Уравнение Ландау-Лифшица. Тензор магнитной проницаемости и восприимчивости.

- Из каких соображений было получено уравнение Ландау-Лифшица?
- Что описывает это уравнение?
- Что мы получили с помощью этого уравнения?
- Зачем уравнение Ландау-Лифшица вводят релаксационный член?
- Что такое ферромагнитный резонанс?
- Какова структура тензора магнитной восприимчивости?
- Как зависят от частоты действительная и мнимая компоненты тензора магнитной восприимчивости?
- Какова величина диагональной компоненты тензора μ на оптических частотах?

Продольные и поперечные магнитооптические эффекты.

- Распространение электромагнитной волны в среде. Уравнения Максвелла
- Показатель преломления при продольном распространении волны
  - ✔ Гироэлектрическая, гиромагнитная и бигиротропная среды
  - ✔ Частотно независимый эффект Фарадея
- Показатель преломления при поперечном распространении волны

Тензор магнитной проницаемости

$$[\mu] = \begin{vmatrix} 1+4\pi\dfrac{\gamma\omega_o M_o}{\omega_o{}^2-\omega^2} & 4\pi\dfrac{i\gamma\omega M_o}{\omega_o{}^2-\omega^2} & 0 \\ -4\pi\dfrac{i\gamma\omega M_o}{\omega_o{}^2-\omega^2} & 1+4\pi\dfrac{\gamma\omega_o M_o}{\omega_o{}^2-\omega^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\left|4\pi\frac{\gamma\omega_o M_o}{\omega_o{}^2-\omega^2}\right| \approx \frac{4\pi\cdot 10^7\cdot 10^{10}\cdot 10^3}{10^{28}} \approx 10^{-7}$$

Поправка к 1 в диагональной компоненте

$$\left|4\pi\frac{\gamma\omega M_o}{\omega_o{}^2-\omega^2}\right| \approx \frac{4\pi\cdot 10^7\cdot 10^{14}\cdot 10^3}{10^{28}} \approx 10^{-3}$$

Недиагональная компонента

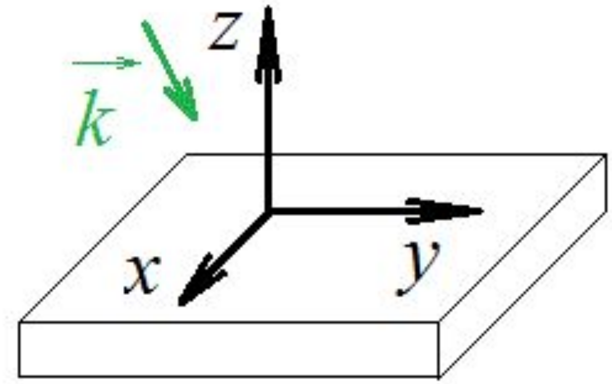
Уравнения Максвелла

$$\boxed{rot\,\vec{H} = \frac{1}{c}\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}} \qquad \vec{D} = [\varepsilon]\vec{E} \qquad div\,\vec{D} = 0$$

$$\boxed{rot\,\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}} \qquad \vec{B} = [\mu]\vec{H} \qquad div\,\vec{B} = 0$$

$$[\varepsilon] = \begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_o \end{vmatrix} \qquad [\mu] = \begin{vmatrix} \mu & -i\mu Q' & 0 \\ i\mu Q' & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_o \end{vmatrix}$$

Электромагнитная волна



$$\vec{E} = \vec{E_o} e^{i\omega\left(t - \frac{\alpha x + \beta y + \gamma z}{c} n\right)};\qquad \vec{H} = \vec{H_o} e^{i\omega\left(t - \frac{\alpha x + \beta y + \gamma z}{c} n\right)}$$

α, β и γ – направляющие косинусы электромагнитной волны.

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$$

n – комплексный показатель преломления.

