

- [1] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Андриеш А.М., Мереуцэ А.З., Сырбу А.В., Яковлев В.П. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 5. С. 66-71.
- [2] Каррон Е., Yun С.Р., Harbison J.P., Hwang D.M., Stoffel N.G. 11th IEEE Int. Semiconductor Laser Conf. Boston, Mass., 1988, New York. P. 74.
- [3] Мереуцэ А.З., Петров А.И., Прокудина В.М., Сырбу А.В., Тарченко В.П., Яковлев В.П. // Письма в ЖТФ, 1989. Т. 15. В. 9. С. 50-54.
- [4] Мереуцэ А.З., Сырбу А.В., Яковлев В.П. Тр. координационного совещания социалистических стран по физическим проблемам оптоэлектроники. Баку, 1989. С. 56.
- [5] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Аксенов В.Ю., Ларионов В.Р., Румянцев В.Д., Хвостиков В.П. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 10. С. 1771-1775.
- [6] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Аксенов В.Ю., Налет Т.Н., ФьонгТ., Румянцев В.Д., Хвостиков В.П. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 22. С. 2057-2060.

Поступило в Редакцию
13 марта 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 9

12 мая 1990 г.

07; 08

© 1990

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ФОТООКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

В.П. Зелёный, Г.С. Митюрин

В фотоакустической спектроскопии конденсированных сред чаще всего используются уже ставшие традиционными два способа регистрации фотоакустического (ФА) сигнала: газомикрофонный и пьезоэлектрический. В первом методе основную роль играют процессы передачи тепла от исследуемого образца в детекторный газ, при этом упругими деформациями в объеме образца обычно

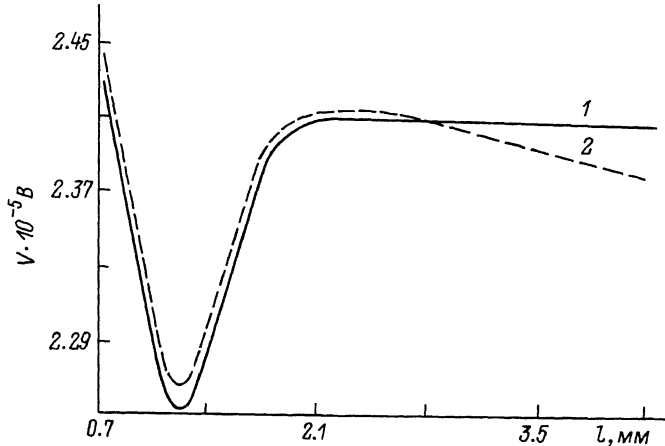


Рис. 1. Зависимость амплитуды ФА сигнала (1 - газомикрофонный метод регистрации, 2 - пьезоэлектрический) от длины образца l , (коэффициент поглощения $\alpha = 10^3 \text{ м}^{-1}$, $\beta_s = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент температурного расширения $\alpha_t = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $U_s = 9.8 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, $\Omega = 2121 \text{ Гц}$, $E = 0.01 \text{ В/м}$).

пренебрегают¹. Метод пьезоэлектрической детекции ФА сигнала основан на расчете термоупругих колебаний, вызванных в образце модулированным поглощением падающего светового пучка. В этом случае пренебрегают теплообменом с окружающей средой. По сути дела, в каждом из методов часть информации неизбежно теряется, поэтому представляет интерес разработка новых или дополнительных к существующим методик регистрации ФА сигнала в конденсированных средах.

При исследовании безизлучательной релаксации и электронных переходов в полупроводниковых кристаллах n -типа CdS авторами [3] использовался комбинированный метод фотоакустической и фотопроводящей спектроскопии. В работе [4] предложен неконтактный оптико-акустический метод, в котором реализован тепловой механизм формирования ФА сигнала с его последующей пьезоэлектрической регистрацией. Изучение неоднородностей электронных характеристик вдоль поверхности полупроводников комбинированным фотоакустическим методом проводилось в [5].

¹ Учет колебаний поверхности образца в рамках модели составного поршня проведен в [1, 2], где показано, что данная модель справедлива в частном случае слабопоглощающих сред ($\alpha < 1 \text{ см}^{-1}$) для частот модуляции падающего излучения $> 1 \text{ кГц}$.

