

08;11;12

## Измерение скорости и затухания вытекающих поверхностных акустических волн ультразвуковым микроскопом с двумя фокусирующими преобразователями

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

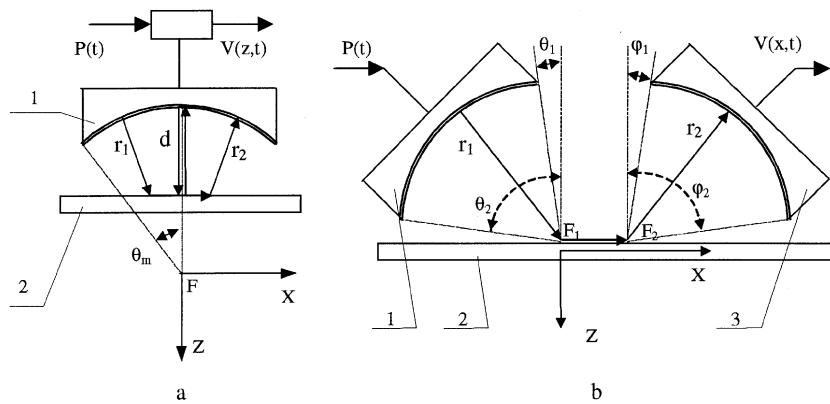
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

В окончательной редакции 2 октября 2000 г.

Предложен новый метод измерения локальных параметров вытекающих поверхностных акустических волн (ВПАВ), в котором используются два фокусирующих преобразователя, а регистрация сигнала осуществляется при сканировании одного из них вдоль поверхности образца. По сравнению с известным методом, в котором один преобразователь перемещается в перпендикулярном к поверхности направлении, предложенный метод позволяет проводить исследования в более широком диапазоне скоростей ВПАВ и обладает меньшей чувствительностью к параметрам иммерсионной жидкости. Метод подтвержден экспериментально путем исследования материалов с известными свойствами.

Среди количественных методов акустической микроскопии наибольшее распространение получил метод локального измерения параметров вытекающих поверхностных волн (ВПАВ), именуемый в англоязычной литературе  $V(z)$  методом [1].

Принцип данного метода может быть рассмотрен в лучевом приближении. Фокусирующий преобразователь  $1$  (рис. 1,  $a$ ), возбуждаемый электрическим сигналом  $P(t)$ , излучает ультразвуковую волну, которая распространяется в иммерсионной среде, отражается от образца  $2$  и принимается тем же преобразователем. При смещении образца  $z < 0$  из фокальной плоскости по направлению к преобразователю в выходной сигнал  $V$  основной вклад дают акустические лучи  $d$  и  $r_1 - r_2$ . Действительно, луч  $d$ , распространяясь нормально к поверхности образца, падает перпендикулярно также на поверхность преобразователя и поэтому эффективно принимается им. Луч  $r_1$  падает на поверхность



**Рис. 1.** Схемы измерений со сканированием перпендикулярно поверхности образца (а) и вдоль поверхности образца (б): 1, 3 — фокусирующие преобразователи, 2 — образец.

образца под критическим углом возбуждения вытекающей поверхностной волны  $\theta_R$ , которая распространяется по поверхности образца и непрерывно переизлучается обратно в жидкость. Среди переизлученных лучей только луч  $r_2$  падает перпендикулярно на преобразователь и дает вклад в выходной сигнал  $V$ .

