

ЛИТЕРАТУРА

1. Корпел А. Акустооптика. М., 1993.
2. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М., 1985.
3. Harris S., Wallace R.//J. Opt. Soc. Am. 1969. 59, N 6. P. 744.
4. Магдич Л. Н.//Изв. АН СССР, сер. физ. 1980. 44, № 8. С. 1683.
5. Parugin V. N.//Proc. SPIE. 1992. 1844. P. 97.
6. Parugin V. N., Vershoubskiy A. V.//Proc. of Int. Symp. on Acoustoelectronics. St. Petersburg, 1995. P. 215.
7. Парыгин В. Н., Жмакин И. Н., Медведков О. И.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. 34, № 5. С. 45.

Поступила в редакцию
22.02.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36. № 6

УДК 534.1.16:620.1.179

НОВЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

А. А. Карабутов, А. П. Кубышкин

(кафедра общей физики и волновых процессов)

Предложен новый вариант лазерной оптико-акустической спектроскопии, заключающийся в лазерном возбуждении мощных поверхностных акустических волн и регистрации теплового излучения поверхности, связанного с дилатационным изменением температуры в ПАВ. Показано, что относительные изменения температуры в ПАВ пропорциональны относительной деформации объема (коэффициент пропорциональности равен 0,3—2,5). Метод может быть эффективен для бесконтактного неразрушающего контроля объектов, находящихся при повышенных температурах.

Оптико-акустическая спектроскопия поверхностных акустических волн (ПАВ) позволяет определять разнообразные характеристики твердых тел, в частности механические, с достаточно высокой локальностью, точностью и удобством [1, 2] и поэтому является перспективным методом исследования структуры и состояния поверхностных слоев [1—8]. Измерение дисперсии скорости возбуждаемых лазером ПАВ позволяет, например, определять толщину и упругие модули покрытий на подложках [3—6]. Более низкочастотные ПАВ, возбуждаемые лазером, использовались также для неразрушающего контроля поверхностных трещин в металлах и графито-эпоксидных композитах [7—8]. Таким образом, лазерная генерация ПАВ может использоваться в широком классе исследований.

В оптико-акустической спектроскопии ПАВ для регистрации сигнала используются в основном контактные (прежде всего пьезоэлектрические) преобразователи. Поскольку лазерное возбуждение ПАВ происходит бесконтактно, представляется перспективным осуществлять регистрацию ПАВ также бесконтактно, что очень важно с практической точки зрения. Это позволит реализовать полностью бесконтактный вариант ультразвуковой дефектоскопии и неразрушающего контроля.

Для этих целей использовались всевозможные методы оптической регистрации ПАВ, основанные на различных эффектах: дефлекции лазерного луча [9, 10] на возмущениях поверхности, модуляции коэффициента оптического отражения поверхности акустической волной, дифракции пробного пучка на возмущении поверхности, связанной с ПАВ, доплеровской велосиметрии колебаний поверхности (примеры см. в обзоре [11]). Наибольшее развитие получили методы регистрации

ПАВ с помощью лазерной интерферометрии с использованием интерферометров различных типов: конфокальных Фабри-Перо [12—14], гомодинных одноканальных [15], гетеродинных [9, 16], волоконно-оптических [17]. Однако интерферометрические методы трудно применять при шероховатых и рассеивающих поверхностях, с которыми обычно имеют дело при исследовании реальных объектов. Следовательно, задача бесконтактной регистрации и измерения характеристик ПАВ остается по-прежнему актуальной. Описанию нового (не встречавшегося ранее нами в литературе) метода регистрации ПАВ посвящена настоящая работа.

Для исследования конструкционных материалов бесконтактным методом широко применяется термоволновая дефектоскопия с регистрацией вариаций температуры исследуемой поверхности по избыточному тепловому излучению. Эти изменения могут быть вызваны как внутренними причинами, например переменными тепловыми полями в окрестностях дефектов при переменных механических напряжениях, так и прямым внешним нагревом (например, лазерным излучением). Метод ИК-радиометрии оказался высокоэффективным при дефектоскопии непрозрачных приповерхностных слоев [18, 19].