Цель данной работы - исследовать возможности комбинированного метода регистрации ФА сигнала, учитывающего энергетику процессов, связанную как с теплопередачей от поверхности исследуемого изотропного образца в детекторный газ, так и с его объемными упругими деформациями. Для реализации схемы комбинированного метода регистрации ФА сигнала необходимо модифицировать ФА ячейку, расположив исследуемый образец на пьезоэлектрический детектор продольных упругих колебаний вместо подложки. Из решения системы уравнений теплопроводности для образца и волновых уравнений для продольных смещений в образце и пьезопреобразователе при граничных условиях $u_s(l_1) = u_p(l_1)$, $\sigma_s(l_1) = \sigma_p(l_1)$, $\sigma_s(0) = 0$, $\sigma_p(l_2) = 0$ получим выражения для разности потенциалов, развиваемой пьезодетектором (ср. с [6]),

$$V = \frac{2h}{x} \sin^2 \frac{k_1(l_2 - l_1)}{2} (\rho \cos k_0 l_1 + N k_0 c^T \sin k_0 l_1 - F). \quad (1)$$

Здесь введены обозначения:

$$x = k_0 c^T \sin k_0 l_1 \cos k_1(l_2 - l_1) + k_1 c^D \cos k_0 l_1 \sin k_1(l_2 - l_1),$$

$$N = \gamma \alpha_t (\alpha e^{\sigma_s l_1} - b e^{-\sigma_s l_1} + c e^{-\alpha l_1}),$$

$$\rho = \gamma \alpha_t c^T (\sigma_s a e^{\sigma_s l_1} + \sigma_s b e^{-\sigma_s l_1} - \alpha c e^{-\alpha l_1}) -$$

$$- B \alpha_t (\alpha e^{\sigma_s l_1} + V e^{-\sigma_s l_1} - E e^{-\alpha l_1}),$$

$$F = \gamma \alpha_t c^T (\sigma_s a + \sigma_s b - \alpha c) - B \alpha_t (\alpha + V - E),$$

$$\alpha = \frac{E}{2 \operatorname{sh} \sigma_s l_1} \left[(e^{-\alpha l_1} + W_0) - (\theta_0 + 1) e^{-\sigma_s l_1} \right],$$

$$V = - \frac{E}{2 \operatorname{sh} \sigma_s l_1} \left[(e^{-\alpha l_1} + W_0) - (\theta_0 + 1) e^{\sigma_s l_1} \right],$$

$$a = \frac{\sigma_s \alpha}{\sigma_s^2 + k_0^2}, \quad b = \frac{\sigma_s V}{\sigma_s^2 + k_0^2}, \quad c = \frac{\alpha E}{\alpha^2 + k_0^2},$$

$$F = \frac{\alpha A}{\alpha^2 - \sigma_s^2}, \quad A = \frac{c \sqrt{\epsilon'} n_1^2 |E|^2}{\sqrt{2} k_s (n_0 + n_1)^2}, \quad \alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\epsilon''}{2 \sqrt{\epsilon'}},$$

где $\theta = E \theta_0$, $W = E W_0$ - комплексные амплитуды температурных полей на границах образец-детекторный газ и образец-пьезопреобразователь, определяемые из решения системы уравнений теплопроводности для областей ФА ячейки:

$$\theta = E \left[e^{-\alpha l_1} (\rho - r) - \operatorname{sh} \sigma_s l_1 (1 - pr) + \operatorname{ch} \sigma_s l_1 (r - p) \right] / x, \quad (2)$$

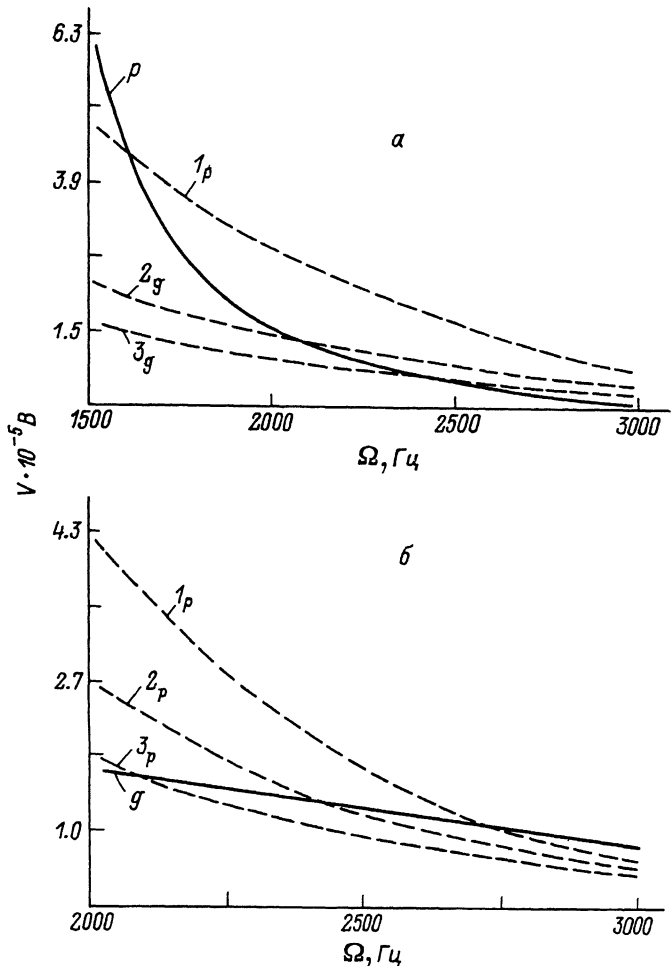


Рис. 2. Зависимость амплитуды ФА сигнала от частоты модуляции падающего излучения: а - при различных длинах столба газа ($1g$ - 2 мм, $2g$ - 6 мм, $3g$ - 10 мм), б - при различных толщинах пьезодетектора ($LiNbO_3$, $h = 0.5 \cdot 10^{10}$ В/м, $v_p = 7.3 \cdot 10^3$ м/с; $1p$ - 3 мм, $2p$ - 4 мм, $3p$ - 5 мм).

