К.В. Жариков, И.Г. Захарова, В.Ф. Марченко

ОТРАЖЕНИЕ И ТУННЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В ЗАПРЕЩЕННОЙ ПОЛОСЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Доклад состоит из двух частей

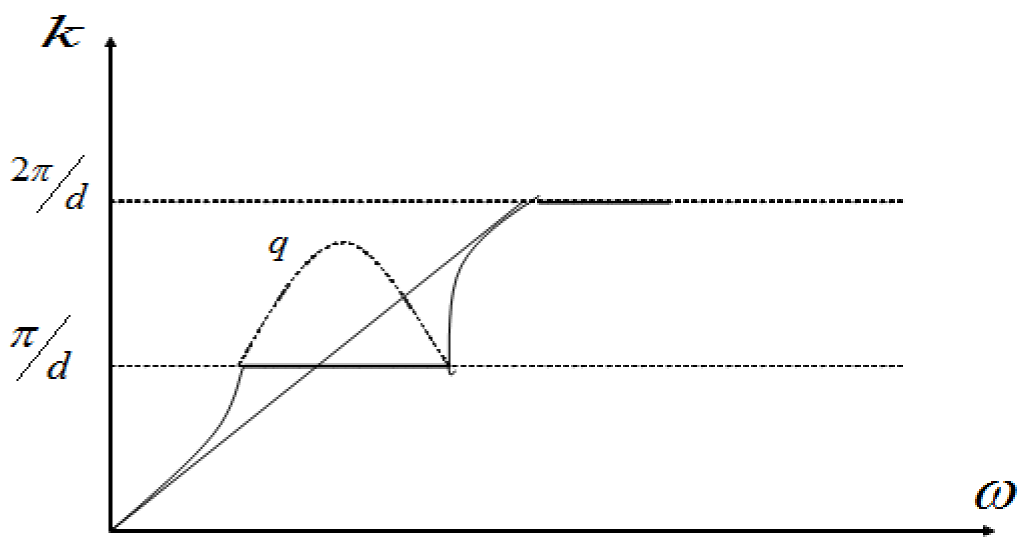
а) Форма и временной сдвиг при отражении гауссова импульса, падающего на периодическую структуру с частотой, лежащей в первой запрещенной полосе

б) Определение времени прохождения импульса через одномерный фотонный кристалл конечной толщины

Падение импульса на фотонный кристалл

$$n(z) = n_0\left[1 + n_1\cos(Kz)\right], \quad n_1 \ll n_0$$

$$k = \frac{\pi}{d} + iq$$



Качественная зависимость k и q от частоты.

$$q = \sqrt{æ^2 - \delta^2}$$

$$\delta = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon} - \frac{\pi}{d}$$

Спектральный метод

$$E_{отр}(t,0) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega, l)\Phi(\omega)\exp(-i\omega t)d\omega$$

$$E_{прош}(t,l) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\omega, l)\Phi(\omega)\exp(-i\omega t + ikl)d\omega$$

