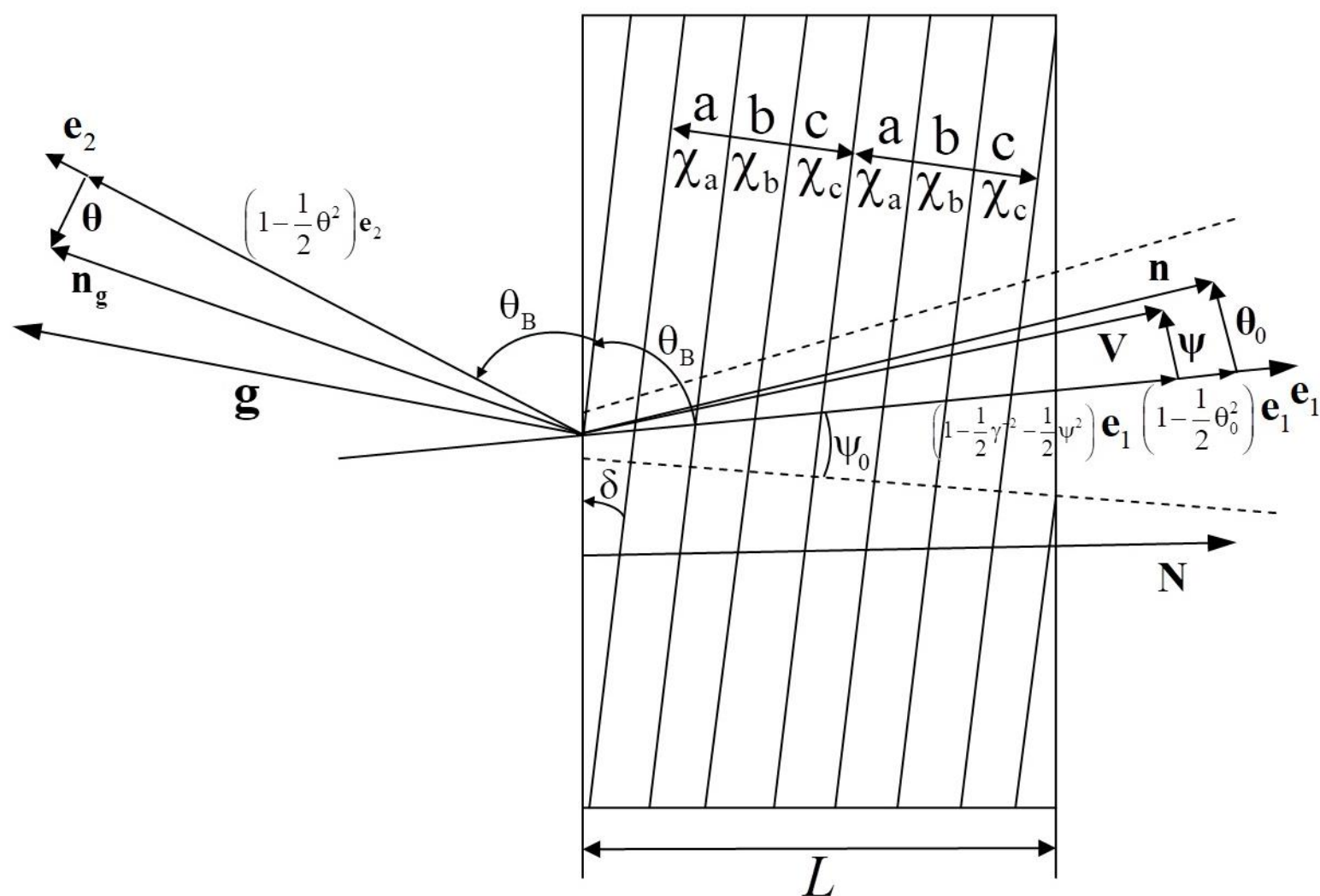


# КОГЕРЕНТНОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОНА В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СРЕДЕ С ТРЕМЯ СЛОЯМИ НА ПЕРИОДЕ

С. В. Блажевич<sup>1)</sup>, А.В. Носков<sup>1,2)</sup>, А.И. Чуева<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

