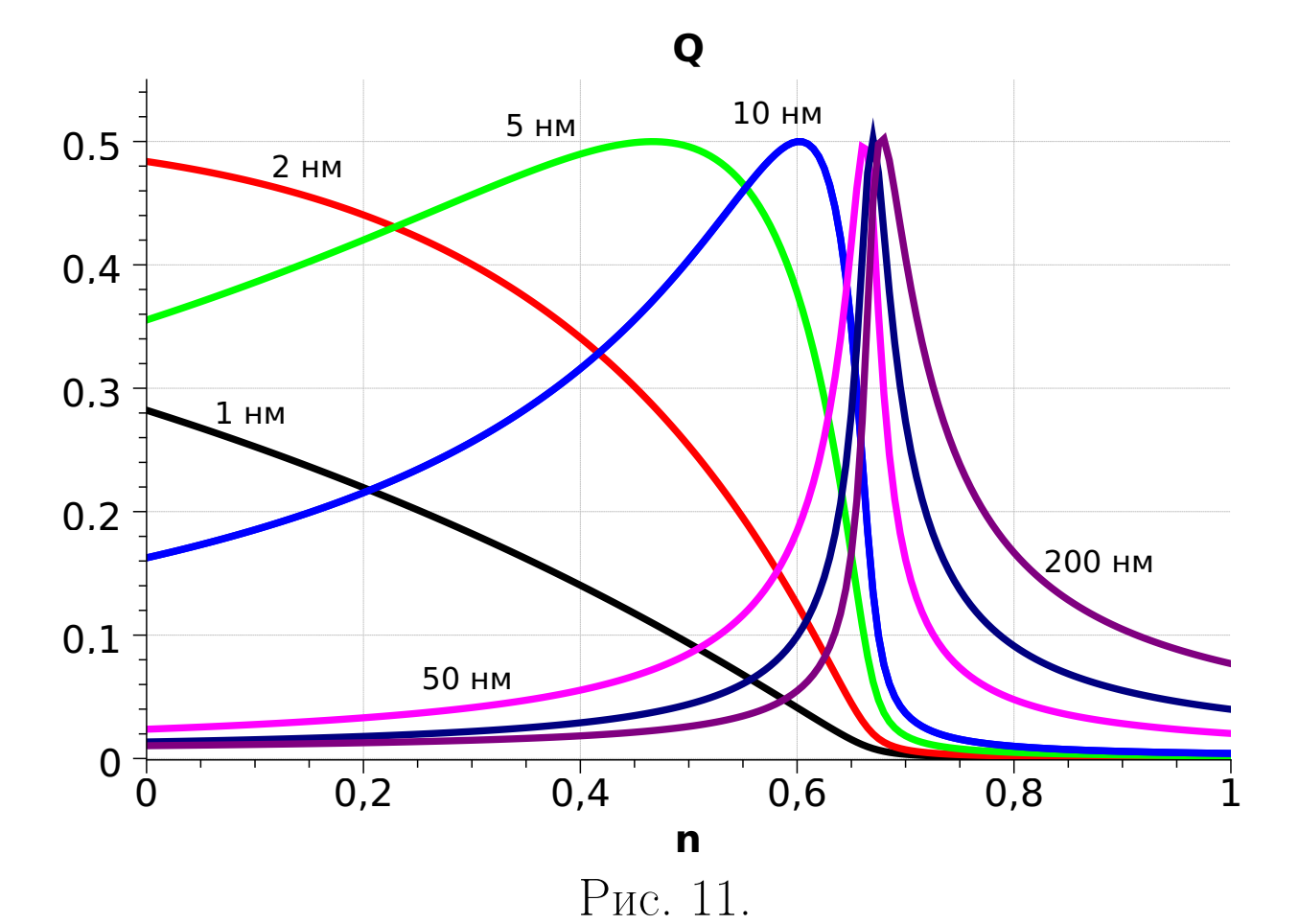


Рис. 11.

Заключение

Метод, разработанный в рамках данного исследования устойчиво работает с приемлемой точностью для расчёта размерных, частотных и угловых зависимостей коэффициентов отражения, прохождения и поглощения многослойных структур, которые можно считать слабо поглощающими, т. е. в тех случаях, когда мала проводимость слоёв. Для анализа результатов расчётов тестировались системы размера вплоть до нескольких сотен слоёв. Алгоритм даёт физически корректные результаты и для сильно поглощающих структур, но только в том случае, когда сильно поглощающий слой — единственный в системе.

Список литературы

- [1] Антоненко И.В., Котов Л.Н., Макаров П.А., Голубев Е.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80 (9). С. 134-140.
- [2] Макаров П.А. Дис. к.ф.-м.н. Челябинск: Челяб. гос. ун-в., апрель 2012.
- [3] Макаров П.А. // Вестник Сыкт. ун-в. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2016. Вып. 1 (21). С. 9-27.