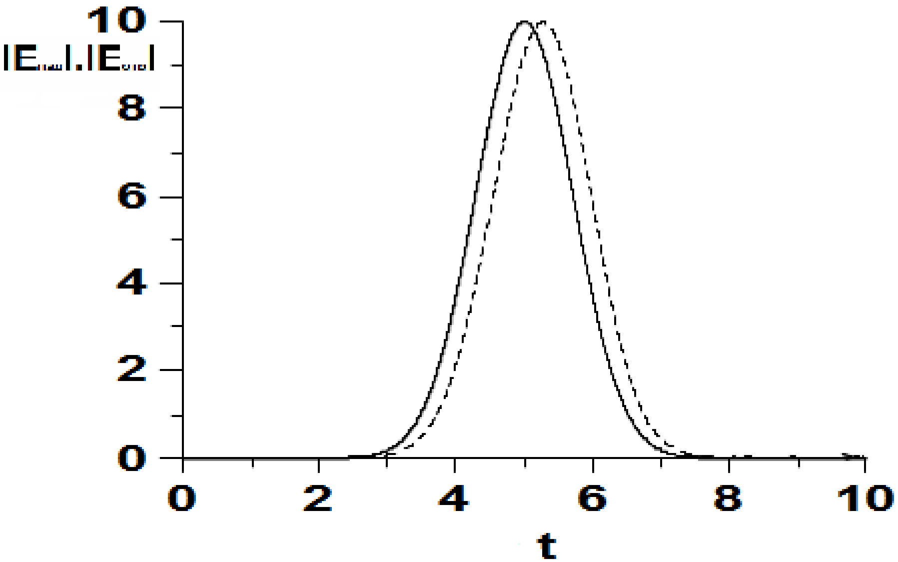
$$R(\omega, l) = \frac{E_{отр}(\omega, l)}{E_{пад}(\omega)} = \frac{i æ \,\mathrm{sh}(ql)}{q\,\mathrm{ch}(ql) - i\delta\,\mathrm{sh}(ql)}$$ - коэффициент отражения

$$q = \sqrt{æ^2 - \delta^2} \qquad \delta = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon} - \frac{\pi}{d}$$

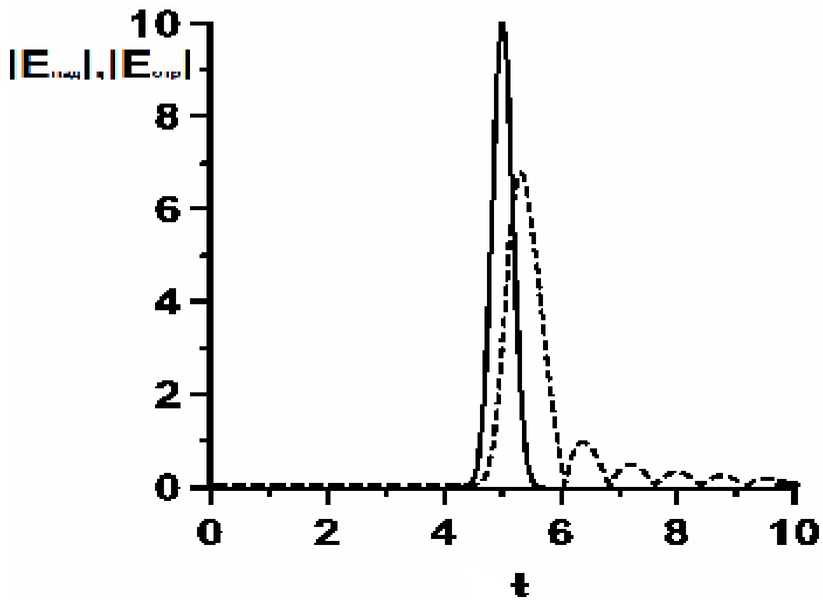
$$T(\omega, l) = \frac{E_{прош}(\omega, l)}{E_{пад}(\omega)} = \frac{q\,e^{-i\frac{\pi}{d}l}}{q\,\mathrm{ch}(ql) - i\delta\,\mathrm{sh}(ql)}$$ - коэффициент прохождения