<sup>2)</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Россия



Развита теория когерентного рентгеновского излучения, генерируемого релятивистским электроном в периодической слоистой среде с тремя различными слоями на периоде в геометрии рассеяния Брэгга. Рассматривается общий случай асимметричного рассеяния поля электрона на данной структуре, когда ее слои располагаются под углом к поверхности мишени. Получены и исследованы выражения, описывающие характеристики спектрально-угловой плотности когерентного рентгеновского излучения, представленной в виде суммы вкладов параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), дифрагированного переходного излучения (ДПИ) и их интерференции. Проведено исследование параметров динамического рассеяния и поглощения излучения в рассматриваемой периодической структуре.

Рис. 1 Геометрия процесса излучения

$$\chi(\omega, \mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{g}} \chi_{\mathbf{g}}(\omega) \exp(i\mathbf{g}\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{g}} \chi_{\mathbf{g}}(\omega) \exp(-igx), \quad \chi_0(\omega) = \frac{a}{T} \chi_a + \frac{b}{T} \chi_b + \frac{c}{T} \chi_c, \quad \text{— средняя диэлектрическая восприимчивость}$$

Получены действительная и мнимая части коэффициента разложения диэлектрической восприимчивости  $\chi_{\mathbf{g}}(\omega) = \chi'_{\mathbf{g}}(\omega) + i\chi''_{\mathbf{g}}(\omega)$  по векторам обратной решетки для трехслойной структуры:

$$|\chi'_{\mathbf{g}}| = \frac{2}{gT} \sqrt{\left( (\chi'_a - \chi'_b)(\chi'_a - \chi'_c) \sin^2\left(\frac{ga}{2}\right) + (\chi'_b - \chi'_a)(\chi'_b - \chi'_c) \sin^2\left(\frac{gb}{2}\right) + (\chi'_c - \chi'_a)(\chi'_c - \chi'_b) \sin^2\left(\frac{gc}{2}\right) \right)},$$

$$\chi''_{\mathbf{g}} = \frac{2}{gT} \sqrt{\left( (\chi''_a - \chi''_b)(\chi''_a - \chi''_c) \sin^2\left(\frac{ga}{2}\right) + (\chi''_b - \chi''_a)(\chi''_b - \chi''_c) \sin^2\left(\frac{gb}{2}\right) + (\chi''_c - \chi''_a)(\chi''_c - \chi''_b) \sin^2\left(\frac{gc}{2}\right) \right)},$$

Получено выражение для спектрально-угловой плотности ПРИ в периодической слоистой среде:

$$\omega \frac{d^2 N_{\text{ПРИ}}^{(s)}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2} \frac{\Omega^{(s)2}}{(\gamma^{-2} + (\theta_{\perp} - \psi_{\perp})^2 + (\theta_{\parallel} + \psi_{\parallel})^2 - \chi'_0)^2} R_{\text{ПРИ}}^{(s)},$$

$$R_{\text{ПРИ}}^{(s)} = \left| \frac{\Omega_+^{(s)} 1 - \exp(-ib^{(s)} \Delta_+^{(s)})}{\Delta_+^{(s)}} - \frac{\Omega_-^{(s)} 1 - \exp(-ib^{(s)} \Delta_-^{(s)})}{\Delta_-^{(s)}} \right|^2, \quad \text{— спектральная функция}$$

$$\Delta_{\pm}^{(s)} = \left( \xi^{(s)} - K^{(s)} - i\rho^{(s)} \frac{1+\varepsilon}{2} \right) \exp(-ib^{(s)} \Delta_+^{(s)}) - \left( \xi^{(s)} + K^{(s)} - i\rho^{(s)} \frac{1+\varepsilon}{2} \right) \exp(-ib^{(s)} \Delta_-^{(s)}), \quad \Omega_{\pm}^{(s)} = \varepsilon \left( (\sigma^{(s)} - i\rho^{(s)}) \cdot \exp(-ib^{(s)} \Delta_{\mp}^{(s)}) + \Delta_{\pm}^{(s)} \right)$$

$$\Delta_{\pm}^{(s)} = \frac{\xi^{(s)} \pm K^{(s)}}{\varepsilon} - \sigma^{(s)} + i \frac{\rho^{(s)}(\varepsilon - 1)}{2\varepsilon}$$