Вектор $\overrightarrow{D}$

$$\overrightarrow{E} = \overrightarrow{E_o} e^{i\omega\left(t - \frac{\alpha x + \beta y + \gamma z}{c} n\right)}$$

$$\overrightarrow{D} = \left[\varepsilon\right] \cdot \overrightarrow{E} = \begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_o \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} E_x\varepsilon - E_y i\varepsilon Q \\ E_x i\varepsilon Q + E_y \varepsilon \\ E_z \varepsilon_o \end{vmatrix}$$

$$\frac{\partial \overrightarrow{D}}{\partial t} = \begin{vmatrix} i\omega(E_x\varepsilon - E_y i\varepsilon Q) \\ i\omega(E_x i\varepsilon Q + E_y \varepsilon) \\ i\omega E_z \varepsilon_o \end{vmatrix}$$

Вектор $\vec{B}$

$$\vec{B} = [\mu] \cdot \vec{H} = \begin{vmatrix} \mu & -i\mu Q' & 0 \\ i\mu Q' & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_o \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H_x\mu - H_y i\mu Q' \\ H_x i\mu Q' + H_y\mu \\ H_z\mu_o \end{vmatrix}$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \begin{vmatrix} i\omega(H_x\mu - H_y i\mu Q') \\ i\omega(H_x i\mu Q' + H_y\mu) \\ i\omega H_z\mu_o \end{vmatrix}$$

$rot\,\overrightarrow{H}$

$$rot\,\overrightarrow{H} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} =$$

$$= \vec{i}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) + \vec{j}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right) + \vec{k}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right)$$

<u>Компоненты</u> $rot\,\overrightarrow{H}$

$$\vec{H} = \overrightarrow{H_o} e^{i\omega(t - \frac{\alpha x + \beta y + \gamma z}{c} n)}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = -\frac{i\omega\beta n}{c} H_z \qquad \frac{\partial H_x}{\partial z} = -\frac{i\omega\gamma n}{c} H_x \qquad \frac{\partial H_y}{\partial x} = -\frac{i\omega\alpha n}{c} H_y$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\frac{i\omega\gamma n}{c} H_y \qquad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\frac{i\omega\alpha n}{c} H_z \qquad \frac{\partial H_x}{\partial y} = -\frac{i\omega\beta n}{c} H_x$$

$$rot\,\overrightarrow{H} = \vec{i}\left(\left(-\frac{i\omega\beta n}{c}\right)H_z - \left(-\frac{i\omega\gamma n}{c}\right)H_y\right) +$$

$$+\vec{j}\left(\left(-\frac{i\omega\gamma n}{c}\right)H_x - \left(-\frac{i\omega\alpha n}{c}\right)H_z\right) + \vec{k}\left(\left(-\frac{i\omega\alpha n}{c}\right)H_y - \left(-\frac{i\omega\beta n}{c}\right)H_x\right)$$

Имеем уравнения

$$\boxed{\frac{i\cancel{\omega}}{c}\left(-\beta n H_z+\gamma n H_y\right)=\frac{i\cancel{\omega}}{c}\left(\varepsilon E_x-i\varepsilon Q E_y\right)}$$

$$\boxed{\frac{i\cancel{\omega}}{c}\left(-\gamma n H_x+\alpha n H_z\right)=\frac{i\cancel{\omega}}{c}\left(i\varepsilon Q E_x+\varepsilon E_y\right)}$$

$$\boxed{\frac{i\cancel{\omega}}{c}\left(-\alpha n H_y+\beta n H_x\right)=\frac{i\cancel{\omega}}{c}\varepsilon_o E_z}$$

$$rot\,\vec{E}$$

$$rot\,\vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} =$$

$$= \vec{i}\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right) + \vec{j}\left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right) + \vec{k}\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)$$

