

08;12

Применение решетки ультразвуковых преобразователей для измерения скорости и затухания вытекающих акустических волн

© С.А. Титов, Р.Г. Маев, А.Н. Богаченков

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва
E-mail: chembio@sky.chph.ras.ru

Поступило в Редакцию 16 мая 2004 г.

Предложен метод измерения локальных значений скорости и затухания вытекающих акустических волн, основанный на регистрации поля вытекающей волны с помощью неподвижной решетки ультразвуковых преобразователей. По сравнению с известными методами, в которых используется механическое сканирование сфокусированных одиночных преобразователей относительно исследуемой области образца, предложенный метод обладает большим быстродействием за счет электронного переключения приемных каналов решетки и не требует применения прецизионных механических сканеров. Построена лучевая модель измерительной ультразвуковой системы с решеткой ультразвуковых преобразователей и электронным сканированием, теоретические выводы подтверждены экспериментально путем исследования тестовых образцов.

В настоящее время иммерсионные ультразвуковые системы, предназначенные для измерения локальных значений упругих параметров объекта, основаны на обработке пространственно-временных сигналов, получаемых при механическом перемещении сфокусированных преобразователей относительно образца. В количественной акустической микроскопии наибольшее распространение получил метод, заключающийся в сканировании сфокусированного преобразователя перпендикулярно поверхности образца [1]. Недавно была предложена схема измерений с передающим и приемным преобразователем, фокусы которых располагаются в плоскости образца, а выходной сигнал регистрируется при перемещении приемного преобразователя параллельно этой плоскости [2,3]. Путем обработки выходного сигнала подобных систем в пространственно-временной или спектральной области воз-

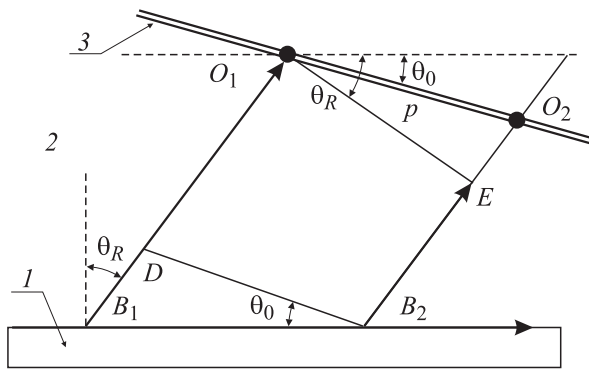


Рис. 1. Лучевая модель ультразвуковой измерительной системы с приемной решеткой преобразователей.

можно восстановление коэффициента отражения ультразвуковой волны в зависимости от угла падения на поверхность раздела иммерсионная жидкость—образец и определение локальных значений фазовой скорости и коэффициента затухания вытекающих акустических волн, таких как волны Рэлея, Лэмба, скользющие продольные волны.

Вследствие необходимости механического перемещения преобразователей указанные системы имеют общие недостатки, выражающиеся в медленности процесса измерения и наличии механических узлов, погрешность которых ограничивает точность измерений. В данной работе предложена иммерсионная измерительная ультразвуковая система, в которой акустическое поле вытекающей волны принимается неподвижной решеткой ультразвуковых преобразователей, а выходной пространственно-временной сигнал формируется путем электронного переключения приемных каналов.

Предложенный метод измерений может быть объяснен с помощью лучевой модели, представленной на рис. 1. Пусть вытекающая акустическая волна возбуждается некоторым преобразователем, расположенным левее точки B_1 и распространяется вдоль поверхности образца 1 , переизлучаясь („вытекающая“) в иммерсионную жидкость 2 . Эта волна принимается одномерной решеткой преобразователей 3 , наклоненной на угол θ_0 по отношению к плоскости образца и имеющей пространственный

период $O_1O_2 = p$. Определим относительную временную задержку Δt и отношение амплитуд откликов двух соседних элементов решетки, положение которых определяется точками O_1 и O_2 . Возбуждение этих откликов производится соответственно акустическими лучами B_1O_1 и B_2O_2 , распространяющимися под критическим углом θ_R .

Опустим перпендикуляр O_1E на отрезок B_2O_2 . Поскольку время распространения вытекающей волны до точек O_1 и E одинаково, то второй отклик оказывается задержанным относительно первого на время прохождения отрезка EO_2 . Таким образом,

$$\Delta t = \frac{EO_2}{C} = \frac{p}{C} \sin(\theta_R - \vartheta_0), \quad (1)$$

где C — скорость волны в иммерсионной жидкости. Измеряя задержку откликов Δt соседних элементов решетки, можно определить критический угол вытекающей волны θ_R , а следовательно, и ее скорость

$$C_R = \frac{C}{\sin \theta_R}. \quad (2)$$

Отношение амплитуд гармонических откликов соседних элементов решетки A_2/A_1 определяется коэффициентом затухания ультразвука в иммерсионной среде α_w и коэффициентом затухания вытекающей волны α :

$$\eta = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\exp(-\alpha \cdot B_1B_2 - \alpha_w \cdot B_2O_2)}{\exp(-\alpha_w \cdot B_1O_1)}. \quad (3)$$

Проведем B_2D параллельно O_1O_2 . Тогда $B_1O_1 - B_2O_2 = B_1D$. Далее из треугольника B_1B_2D по теореме синусов имеем

$$\frac{B_1B_2}{\sin(\pi/2 - (\theta_0 - \theta_R))} = \frac{B_1D}{\sin \theta_0} = \frac{p}{\sin(\pi/2 - \theta_R)}. \quad (4)$$

Окончательно для отношения амплитуд получим

$$\eta = \exp\left\{(-\alpha \cdot \cos(\theta_0 - \theta_R) + \alpha_w \cdot \sin \theta_0) \cdot \frac{p}{\cos \theta_R}\right\}. \quad (5)$$

Таким образом, измерив отношение η и критический угол θ_R и зная коэффициент затухания в жидкости α_w , можно определить коэффициент затухания вытекающей волны α .

