

МЕТОДЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ поверхности твердого тела

Понятие о фазе волны ВГ

В вакууме амплитуда плоской электромагнитной волны $\mathbf{E}_\Omega \exp(ik\mathbf{R} - i\Omega t)$ полагается вещественной

Электромагнитная волны, описывающая отклик среды, в рамках формализма функций Грина, имеет вид:

$$\mathbf{E}_\Omega \exp(ik\mathbf{R}) = \int \overleftrightarrow{G}(\mathbf{R}, \mathbf{r}', \Omega) \mathbf{P}(\mathbf{r}', \Omega) d\mathbf{r}' \quad \begin{array}{l} \text{(множитель} \\ \text{опущен)} \end{array} \quad \exp(i\Omega t)$$

\overleftrightarrow{G} - тензорная функция Грина, а амплитуда \mathbf{E}_Ω - комплексная величина:

$$\mathbf{E}_\Omega = |\mathbf{E}_\Omega| e^{i\Phi}$$

Φ - относительная фаза «отклика» вещества

методы интерферометрии – методы измерения Φ

Физический смысл фазы Φ амплитуды нелинейной волны - запаздывание нелинейной волны относительно волны накачки

Фаза волны ВГ

Причины комплексности амплитуды E_{Ω} нелинейной волны:

1. Комплексность тензора квадратичной восприимчивости (запаздывание генерации)

Общее квантово-механическое выражение для квадратичной восприимчивости:

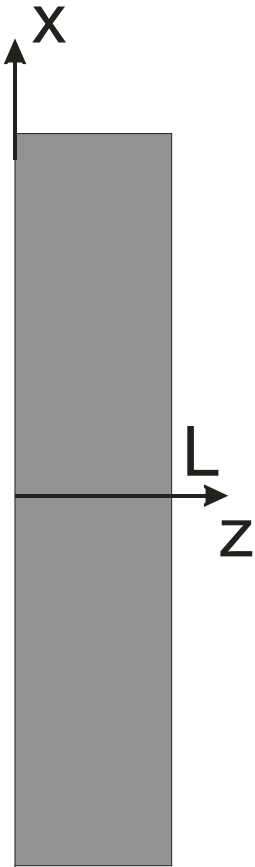
$$\chi_{ijk}^{(2)}(\hbar\omega = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2) = -\frac{N}{\hbar} \sum_{g,n,n'} \rho_g^{(0)} \left[\frac{(d_i)_{gn}(d_j)_{nn'}(d_k)_{n'g}}{(\hbar\omega - E_{ng} + i\Gamma_{ng})(\hbar\omega_2 - E_{n'g} + i\Gamma_{n'g})} + \right. \\ + \frac{(d_i)_{gn}(d_k)_{nn'}(d_j)_{n'g}}{(\hbar\omega - E_{ng} + i\Gamma_{ng})(\hbar\omega_1 - E_{n'g} + i\Gamma_{n'g})} + \\ + \frac{(d_k)_{gn'}(d_j)_{n'n}(d_i)_{ng}}{(\hbar\omega + E_{ng} + i\Gamma_{ng})(\hbar\omega_2 + E_{n'g} + i\Gamma_{n'g})} + \\ + \frac{(d_j)_{gn'}(d_k)_{n'n}(d_i)_{ng}}{(\hbar\omega + E_{ng} + i\Gamma_{ng})(\hbar\omega_1 + E_{n'g} + i\Gamma_{n'g})} - \\ - \frac{(d_j)_{ng}(d_i)_{n'n}(d_k)_{gn'}}{(\hbar\omega - E_{ng} + i\Gamma_{ng})} \left(\frac{1}{\hbar\omega_2 + E_{n'g} + i\Gamma_{n'g}} + \frac{1}{\hbar\omega_2 - E_{ng} + i\Gamma_{ng}} \right) - \\ \left. - \frac{(d_k)_{ng}(d_i)_{n'n}(d_j)_{gn'}}{(\hbar\omega - E_{ng} + i\Gamma_{ng})} \left(\frac{1}{\hbar\omega_2 - E_{ng} + i\Gamma_{ng}} + \frac{1}{\hbar\omega_2 + E_{n'g} + i\Gamma_{n'g}} \right) \right] \rho_g^{(0)}$$

Фаза волны ВГ

Причины комплексности амплитуды \mathbf{E}_Ω нелинейной волны:

2. Запаздывание распространения волн.