Форма отраженного импульса

$$R = |R| e^{i\psi} \qquad \tau_g = \frac{\partial \psi_R}{\partial \omega}$$

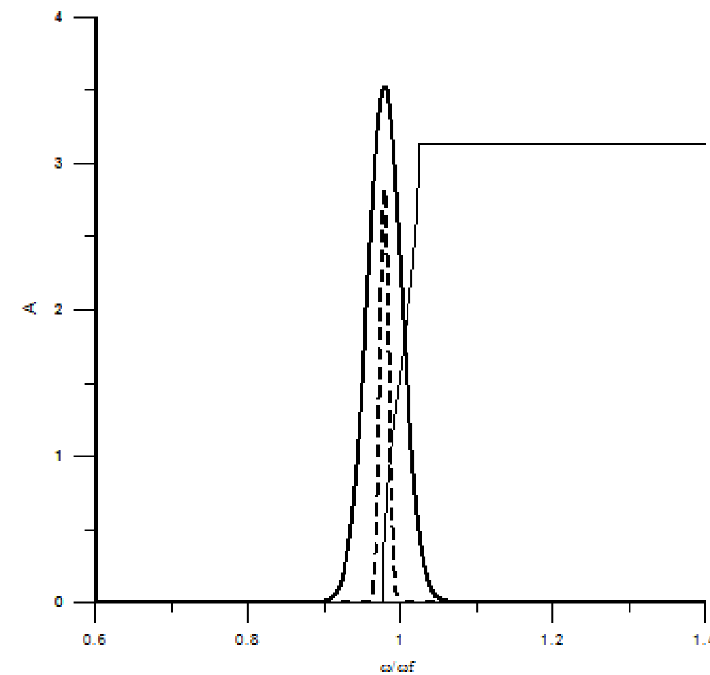


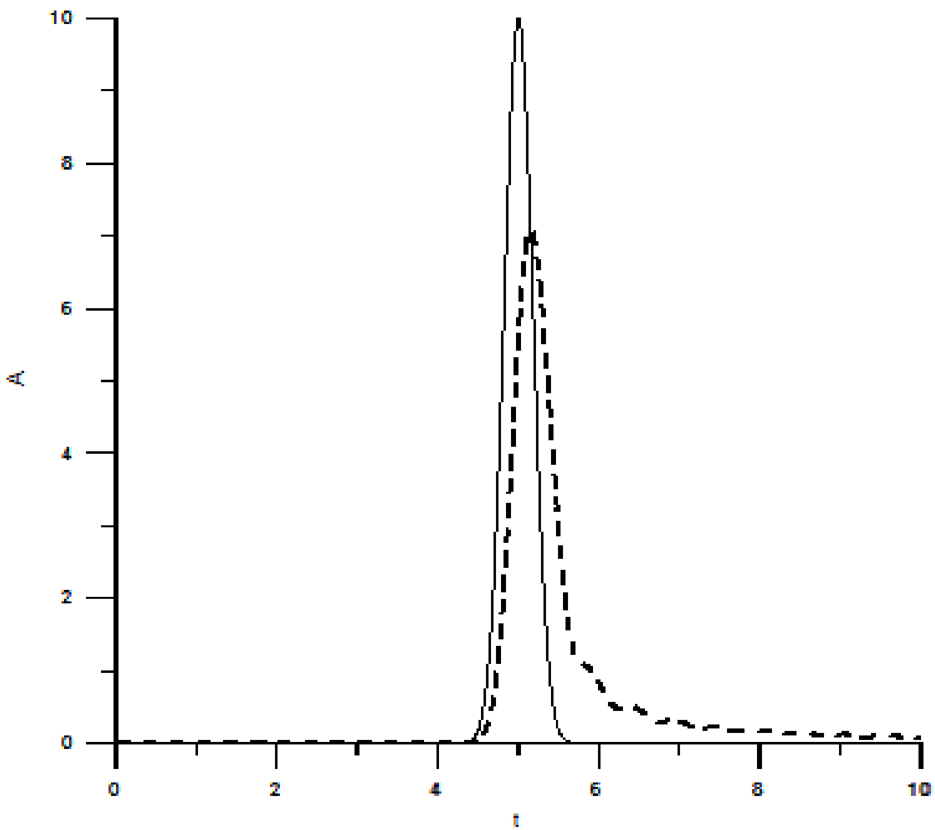