В то же время адиабатическое распространение акустических волн (что справедливо во всем ультразвуковом диапазоне частот [1, 2]) сопровождается соответствующим изменением температуры, которое в принципе также может быть зарегистрировано по вариации теплового излучения исследуемой поверхности. Таким образом, предлагается новый вариант лазерной оптико-акустической спектроскопии, заключающийся в лазерном возбуждении мощных ПАВ и регистрации теплового излучения поверхности, связанного с дилатационным изменением ее температуры. Этот вариант бесконтактной оптико-акустической спектроскопии может применяться для исследования дисперсии скорости ПАВ в непрозрачных материалах, работающих в тяжелых условиях (например, при высоких температурах), когда контактные методы не могут быть использованы. Его преимущества перед другими оптическими методами регистрации связаны с возможностью исследования шероховатых и плохо отражающих свет поверхностей, с отсутствием маскирующего влияния ударной волны в воздухе, сопровождающей лазерное возбуждение ПАВ.

Проведем оценки чувствительности предлагаемого метода. При адиабатическом изменении объема твердого тела изменение температуры может быть выражено следующей формулой [20]:

$$c_v \frac{T - T_0}{T_0} = -K \alpha_{иц}, \quad (1)$$

где c_v — удельная теплоемкость, T — температура (T_0 — ее равновесное значение), K — модуль всестороннего сжатия, α — объемный коэффициент теплового расширения, $\alpha_{иц}$ — тензор деформации. В (1) входит изотермический модуль всестороннего сжатия; в то же время из непосредственно измеряемых величин (например, скоростей продольной и сдвиговой волн) определяется адиабатический модуль K_a . Используя известное соотношение между ними:

$$\frac{1}{K_a} = \frac{1}{K} - \frac{T \alpha^2}{c_p}, \quad (2)$$

и связь адиабатического модуля со скоростями акустических волн

$$K_a = \rho \left(c_l^2 - \frac{4}{3} c_t^2 \right), \quad (3)$$

нетрудно получить выражение для изменения температуры в виде

$$\frac{T - T_0}{T_0} = \frac{\alpha}{c_p} \left(c_l^2 - \frac{4}{3} c_t^2 \right) \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (4)$$

Полученное соотношение показывает, что дилатационное изменение температуры, отнесенное к равновесной температуре, имеет порядок относительного изменения объема в волне. Коэффициент, связывающий относительные изменения температуры и объема,

$$\eta = \frac{\alpha}{c_p} \left(c_l^2 - \frac{4}{3} c_t^2 \right), \quad (5)$$

определяется только характеристиками среды и, очевидно, имеет отношение к коэффициенту Грюнайзена. Значения этого параметра для некоторых сред приведены в таблице. Как видно, его величина лежит в пределах 0,3—2,2 и слабо зависит от типа вещества. Поэтому относительное изменение температуры в ПАВ будет иметь значение, близкое к величине относительной деформации объема.

Параметры среды и коэффициент η , связывающий относительные изменения плотности и температуры в ПАВ (значения параметров веществ взяты из [22])

Параметры	Материал				
	Al	Fe	SiO ₂	Si	ПММА
c_p , Дж/(кг·К)	858	422	223	648	1500
α , 10 ⁻⁵ , К ⁻¹	6,7	3,6	1,3	0,76	24
v , 10 ³ , м/с	6,26	5,85	5,75	8,43	2,67
c_t , 10 ³ , м/с	3,08	3,23	3,3	5,84	1,12
η	2,16	1,73	1,12	0,3	0,87

При возбуждении ПАВ относительная деформация может достигать величины 10⁻⁴—10⁻³. Особенно эффективно возбуждение мощных ПАВ с помощью лазера [1, 2]. Соответственно модуляция температуры в распространяющейся акустической волне может достигать величин 0,01—1 К. Этого достаточно для реализации ИК-радиометрического метода регистрации ПАВ, поскольку чувствительность такого метода позволяет регистрировать изменения температуры поглощающей поверхности порядка 0,1—1 К в полосе частот до 1 МГц.