Получено выражение для спектрально-угловой плотности ДПИ в периодической слоистой среде:

$$\omega \frac{d^2 N_{\text{ДПИ}}^{(s)}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2} \Omega^{(s)2} \left( \frac{1}{\gamma^{-2} + (\theta_{\perp} - \psi_{\perp})^2 + (\theta_{\parallel} + \psi_{\parallel})^2} - \frac{1}{\gamma^{-2} + (\theta_{\perp} - \psi_{\perp})^2 + (\theta_{\parallel} + \psi_{\parallel})^2 - \chi'_0} \right)^2 R_{\text{ДПИ}}^{(s)},$$

$$R_{\text{ДПИ}}^{(s)} = \varepsilon^2 \left| \frac{\exp\left(-ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right) - \exp\left(ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right)}{\left(\xi^{(s)} - K^{(s)} - i\rho^{(s)} \frac{1+\varepsilon}{2}\right) \exp\left(-ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right) - \left(\xi^{(s)} + K^{(s)} - i\rho^{(s)} \frac{1+\varepsilon}{2}\right) \exp\left(ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right)} \right|^2,$$

Получено выражение для интерференции ДПИ в периодической слоистой среде:

$$\omega \frac{d^2 N_{\text{ИИТ}}^{(s)}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2} \frac{\Omega^{(s)2}}{\left(\gamma^{-2} + (\theta_{\perp} - \psi_{\perp})^2 + (\theta_{\parallel} + \psi_{\parallel})^2 - \chi'_0\right)^2} \left( \frac{1}{\gamma^{-2} + (\theta_{\perp} - \psi_{\perp})^2 + (\theta_{\parallel} + \psi_{\parallel})^2 - \chi'_0} - \frac{1}{\gamma^{-2} + (\theta_{\perp} - \psi_{\perp})^2 + (\theta_{\parallel} + \psi_{\parallel})^2} \right) R_{\text{ИИТ}}^{(s)},$$

$$R_{\text{ИИТ}}^{(s)} = 2\varepsilon \operatorname{Re} \left( \left( \frac{\Omega_+^{(s)}}{\Delta_+^{(s)}} \cdot \frac{1 - \exp(-ib^{(s)} \Delta_+^{(s)})}{\Delta_+^{(s)}} - \frac{\Omega_-^{(s)}}{\Delta_-^{(s)}} \cdot \frac{1 - \exp(-ib^{(s)} \Delta_-^{(s)})}{\Delta_-^{(s)}} \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left( \frac{\exp\left(-ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right) - \exp\left(ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right)}{\left(\xi^{(s)} - K^{(s)} - i\rho^{(s)} \frac{1+\varepsilon}{2}\right) \exp\left(-ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right) - \left(\xi^{(s)} + K^{(s)} - i\rho^{(s)} \frac{1+\varepsilon}{2}\right) \exp\left(ib^{(s)} \frac{K^{(s)}}{\varepsilon}\right)} \right)^* \right),$$

Введены обозначения:

$$K^{(s)} = \sqrt{\xi^{(s)2} - \varepsilon - i\rho^{(s)}((1+\varepsilon)\xi^{(s)} - 2\kappa^{(s)}\varepsilon) - \rho^{(s)2} \left( \frac{(1+\varepsilon)^2}{4} - \kappa^{(s)2}\varepsilon \right)}, \quad \xi^{(s)}(\omega) = \eta^{(s)}(\omega) + \frac{1+\varepsilon}{2v^{(s)}}, \quad \varepsilon = \frac{\sin(\theta_B - \delta)}{\sin(\theta_B + \delta)},$$

$$\eta^{(s)}(\omega) = \frac{2\pi^2 n^2}{T^2 \omega_B} L_{\text{ext}}^{(s)} \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_B} \left( 1 - \theta_{\parallel} \sqrt{\frac{T^2 \omega_B^2}{\pi^2 n^2} - 1} \right) \right), \quad \sigma^{(s)} = \frac{1}{|\chi'_g| C^{(s)}} \left( \gamma^{-2} + (\theta_{\perp} - \psi_{\perp})^2 + (\theta_{\parallel} + \psi_{\parallel})^2 - \chi'_0 \right)$$