Спектр целиком внутри полосы

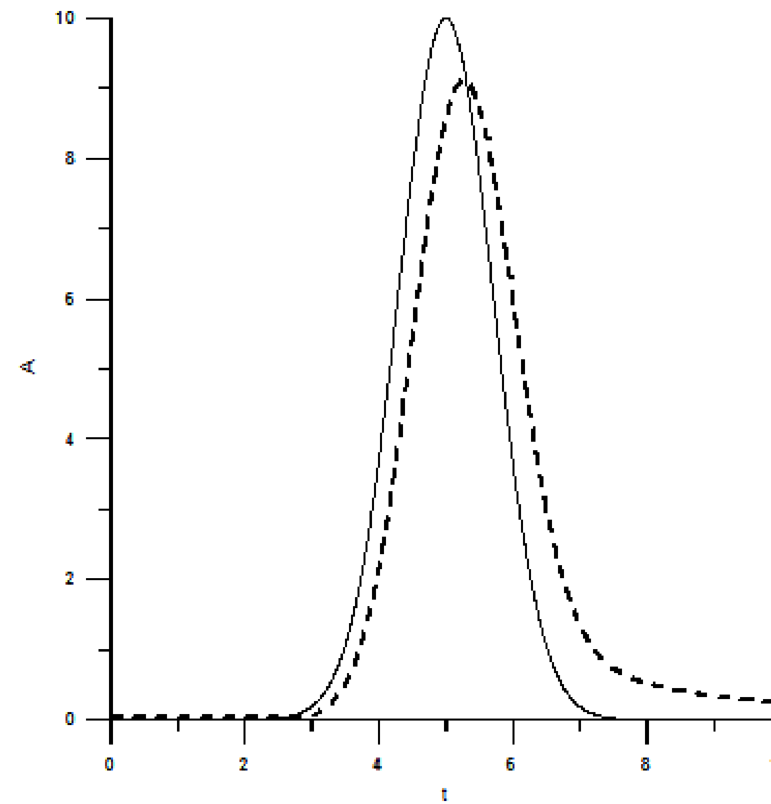


Спектр превосходит ширину полосы

Отраженный импульс для спектра, лежащего на границе запрещенной полосы







