

01;02;05

О возможности увеличения пространственного разрешения фототермической микроскопии

© А.Ю. Лукьянов

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород
E-mail: luk@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 31 мая 2000 г.

Показана возможность увеличения пространственного разрешения фототермической микроскопии вплоть до уровня оптической благодаря использованию модуляции положения греющего пучка лазера.

За последние годы были продемонстрированы широкие возможности фототермической микроскопии для неразрушающих исследований теплофизических свойств различных материалов и структур, построения изображений подповерхностных объектов, контроля дефектов и т.д., недоступных обычными оптическими методами [1–4].

Принцип действия фототермической микроскопии основан на возбуждении в исследуемом образце тепловых волн, возникающих при поглощении модулированного во времени греющего излучения, и последующей их регистрации каким-либо способом. При этом пространственное разрешение вдоль x направления определяется диаметром греющего пучка плюс длина тепловой диффузии справа и слева. Увеличить разрешение можно, уменьшая длину тепловой диффузии за счет увеличения частот модуляции греющего излучения, что приводит к уменьшению амплитуды сигнала и ухудшению чувствительности.

Другая возможность формирования фототермического изображения состоит в модуляции положения, а не интенсивности греющего пучка [5]. Из теоретического анализа этой возможности [6] следует, что при достаточно малой пространственной амплитуде модуляции получаемое изображение оказывается пропорциональным производной от обычного фототермического изображения. Кроме того, было показано,

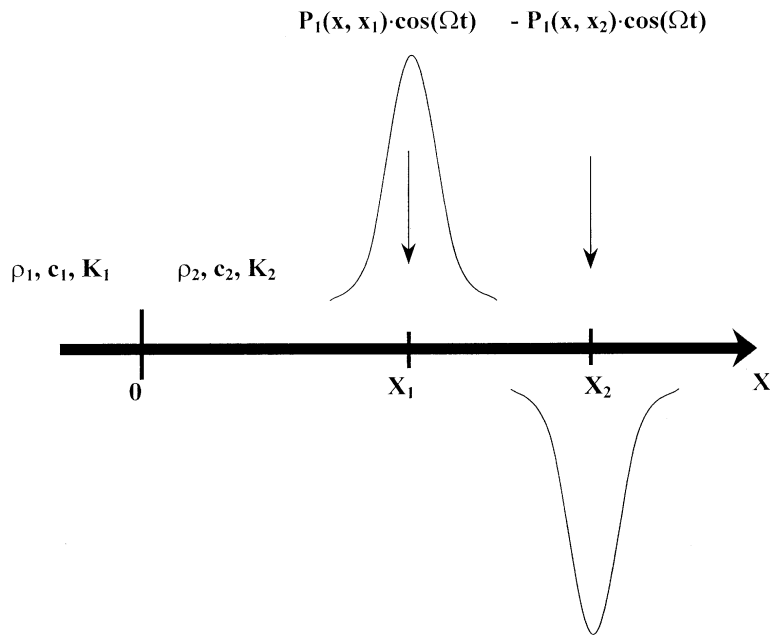


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой задачи.

что при наличии периодических дефектов в исследуемой структуре можно добиться увеличения регистрируемого сигнала при совпадении пространственной частоты модуляции с пространственной частотой дефектов.

Однако существует еще одна очень важная особенность. Пространственное разрешение подобных схем может быть лучше, чем длина тепловой диффузии, и ограничиваться только диаметром пучка накачки.

Покажем это на простом примере. Пусть на достаточно тонкую проволоку падает излучение накачки с мощностью, распределенной по гауссову закону и гармонически промодулированной по времени (рис. 1) (термически тонкая проволока, теплофизические параметры которой испытывают скачок при $x = 0$, поглощает всю падающую мощность;

поглощение будем считать чисто поверхностным):

$$P_1(x, x_1, t) = \frac{P_0}{a \cdot \sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2}{a^2}\right] \cos(\Omega t) \\ = \operatorname{Re} (P(x, x_1) \cdot \exp(i\Omega t)). \quad (1)$$

Решение уравнения теплопроводности (2) данной задачи для комплексной амплитуды переменной на частоте Ω температуры можно записать в виде

$$\frac{d^2 \tilde{T}}{dx^2} - \frac{i\Omega}{\chi} \cdot \tilde{T} = -\frac{1}{K} \cdot P(x), \quad (2)$$

$$\tilde{T}^I = C \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} x\right) + \frac{P_0}{4K_1} \sqrt{\frac{\chi_1}{i\Omega}} \exp\left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_1}\right) \\ \times \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}}(x-x_1)\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{(x-x_1)}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} \frac{a}{2}\right) \right. \\ \left. + \exp\left(\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}}(x-x_1)\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} \frac{a}{2}\right) \right\}, \quad (3)$$

$$\tilde{T}^{II} = A \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} x\right) + \frac{P_0}{4K_2} \sqrt{\frac{\chi_2}{i\Omega}} \exp\left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_2}\right) \\ \times \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}}(x-x_1)\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{(x-x_1)}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} \frac{a}{2}\right) \right. \\ \left. + \exp\left(\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}}(x-x_1)\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x-x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} \frac{a}{2}\right) \right\} \quad (4)$$