Компоненты $rot\,\vec{E}$

$$\vec{E} = \vec{E}_o e^{i\omega(t - \frac{\alpha x + \beta y + \gamma z}{c} n)}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -\frac{i\omega\beta n}{c} E_z \qquad \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{i\omega\gamma n}{c} E_x \qquad \frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{i\omega\alpha n}{c} E_y$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\frac{i\omega\gamma n}{c} E_y \qquad \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{i\omega\alpha n}{c} E_z \qquad \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\frac{i\omega\beta n}{c} E_x$$

$$rot\,\vec{E} = \vec{i}\left(\left(-\frac{i\omega\beta n}{c}\right)E_z - \left(-\frac{i\omega\gamma n}{c}\right)E_y\right) +$$

$$+\vec{j}\left(\left(-\frac{i\omega\gamma n}{c}\right)E_x - \left(-\frac{i\omega\alpha n}{c}\right)E_z\right) + \vec{k}\left(\left(-\frac{i\omega\alpha n}{c}\right)E_y - \left(-\frac{i\omega\beta n}{c}\right)E_x\right)$$

Имеем уравнения

$$\boxed{-\cancel{\frac{i\omega}{c}}\left(\beta n E_z - \gamma n E_y\right) = -\cancel{\frac{i\omega}{c}}\left(\mu H_x - i\mu Q' H_y\right)}$$

$$\boxed{-\cancel{\frac{i\omega}{c}}\left(\gamma n E_x - \alpha n E_z\right) = -\cancel{\frac{i\omega}{c}}\left(i\mu Q' H_x + \mu H_y\right)}$$

$$\boxed{-\cancel{\frac{i\omega}{c}}\left(\alpha n E_y - \beta n E_x\right) = -\cancel{\frac{i\omega}{c}}\mu_o H_z}$$

Система уравнений для компонент векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$

$$\begin{cases} -\beta n H_z + \gamma n H_y = \varepsilon E_x - i\varepsilon Q E_y \\ -\gamma n H_x + \alpha n H_z = i\varepsilon Q E_x + \varepsilon E_y \\ -\alpha n H_y + \beta n H_x = \varepsilon_o E_z \\ \beta n E_z - \gamma n E_y = \mu H_x - i\mu Q' H_y \\ \gamma n E_x - \alpha n E_z = i\mu Q' H_x + \mu H_y \\ \alpha n E_y - \beta n E_x = \mu_o H_z \end{cases}$$

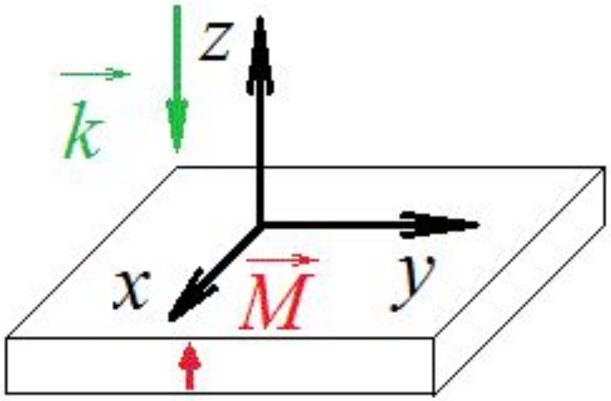
Расположим компоненты векторов и $\vec{E}$ и $\vec{H}$ по порядку

$$\begin{cases} \varepsilon E_x - i\varepsilon Q E_y - \gamma n H_y + \beta n H_z = 0 \\ i\varepsilon Q E_x + \varepsilon E_y + \gamma n H_x - \alpha n H_z = 0 \\ \varepsilon_o E_z - \beta n H_x + \alpha n H_y = 0 \\ -\gamma n E_y + \beta n E_z - \mu H_x + i\mu Q' H_y = 0 \\ \gamma n E_x - \alpha n E_z - i\mu Q' H_x - \mu H_y = 0 \\ -\beta n E_x + \alpha n E_y - \mu_o H_z = 0 \end{cases}$$

Однородная система имеет решение, если ее определитель равен нулю

$$\begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & 0 & -\gamma n & \beta n \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 & \gamma n & 0 & -\alpha n \\ 0 & 0 & \varepsilon_o & -\beta n & \alpha n & 0 \\ 0 & -\gamma n & \beta n & -\mu & i\mu Q' & 0 \\ \gamma n & 0 & -\alpha n & -i\mu Q' & -\mu & 0 \\ -\beta n & \alpha n & 0 & 0 & 0 & -\mu_o \end{vmatrix}$$

Пусть α,β=0, γ=1.
(Продольные эффекты.)



$$\begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & 0 & -\gamma n & \beta n \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 & \gamma n & 0 & -\alpha n \\ 0 & 0 & \varepsilon_o & -\beta n & \alpha n & 0 \\ 0 & -\gamma n & \beta n & -\mu & i\mu Q' & 0 \\ \gamma n & 0 & -\alpha n & -i\mu Q' & -\mu & 0 \\ -\beta n & \alpha n & 0 & 0 & 0 & -\mu_o \end{vmatrix}$$

Пусть α,β=0, γ=1.

