

## О ФОТОАКУСТИЧЕСКОМ СИГНАЛЕ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ ВЕЩЕСТВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А. Самохин

*Исследуются особенности фотоакустического сигнала в конденсированных средах, связанные с изменением поглощательной способности вещества при плавлении в процессе импульсного облучения.*

Действие коротких импульсов оптического излучения возбуждает в поглощающих средах акустическое возмущение, которое связано с изменением удельного объема вещества, обусловленного, в частности, нагревом среды /1/. Для сильнопоглощающих сред, у которых глубина проникновения излучения мала по сравнению с характерной длиной теплового влияния, выражение для фотоакустического сигнала давления может быть представлено в следующем виде /2/:

$$P = \rho\beta\chi \frac{dT_s}{dt}, \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $\beta$  и  $\chi$  — плотность, коэффициент теплового расширения и температуропроводность среды;  $T_s$  — температура облучаемой поверхности, которая определяется из решения уравнения теплопроводности с поверхностным источником. В случае симметричного импульса излучения соотношение (1) дает асимметричный биполярный импульс давления, у которого амплитуда положительной полуволны примерно в два раза превосходит амплитуду следующей за ней фазы разрежения (см., напр., /3/ и цитированную там литературу).

Трансформация фотоакустического сигнала при плавлении во время облучения обусловлена изменением теплофизических и оптических свойств среды. Изменение плотности расплава  $\Delta\rho$  по сравнению с плотностью твердой фазы в линейном приближении по  $\Delta\rho$  дает следующий вклад в давление:

$$\Delta p = -\Delta\rho \frac{d(Vh)}{dt}, \quad V = \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

где  $V$  — скорость движения фронта плавления вглубь среды /2/.

Фотоакустический сигнал (1) также трансформируется при плавлении, в частности, из-за изменения оптических свойств облучаемой поверхности, которые влияют на скорость ее нагрева. Возрастание отражательной способности облучаемой поверхности, наблюдаемое у полупроводников, металлизующихся при плавлении, должно приводить к уменьшению фотоакустического сигнала. В этом случае  $\Delta\rho > 0$  и вклад (2) также оказывается отрицательным на начальном этапе движения фронта плавления.

Кратковременное падение давления на положительной полуволне фотоакустического сигнала давления наблюдалось в /3/ при действии оптических импульсов с длительностью 30–40 нс на образцы из германия. В настоящей работе обсуждаются особенности в поведении (1) и (2), которые обусловлены изменением поглощательной способности облучаемой поверхности при плавлении.

Рассмотрим сначала трансформацию фотоакустического сигнала (1), используя для этого простейшую модель кусочно-линейного поведения поглощаемой интенсивности  $I(t)$ , которая допускает точное аналитическое решение.

Если поглощаемая интенсивность при  $t < t_1$  растет линейно со временем,  $I(t) = a_1 t = I_1(t)$ , при  $t_1 \leq t < t_2$  линейно убывает,  $I_2(t) = I_1(t_1) - a_2 \Delta t_1$ , а затем при  $t \geq t_2$  снова растет,  $I_3(t) = I_2(t_2) + a_3 \Delta t_2$ ,  $\Delta t_i = t_i - t$ , то с помощью известного соотношения для температуры поверхности  $T_s = T_s(0) + \int_0^t \frac{I(t-\tau)}{\rho c \sqrt{\chi \pi \tau}} d\tau$  в рассматриваемом случае получаем:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{2}{c\rho\sqrt{\chi\pi}} [a_1\sqrt{t} - (a_1 + a_2)\sqrt{\Delta t_1}\theta(\Delta t_1) + (a_2 + a_3)\sqrt{\Delta t_2}\theta(\Delta t_2)], \quad (3)$$

где  $\theta(t) = 0$  при  $t < 0$  и  $\theta(t) = 1$  при  $t \geq 0$ .