рассмотрим генерацию ВГ на просвет нелинейной пластины толщиной L :



$$\mathbf{E}_{2\omega} = T_{2\omega} \int_0^L \mathbf{P}_{2\omega} e^{i\Delta k z'} dz'$$

$$\Delta k = k_{2\omega} - 2k_\omega$$

или:

$$\mathbf{E}_{2\omega} = T_{2\omega} \mathbf{P}_{2\omega} (i\Delta k)^{-1} \left(e^{i\Delta k L} - 1 \right)$$

Физический смысл такой комплексности $\mathbf{E}_{2\omega}$ - деструктивная интерференция волн ВГ, прогенерированных в разных областях нелинейной пластины

Фаза волны ВГ

Причины комплексности амплитуды E_{Ω} нелинейной волны:

3. Влияние поглощения

Комплексность $\vec{G}(\mathbf{R}, \mathbf{r}', \omega)$, выражаемая комплексностью

волновых векторов $k_{2\omega}, k_{\omega}$ и френелевских факторов для волны

накачки и ВГ

Общий принцип методов интерферометрии второй гармоники

Методы интерферометрии в нелинейной оптике основаны на когерентном сложении двух волн, прогенерированных разными источниками (образцами):

$$\mathbf{E}_{\Omega}^{(1)} = |\mathbf{E}_{\Omega}^{(1)}| \exp(i\Phi_1), \quad \mathbf{E}_{\Omega}^{(2)} = |\mathbf{E}_{\Omega}^{(2)}| \exp(i\Phi_2)$$

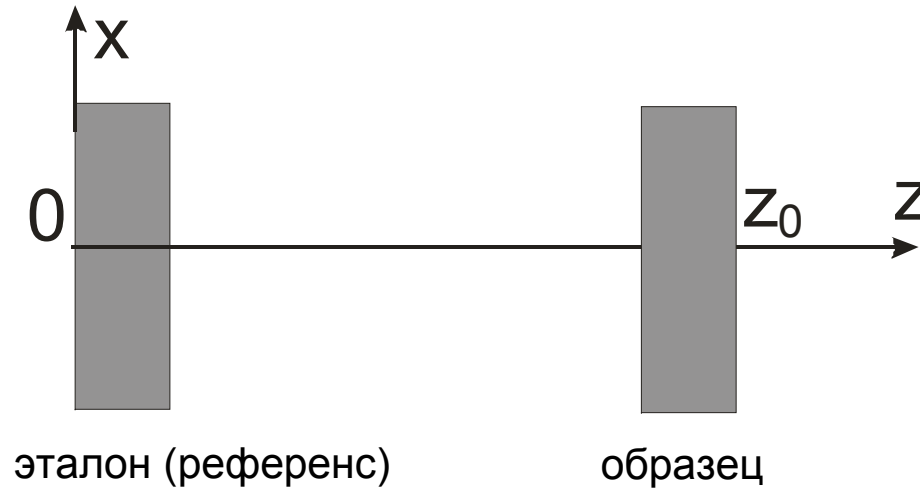
Интенсивность суммарной волны $\mathbf{E}_{\Omega} = \mathbf{E}_{\Omega}^{(1)} + \mathbf{E}_{\Omega}^{(2)}$ имеет вид:

$$I_{\Omega} = \frac{c}{8\pi} \left(|\mathbf{E}_{\Omega}^{(1)}|^2 + |\mathbf{E}_{\Omega}^{(2)}|^2 + 2\operatorname{Re}\mathbf{E}_{\Omega}^{(1)*}\mathbf{E}_{\Omega}^{(2)} \right)$$