Чувствительность метода ИК-радиометрии повышается с ростом начальной температуры объекта — за счет возрастания теплового потока. В соответствии с законом Стефана—Больцмана изменение плотности потока излучения черного тела [21]

$$\Delta W = 4\sigma T^3 \Delta T, \quad (6)$$

где σ — постоянная Стефана—Больцмана. Соответственно приращение температуры на величину $\Delta T = 0,1$ К при температуре $T_0 = 1000$ К вызывает изменение интенсивности теплового потока на величину порядка

$$\delta P = \delta W / \delta \Omega \sim 4 \cdot 10^{-4}, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср}), \quad (7)$$

что вполне может быть зарегистрировано ИК-фотодатчиками.

Поэтому ИК-регистрация ПАВ особенно привлекательна для исследований механических характеристик сред при повышенных темпе-

ратурах. Кроме того, имеет смысл специально повышать температуру исследуемого объекта для увеличения чувствительности при бесконтактной ИК-регистрации ПАВ. К тому же вследствие смещения максимума спектральной плотности излучения (функции Планка) с ростом температуры регистрацию ИК-сигнала можно производить в более удобном — более коротковолновом участке спектра (3—5 мкм), где чувствительность ИК-датчиков выше.

Таким образом, подводя итог, можно сделать вывод, что метод регистрации ПАВ с помощью измерения приращения температуры поверхности, по которой распространяется ПАВ, может быть эффективным при

а) регистрации достаточно мощных акустических волн (относительные деформации 10^{-4} — 10^{-3});

б) регистрации ПАВ на нагретых до 500—1000 К и выше объектах.

Предложенный новый метод лазерной бесконтактной оптико-акустической спектроскопии ПАВ может найти применение при неразрушающем контроле конструкционных материалов, эксплуатируемых в экстремальных условиях повышенных температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карабутов А. А.//УФН. 1985. 147, № 3. С. 605.
2. Гусев В. Э., Карабутов А. А. Лазерная оптоакустика. М., 1991.
3. Aussel J. D., Monchalin J. P.//Review of Progress in Quant. NDE/Eds. D. O. Thompson, D. E. Chimonti. N. Y., 1989. V. 8a. P. 535.
4. Neubrand A., Konstantinov L., Hess P.//Physical Acoustics/Eds. O. Leroy, M. A. Breazeale. N. Y., 1991. P. 551.
5. Coufal H., Meyer K., Grygier R. K. et al.//Proc. of 8 ITMPPP. Paris, 1994. P. 485.
6. Schneider D., Scheibe H. J., Schwarz Th., Hess P.//Diam. Relat. Mater. 1993. 2. P. 1396.
7. Chenu C., Noroy M. H., Royer D.//Appl. Phys. Lett. 1994. 65. P. 1091.
8. Corbel C., Guillois F., Royer D. et al.//IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectr. Freq. Control. 1993. 40. P. 710.
9. Coufal H., Meyer K., Grygier R. K. et al.//J. Acoust. Soc. Am. 1994. 95. P. 1158.
10. Zhang X., Gan Ch., Fei D., Zhang Sh.//Proc. of 8 ITMPPP. Paris, 1994. P. 507.
11. Monchalin J. P.//IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectr. Freq. Control. 1986. 33. P. 485.
12. Monchalin J. P.//Appl. Phys. Lett. 1985. 47. P. 14.
13. Cand A., Monchalin J. P., Jia X.//Appl. Phys. Lett. 1994. 64. P. 414.
14. Murphy K. A., Gunter M. F., Claus R. O.//Proc. SPIE. 1993. 1918. P. 110.
15. Weiss P., Sigrist M. W.//J. de Physique IY C7. 1994. 4. P. 729.
16. Monchalin J. P., Aussel J. D., Heon R. et al.//J. Nondestructive Evaluation. 1989. 8. P. 121.
17. Burger C. P., Schumacher N. A., Duffer C. E., Knab T. D.//Opt. Laser Eng. 1993. 19. P. 121.
18. Busse G.//Infrared Phys. 1980. 20. P. 419.
19. Lau S. K., Almond D. F., Patel P. M.//J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. 24. P. 428.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М., 1987.
21. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М., 1990.
22. Физические величины (справочник)/Ред. И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. М., 1991.