в *I*- и *II*-й областях соответственно, где $\chi = K/(\rho c)$, а $A = \Delta_A/\Delta$ и $C = \Delta_C/\Delta$ находятся из граничных условий

$$\tilde{T}^{I,II} \Big|_{x=\pm\infty} = 0, \quad \tilde{T}^I \Big|_{x=0} = \tilde{T}^{II} \Big|_{x=0}, \quad K_1 \frac{\partial \tilde{T}^I}{\partial x} \Big|_{x=0} = K_2 \frac{\partial \tilde{T}^{II}}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (5)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
\Delta_A = & \frac{P_0}{2\sqrt{i\Omega}} \exp\left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_1} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} x_1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} \frac{a}{2}\right) \\
& + \frac{P_0}{4\sqrt{i\Omega}} \exp\left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_2}\right) \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} x_1\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} \frac{a}{2}\right) \right. \\
& \times \left(1 - \frac{\sqrt{K_1 \rho_1 c_1}}{\sqrt{K_2 \rho_2 c_2}}\right) - \exp\left(\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} x_1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} \frac{a}{2}\right) \\
& \left. \times \left(1 + \frac{\sqrt{K_1 \rho_1 c_1}}{\sqrt{K_2 \rho_2 c_2}}\right) \right\}, \tag{6}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_C = & \frac{P_0}{2\sqrt{i\Omega}} \exp\left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_2} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} x_1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} \frac{a}{2}\right) \\
& + \frac{P_0}{4\sqrt{i\Omega}} \exp\left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_1}\right) \left\{ \exp\left(\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} x_1\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} \frac{a}{2}\right) \right. \\
& \times \left(1 - \frac{\sqrt{K_2 \rho_2 c_2}}{\sqrt{K_1 \rho_1 c_1}}\right) - \exp\left(-\sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} x_1\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} \frac{a}{2}\right) \\
& \left. \times \left(1 + \frac{\sqrt{K_2 \rho_2 c_2}}{\sqrt{K_1 \rho_1 c_1}}\right) \right\}. \tag{7}
\end{aligned}$$

Амплитуду измеряемого фототермического сигнала $S(x_1)$ с хорошей точностью, зависящей, конечно, от способа регистрации, можно считать пропорциональной

$$S(x_1) \approx \operatorname{Abs} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{T}(x, x_1) dx \right],$$

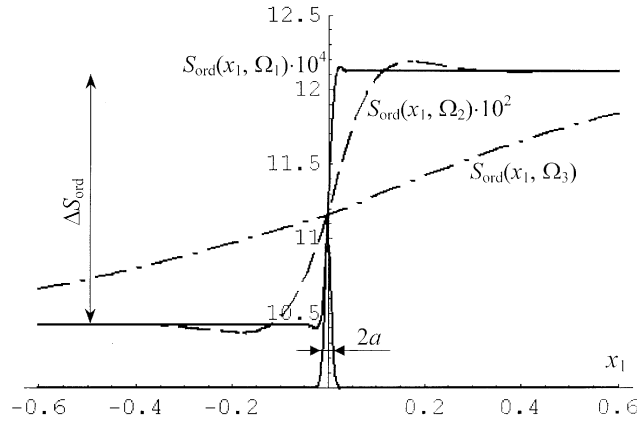


Рис. 2. График зависимости амплитуды обычного фототермического сигнала $S_{ord}(x_1)$ от положения греющего пучка для различных значений частоты модуляции при следующих значениях параметров: $K_1 = 8.2 \cdot 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $\rho_1 = 1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$, $c_1 = 0.6 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$, $K_2 = 5.6 \cdot 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $\rho_2 = 1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$, $c_2 = 0.75 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$, $a = 0.01 \text{ cm}$, $\Omega_1 = 1000 \text{ Hz}$, $\Omega_2 = 10 \text{ Hz}$, $\Omega_3 = 0.1 \text{ Hz}$.