Эффект Хартмана

1962 г. Хартман получает соотношение для квантового туннелирования частицы под барьером.

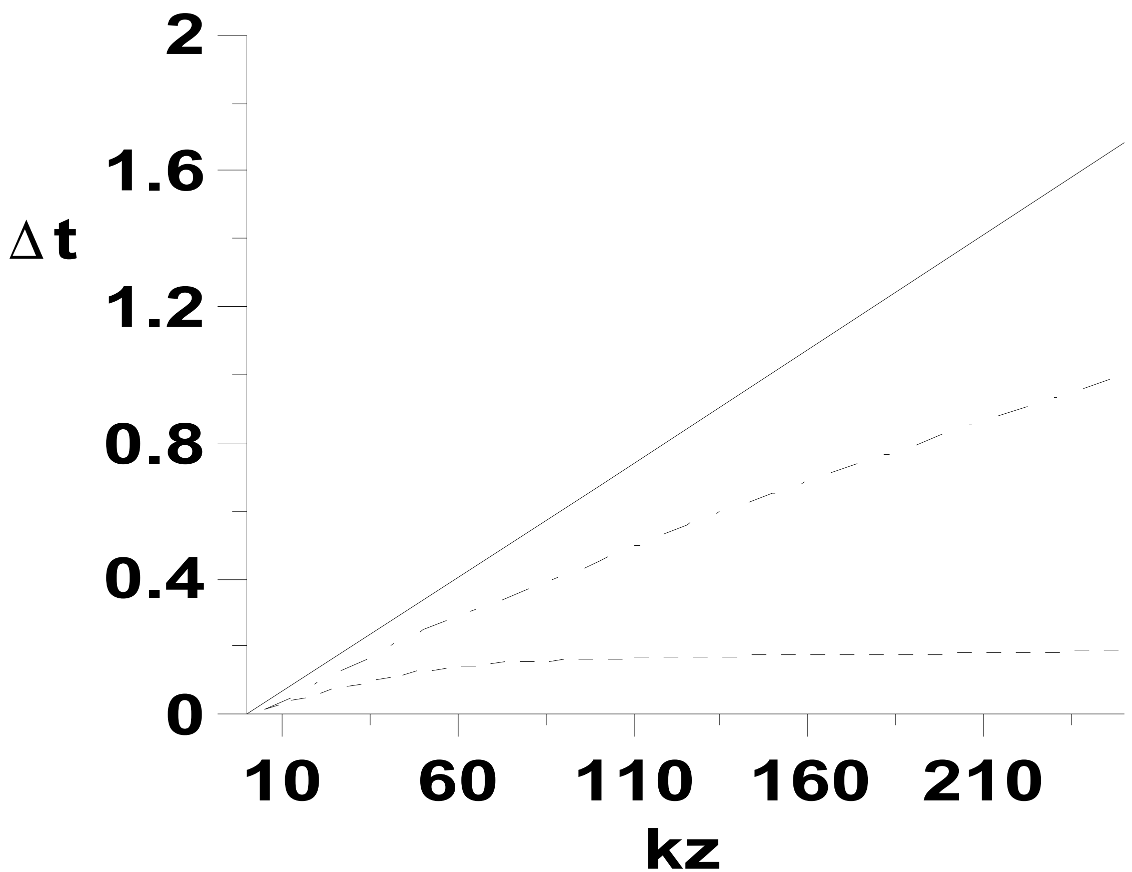
$$\tau_p = \frac{\hbar}{\sqrt{E(U_0 - E)}}$$

