

УДК: 534.08: 534.213

ЛИНЗОВЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП С ЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКОЙ В РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОИСТЫХ ОБЪЕКТОВ

С.А. Титов^{1,2,@}, к.т.н., старший научный сотрудник,
Р.Г. Маев², д.ф.-м.н., профессор,
А.Н. Богаченков¹, к.т.н., доцент

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119434 Россия

²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (ИБХФ РАН),
Москва, 119334 Россия

@Автор для переписки, e-mail: sergetitov@mail.ru

Предложен акустический микроскоп с ультразвуковой решеткой и цилиндрической линзой, предназначенный для количественной характеристики слоистых областей исследуемого объекта. Разработан метод определения по регистрируемому пространственно-временному сигналу решетки микроскопа толщины слоя и скоростей продольной и поперечной волн в материале слоя. На примере тестового образца показано, что погрешность измерений составляет примерно 1% для толщины и скорости продольной волны и 3% – для скорости поперечной волны.

Ключевые слова: акустическая микроскопия, ультразвуковая решетка, количественная характеристика.

LENS ACOUSTIC MICROSCOPE WITH A LINEAR ARRAY FOR QUANTITATIVE CHARACTERIZATION OF LAYERED OBJECTS

S.A. Titov^{1,2,@},
R.G. Maev²,
A.N. Bogachenkov¹

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

²Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences (IBCP RAS),
Moscow, 119334 Russia

@Corresponding author e-mail: sergetitov@mail.ru

In this paper, the acoustic microscope with a linear ultrasonic array and a cylindrical lens has been proposed in order to carry out quantitative characterization of layered regions of the sample under research. The determination method based on recording the microscope array spatio-temporal signal of the layer thickness and velocities of the longitudinal and transverse waves in the layer material has been developed. By using a test sample, it was shown that the error of measurement is about 1 % for both the thickness and the velocity of the longitudinal wave, and it is 3 % for the velocity of the transverse wave.

Keywords: acoustic microscopy, ultrasonic array, quantitative characterization.

В настоящее время для исследования структуры материалов различной природы широко используются такие методы, как оптическая микроскопия, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия и сканирующая зондовая микроскопия. Эти методы позволяют проводить исследования с высоким пространственным разрешением приповерхностных областей объектов или их очень тонких срезов. Вместе с тем, с помощью этих методов зачастую оказывается затруднительным получать информацию о подповерхностных и внутренних областях объектов. Исследовать внутренние области непрозрачного либо малококонтрастного для оптического или рентгеновского излучения образца можно с помощью сканирующего акустического микроскопа [1–3].

В типичной конфокальной схеме акустического микроскопа используется одиночный высокочастотный ультразвуковой преобразователь и акустическая линза, обеспечивающая фокусировку излучаемых и принимаемых преобразователем волн. Механическое сканирование всего ультразвукового блока позволяет визуализировать пространственное распределение упруго-вязкостных свойств образца [4, 5]. Вместе с тем, в такой схеме достаточно сложно производить непосредственное измерение количественных параметров локальных однородных областей объектов [6, 7].

В данной работе предложена схема акустического микроскопа с линейной ультразвуковой решеткой и цилиндрической линзой, а также представлен метод измерения с его помощью скорости ультразвука объемных волн в материале и толщины слоя.

Схема акустического микроскопа приведена на рис. 1. В предлагаемом микроскопе ультразвуковая решетка 1 расположена на торце звукопровода 2 с акустической линзой 3. Излучаемая элементом решетки волна проходит вдоль звукопровода, преломляется частью поверхности линзы, и, пройдя через слой иммерсионной жидкости, падает на поверхность исследуемого образца 4. В силу малости размера излучающего элемента решетки по сравнению с общей апертурой линзы и ее фокусным расстоянием фронт падающей на образец волны является квази-плоским. Отраженная от образца волна распространяется в обратном направлении и принимается элементом решетки, расположенным симметрично передающему элементу. Угол падения волны θ связан с координатами источника и приемника соотношением [8]:

$$\sin \theta = |x|F^{-1}, \quad (1)$$

где F – фокусное расстояние линзы.