Параметр  $v^{(s)}$ , принимающий значения в промежутке  $0 \leq v^{(s)} \leq 1$ , определяет степень отражения поля от периодической слоистой структуры, которая обуславливается характером интерференции волн, отраженных от разных плоскостей: конструктивным ( $v^{(s)} \approx 1$ ) или деструктивным ( $v^{(s)} \approx 0$ ).

$$v^{(s)} = \frac{C^{(s)} \chi'_g}{\chi'_0} = \frac{2C^{(s)}}{g} \sqrt{\frac{(\chi'_a - \chi'_b)(\chi'_a - \chi'_c) \sin^2\left(\frac{ga}{2}\right) + (\chi'_b - \chi'_a)(\chi'_b - \chi'_c) \sin^2\left(\frac{gb}{2}\right) + (\chi'_c - \chi'_a)(\chi'_c - \chi'_b) \sin^2\left(\frac{gc}{2}\right)}{|a\chi'_a + b\chi'_b + c\chi'_c|}},$$

Параметр поглощения  $\rho^{(s)}$  может быть представлен как отношение длины экстинкции  $L_{\text{ext}}^{(s)}$  к длине поглощения  $L_{\text{abs}}$

рентгеновских волн в периодической слоистой среде:  $\rho^{(s)} = \frac{L_{\text{ext}}^{(s)}}{L_{\text{abs}}}$ .  $L_{\text{ext}}^{(s)} = \frac{1}{C^{(s)} \omega |\chi'_g|}$ ,  $L_{\text{abs}} = \frac{1}{\omega \chi''_0}$

$$\rho^{(s)} = \left| \frac{\chi_0''}{C^{(s)} \chi_g'} \right| = \frac{g(a\chi_a'' + b\chi_b'' + c\chi_c'')}{2C^{(s)} \sqrt{\left( (\chi_a' - \chi_b')(\chi_a' - \chi_c') \sin^2\left(\frac{ga}{2}\right) + (\chi_b' - \chi_a')(\chi_b' - \chi_c') \sin^2\left(\frac{gb}{2}\right) + (\chi_c' - \chi_a')(\chi_c' - \chi_b') \sin^2\left(\frac{gc}{2}\right) \right)}}$$