и содержит интерференционный множитель $2\operatorname{Re}\mathbf{E}_{\Omega}^{(1)*}\mathbf{E}_{\Omega}^{(2)}$,

пропорциональный разности фаз, $\cos(\Phi_2 - \Phi_1)$

Однолучевая интерферометрия второй гармоники (1)



поле ВГ, прогенерированное эталоном и пришедшее в точку $z = z_0$:

$$|\mathbf{E}_{2\omega}^R| e^{i\Phi_R} e^{i2\omega t - ik_{2\omega} z_0}$$

поле ВГ, прогенерированное образцом и пришедшее в точку $z = z_0$:

$$|\mathbf{E}_{2\omega}^S| e^{i\Phi_S} e^{i2\omega t - i2k_{\omega} z_0}$$

Суммарное поле ВГ от эталона и образца имеет вид:

$$\mathbf{E}_{2\omega}^{total}(z, t) = \left(|\mathbf{E}_{2\omega}^R| e^{i\Phi_R - ik_{2\omega} z_0} + |\mathbf{E}_{2\omega}^S| e^{i\Phi_S - i2k_{\omega} z_0} \right) e^{i2\omega t - ik_{2\omega}(z - z_0)}$$

Однолучевая интерферометрия второй гармоники (2)

Детектируемая интенсивность ВГ от такой системы имеет вид

$$I_{2\omega}^{total} = \frac{c}{8\pi} \left(|\mathbf{E}_{2\omega}^R|^2 + |\mathbf{E}_{2\omega}^S|^2 + 2|\mathbf{E}_{2\omega}^R||\mathbf{E}_{2\omega}^S| \cos \left((k_{2\omega} - 2k_\omega)z_0 - (\Phi_R - \Phi_S) \right) \right)$$

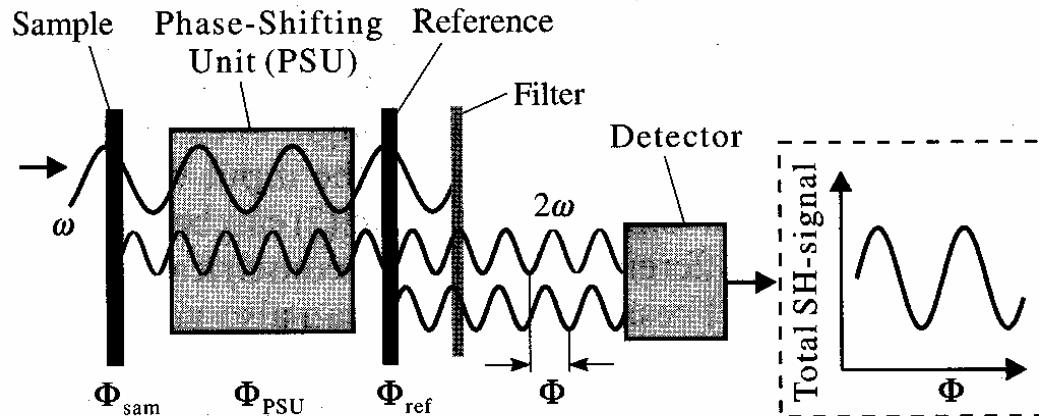
или

$$I_{2\omega}^{total}(z_0) = I_{2\omega}^R + I_{2\omega}^S + 2\sqrt{I_{2\omega}^R I_{2\omega}^S} \cos \left(2\pi \frac{z_0}{L} - (\Phi_R - \Phi_S) \right)$$

где период интерференционной картины $L = \lambda_{2\omega}(n_{2\omega} - n_\omega)^{-1}$