(Продольные эффекты.)

$$\begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & 0 & -n & 0 \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 & n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_o & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -n & 0 & -\mu & i\mu Q' & 0 \\ n & 0 & 0 & -i\mu Q' & -\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_o \end{vmatrix} =$$

По шестой строке и шестому столбцу

$$
= -\mu_o \begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & 0 & -n \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 & n & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_o & 0 & 0 \\ 0 & -n & 0 & -\mu & i\mu Q' \\ n & 0 & 0 & -i\mu Q' & -\mu \end{vmatrix} =
$$

По третьей строке и третьему столбцу

$$= -\mu_o \cdot \varepsilon_o \begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & -n \\ -i\varepsilon Q & \varepsilon & n & 0 \\ 0 & -n & -\mu & i\mu Q' \\ n & 0 & -i\mu Q' & -\mu \end{vmatrix} =$$

По первой строке

$$-\mu_o \cdot \varepsilon_o \left[\varepsilon \begin{vmatrix} \varepsilon & n & 0 \\ -n & -\mu & i\mu Q' \\ 0 & -i\mu Q' & -\mu \end{vmatrix} + i\varepsilon Q \begin{vmatrix} i\varepsilon Q & n & 0 \\ 0 & -\mu & i\mu Q' \\ n & -i\mu Q' & -\mu \end{vmatrix} + \right.$$

$$\left. + n \begin{vmatrix} i\varepsilon Q & \varepsilon & n \\ 0 & -n & -\mu \\ n & 0 & -i\mu Q' \end{vmatrix} \right] = -\mu_o \cdot \varepsilon_o \left[\varepsilon \left(\mu^2 \varepsilon - \varepsilon \mu^2 Q'^2 - n^2 \mu \right) + \right.$$

$$\left. + i\varepsilon Q \left(i\mu^2 \varepsilon Q + i\mu n^2 Q' - i\mu^2 \varepsilon Q Q'^2 \right) + n \left(-\mu\varepsilon Q Q' n - \varepsilon\mu n + n^3 \right) \right] =$$

$$= -\mu_o \cdot \varepsilon_o \left[n^4 + n^2 \left(\underline{-\mu\varepsilon} \underline{-\varepsilon\mu Q Q'} \underline{-\varepsilon\mu} \underline{-\varepsilon\mu Q Q'} \right) + \mu^2 \varepsilon^2 - \mu^2 \varepsilon^2 Q'^2 - \right.$$

$$\left. - \mu^2 \varepsilon^2 Q^2 + \mu^2 \varepsilon^2 Q^2 Q'^2 \right] = 0$$

Имеем биквадратное уравнение относительно n

$$n^4 - n^2\left(2\varepsilon\mu + 2\varepsilon\mu QQ'\right) + \mu^2\varepsilon^2\left(1 - Q'^2 - Q^2 + Q^2Q'^2\right) = 0$$

$$n^4 - 2n^2\varepsilon\mu\left(1 + QQ'\right) + \mu^2\varepsilon^2\left(1 - Q'^2 - Q^2 + Q^2Q'^2\right) = 0$$

$$D = 4\varepsilon^2\mu^2\left(1 + QQ'\right)^2 - 4\mu^2\varepsilon^2\left(1 - Q'^2 - Q^2 + Q^2Q'^2\right) =$$

$$= 4\varepsilon^2\mu^2\left(\cancel{1} + 2QQ' + \cancel{Q^2Q'^2} \cancel{-1} + Q'^2 + Q^2 - \cancel{Q^2Q'^2}\right) =$$

