

10;15

Линзовый акустический микроскоп с двумерной ультразвуковой решеткой

© С.А. Титов, Р.Г. Маев

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

E-mail: sergetitov@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 декабря 2015 г.

Предложен линзовый акустический микроскоп, в котором вместо одиночного преобразователя используется двумерная высокочастотная ультразвуковая решетка. В предложенном микроскопе возможно производить электронное сканирование в области естественного фокуса акустической линзы и электронными средствами осуществлять фокусировку на различных расстояниях, в том числе внутри твердотельных объектов. Показано, что многоэлементный микроскоп потенциально обладает более высокой производительностью по сравнению с одноэлементным сканирующим микроскопом и не уступает ему по разрешающей способности.

Для исследования упруго-вязкостных свойств различных объектов с высоким пространственным разрешением используется сканирующий линзовый акустический микроскоп [1]. В типичной конфокальной схеме микроскопа излучение зондирующей ультразвуковой волны и прием отраженной образцом волны осуществляются одиночным преобразователем 1, расположенным на торце звукопровода с акустической линзой 2 (рис. 1, а). Для построения акустического изображения используется двухкоординатное механическое сканирование всего акустического узла относительно объекта, что приводит к большим временам исследований. Кроме того, фокусное расстояние микроскопа является постоянным, и формируемое акустическое изображение оказывается сфокусированным на определенной глубине объекта.

Гибко управлять диаграммами направленности при передаче и приеме волн и осуществлять электронное сканирование позволяют устройства ультразвуковой визуализации на основе фазированных решеток [2]. В таких устройствах период решетки не должен существенно превосходить половины длины волны во избежание появления артефактов в изображениях. Однако непосредственная реализация

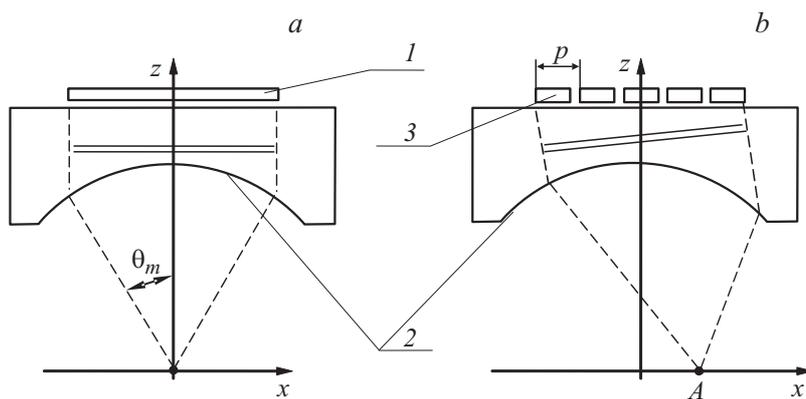


Рис. 1. Акустический микроскоп с одиночным преобразователем (*a*) и с ультразвуковой решеткой (*b*): 1 — преобразователь; 2 — линза; 3 — решетка.

устройств с фазированными решетками на частотах, характерных для акустической микроскопии, представляется затруднительной вследствие технологических ограничений, возникающих при изготовлении решеток с достаточно малыми размерами элементов.

Задача данной работы заключается в создании линзового акустического микроскопа с электронным сканированием, имеющего повышенную производительность и регулируемое фокусное расстояние. В предлагаемом микроскопе вместо одиночного преобразователя используется высокочастотная двумерная ультразвуковая решетка 3, размеры элементов которой существенно превосходят длину волны (рис. 1, *b*). В этой схеме ультразвуковые пучки, излучаемые элементами решетки, сводятся линзой в фокальной области. Путем управления сигналами, излучаемыми элементами решетки, и обработкой принимаемых ими сигналов оказывается возможным производить электронную фокусировку и сканирование в продольном и поперечном направлениях в области естественного фокуса линзы. Кроме того, в такой схеме можно регулировать фокусное расстояние и угловую апертуру, а также компенсировать aberrации, возникающие при визуализации внутренних областей твердотельных объектов.