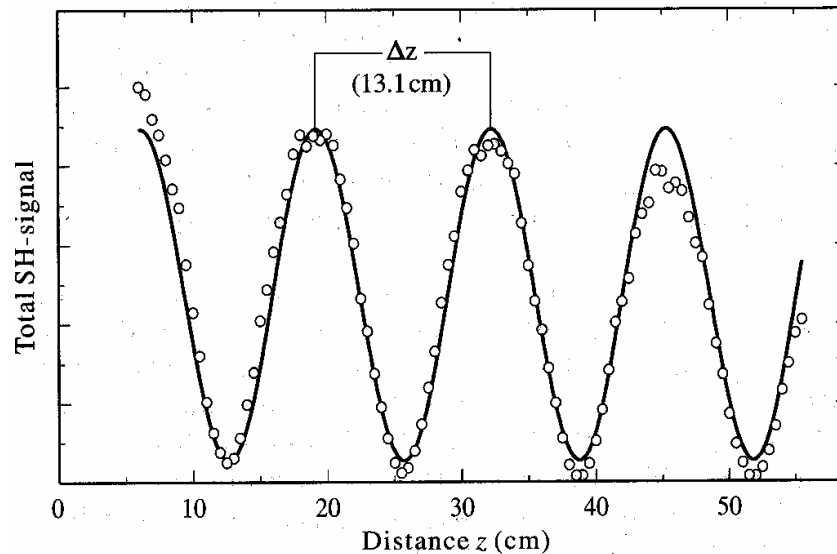
пространственный масштаб интерференционной картины $L \gg \lambda_{2\omega}$

Однолучевая интерферометрия второй гармоники с воздушным зазором



фазосдвигающий элемент –
воздушный зазор между образцом
и эталоном :

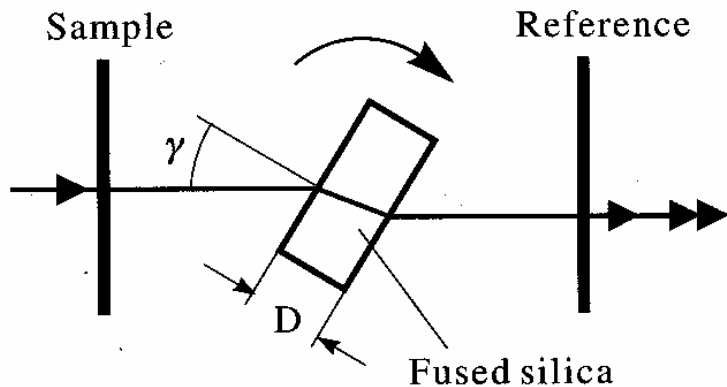
для $\lambda_{2\omega} = 532$ нм $\Delta n = n_{2\omega} - n_{\omega} \sim 4,3 \cdot 10^{-6}$



период интерференционной картины

$L \sim 13$ см

Однолучевая интерферометрия второй гармоники с кварцевым фазосдвигающим элементом