Формальное сходство уравнений Шредингера и Гельмгольца. Проверка эффекта на классическом туннелировании световых импульсов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ

$$R = |R| e^{i\psi} \qquad \psi_T = \psi_R + \frac{\pi}{2} \qquad \tau_g = \frac{\partial \psi_T}{\partial \omega} = \frac{\partial \psi_R}{\partial \omega}$$

Эффект Хартмана



Полное поле внутри фотонного кристалла

Метод связанных уравнений

$$\frac{i}{v}\frac{\partial E_1}{\partial t} + i\frac{\partial E_1}{\partial z} + \Delta E_1 + \kappa E_2 = 0$$

$$\frac{i}{v}\frac{\partial E_2}{\partial t} - i\frac{\partial E_2}{\partial z} + \Delta E_2 + \kappa E_1 = 0$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_o}}$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\Omega}{v} + \Delta$$

$$E_1(0) = E_{10}, E_2(l) = 0$$

$$q = \pm\sqrt{\kappa^2 - \bar{\Delta}^2}$$

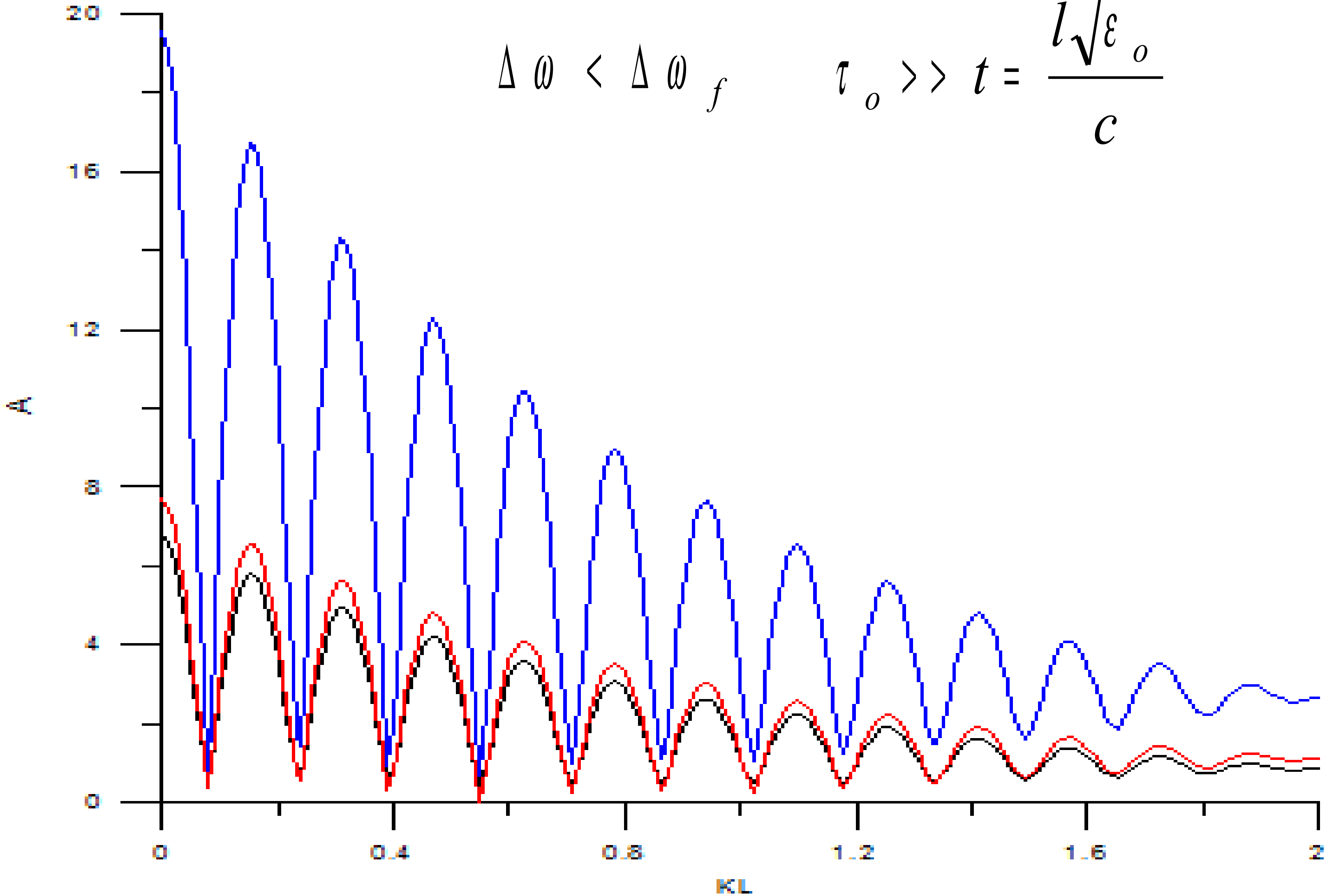
$$E_1, E_2 \sim e^{-i\Omega t} \qquad E_1, E_2 \sim e^{qz}$$

$$E_1 = E_{10}\frac{q\,ch\,q(z-l) + i\bar{\Delta}\,sh\,q(z-l)}{q\,ch\,ql - i\bar{\Delta}\,sh\,ql}$$