$$\begin{aligned}
 S(x_1) \approx & \text{Abs} \left[\frac{P}{2i\Omega\rho_1c_1} \text{erfc} \left(\frac{x_1}{a} \right) + \frac{P}{2i\Omega\rho_2c_2} \text{erfc} \left(-\frac{x_1}{a} \right) \right. \\
 & + \frac{P}{2i\Omega} \frac{1}{\sqrt{K_2\rho_2c_2} + \sqrt{K_1\rho_1c_1}} \left(\frac{1}{\rho_1c_1} - \frac{1}{\rho_2c_2} \right) \\
 & \times \left\{ \exp \left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_2} - \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} x_1 \right) \text{erfc} \left(\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} \frac{a}{2} \right) \cdot \sqrt{K_1\rho_1c_1} \right. \\
 & \left. \left. - \exp \left(\frac{i\Omega a^2}{4\chi_1} - \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_1}} x_1 \right) \text{erfc} \left(\frac{x_1}{a} + \sqrt{\frac{i\Omega}{\chi_2}} \frac{a}{2} \right) \cdot \sqrt{K_2\rho_2c_2} \right\} \right]. \quad (8)
 \end{aligned}$$

График $S(x_1)$ для различных Ω приведен на рис. 2. Как и следовало ожидать, величина переходной области равна диаметру пучка накачки плюс длина тепловой диффузии в первой и во второй областях.

Теперь добавим еще один греющий пучок

$$P_2(x, x_2, t) = -P(x, x_2) \cdot \cos \Omega t. \quad (9)$$

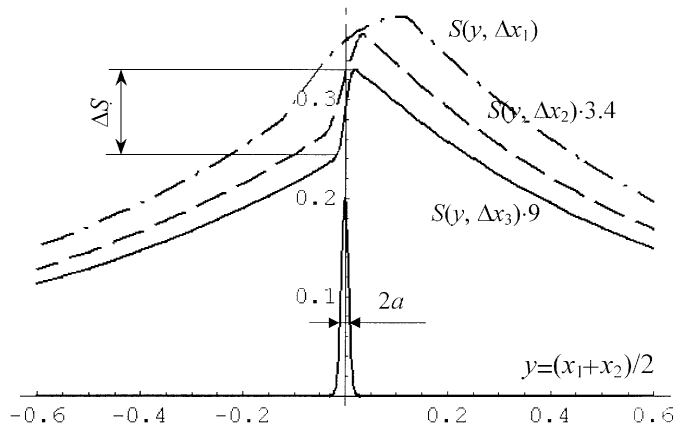


Рис. 3. График зависимости амплитуды фототермического сигнала $S(x)$ от положения центра греющих пучков для различных значений расстояния между ними при следующих значениях параметров: $K_1 = 8.2 \cdot 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $\rho_1 = 1.6 \text{ g}/\text{cm}^3$, $c_1 = 0.6 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$, $K_2 = 5.6 \cdot 10^{-4} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $\rho_2 = 1.1 \text{ g}/\text{cm}^3$, $c_2 = 0.75 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$, $a = 0.01 \text{ cm}$, $\Omega_1 = 0.1 \text{ Hz}$, $\Delta x_1 = 0.12 \text{ cm}$, $\Delta x_2 = 0.03 \text{ cm}$, $\Delta x_3 = 0.01 \text{ cm}$.

Амплитуда суммарного фототермического отклика в зависимости от положения центра масс пучков накачки $y = (x_1 + x_2)/2$ приведена на рис. 3. При достаточно малых $\Delta x = (x_1 - x_2)/2$ в области $x = 0$ видна узкая переходная область с размерами, стремящимися к $2a$. При этом величина скачка ΔS по сравнению с высотой переходной области в обычной фототермической микроскопии ΔS_{ord} имеет иной характер:

$$\Delta S \sim \Delta x (\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2) (K_1 - K_2) / \sqrt{\Omega}, \quad (10)$$

$$\Delta S_{ord} \sim (\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2) / \Omega. \quad (11)$$

Поэтому, варьируя Δx и Ω , в ряде случаев можно добиться либо более высокой чувствительности, либо более высокого поперечного разрешения.

Таким образом, метод модуляции положения по сравнению с методом временной модуляции мощности накачки имеет в ряде случаев

существенные преимущества, особенно для фототермической (фотоакустической) микроскопии предельно высокого пространственного разрешения.

Автор выражает благодарность М.А. Новикову за полезные обсуждения, давшие начало данной работе.

Список литературы

- [1] *Hess P., Pelzl J.* (Eds) // Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Proceedings of the 5th International Topical Meeting, Heidelberg, Germany, Springer, Berlin, 1987.
- [2] *Mandelis A.* // Principles & Perspectives of Photothermal and Photoacoustic Phenomena. Elsevier, New York, 1992.
- [3] *Reichling M.* et al. // Optic. Eng. 1994. V. 33. N 4. P. 1334–1342.
- [4] *Муратиков К.Л., Глазов А.Л., Роуз Д.Н., Думар Д.Е., Квай Г.Х.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 5. С. 44–52.
- [5] *Quimby R.S., Liu Z.M.* // Can. J. Phys. 1986. V. 64. P. 1276.
- [6] *Глазов А.Л., Муратиков К.Л.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 11. С. 2184–2191.