Падающая на образец импульсная волна частично отражается от верхней границы слоя, а частично проходит внутрь и отражается от нижней границы слоя. При достаточно малой

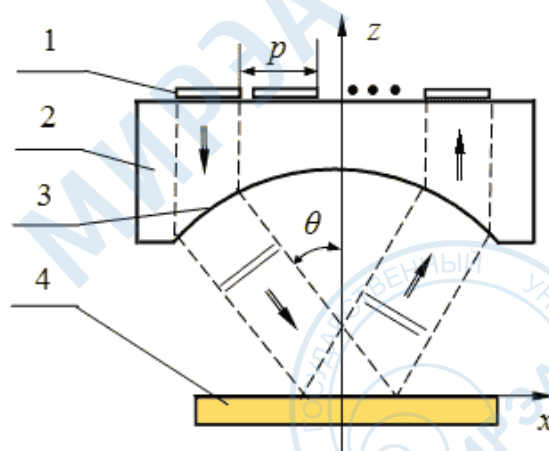


Рис. 1. Схема акустического микроскопа:

1 – ультразвуковая решетка; 2 – звукопровод; 3 – акустическая линза;
4 – образец.

длительности зондирующего импульса в принятом сигнале можно разделить несколько откликов [9]. Отклик R производится волнами, отраженными от верхней поверхности раздела иммерсионная жидкость–образец (рис. 2). Отклики L и L_2 образованы продольными волнами, прошедшими вглубь образца и испытавшими однократное и двукратное отражение от его нижней поверхности, соответственно. При наклонном падении продольной волны на границы слоя имеет место ее частичная трансформация в поперечную волну, и наоборот, поперечная волна частично преобразуется в продольную. Это приводит к возникновению отклика смешанной моды LT, который производится продольной волной, распространяющейся через слой в одном направлении, и поперечной волной, распространяющейся в противоположном направлении.

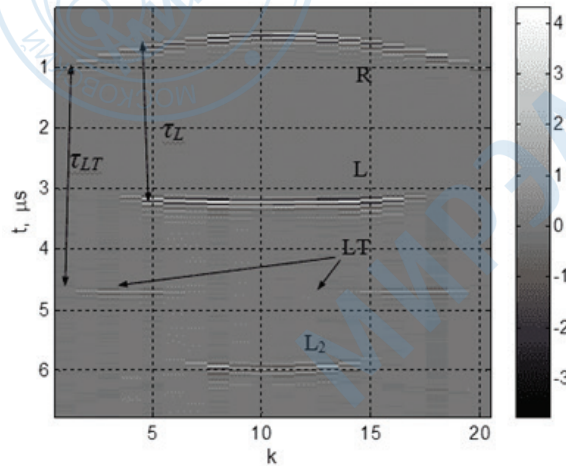


Рис. 2. Пространственно-временной сигнал $s_k(t)$, записанный для медного слоя.

Задержка отклика L относительно отклика R равна времени распространения продольной плоской волны в слое, которая зависит от угла падения θ следующим образом:

$$\tau_L(\theta) = \frac{2d}{C_L} \cos \theta_L \quad (2)$$

где d – толщина слоя; C_L – скорость продольной волны в слое;

θ_L – угол распространения волны в слое определяется законом преломления:

$$\frac{\sin \theta_L}{\sin \theta} = \frac{C_L}{C_w} \quad (3)$$

где C_w – скорость ультразвука в иммерсионной среде (воде).

Аналогичным образом, относительная задержка отклика LT равна:

$$\tau_{LT}(\theta) = \frac{d}{C_L} \cos \theta_L + \frac{d}{C_T} \cos \theta_T \quad (4)$$

где C_T – скорость поперечной волны.

Осуществляя подстановку (3) в (2), можно выразить задержку τ_L как функцию угла падения и искомых параметров d и C_L :

$$\tau_L(\theta) = \frac{2d}{C_L} \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{C_w}{C_L} \sin \theta \right) \right) \quad (5)$$

Располагая экспериментально измеренной зависимостью $\tau_L(\theta)$, можно определить неизвестные толщину слоя и скорость звука в материале с помощью, например, методов нелинейного оценивания параметров [10], используя (5) в качестве модельного соотношения.

Используя полученное значение d и измеренную зависимость задержки смешанной моды $\tau_{LT}(\theta)$, в соответствии с (4) можно рассчитать задержку, приобретаемую в слое только поперечной волной:

$$\tau_T(\theta) = \tau_{LT}(\theta) - \frac{\tau_L(\theta)}{2} = \frac{d}{C_T} \cos \theta_T \quad (6)$$

Учет закона преломления (3) дает выражение, аналогичное модельному соотношению (5):

$$\tau_T(\theta) = \frac{d}{C_T} \cos \left(\sin^{-1} \left(\frac{C_W}{C_T} \sin \theta \right) \right) \quad (7)$$

На основе соотношения (7) производится оценка C_T .

