

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РЕШЕТОК В ЛИНЗОВОМ АКУСТИЧЕСКОМ МИКРОСКОПЕ

© 2016 г. С.А. ТИТОВ, А.Н. БОГАЧЕНКОВ*

Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля, г. Москва,
*Московский технологический университет

Сканирующая акустическая микроскопия известна как методика исследования структуры различных объектов посредством высокочастотных ультразвуковых волн [1]. Она позволяет не только производить визуализацию пространственного распределения упруго-вязкостных неоднородностей в толще и подповерхностной области образца, но и выполнять измерения акустических параметров локально однородных областей. Как правило, сканирующий акустический микроскоп построен по конфокальной схеме, в которой имеется акустическая линза и соосно расположенный ультразвуковой преобразователь. В такой схеме выходной сигнал преобразователя определяется свойствами образца в фокальной области микроскопа, размер которой является сравнимым с длиной ультразвуковой волны и определяет пространственное разрешение. Для получения изображения необходимо производить механическое сканирование всего ультразвукового узла относительно объекта, что сопряжено с рядом недостатков метода.

Для повышения производительности, точности и информативности исследований предложено в линзовом акустическом микроскопе вместо одиночного преобразователя использовать решетку ультразвуковых преобразователей (рис. 1). В режиме формирования изображений в предложенной схеме используется сферическая акустическая линза и двумерная ультразвуковая решетка, состоящая из квадратных пьезоэлементов [2]. В режиме измерения акустических параметров локальных однородных областей используется цилиндрическая линза и линейная решетка прямоугольных элементов, длинные стороны которых ориентированы вдоль образующей линзы [3]. В данной работе рассматриваются общие принципы работы и анализа таких устройств и на ряде примеров демонстрируются их преимущества.

Наличие акустической линзы позволяет свести ультразвуковые пучки, излучаемые элементами решетки, в фокальной области линзы. Производя электронное управление амплитудами и задержками излучаемых элементами волн и осуществляя цифровую обработку отраженных сигналов, оказывается возможным осуществлять фокусировку в различные точки околофокальной области и производить формирование изображений без механического сканирования. Благодаря гибкости, присущей подобным многоэлементным системам, в данной схеме оказывается возможным также перестраивать фокусное расстояние, менять угловую апертуру и компенсировать аберрации различного рода.

Обработка сигналов в многоэлементном акустическом микроскопе производится с помощью методов, развитых в теории фазированных ультразвуковых решеток [4]. Однако наличие акустической линзы между решеткой и объектом вносит существенные отличия в применяемые алгоритмы. Так для фокусировки в точку x , лежащую в фокальной плоскости линзы, решетка должна излучать квазиплоскую волну, для чего возбуждение соседних элементов решетки производится с постоянным временным сдвигом Δt . Если фокусное расстояние линзы равно F , период решетки равен p , а ско-

рость звука в иммерсионной среде составляет V , то положение точки фокусировки определяется выражением:

$$x = FV \Delta t p^{-1}.$$

Разрешающая способность многоэлементного микроскопа приблизительно равна разрешающей способности одноэлементного микроскопа и может быть оценена следующим образом $\delta = \lambda FL^{-1}$, где λ есть длина ультразвуковой волны на характерной частоте, L – апертура решетки.

Для экспериментальной апробации метода использовалась решетка с центральной частотой 15 МГц, периодом $p = 1.25$ мм и апертурой $L=10$ мм. Решетка была сопряжена с акустической линзой с фокусным расстоянием $F=29$ мм. Для исследования разрешающей способности было получено изображение двух тонких стержней, расположенных в воде на расстоянии 0.4 мм (рис. 2). Как видно стержни наблюдаются раздельно с высоким контрастом, что подтверждает полученную выше оценку разрешающей способности.

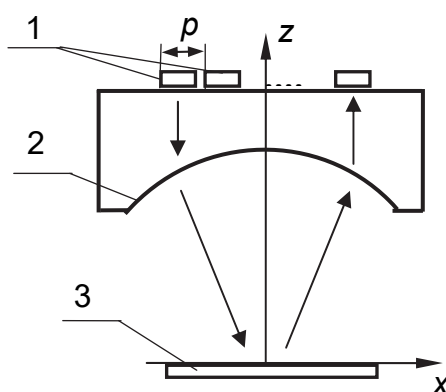


Рис. 1. Линзовый акустический микроскоп с ультразвуковой решеткой: 1 – пьезоэлементы решетки; 2 – акустическая линза; 3 – образец.

