

Взаимодействие электромагнитных Е-волн с одномерным металло-диэлектрическим фотонным кристаллом

Н.В. Зверев, А.А. Юшканов

Московский государственный областной университет

Исследовано взаимодействие электромагнитных Е-волн с одномерным фотонным кристаллом из N одинаковых параллельных плоских металлических слоёв толщиной d_1 , между которыми расположены одинаковые слои толщиной d_2 из прозрачных диэлектриков с диэлектрической проницаемостью ε_2 . Данный фотонный кристалл находится между двумя прозрачными диэлектрическими средами с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_3 .

Электромагнитная Е-волна (вектор \mathbf{E} лежит в плоскости падения) падает со стороны среды с ε_1 на металлическую поверхность фотонного кристалла под углом θ . Энергетические коэффициенты отражения R , прохождения T и поглощения A электромагнитного излучения в рассматриваемом фотонном кристалле имеют вид [1]:

$$R = \left| \frac{m_{21}}{m_{22}} \right|^2, \quad (1)$$

$$T = \operatorname{Re} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_3 \cos \theta'}{\varepsilon_1 \cos \theta}} \right) \left| m_{11} - \frac{m_{12} m_{21}}{m_{22}} \right|^2, \quad (2)$$

$$A = 1 - R - T. \quad (3)$$

Здесь θ' – угол преломления в среду с ε_3 , m_{jk} – элементы матрицы переноса излучения через рассматриваемый фотонный кристалл:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_{3\text{out}}^{-1} \left(\mathbf{M}_{2\text{in}} \mathbf{M}_{2\text{pr}} \mathbf{M}_{2\text{out}}^{-1} \right)^{N-1} \mathbf{M}_{1\text{in}}. \quad (4)$$

В этой формуле $\mathbf{M}_{\alpha\text{in}}$ ($\alpha = 1, 2$) – матрица входа излучения в металлический слой из прозрачного диэлектрика с ε_α ; $\mathbf{M}_{\alpha\text{out}}$ ($\alpha = 2, 3$) – матрица выхода излучения из металлического слоя в диэлектрик с ε_α ; $\mathbf{M}_{2\text{pr}}$ – матрица распространения излучения в диэлектрике с ε_2 . Данные матрицы имеют вид:

$$\mathbf{M}_{\alpha\text{in}} = \begin{pmatrix} \cos \theta_\alpha - Z_E^{(1)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} & -\cos \theta_\alpha - Z_E^{(1)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} \\ -\cos \theta_\alpha + Z_E^{(2)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} & \cos \theta_\alpha + Z_E^{(2)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{\alpha\text{out}} = \begin{pmatrix} \cos \theta_\alpha + Z_E^{(1)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} & -\cos \theta_\alpha + Z_E^{(1)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} \\ \cos \theta_\alpha + Z_E^{(2)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} & -\cos \theta_\alpha + Z_E^{(2)} \sqrt{\varepsilon_\alpha} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{2\text{pr}} = \begin{pmatrix} \exp(ik_{2z}d_2) & 0 \\ 0 & \exp(-ik_{2z}d_2) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Здесь $\theta_1 = \theta$, $\theta_3 = \theta'$; θ_2 – угол преломления излучения в диэлектрические слои с ε_2 ; $k_{2z} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_2$ – проекция волнового вектора в диэлектрических слоях на перпендикулярное к их поверхностям направление; $Z_E^{(j)}$ ($j = 1, 2$) – импедансы Е-волны на поверхности металла; ω – частота излучения, c – скорость света в вакууме.

Рассматривается вырожденная электронная плазма при нулевой температуре в случае зеркального отражения электронов от поверхности металла. Для этого случая в работе [2] были вычислены импедансы $Z_E^{(j)}$. Формулы для импедансов содержат продольную и поперечную диэлектрические проницаемости электронной плазмы. Для исследований взяты проницаемости квантовой электронной плазмы с постоянной частотой столкновений, найденные в работах [3, 4]. Полученные результаты сравниваются с данными, найденными для проницаемости классического электронного газа в подходе Друде – Лоренца [2].