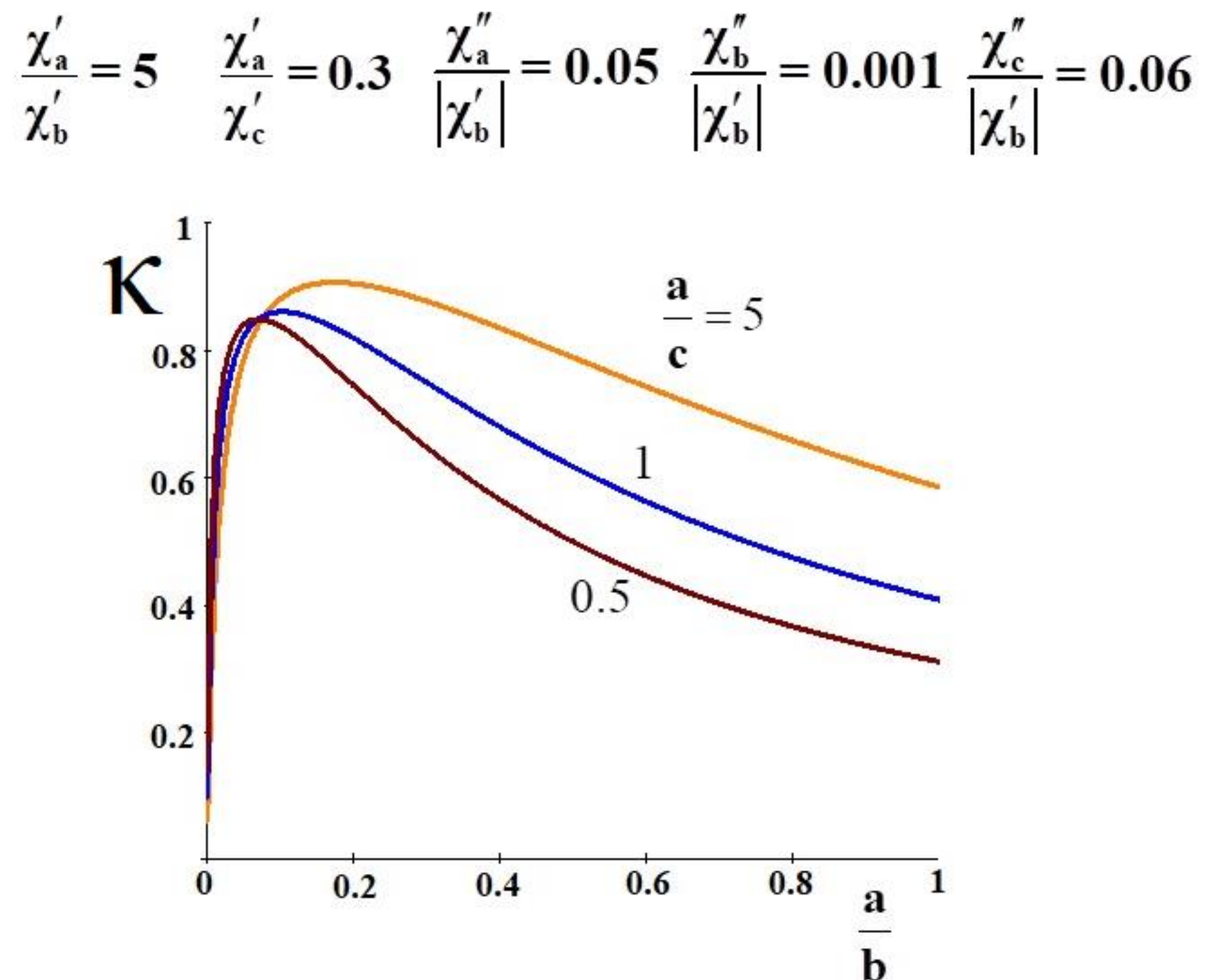
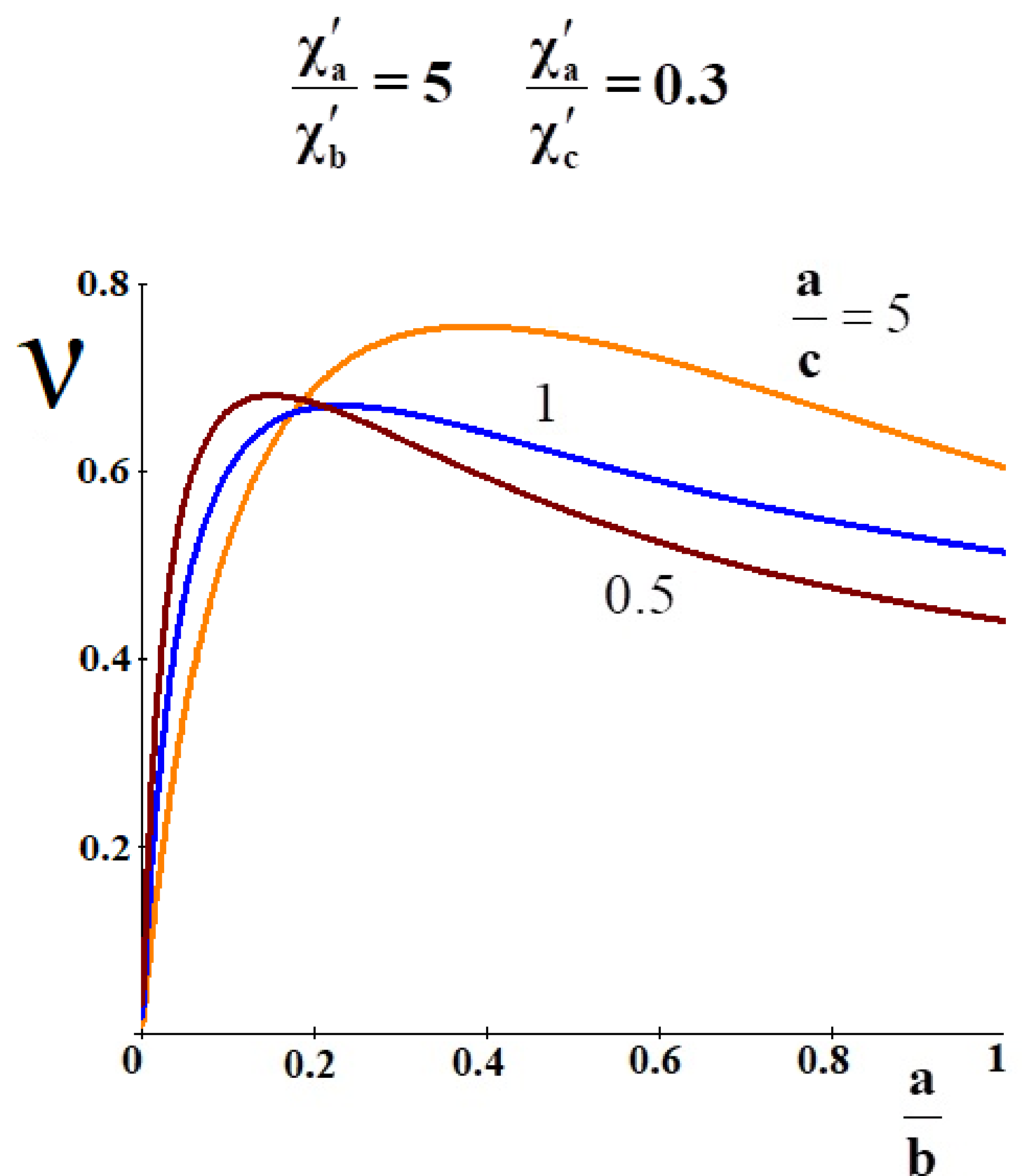
Параметр  $\kappa^{(s)}$  определяет степень проявления эффекта аномального низкого фотопоглощения (эффекта Бормана) в прохождении рентгеновских фотонов через периодическую слоистую структуру. Необходимым условием проявления эффекта Бормана, как для кристаллической, так и для периодической слоистой структуры, является  $\kappa^{(s)} \approx 1$ .