$$E_2 = -iE_{10}\kappa\frac{sh\,q(z-l)}{q\,ch\,ql - i\bar{\Delta}\,sh\,ql}$$

Стоячая волна внутри фотонного кристалла

для трех моментов времени в запрещенной полосе



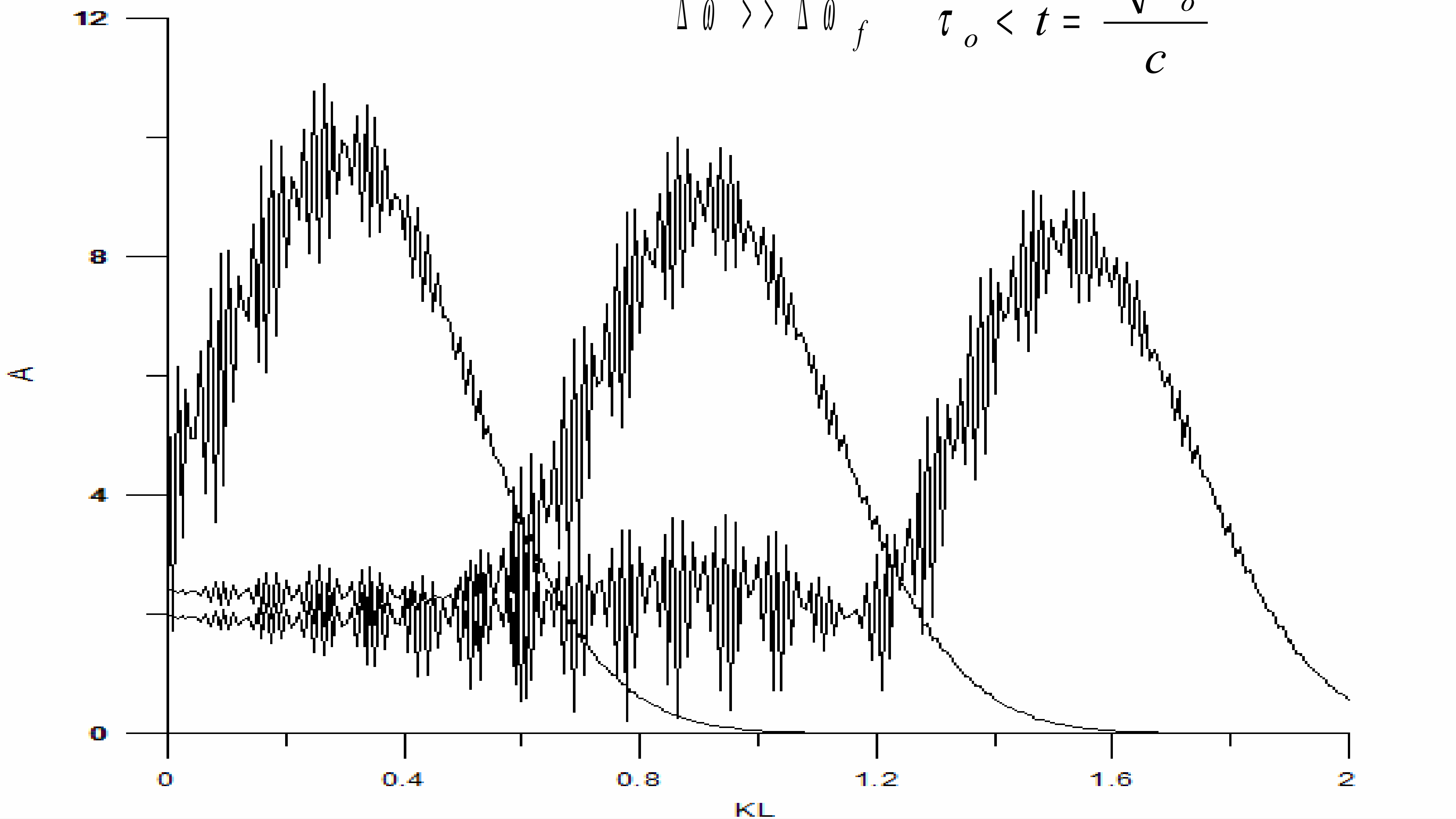
$$\Delta\omega < \Delta\omega_f \qquad \tau_o >> t = \frac{l\sqrt{\varepsilon_o}}{c}$$

$$\kappa = 0.05$$

Вид полного поля внутри кристалла,

для 3 последовательных моментов времени при $r = 0.005$

$$\Delta\omega \gg \Delta\omega_f \qquad \tau_o < t = \frac{l\sqrt{\varepsilon_o}}{c}$$



Выводы

1. Получены форма и спектр отраженных и прошедших импульсов для различных случаев положения и ширины спектра входного импульса
2. Продемонстрирован эффект Хартмана и условия его наблюдения:
а) если спектр падающего импульса целиком лежит внутри запрещенной полосы, то кристалл ведет себя как сосредоточенный реактивный элемент и вводить групповую скорость физически не оправдано
б) если длительность импульса меньше времени его прохождения через слой, то спектр импульса оказывается шире частотной брэгговской полосы и эффект Хартмана не наблюдается (групповая скорость всегда меньше фазовой)