$$= 4\varepsilon^2\mu^2\left(Q + Q'\right)^2$$

$$n_{1,2}{}^2 = \frac{2\varepsilon\mu(1 + QQ') \pm 2\varepsilon\mu(Q' + Q)}{2} = \frac{2\varepsilon\mu}{2}(1 + \cancelto{0}{QQ'} \pm (Q' + Q))$$

$$n_{1,2}{}^2 = \varepsilon\mu(1 \pm (Q' + Q))$$

Поворот плоскости поляризации

$$\theta = \omega \cdot \Delta t = \omega\left(\frac{d}{V_1} - \frac{d}{V_2}\right) = \omega d\left(\frac{n_1}{c} - \frac{n_2}{c}\right) = \frac{\omega d \cdot \Delta n}{c}$$

d – толщина пластинки, n – показатель преломления

$$n_{1,2}{}^2 = \varepsilon\mu(1 \pm (Q' + Q))$$

Учтем, что $Q' + Q << 1$

$$n_{1,2} = \sqrt{\varepsilon\mu(1 \pm (Q' + Q))} = \sqrt{\varepsilon\mu} \cdot \left(1 \pm (Q' + Q)\right)^{0,5} = \sqrt{\varepsilon\mu} \cdot \left(1 \pm 0,5(Q' + Q)\right)$$

Поворот плоскости поляризации

$$\theta = \frac{\omega d \cdot \Delta n}{c} = \frac{\omega d \sqrt{\varepsilon\mu}}{c}\left(1 + 0{,}5(Q' + Q) - 1 + 0{,}5(Q' + Q)\right)$$

$$\boxed{\theta = \frac{\omega d \sqrt{\varepsilon\mu}}{c}\left(Q' + Q\right)}$$

Для бигиротропной среды

$$\boxed{\theta = \frac{\omega d \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} Q}$$

Для гироэлектрической среды

$$\boxed{\theta = \frac{\omega d \sqrt{\varepsilon\mu}}{c} Q'}$$

Для гиромагнитной среды

Напомним, что

$$\mu_{xy} = 4\pi \frac{i\gamma M_o \omega}{\omega_o{}^2 - \omega^2} = -4\pi \frac{i\gamma M_o \omega}{\omega^2 - \omega_o{}^2}$$

Вращение плоскости поляризации в гиромагнитной среде

$$\theta = \frac{\omega d\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} Q'$$