С целью экспериментальной апробации предложенного метода мы использовали линейную ультразвуковую решетку 1, состоящую из $N = 20$ прямоугольных элементов, расположенных с периодом $p = 0.8$ мм (рис. 1). Ширина элементов несколько меньше p , а их длина равна 1.2 мм. Центральная частота частотной характеристики элементов в режиме передачи-приема и относительная полоса на уровне 6 дБ составляли 15 МГц и 60%, соответственно. Решетка располагалась на звукопроводе из полистирола 2, на противоположном конце которого выполнена акустическая линза 3 в виде цилиндрической поверхности с радиусом 13 мм. При использовании воды в качестве иммерсионной среды между линзой и образцом 4 фокусное расстояние, рассчитанное в параксиальном приближении, составляло $F = 35$ мм. Расстояние между линзой и решеткой выбрано равным 17 мм, что близко к заднему фокусному расстоянию. Полная апертура ультразвуковой решетки $N_p = 16$ мм обеспечивала половинный максимальный апертурный угол $\theta_m = 12^\circ$.

Для формирования выходного пространственно-временного сигнала с помощью многоканального электронного блока производили последовательное импульсное возбуждение элементов решетки с номерами k ($k = 1 \dots N$) и регистрацию сигналов элементов с номерами $N-k+1$, расположенными относительно оси линзы симметрично излучающим элементам.

На рис. 2 показан сигнал $s_k(t)$, измеренный для тестового образца в виде медной пластинки с толщиной $d = 6.40 \pm 0.01$ мм. Вертикальное положение ультразвукового блока настроено таким образом, что геометрический фокус линзы расположен на расстоянии 15 мм под поверхностью образца. Данные $s_k(t)$ представлены в виде полутоновой диаграммы, где значения регистрируемого сигнала кодированы оттенками серого цвета в соответствии со шкалой, показанной справа. В принятом пространственно-временном сигнале наблюдаются отклики R, L, LT, L_2 , образование которых описано выше. Отклики L, LT, L_2 , прошедшие через слой, значительно слабее отклика R, поэтому их амплитуда для лучшего восприятия на рисунке увеличена в 10 раз.

Времена прихода откликов R, L, LT, определенные по представленным данным, показаны на рис. 3. Время прихода фиксировали по моменту, когда величина принимаемых знакопеременных импульсных откликов достигала экстремальных значений. Точность определения экспериментальных относительных задержек τ_{Lk}^* и τ_{LTk}^* зависела от соотношения амплитуд импульсов по отношению к уровню шума.

Как видно из рис. 2, амплитуда отклика L спадает при увеличении угла падения, поэтому задержка τ_{Lk}^* является нестабильной для элементов, расположенных на краях решетки. Поэтому в дальнейших расчетах толщины d и скорости C_L использовали данные для $3 \leq k \leq 18$.

Поперечная волна неэффективно возбуждается в слое при малых углах падения, и амплитуда отклика LT мала для центральных элементов решетки. Поэтому в расчетах скорости C_T использовали значения τ_{LTk}^* для $2 \leq k \leq 7$ и $8 \leq k \leq 19$.

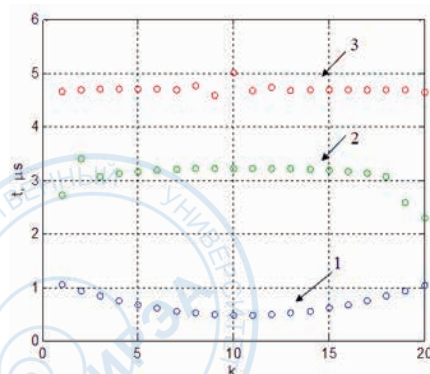


Рис. 3. Времена прихода откликов R (1), L (2), LT (3).

Искомые параметры d и C_L находили путем минимизации функции невязки вида:

$$\delta(d, C_L) = \sum (\tau_{Lk}^* - \tau_L(d, C_L, \theta_k)) \quad (8)$$

где модельную функцию $\tau_L(d, C_L, \theta_k)$ рассчитывали по формуле (5), а суммирование по k производили в пределах интервалов, указанных выше.

Как следует из рис. 4, функция $\delta(d, C_L)$ имеет глобальный минимум в широком диапазоне изменения параметров d и C_L . Многократное повторение измерений для данного образца и статистическая обработка результатов измерений дают значения $d = 6.45 \pm 0.05$ мм и $C_L = 4.71 \pm 0.03$ км/с. Полученное значение толщины находится в соответствии с результатом ее независимого измерения с помощью микрометра (6.40 ± 0.01 мм). Значение измеренной скорости C_L согласуется с опубликованной для меди величиной 4.72 км/с [11].