В случае узкополосного возбуждения преобразователя в принятом сигнале имеет место биение откликов, соответствующих лучам  $d$  и  $r_1 - r_2$ , а модуль зависимости  $|V(z)|$  имеет характерные осцилляции. По периоду и скорости убывания амплитуды этих осцилляций можно измерить скорость и затухание ВПАВ [2]. При широкополосном импульсном возбуждении преобразователя отклики  $d$  и  $r_1 - r_2$  при достаточном смещении образца из фокуса разделяются в выходном сигнале  $V(z, t)$  по времени. Для величины их относительной задержки  $t_R$  справедливо соотношение [3]

$$t_R = \frac{2 \cdot z \cdot (1 - \cos \theta_R)}{C}; \quad \cos \theta_R = \sqrt{1 - \frac{C^2}{C_R^2}}, \quad (1)$$

где  $C \approx 1500$  м/с — скорость ультразвука в иммерсионной жидкости (воде),  $C_R$  — скорость ВПАВ. Результат измерения скорости  $C_R$

определяется при этом не только задержкой  $t_R$ , но и величиной скорости ультразвука в жидкости  $C$ , которая может заметно меняться в зависимости от параметров иммерсионной жидкости, главным образом температуры.

Кроме того, как видно из рис. 1, в рассматриваемой измерительной системе невозможно возбуждение ВПАВ, для которых критический угол  $\theta_R$  больше максимального апертурного угла преобразователя  $\theta_R > \theta_m$ . Таким образом, описываемый метод  $V(z)$  неприменим в области малых значений скорости  $C_R < C / \sin \theta_m$ . Угол  $\theta_m$  не может быть выбран произвольным, поскольку для обеспечения достаточной точности измерения интервал сканирования по координате  $z$  нужно иметь по возможности большим. Обычно угол  $\theta_m$  не превышает  $40^\circ$ , что не дает возможности измерять скорости  $C_R < 2400$  m/s в случае использования воды в качестве иммерсионной жидкости.

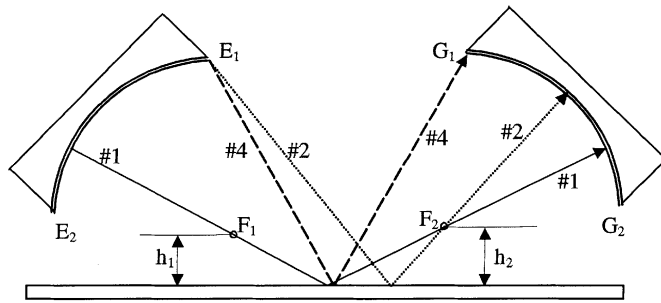
В данной работе предлагается использовать два наклонных преобразователя (рис. 1, *b*), а выходной сигнал приемного преобразователя регистрировать в процессе его сканирования вдоль поверхности образца. При такой конфигурации измерительной системы передающий преобразователь 1 может возбуждать ВПАВ, критические углы которых находятся в интервале  $(\theta_1, \theta_2)$ . Соответственно приемный преобразователь 2 может принимать ВПАВ в интервале углов  $(\varphi_1, \varphi_2)$ . Поскольку сканирование в предлагаемом методе осуществляется вдоль координаты  $x$ , то зазор между преобразователями и поверхностью образца может быть сделан малым, а углы  $\theta_2, \varphi_2$  могут быть близки к  $90^\circ$ . Это означает, что диапазон измеряемых скоростей ВПАВ может быть в принципе расширен до значений, приближающихся к скорости ультразвука в иммерсионной жидкости ( $C = 1500$  m/s для воды).

Нетрудно видеть, что изменение задержки отклика ВПАВ  $\Delta t_R$  пропорционально соответствующему смещению фокуса подвижного преобразователя  $\Delta x$ :

$$\Delta t_R = \frac{\Delta x}{C_R}. \quad (2)$$

Таким образом, результат измерения данным методом скорости ВПАВ  $C_R$  не зависит от параметров иммерсионной среды, в частности температуры.