Экспериментальный прототип микроскопа был построен на базе двумерной решетки, состоящей из квадратных элементов размером 1.2 mm,

расположенных с периодом $p = 1.25$ mm. Число элементов вдоль стороны решетки составляло $N = 8$, однако по три элемента в каждом углу решетки не использовались. Таким образом активная апертура решетки лежала внутри окружности с диаметром примерно $L = 10$ mm. Центральная частота и относительная полоса элементов составляли 15 MHz и 60% соответственно. Более подробное описание решетки можно найти в [3]. Эта решетка была присоединена к звуководу из полистирола со сферической линзой (рис. 1, *b*). Фокусное расстояние линзы составляло $F = 29$ mm, половинный апертурный угол объектива был равен $\theta_m \approx 10^\circ$.

Формирование изображений в многоэлементном микроскопе выполняется с помощью методов, развитых в теории фазированных решеток [2]. Для фокусировки зондирующей волны в некоторую точку фокальной плоскости линзы возбуждение элементов решетки производится с временным сдвигом, линейно изменяющимся по апертуре решетки. Пусть Δt есть относительный временной сдвиг между сигналами возбуждения соседних элементов, лежащих вдоль одной оси, например, оси x . Тогда решетка излучает квазиплоскую волну, которая собирается акустической линзой в точку A фокальной плоскости с координатами $(x, 0)$, где

$$x = F\Delta t C_W p^{-1}, \quad (1)$$

а C_W есть скорость ультразвука в иммерсионной жидкости (воде). Для фокусировки в эту же точку при регистрации рассеянной объектом волны производится компенсация задержки Δt и суммирование сигналов, принятых элементами решетки.

С помощью данного прототипа многоэлементного микроскопа было получено изображение металлического шарика с диаметром $d_b = 0.5$ mm. Эффективный отражающий диаметр шарика может быть оценен как $d_b \sin \theta_m = 0.09$ mm. Этот размер меньше характерной длины волны ультразвука $\lambda \approx 0.1$ mm, поэтому такой объект может использоваться в качестве экспериментальной модели точечного отражателя. На рис. 2, *a* показано изображение шарика, расположенного в фокальной плоскости в точке с координатами $x = -0.7$ mm, $y = 0.4$ mm. Изображение представлено в виде полутоновой диаграммы, отображающей максимум амплитуды принятого сигнала $C(x, y)$. На рис. 2, *b* приведены нормированные зависимости величины $C(x, 0)$, полученные при различных положениях шарика вдоль оси x и $y = 0$ mm.

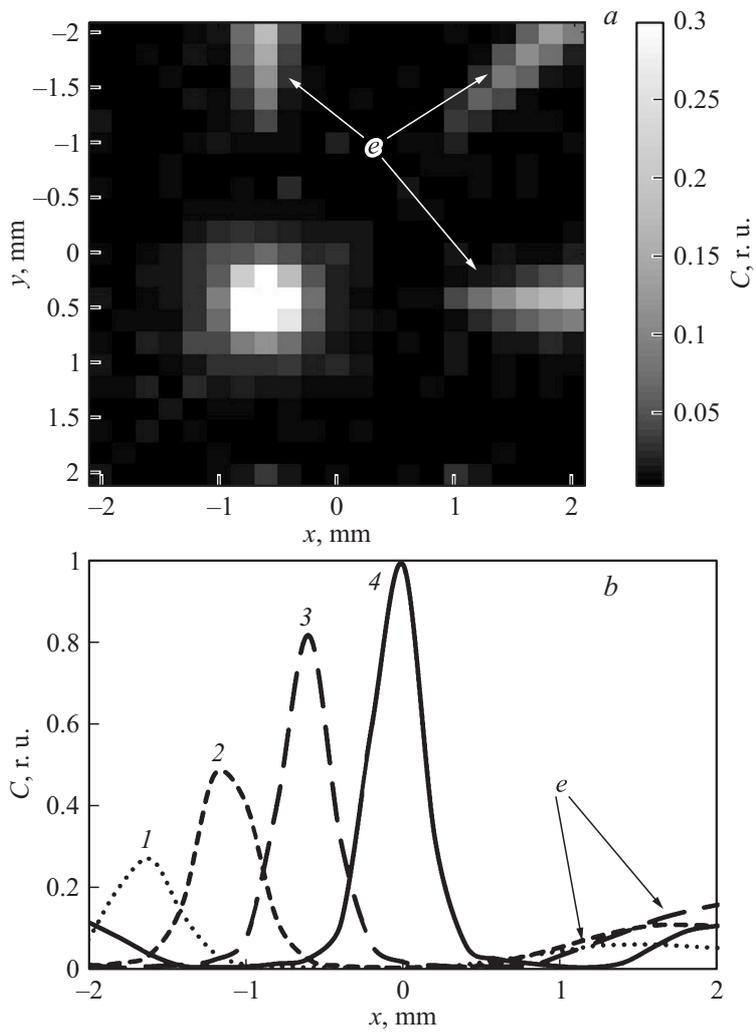


Рис. 2. Изображение шарика (*a*); амплитуда сигналов при положениях отражателя $x = -1.7$ (1), -1.2 (2), -0.7 (3) и 0 mm (4) (*b*).