Из (3) видно, что при  $a_2 \gg a_1$  фотоакустический сигнал давления (1) после начала уменьшения поглощаемой интенсивности быстро падает, обращаясь в нуль при  $\Delta t_1 \cong (a_1/a_2)^2 t_1$  и принимая затем отрицательные значения, если  $t_2 - t_1 > (a_1/a_2)^2 t_1$ . Последующее нарастание давления происходит не столь быстро, поскольку  $a_3 \ll a_1$ . Из (1) и (3) получается следующее соотношение между перепадом давления на интервале  $t_2 - t_1$  и соответствующим изменением поглощаемой интенсивности на этом же интервале:

$$p(t_1) - p(t_2) = 2(\beta/c) [I(t_1) - I(t_2)] [\chi/\pi(t_2 - t_1)]^{1/2}. \quad (4)$$

Время изменения  $t_2 - t_1$  оптических свойств облучаемой поверхности при плавлении определяется параметром  $(aV)^{-1}$ , который зависит от коэффициента поглощения жидкой фазы  $a$  и может меняться при изменении интенсивности и длины волны излучения. При  $a \cong 10^5 \text{ см}^{-1}$  и  $V \cong 10^4 \text{ см/с}$  величина  $t_2 - t_1$  попадает в наносекундный диапазон. В работе [3] длительность переднего фронта провала на сигнале давления составляет примерно 10 нс, что уже близко к пределу разрешающей способности системы регистрации в условиях эксперимента [3]. Сопоставление соотношения (4) с более подробными экспериментальными данными позволит определить относительное влияние переменной поглощательной способности на форму фотоакустического сигнала при плавлении вещества на облучаемой поверхности.

Изменение фотоакустического сигнала при плавлении, обусловленное перепадом плотности  $\Delta\rho$  (2), имеет место и при постоянной поглощательной способности облучаемой поверхности. Очевидно также, что при рассмотрении динамики фронта плавления на малых временах, когда толщина слоя расплава не превосходит глубину проникновения излучения в среду, приближение поверхностного поглощения оказывается недостаточным.

Скорость движения фронта расплава на самом начальном этапе плавления можно оценить с помощью условия Стефана

$$LU \cong c\chi \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (5)$$

где  $L$  обозначает теплоту плавления, а температурный градиент в твердой фазе связан с величиной перегрева под ее поверхностью  $\Delta T$  относительно температуры плавления и характерной длиной теплового влияния  $\Delta z \cong \sqrt{\chi\Delta t_1}$ :

$$\frac{\partial T}{\partial z} \cong \frac{\Delta T}{\Delta z} \cong \frac{\partial T}{\partial t} \left( \frac{\Delta t_1}{\chi} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Начальная скорость перегрева в (6) соответствует скорости изменения температуры поверхности (3) непосредственно перед достижением температуры плавления в момент  $t = t_1$ .

Из (2), (5), (6) получается следующее выражение для того вклада в давление, который связан с перепадом плотности при плавлении:

$$\Delta p = -\frac{4}{3} \Delta\rho \left( \frac{c}{L} \frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 \chi\Delta t_1. \quad (7)$$

Отметим, что в случае реализации перегрева на облучаемой поверхности изменение давления  $\Delta p$  в начальный момент плавления будет более резким, чем (7). Дальнейшее поведение  $\Delta p$  существенно зависит, в частности, от изменения поглотательной способности и может оказаться немонотонным уже на интервале  $t_1 < t < t_2$ .

Наблюдение подобных особенностей фотоакустического сигнала возможно, в принципе, с помощью существующих систем регистрации импульсных давлений, разрешение которых уже достигло субнаносекундного диапазона и позволяет исследовать тонкие особенности динамики плавления вещества под действием коротких импульсов оптического излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лямшев Л. М. УФН, 135, 637 (1981).
2. Коротченко А. И., Самохин А. А. Препринт ФИАН № 223, М., 1981.
3. Веселовский И. А. и др. Квантовая электроника, 12, 381 (1985); Препринт ИОФАН № 277, М., 1985.

Поступила в редакцию 13 мая 1986 г.