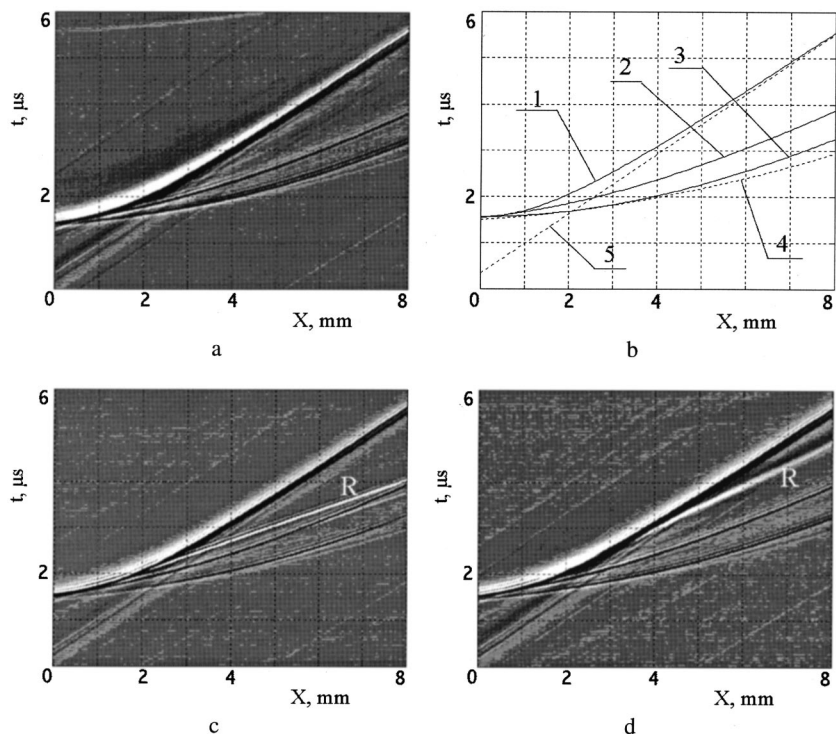
Для экспериментального подтверждения предлагаемого метода была разработана измерительная система, состоящая из двух цилиндрических фокусирующих преобразователей, выполненных на основе пьезо-



**Рис. 2.** Схема распространения различных волновых мод в измерительной системе.

зоэлектрической пленки из поливинилиденфторида (ПВДФ). Пленка, имеющая металлизированное покрытие, была присоединена к вогнутой цилиндрической поверхности монолитного блока из эпоксидной смолы. Наружная сторона пленки оставалась свободной и находилась в непосредственном контакте с водой. Такая конструкция обладает хорошими широкополосными свойствами и имеет малый уровень реверберационных помех вследствие отсутствия акустической линзы [3]. Ширина преобразователей вдоль образующей была равна 12 мм, фокусное расстояние —  $R = 9$  мм, а апертурные углы равны соответственно  $\theta_1 = 90^\circ$ ,  $\theta_2 = 10^\circ$ ,  $\varphi_1 = 80^\circ$ ,  $\varphi_2 = 10^\circ$ . Фокусы преобразователей находились на расстояниях  $h_1 = h_2 = 1.2$  мм над поверхностью образца (рис. 2). Возбуждение передающего преобразователя производилось одиночным импульсом амплитудой около 150 В, длительностью 30 нс, прием осуществлялся в полосе частот 1–30 МГц при центральной частоте преобразователей 12 МГц, отношение сигнал–шум было не менее 40 дБ.

Результаты измерений сигнала  $V(x, t)$ , полученные для некоторых материалов, представлены на рис. 3 в виде полутоновых изображений. Положительные значения сигнала соответствуют светлому тону изображения, отрицательные — темному, а нулевой уровень — серому цвету фона. Как видно, в измерительной системе существует несколько типов волн, задержка которых изменяется при сканировании различным образом. Наличие и поведение этих откликов может быть объяснено с



**Рис. 3.** Сигнал  $V(x, t)$ , измеренный для свинца (а), углеродистой стали (с), меди (d), и результат расчета относительных задержек наблюдаемых типов волн (b).