Пространственная разрешающая способность многоэлементного микроскопа приблизительно равна разрешающей способности одноэлементного микроскопа, у которого акустическая линза имеет те же параметры, а диаметр преобразователя равен апертуре решетки. Действительно, если все элементы решетки излучают и принимают синфазно, то их совместное действие близко к действию одиночного большого преобразователя. При этом фокусировка микроскопа производится в геометрический фокус линзы, поэтому ширина импульсного пространственного отклика и разрешающая способность могут быть оценены известным выражением [4]

$$\delta \approx \frac{0.5\lambda}{\sin \theta_m} = \frac{\lambda F}{L}. \quad (2)$$

Фокусировка в точки, не лежащие на оси z , сопряжена с некоторым уменьшением эффективной угловой апертуры. Однако в паракиальном приближении это изменение является незначительным и деградацией пространственного разрешения можно пренебречь.

Экспериментально разрешающая способность может быть оценена по ширине главного лепестка отклика $C(x)$ при центральном положении точечного отражателя. Как следует из рис. 2, b , ширина лепестка по уровню 0.5 составляет примерно 0.35 мм, что согласуется с оценкой (2) разрешающей способности $\delta \approx 0.3$ мм. При смещении отражателя к краю изображения амплитуда отклика уменьшается, что объясняется падением диаграммы направленности элемента решетки при отклонении от нормали к его поверхности.

Помимо непосредственного отражения от шарика в изображении присутствует помеха e (рис. 2, a), которая располагается на некотором расстоянии от основного отклика вдоль осей решетки и ее диагоналей. Такие помехи образуются дополнительными, побочными максимумами диаграммы направленности решетки, у которой период расположения элементов p превосходит длину волны [2]. Как показано в [5], относительная амплитуда помехи достигает величины N^{-1} , когда импульсы, принимаемые элементами решетки, не перекрываются во времени и $\Delta t > T$, где $T \approx \lambda C_w^{-1}$ есть длительность импульсов. Однако помеха становится малой вследствие деструктивной интерференции, если эти знакопеременные импульсы значительно накладываются друг на друга при $\Delta t < 0.5T$. Для центрального расположения отражателя $x = 0$

свободная от помехи область сканирования может быть оценена с учетом соотношения (1) следующим образом:

$$2|x_p| \approx F\lambda p^{-1}. \quad (3)$$

Для прототипа эта оценка составляет $x_p \approx 1.2$ mm, что согласуется с экспериментальным графиком, приведенным на рис. 2, *b* (сплошная линия). При смещении отражателя из центра область, занимаемая помехой, также смещается, однако ее относительный уровень при любом положении отражателя не превышает -20 dB. Кроме того, уровень помехи может быть снижен за счет выбора области сканирования, меньшей $2x_p$. Таким образом, в многоэлементном линзовом микроскопе размер поля электронного сканирования ограничивается допустимым уровнем помех рассмотренного типа. Следует отметить, что оно может быть расширено путем увеличения числа элементов решетки и применения известных способов подавления помех, основанных на неравномерном распределении элементов по апертуре решетки и применении цифровой обработки сигналов.

В многоэлементном микроскопе представляется возможным без изменения вертикального положения акустического узла проводить фокусировку на различной глубине объекта. Для этого проводится компенсация изменений задержек сигналов элементов решетки, вызываемых прохождением волн в материале образца до требуемой глубины. На рис. 3, *a* приведены отклики от сферической полости с диаметром 1.5 mm, центр которой располагался на глубине 4 mm внутри дюралюминиевого образца. Как видно из сравнения результатов, наибольшая амплитуда отклика достигается при фокусировке на глубину, совпадающую с расстоянием до центра сферы.