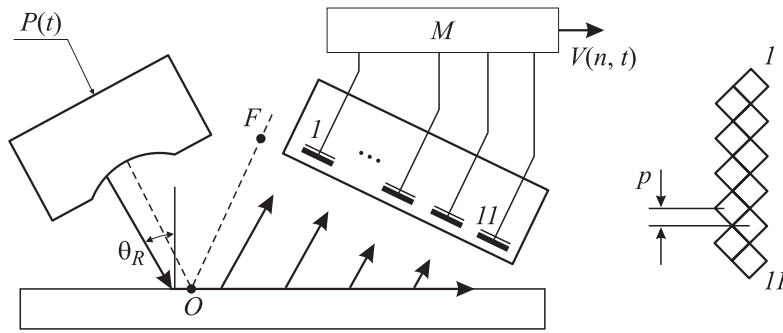


Рис. 2. Схема ультразвуковой измерительной системы с решеткой приемных преобразователей и электронным сканированием.

Схема экспериментальной системы, построенной по предложенному принципу, представлена на рис. 2. Зондирующая ультразвуковая волна создается в иммерсионной жидкости (воде) сфокусированным преобразователем IS-HR-1/4-20 (XACTEX Inc., USA), имеющим центральную частоту 20 MHz, диаметр апертуры 6 mm и фокусное расстояние 19 mm. Приемная решетка состоит из 11 одинаковых квадратных преобразователей со стороной 1.25 mm, схема расположения которых приведена на рисунке справа. Такое расположение элементов решетки позволило получить пространственный период в направлении регистрации вытекающей волны, равный $p = 0.884$ mm. Преобразователи выполнены из пьезокерамики PZT-5, толщина которой соответствует центральной частоте 20 MHz. Внешняя поверхность пьезоэлементов покрыта общим тонкопленочным земляным электродом и находится в непосредственном контакте с водой, а их внутренние стороны для обеспечения широкополосности соединены с акустически согласованным демпфером.

Сфокусированный преобразователь и решетка наклонены по отношению к вертикальной оси на угол $\theta_0 = 27.0^\circ$. Расстояния между преобразователем, решеткой и образцом были выбраны таким образом, что зеркальное изображение фокуса F находилось в иммерсионной жидкости слева от решетки так, как это показано на рис. 2. Таким образом, луч OF , зеркально отраженный от поверхности образца, проходил мимо приемных элементов, а выходной сигнал решетки целиком определялся откликами вытекающей волны.

Материал	V_L , m/s	V_S , m/s	C_R^* , m/s	α^* , 1/mm (4 MHz)	C_R , m/s	α , 1/mm (4 MHz)
Плавленый кварц	5959	3767	3426	0.28	3430	0.30
Алюминиевый сплав	6393	3163	2960	0.24	2973	0.28

Возбуждение передающего преобразователя производилось одиночными видеоимпульсами $P(t)$ амплитудой около 150 В, длительностью 30 ns. Элементы приемной решетки последовательно подключались посредством мультиплексора (M) ко входу широкополосного (1–30 MHz) усилителя стандартной ультразвуковой системы. Время сбора полного набора данных $V(n, t)$, где $n = 1, \dots, 11$ — номер канала, не превышает 100 ms.

Для измерения скорости вытекающей волны регистрировались временные задержки принятых в каждом канале импульсов, и рассчитывалось среднее значение относительной задержки Δt . Для определения коэффициента затухания вытекающей волны отклики $V(n, t)$ подвергались сначала спектральному анализу и рассчитывалось для некоторой частоты среднее значение отношения амплитуд откликов соседних элементов решетки η . Скорость C_r и коэффициент затухания α вытекающей волны рассчитывались затем по выведенным выше формулам (1), (2) и (5).

Для экспериментальной апробации предложенного метода было проведено исследование ряда материалов, акустические свойства которых были определены независимым способом. В качестве характерного примера в таблице приведены результаты, полученные для плоскопараллельных образцов из плавленого кварца и алюминиевого сплава.

Измерение скорости продольной V_L и поперечной V_S волн проводилось эхоимпульсным методом [4] с использованием соответственно преобразователей V205 и V156 (Panametrics, USA). По полученным значениям V_L , V_S и плотности материала находились полюса коэффициента отражения плоской волны от поверхности раздела иммерсионная жидкость—образец, по действительной и мнимой частям которых рассчитывались скорость C_R^* и коэффициент затухания α^* вытекающей рэлеевской волны соответственно [3].

Сравнение рассчитанных величин скорости и затухания вытекающих волн со значениями C_R и α , измеренными системой с ультразвуковой решеткой преобразователей и электронным сканированием, демонстрирует удовлетворительное соответствие, что может рассматриваться как экспериментальное подтверждение предложенного метода.

Список литературы

- [1] *Briggs A.* Acoustic microscopy. Oxford: Clarendon Press, 1992.
- [2] *Титов С.А., Маев Р.Г., Богаченков А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 4. С. 19–24.
- [3] *Titov S., Maev R., Bogatchenkov A.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics Freq. Cont. 2003. V. 50. N 8. P. 1046–1056.
- [4] *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.