лучевых позиций. Отклик #1 (рис. 2) порождается лучом, проходящим через фокусы преобразователей  $F_1, F_2$  и отражающимся от поверхности образца. За остальные типы волн ответственны края преобразователей  $E_1, E_2, G_1, G_2$ , являющиеся источниками и приемниками цилиндрических краевых волн. Луч #2 излучается краем  $E_1$  и после отражения проходит через фокус  $F_2$ . Аналогично отклик #3 соответствует лучу (на рис. 2 не показан), проходящему через  $F_1$  и принимаемому краем  $G_1$ . Наконеч лучи #4 (5) проходят пути  $E_{1(2)} - \text{образец} - G_{1(2)}$  соответственно. Из простых геометрических соображений расстояния,

проходимые этими лучами, могут быть определены следующим образом:

$$d_1 = \sqrt{h^2 + x^2} + 2R; \quad (3)$$

$$d_2 = \sqrt{(R \sin \theta_1 + h)^2 + (R \cos \theta_1 + x)^2} + R;$$

$$d_3 = \sqrt{(R \sin \varphi_1 + h)^2 + (R \cos \varphi_1 + x)^2} + R; \quad (4)$$

$$d_{4(5)} = \sqrt{(R \cos \theta_{1(2)} + R \cos \varphi_{1(2)} + x)^2 + (R \sin \theta_{1(2)} + R \sin \varphi_{1(2)} + h)^2}. \quad (5)$$

Здесь  $h = h_1 + h_2$  и  $x$  — расстояния между фокусами. Результаты расчета относительных задержек волн, определяемых расстояниями  $d_1 - d_5$ , приведены на рис. 3, *b*, причем номера кривых соответствуют номерам рассмотренных выше лучей. Сравнение расчетных и экспериментальных данных (рис. 3, *a*, *c*, *d*) показывает, что наибольшую амплитуду имеет луч 1, проходящий через оба фокуса. Лучи 2 и 3, проходящие через фокусы и края преобразователей, являются более слабыми, а лучи 4 и 5, источники и приемники которых лежат только на краях преобразователей, частично сливаются с откликами 3 и 1 соответственно. Форма же рассчитанных кривых соответствует относительным задержкам измеренных сигналов  $V(x, t)$ , что подтверждает справедливость использованной лучевой модели.

В экспериментальных данных, полученных для стали и меди (рис. 3, *c*, *d*) помимо рассмотренного набора волн наблюдаются отклики  $R$ , соответствующие вытекающей рэлеевской поверхностной волне. Для свинца (рис. 3, *a*) скорость рэлеевской волны меньше скорости звука в иммерсионной жидкости, поэтому возбуждение ВПАВ невозможно и отклик данного типа отсутствует. Задержка наблюдаемых откликов  $R$  линейно изменяется от расстояния  $x$ , и применение формулы (2) дает значение скорости  $C_S = 3024$  м/с для стали и  $C_M = 2147$  м/с для меди. Рассчитанные на основе известных акустических параметров значения составляют соответственно  $C_S = 3015$  м/с и  $C_M = 2115$  м/с. По спаданию амплитуды принятого импульса были также определены коэффициенты затухания ВПАВ  $\alpha_S = 0.26$  мм<sup>-1</sup> для стали и  $\alpha_M = 0.6$  мм<sup>-1</sup> для меди, а рассчитанные значения равны  $\alpha_S = 0.28$  мм<sup>-1</sup> и  $\alpha_M = 0.53$  мм<sup>-1</sup> соответственно. Как видно, между измеренными и расчетными данными наблюдается удовлетворительное совпадение, что можно рассматривать как экспериментальное подтверждение предложенного метода.

## Список литературы

- [1] *Briggs A.* Acoustic microscopy. Oxford: Clarendon Press, 1992.
- [2] *Kushibiki J., Chubachi N.* // IEEE Trans. Sonics Ultrason. 1985. V. SU-32. N 2. P. 189-212.
- [3] *Xiang D., Hsu N.N., Blessing G.V.* // The design, construction and application of a large aperture lens-less line-focus PVDF transducer. Ultrasonics. 1996. V. 34. P. 641-647.