$$W = E \left[(r+g) - e^{-\alpha l_1} (sh \sigma_s l_1 (1+rg) + ch \sigma_s l_1 (r+g)) \right] / x, \quad (3)$$

где обозначено $x = sh \sigma_s l_1 (1+pg) + ch \sigma_s l_1 (p+g)$, $\sigma_s = (1+i)\alpha_s$, $r = (1-i)\alpha/\alpha_s$, $\rho = (\sigma_p k_p)/(\sigma_s k_s)$, $\alpha_s = \sqrt{\Omega/2\beta_s}$, Ω - частота модуляции падающего света, β_s - коэффициент температуропроводности образца, l_1, l_2 - длины исследуемого образца и пьезо-

преобразователя соответственно. Остальные обозначения соответствуют принятым в [7]. Разность потенциалов, развиваемая в газомикрофонном методе, пропорциональна розенцвейговскому давлению $V_g = K \Delta P$, где K — чувствительность микрофона, а $\Delta P \sim \theta$.

Таким образом, часть энергии падающего излучения расходуется на возбуждение сигнала в столбе детекторного газа, а другая часть преобразуется в энергию упругих колебаний пьезоэлектрика. При этом на разность потенциалов, детектируемых пьезопреобразователем, как следует из (1), оказывают влияние изменения амплитуд температурных полей на границах $x = l_1$ и $x = l_2$.

Численный анализ выражений для амплитуд ФА сигналов, в частном случае термически толстого образца, при этом в (2), (3) $W = 0$, $\rho = 0$, показывает, что на фиксированной частоте модуляции падающего излучения, при определенной толщине образца, амплитуды ФА сигналов V_g и V_p , как следует из рис. 1, могут быть сравнимы по величине. Провалы на графиках зависимостей $V_{g,p} = f_{1,2}(l_1)$ (рис. 1) объясняются интерференцией тепловых волн, что отмечалось, например в [8]. Область частот модуляции $\Delta \Omega$, в которой графики зависимостей $V_g = f_1(\Omega)$ и $V_p = f_2(\Omega)$ пересекаются (рис. 2), зависит прежде всего от чувствительности микрофона, величины $h = e/\epsilon^2$, определяющей пьезоэлектрические свойства детектора, а также геометрических размеров газовой камеры, образца и пьезопреобразователя. Уменьшение длины газового слоя в ячейке, при $l_1 = \text{const}$, $l_2 = \text{const}$, приводит к возрастанию амплитуды ФА сигнала и значительному смещению точки пересечения графиков ($\Delta \Omega \approx 1000$ Гц) (рис. 2,а). Вариация толщины пьезопреобразователя при $l_g = \text{const}$, $l_1 = \text{const}$ оказывает еще более существенное влияние (\approx в 2 раза) на рассматриваемую область частот модуляции (рис. 2,б).

Таким образом, учет объемных упругих колебаний исследуемого образца в газомикрофонном методе для определенного диапазона частот модуляции, как показано выше, принципиально необходимо. Комбинированный метод детекции ФА сигнала позволит, с одной стороны, получать одновременно более полную информацию об оптических, акустических, теплофизических свойствах исследуемых образцов, а с другой — проводить исследования в широком интервале частот модуляции без традиционной замены элементов системы регистрации амплитудных и фазовых характеристик ФА сигнала.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] M c D o n a l d F.A., W e t s e l G.C.Jr. // J. Appl. Phys. 1978. V 49. N 4. P. 2313–2322.
- [2] M c D o n a l d F.A. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 9. P. 1363–1367.
- [3] S t r a s h i l o v V.L., K o n s t a n t i n o v L.L. // Appl. Phys. 1987. V B43. N 1. P. 17–21.

- [4] В и н о к у р о в С.А. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14.
В. 1. С. 34-36; // Оптика и спектроскопия 1988. Т. 64.
В. 3. С. 473-475.
- [5] M a n d e l i s A., S i u E.K.M. // Phys. Rev.
B. 1986. V. 34. N 10. P. 7209-7221.
- [6] Гуляев Ю.В., Морозов А.И., Раевский В.Ю.//
Акустический журнал. 1985. Т. 31. № 4. С. 469-474.
- [7] М и т ю р и ч Г.С. // ДАН БССР. 1982. Т. 26. № 5.
С. 414-417.
- [8] M a t ý s k a S., M a t ý s k o v a E.,
S l a d k ý P. // Czech. J. Phys. 1985. V. B35.
P. 433-441.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило в Редакцию
16 февраля 1990 г.