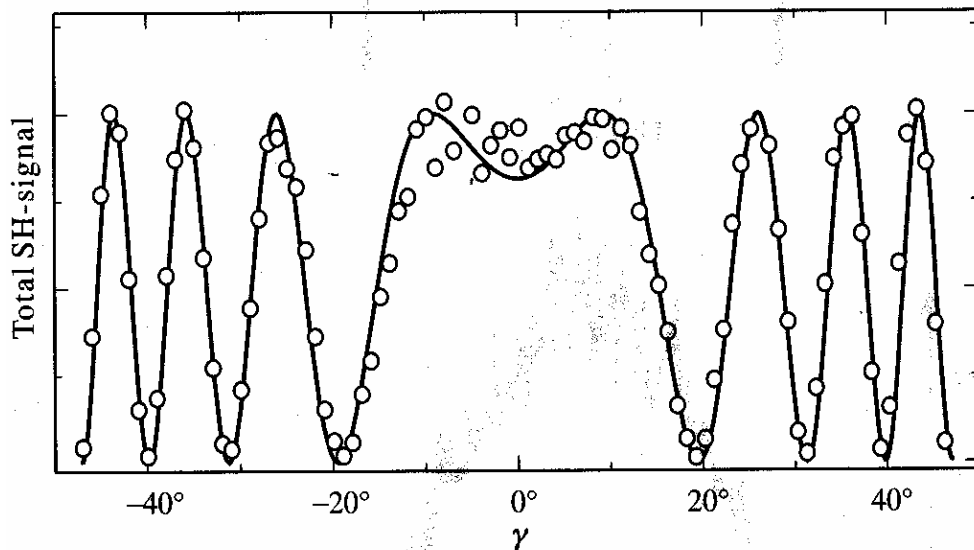


фазосдвигающий элемент –
плоскопараллельная пластина кварца

разность хода между волнами складывается
из разности хода внутри пластины и
компенсирующей разности хода вне пластины

$$\Delta D = D \left(\frac{n_{2\omega}}{\cos \theta_{2\omega}} - \frac{n_{\omega}}{\cos \theta_{\omega}} \right) - D (\operatorname{tg} \theta_{2\omega} - \operatorname{tg} \theta_{\omega}) \sin \theta$$

где $\theta_{\Omega} = \operatorname{Arccsin} (n_{\Omega}^{-1} \sin \theta)$ тогда

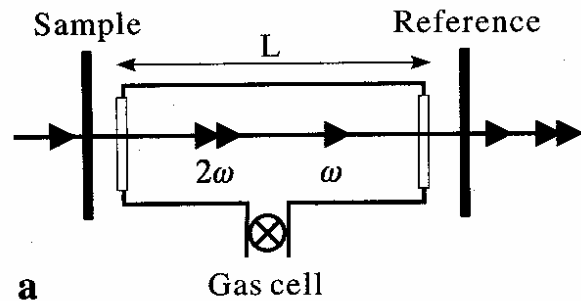


$$I_{2\omega}^{total}(\theta) = I_{2\omega}^R + I_{2\omega}^S + 2\sqrt{I_{2\omega}^R I_{2\omega}^S} \times \cos \left(2\pi \frac{D}{\lambda_{2\omega}} \Delta n - (\Phi_R - \Phi_S) \right)$$

где

$$\Delta n = n_{2\omega} \cos \theta_{2\omega} - n_{\omega} \cos \theta_{\omega}$$

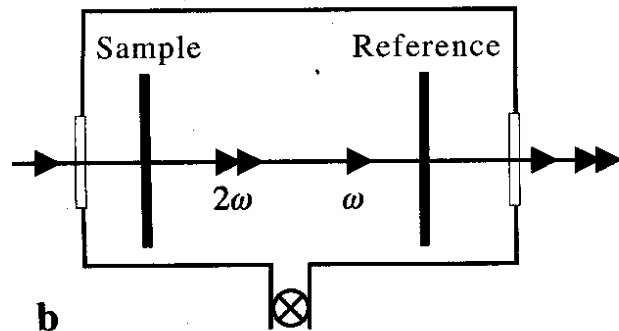
Однолучевая интерферометрия второй гармоники с газовым фазосдвигающим элементом



В приближении линейной зависимости дисперсии от давления:

$$\Delta n(p) = \Delta n(p_0) \frac{p}{p_0}$$

интерферограмма ВГ:



$$I_{2\omega}^{total}(p) = I_{2\omega}^R + I_{2\omega}^S + 2\sqrt{I_{2\omega}^R I_{2\omega}^S} \times \cos\left(2\pi \frac{p}{\Delta p} - (\Phi_R - \Phi_S)\right)$$

период интерферограммы

$$\Delta p = \frac{p_0 \lambda_{2\omega}}{\Delta n(p_0) z_0}$$

z_0 - расстояние между образцом и эталоном

для воздуха $\Delta n(p_0) = 4,3 \cdot 10^{-6}$

$$\Delta p \approx 9150/z_0$$