Обычно размер исследуемой области образца превосходит поле электронного сканирования, поэтому для построения изображений протяженных объектов электронное сканирование в многоэлементном микроскопе дополняется механическим дискретным перемещением по двум поперечным координатам с шагом $2x_p$. В качестве примера построения такого покадрового изображения на рис. 3, *b* представлены результаты визуализации внутренних пор в эпоксидном компаунде с диаметрами 0.6–0.9 mm. Акустическое изображение составлено из 4×4 кадров размером 1.5×1.5 mm.

Следует отметить, что в многоэлементном микроскопе время, необходимое на формирование одного пиксела кадра, может быть доведено

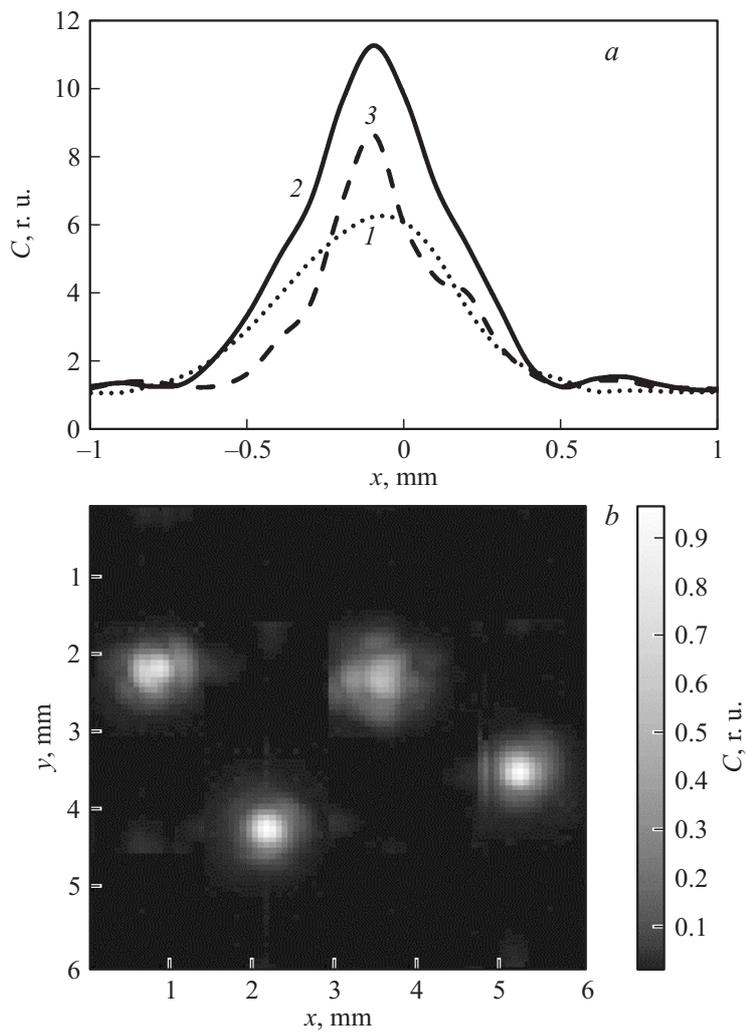


Рис. 3. Отклик $C(x)$ от сферической полости в дюралюминии при фокусировке на глубину 3 мм (1), 4 мм (2) и 5 мм (3) (a); изображение пор в композите (b).

до характерного времени распространения ультразвука в акустическом тракте τ . В одноэлементном же микроскопе время, приходящееся на один пиксел, определяется скоростью механического движения. Однако это время должно быть существенно больше τ , в противном случае излучение и прием ультразвука будет производиться при разных положениях ультразвукового узла и изображение будет искажено. Таким образом, многоэлементный микроскоп потенциально обладает более высокой производительностью по сравнению с одноэлементным.

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] *Azhari H.* Basic of biomedical ultrasound for engineers. Hoboken, New Jersey, USA: John Willey & Sons, 2010. P. 173.
- [3] *Тумов С.А., Маев Р.Г., Богаченков А.Н.* // Датчики и системы. 2010 (7). С. 18.
- [4] *Briggs G.A.D.* Acoustic microscopy. New York: Oxford university press, 1992. P. 25.
- [5] *Schwartz J.L., Steinberg B.D.* // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 1998. V. 45(2). P. 376.