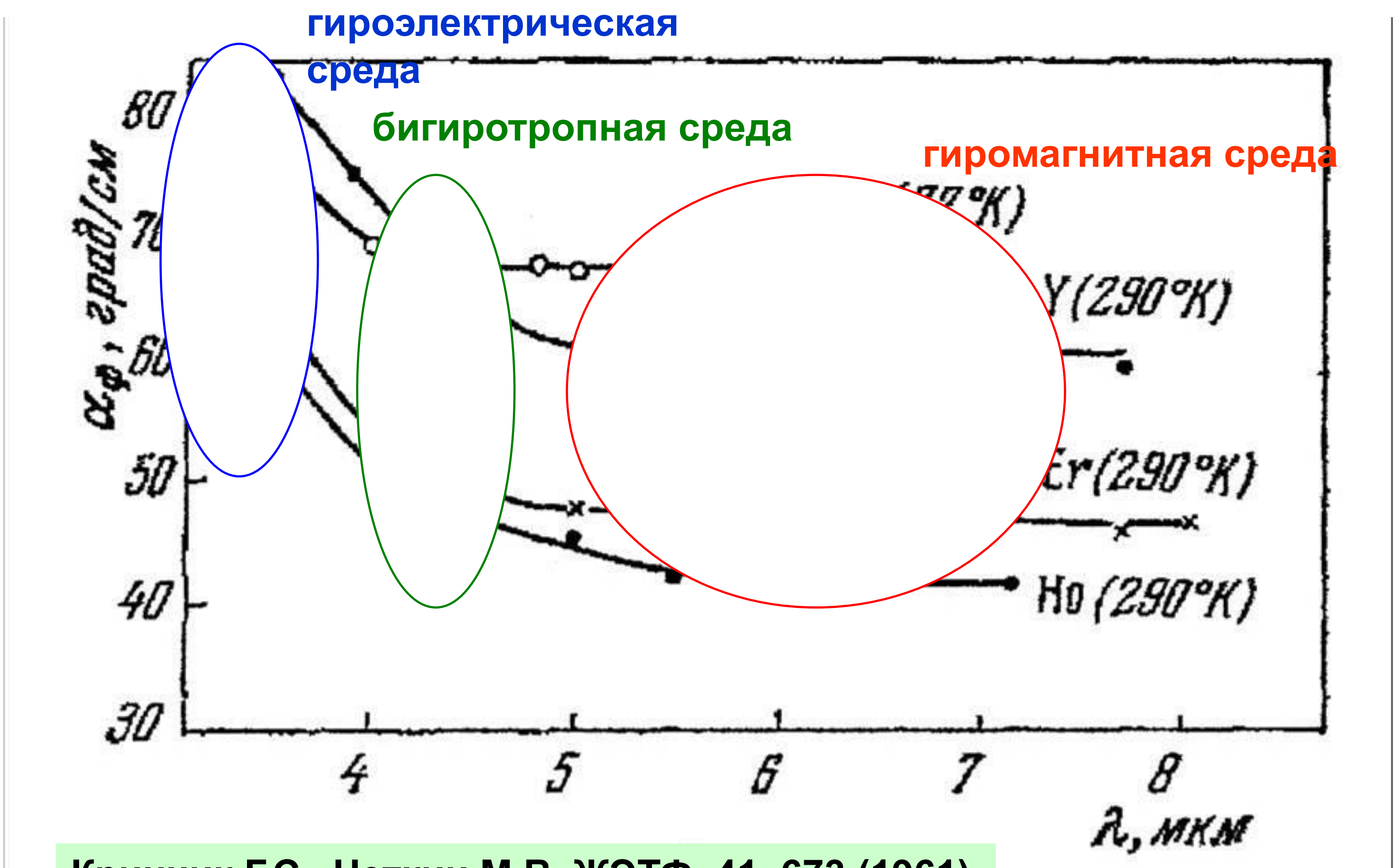
Учитывая, что $\mu_{xy} = 4\pi \dfrac{i\gamma\omega M_o}{\omega_o^2 - \omega^2} = -4\pi \dfrac{i\gamma\omega M_o}{\omega^2 - \omega_o^2} = -i\mu Q'$

следовательно $Q' = \dfrac{4\pi\gamma\omega M_o}{\mu\left(\omega^2 - \omega_o^2\right)}$ При $\omega \gg \omega_o$

$$Q' = \frac{4\pi\gamma\omega M_o}{\mu\omega^2} = \frac{4\pi\gamma M_o}{\mu\omega}$$

$$\theta = \frac{\omega d\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} Q' = \frac{\omega d\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} \cdot \frac{4\pi\gamma M_o}{\mu\omega} = \frac{4\pi d\gamma\sqrt{\varepsilon} M_o}{c\sqrt{\mu}}$$

Вращение плоскости поляризации в гиромагнитной среде не зависит от длины волны



Кринчик Г.С., Четкин М.В. ЖЭТФ, 41, 673 (1961)

Эффект Фарадея в ферритах-гранатах иттрия (Y), эрбия (Er) и гольмия (Ho) в инфракрасной области спектра при T=290°K и в феррите-гранате иттрия при T=77°K

Продольные эффекты.

$$n_{1,2}{}^2 = \varepsilon\mu(1 \pm (Q' + Q))$$

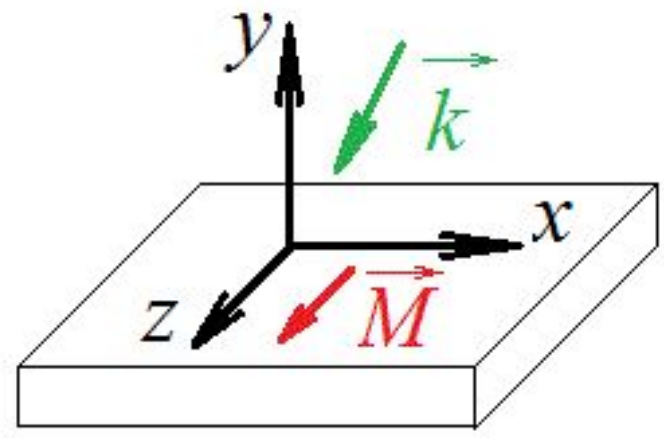
Нельзя разделить вклады тензоров [ε] и [μ]