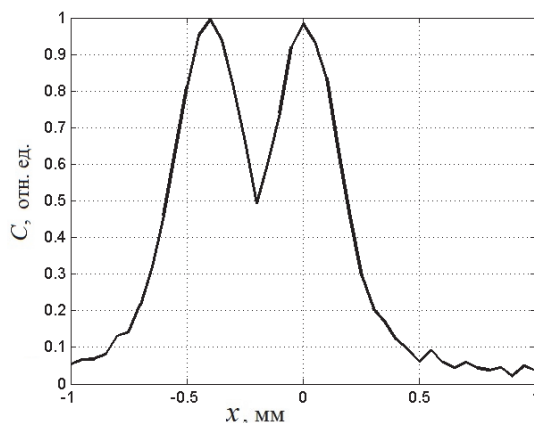


Рис. 2. Выходной сигнал микроскопа при визуализации параллельных стержней.

Наличие акустической линзы приводит к тому, что волна, излучаемая элементом решетки, преобразуется линзой в околофокальной области в квазиплоскую волну. Угол падения этой волны на поверхность образца равен $\sin \theta = x_t F^{-1}$, где x_t есть координата передающего элемента. Для локально однородного слоистого участка образца имеет место зеркальное отражение падающей волны. Таким образом, амплитуда и задержка отраженных сигналов, принимаемых элементами решетки, содержат информа-

цию об угловой зависимости коэффициента отражения, по которой возможно определение таких параметров, как толщина слоя и скорости объемных волн.

В качестве примера на рис. 3 показан сигнал решетки $s_k(t)$, где k – номер элемента, измеренный для стеклянной пластинки толщиной $d=2.92$ мм. Измерения проводились с помощью 20-ти элементной линейной решетки с периодом $p=0.8$ мм, сопряженной с цилиндрической линзой с фокусным расстоянием $F=35$ мм. В принятом сигнале различимы: отклик D, образованный отражением от верхней поверхности пластинки, и отклики L, LT, даваемые отражением продольных и поперечных волн от нижней поверхности слоя. Путем анализа угловой зависимости задержки этих откликов были определены: толщина $d=2.9$ мм, скорости продольной 5830 м/с и поперечной 3420 м/с волн в материале. Полученные значения скоростей находятся в согласии с табличными величинами [5].

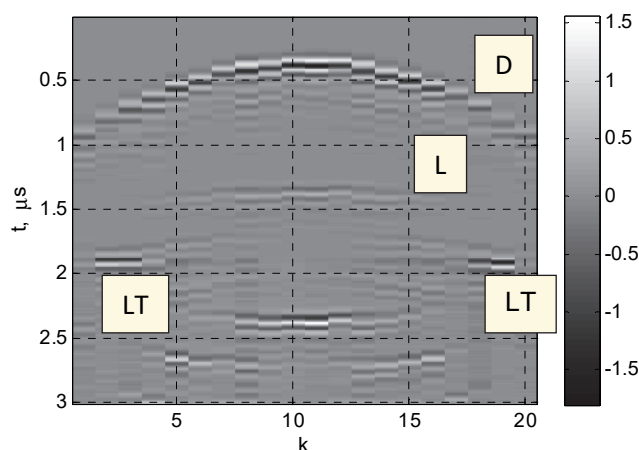


Рис. 3. Сигнал решетки $s_k(t)$, измеренный для стеклянной пластинки.

Таким образом, применение ультразвуковых решеток в линзовом акустическом микроскопе позволяет не только осуществлять электронные фокусировку и сканирование, но и производить измерение акустических параметров слоистых участков объекта.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maev R.* Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: from principles to applications. — Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013. – 400 p.
2. *Тумов С.А., Маев Р.Г.* Линзовый акустический микроскоп с двумерной ультразвуковой решеткой // Письма в ЖТФ, 2016, Т. 42, вып. 9, С. 8-15.
3. *Тумов С.А., Маев Р.Г., Богаченков А.Н.* Линзовый акустический микроскоп с линейной решеткой в режиме измерения параметров слоистых объектов. // Российский технологический журнал, 2016, Т. 4, № 2 (11), С. 25-30.
4. *Azhari H.* Basic of biomedical ultrasound for engineers – Hoboken, New Jersey, USA: John Willey & Sons, 2010, P. 173.
5. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.* Ультразвуковой контроль. – М.: Машиностроение, 2004, С. 30.