При численных расчётах коэффициентов отражения, прохождения и поглощения R , T и A используются следующие безразмерные величины:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_p}, \quad \beta = \frac{v_F}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\omega_p \tau}, \quad (8)$$

$$W_\alpha = \frac{\omega_p d_\alpha}{v_F} \quad (\alpha = 1, 2), \quad r = \frac{\hbar \omega_p}{m_e v_F^2}, \quad (9)$$

где ω_p – плазменная частота вырожденного электронного газа, v_F – скорость Ферми электронов, τ – время релаксации электронов вследствие их столкновений в плазме, m_e – эффективная масса электронов проводимости, \hbar – постоянная Планка. Коэффициенты R , T и A зависят от величин (8), (9), а также от угла падения θ и числа слоёв металла N в данном фотонном кристалле.

Результаты численных расчётов коэффициентов R , T и A , выполненных по формулам (1) – (7), показывают, что возникают частотные области отражения, прохождения и поглощения Е-волн в металло-диэлектрическом фотонном кристалле. Это особенно заметно при числе слоёв металла $N \geq 5$ и толщинах металла и диэлектрика $d_1, d_2 \sim c/\omega_p$. Однако результаты для квантовой вырожденной электронной плазмы отличаются от результатов в случае классического электронного газа в подходе Друде – Лоренца (рис. 1). И металло-диэлектрический фотонный кристалл позволяет более чётко увидеть данное отличие.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ МК-2382.2014.9 и РФФИ № 15-37-20441 мол_а_вед, № 14-47-03608 (совместно с правительством Московской области).

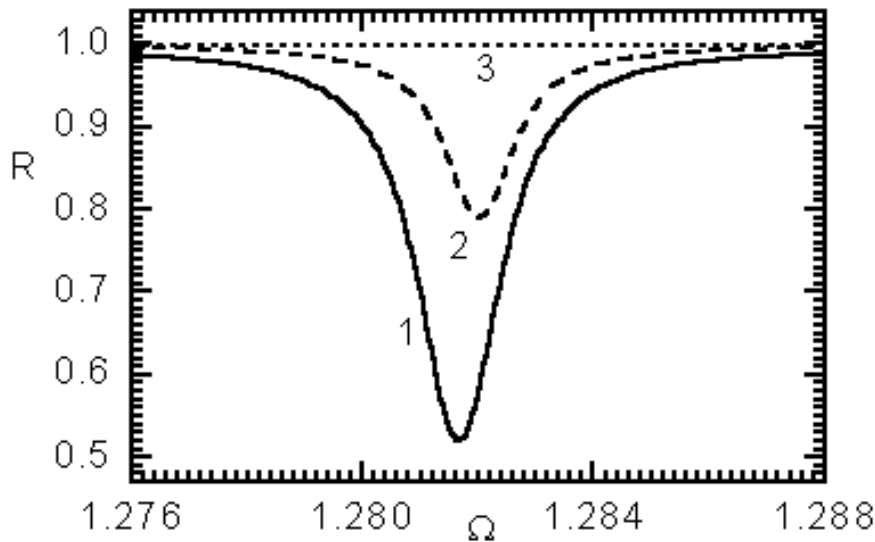


Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения R от Ω : 1, 2 – квантовая вырожденная плазма, 1 – $N = 7$, 2 – $N = 1$; 3 – классический электронный газ, $N = 7$. Величины $\theta = 75^\circ$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$, $\varepsilon_3 = 1$, $W_1 = 50$, $W_2 = 5000$, $\beta = 2.83 \cdot 10^{-3}$, $\gamma = 10^{-3}$, $r = 1.07$.

Литература

1. Горелик В.С., Канаев В.В. Усиление электромагнитного поля в ограниченных одномерных фотонных кристаллах // Журн. Эксп. и Теор. Физ. 2016. Т. 150. Вып. 3 (9). С. 435.
2. Kliewer K.L. and Fuchs R. Anomalous Skin Effect for Specular Electron Scattering and Optical Experiments at Non-Normal Angles of Incidence // Phys. Rev. 1968. V. 172. No. 3. P. 607.
3. Латышев А.В., Юшканов А.А. Поперечная электрическая проводимость квантовой столкновительной плазмы в подходе Мермина // Теор. и Матем. Физ. 2013. Т. 175. № 1. С. 132.
4. Латышев А.В., Юшканов А.А. Продольная электрическая проводимость в квантовой плазме с переменной частотой столкновений в рамках подхода Мермина // Теор. и Матем. Физ. 2014. Т. 178. № 1. С. 147.