Однородная система имеет решение, если ее определитель равен нулю

$$
\begin{vmatrix}
\varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & 0 & -\gamma n & \beta n \\
i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 & \gamma n & 0 & -\alpha n \\
0 & 0 & \varepsilon_o & -\beta n & \alpha n & 0 \\
0 & -\gamma n & \beta n & -\mu & i\mu Q' & 0 \\
\gamma n & 0 & -\alpha n & -i\mu Q' & -\mu & 0 \\
-\beta n & \alpha n & 0 & 0 & 0 & -\mu_o
\end{vmatrix}
$$

Пусть α,β≠0, γ=0.

(Поперечные эффекты.)



$$\begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & 0 & -\gamma n & \beta n \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 & \gamma n & 0 & -\alpha n \\ 0 & 0 & \varepsilon_o & -\beta n & \alpha n & 0 \\ 0 & -\gamma n & \beta n & -\mu & i\mu Q' & 0 \\ \gamma n & 0 & -\alpha n & -i\mu Q' & -\mu & 0 \\ -\beta n & \alpha n & 0 & 0 & 0 & -\mu_o \end{vmatrix} = 0$$

α,β≠0, γ=0. (Поперечные эффекты.)

$$\begin{vmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 & 0 & 0 & \beta n \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 & 0 & 0 & -\alpha n \\ 0 & 0 & \varepsilon_o & -\beta n & \alpha n & 0 \\ 0 & 0 & \beta n & -\mu & i\mu Q' & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha n & -i\mu Q' & -\mu & 0 \\ -\beta n & \alpha n & 0 & 0 & 0 & -\mu_o \end{vmatrix} = 0$$

Учитывая, что $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ получим уравнение:

$$n^4 - n^2\left[\varepsilon_o\mu(1-Q'^2) - \mu_o\varepsilon(Q^2-1)\right] - \mu_o\varepsilon_o\mu\varepsilon(Q^2-1)(1-Q'^2) = 0$$

$$n_{1,2}{}^2 = \frac{\varepsilon_o\mu(1-Q'^2) + \varepsilon\mu_o(1-Q^2) \pm \left(\varepsilon_o\mu(1-Q'^2) - \varepsilon\mu_o(1-Q^2)\right)}{2}$$