На основании полученных результатов можно заключить, что погрешность измерений d и C_L по предложенному методу не превосходит 1%.

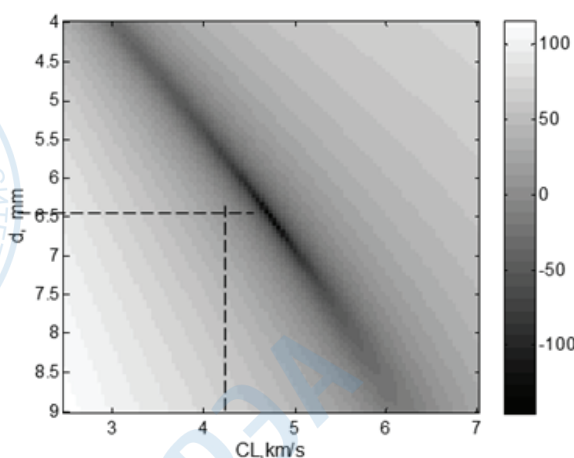


Рис. 4. Функция $\delta(d, C_L)$.

Полученное значение толщины слоя d и измеренные задержки смешанной моды τ_{LTk}^* использовали для оценки скорости поперечной волны. Значение скорости C_T находили также методом нелинейного оценивания на основе уравнения (7). Полученная оценка составила $C_T = 2.48 \pm 0.07$ км/с, что несколько отличается от опубликованного значения 2.4 км/с [5]. Погрешность измерений поперечной волны, которая может быть оценена на уровне 3%, заметно больше погрешности измерения d и C_L . Ухудшение точности в этом случае можно объяснить тем, что амплитуда отклика LT существенно меньше амплитуды отклика L (рис. 2) и погрешность измерения задержки τ_{LTk}^* выше. Кроме того, точность измерения C_T дополнительно ухудшает погрешность определения толщины d и задержки τ_{LTk}^* .

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что предложенная схема построения акустического микроскопа обеспечивает проведение количественной

характеризации акустических параметров слоистых объектов. Использование ультразвуковой решетки и многоканальной аппаратуры сбора данных делает возможным проводить измерения за время, сравнимое со временем распространения ультразвуковых волн в иммерсионной среде и образце. Экспериментально показано, что с помощью акустического микроскопа можно измерять толщину слоев и скорости продольных и поперечных волн в материале слоя. Вместе с тем, регистрация не только задержек отраженных от границ слоя откликов, но и их амплитуд может быть потенциально использована для регистрации коэффициентов отражения и преломления волн с последующей оценкой плотности и коэффициента поглощения звука исследуемого материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-01236а.

Литература:

1. Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: from principles to applications / Ed. R. Maev. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013. 400 p.
2. Prokhorov V.M., Bagramov R.H., Blank V.D., Pivovarov G.I. Pulse acoustic microscopy characterization of the elastic properties of nanostructured metal–nanocarbon composites // Ultrasonics. 2008. V. 48. P. 578–582.
3. Habib A., Shelke A., Vogel M., Pietsch U., Jiang X., Kundu T. Mechanical characterization of sintered piezo-electric ceramic material using scanning acoustic microscope // Ultrasonics. 2012. V. 52. P. 989–995.
4. Deng X.D., Monnier T., Guy P., Courbon J. Acoustic microscopy of functionally graded thermal sprayed coatings using stiffness matrix method and Stroh formalism. // J. Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 224508-1–224508-10.
5. Петронюк Ю.С., Мороков Е.С., Левин В.М. Методы импульсной акустической микроскопии в промышленной диагностике // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 10. С. 1425–1431.
6. Xiaolong Bai, Zeqing Sun, Anyu Sun, Jian Chen, and Bing-Feng Ju. Determination of the multiple local properties of thin layer with high lateral resolution by scanning acoustic microscopy // Review of Scientific Instruments. 2014. V. 85. P. 094901-1–094901-8.
7. Rohrbach D., Lloyd H.O., Silverman R.H., Mamou J. Fine-resolution maps of acoustic properties at 250 MHz of unstained fixed murine retinal layer // J. Acoust. Soc. Am. 2015. V. 137. № 5. P. EL381 – EL387.
8. Титов С.А., Маев Р.Г. Линзовый акустический микроскоп с двумерной ультразвуковой решеткой // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 9. С. 8–15.
9. Титов С.А., Маев Р.Г. Определение параметров изотропного слоя по пространственно-временным сигналам ультразвуковой решетки // Акуст. ж.. 2013. Т. 59. № 5. С. 648–656.
10. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. М.: Статистика, 1979. С. 98–101.
11. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. С. 30.