$$\kappa^{(s)} = \frac{C^{(s)} \chi_g''}{\chi_0''} = \frac{2C^{(s)}}{g} \frac{\sqrt{\left( (\chi_a'' - \chi_b'')(\chi_a'' - \chi_c'') \sin^2\left(\frac{ga}{2}\right) + (\chi_b'' - \chi_a'')(\chi_b'' - \chi_c'') \sin^2\left(\frac{gb}{2}\right) + (\chi_c'' - \chi_a'')(\chi_c'' - \chi_b'') \sin^2\left(\frac{gc}{2}\right) \right)}}{|a\chi_a'' + b\chi_b'' + c\chi_c''|}$$

### Численные расчеты

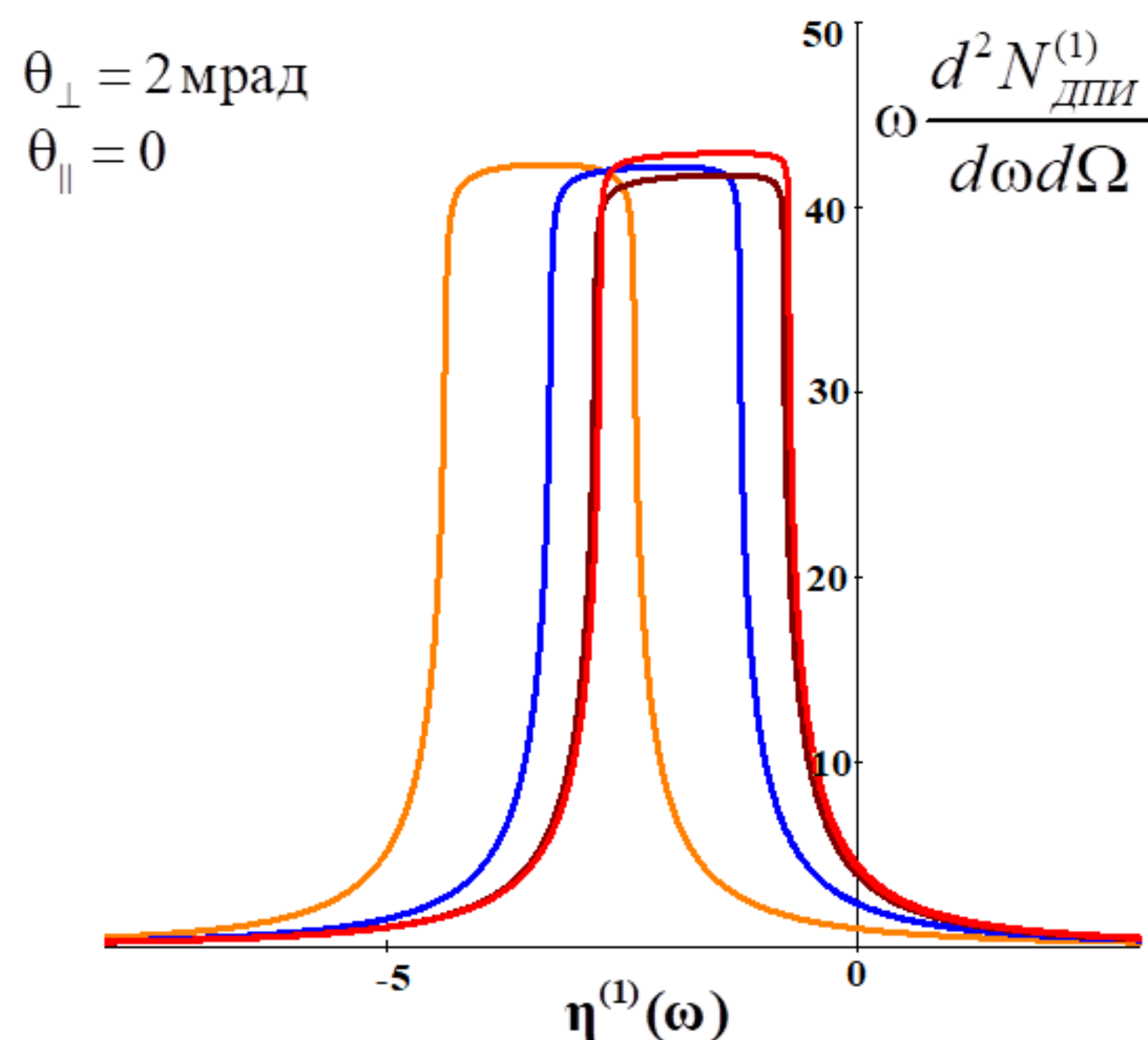
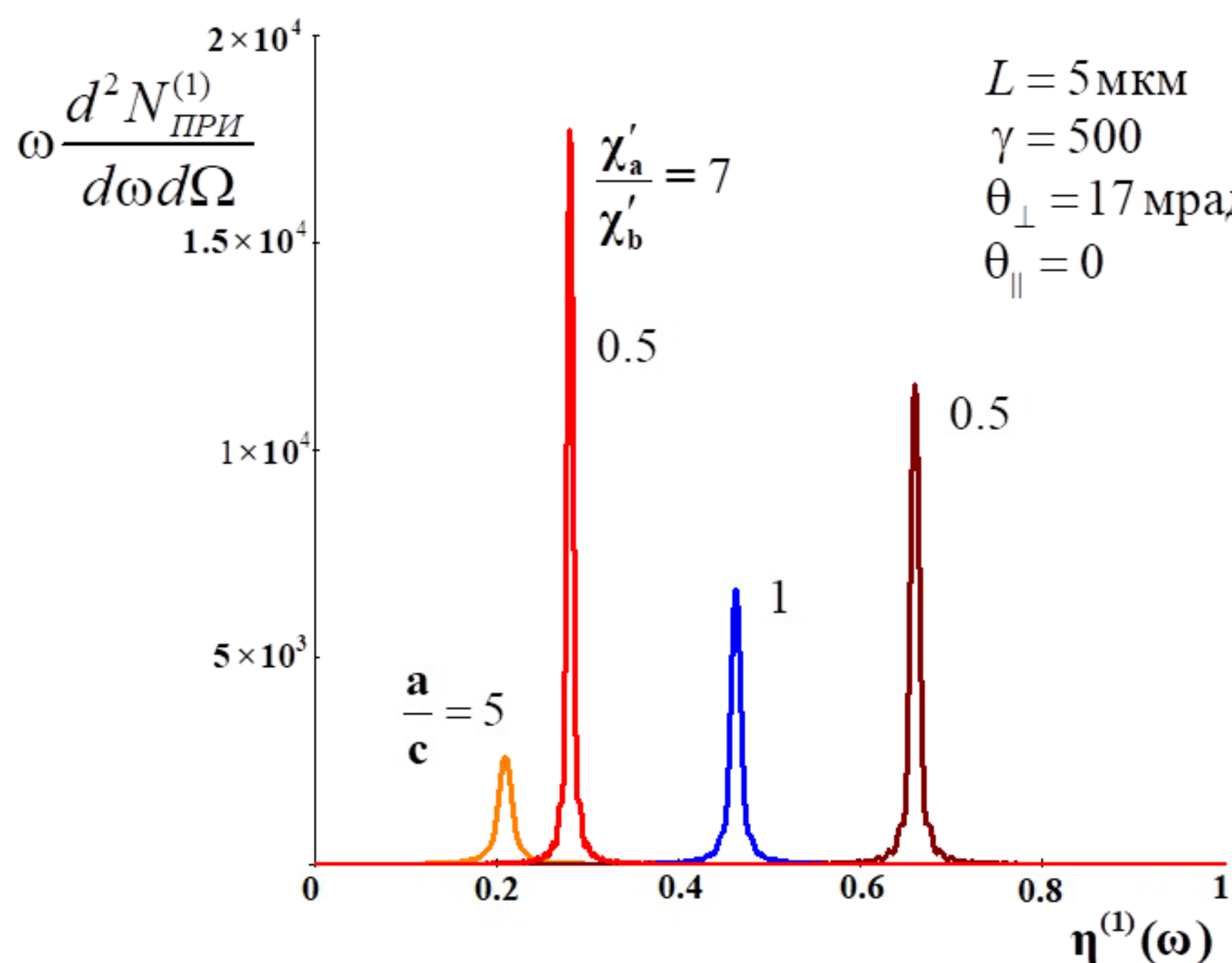
Рассмотрим трехслойную структуру, для определенности возьмем второй слой углерод С. Положим угол Брэгга  $\theta_B = 2.25^\circ$ , при этом частота Брэгга  $\omega_B = 8$  кэВ, период  $T = 0.002$  мкм, диэлектрическая восприимчивость углерода  $\chi_b' = -2.26 \cdot 10^{-5}$ .

Зависимость параметров динамического рассеяния от соотношения слоев  $\frac{a}{b}$



## Спектрально-угловые плотности ПРИ и ДПИ для определенных параметров

$$\frac{\chi'_a}{\chi'_b} = 5 \quad \frac{\chi'_a}{\chi'_c} = 0.3 \quad \frac{\chi''_a}{|\chi'_b|} = 0.05 \quad \frac{\chi''_b}{|\chi'_b|} = 0.001 \quad \frac{\chi''_c}{|\chi'_b|} = 0.06$$



### Заклучение

Развита теория когерентного рентгеновского излучения, генерируемого релятивистским электроном в периодической слоистой среде с тремя различными слоями на периоде в геометрии рассеяния Брэгга.

Получены и исследованы выражения, описывающие характеристики спектрально-угловой плотности когерентного рентгеновского излучения, представленной в виде суммы вкладов параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), дифрагированного переходного излучения (ДПИ) и их интерференции.

Проведено исследование параметров динамического рассеяния и поглощения излучения в рассматриваемой периодической структуре с тремя различными слоями на периоде.