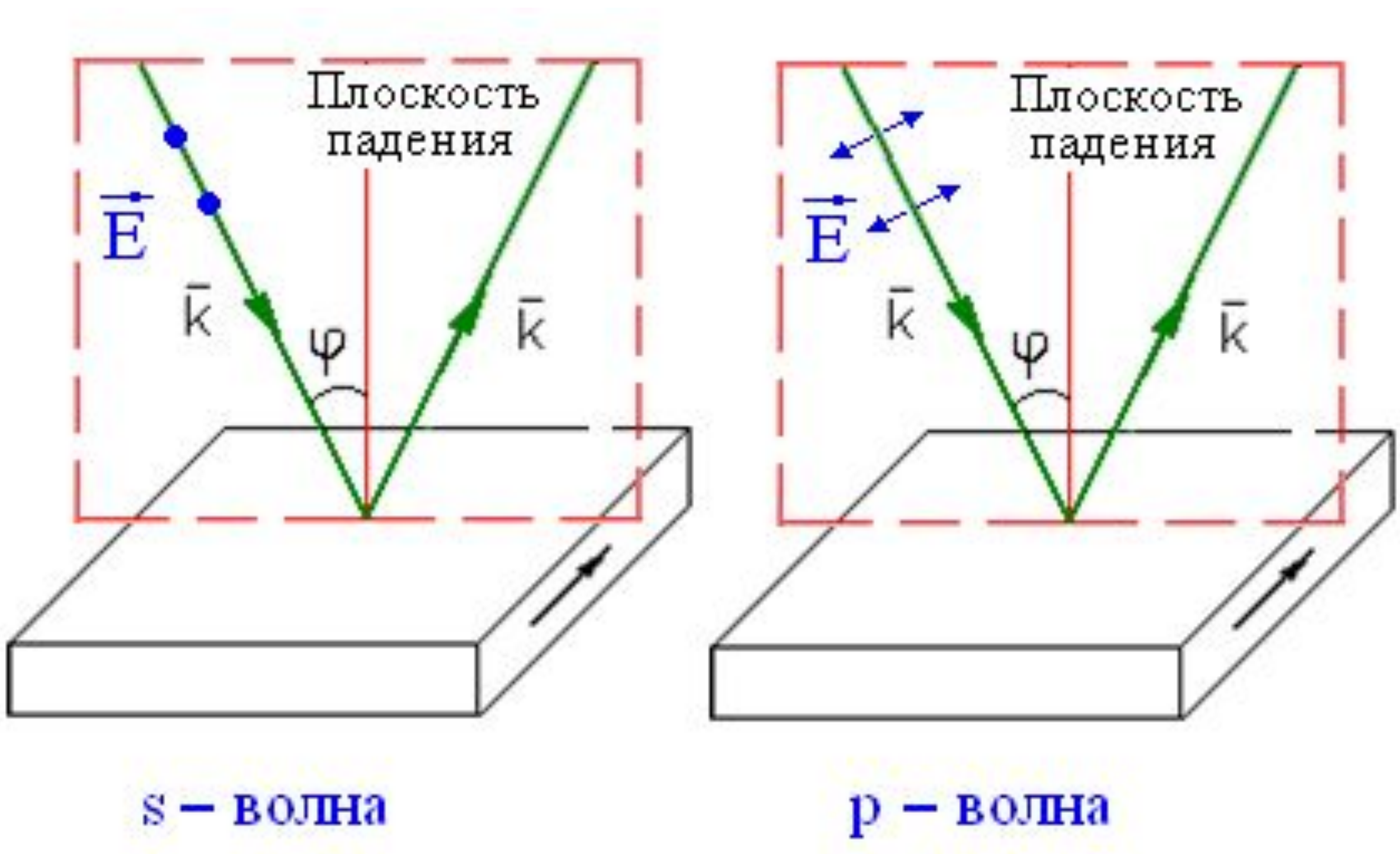
$$n_1{}^2 = n_s{}^2 = \frac{2\varepsilon_o\mu(1-Q'^2)}{2} = \varepsilon_o\mu(1-Q'^2)$$

S – волна
(Hz=0, Hx, Hy≠0);
вектор E $\perp$ плоскости
падения света

$$n_2{}^2 = n_p{}^2 = \frac{2\varepsilon\mu_o(1-Q^2)}{2} = \varepsilon\mu_o(1-Q^2)$$

P – волна
(Hz≠0, Hx, Hy=0),
E $\parallel$ плоскости
падения света

Вектор E в s- и p- волне



Показатели преломления

Для продольных эффектов

$$n_{1,2}{}^{2} = \varepsilon\mu(1 \pm (Q' + Q))$$

Для поперечных эффектов

$$n_{s}{}^{2} = \varepsilon_{o}\mu(1 - Q'^{2})$$

$$n_{p}{}^{2} = \varepsilon\mu_{o}(1 - Q^{2})$$

Магнитооптические эффекты существует только при совместном влиянии обменного и спин-орбитального взаимодействия

Продольные и поперечные магнитооптические эффекты.

- Распространение электромагнитной волны в среде. Уравнения Максвелла
- Показатель преломления при продольном распространении волны
  - ✔ Гироэлектрическая, гиромагнитная и бигиротропная среды
  - ✔ Частотно независимый эффект Фарадея
- Показатель преломления при поперечном распространении волны