

Ультразвуковая визуализация неоднородностей в структуре излучателей сдвиговых волн

© С.А. Титов, Е.А. Давыдова

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

E-mail: sergetitov@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 27 июня 2025 г.

Принято к публикации 15 июля 2025 г.

Экспериментально показано, что неоднородности в структуре излучателей сдвиговых волн могут быть визуализированы за счет преобразования на этих неоднородностях сдвиговых колебаний в продольные волны. Генерируемые продольные волны распространяются в окружающую излучатель иммерсионную жидкость и принимаются сканирующим ультразвуковым преобразователем.

Ключевые слова: сдвиговые волны, пьезопреобразователь, ультразвуковая визуализация, акустический микроскоп.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.20.61397.20356

Пьезоэлектрические излучатели широко используются в разнообразных устройствах, например в биомедицинских диагностических и терапевтических приборах, акустооптических компонентах, приборах неразрушающего контроля. Их важные параметры и характеристики зависят от наличия нарушений в структуре. К типичным дефектам можно отнести расслоения между пьезоматериалом, подложкой и электродами, возникающие главным образом вследствие низкой адгезии между слоями. Критическими следует рассматривать неоднородности в виде трещин в пластине и подложке. Наиболее вероятными причинами их возникновения являются механические и температурные деформации. Дефекты приводят к снижению эффективности излучателя и нежелательным искажениям генерируемого поля, а также свидетельствуют о нарушениях технологии изготовления, приводящих к низкой надежности.

Оценить работоспособность излучателя можно по его электрическому импедансу [1,2]. Более информативными представляются методы, позволяющие измерять поле излучателя продольных волн с помощью сканирующего гидрофона [3] или сфокусированного ультразвукового приемника [4]. Получить распределение колебаний поверхности излучателя можно путем восстановления записанной гидрофоном в иммерсионной жидкости акустической голограммы [3] или с помощью лазерного виброметра [5]. Однако данные методы неприменимы для излучателей сдвиговых волн, так как в них колебания направлены вдоль поверхности и отсутствует нормальная компонента смещения. Визуализация структуры излучателей продольных волн была выполнена в эхо-импульсном режиме акустического микроскопа путем облучения излучателя сфокусированной волной и приема отраженной им волны [5,6]. Более того, было показано [6], что пространственное распределение излучательной способности может быть получено путем при-

ема сканирующим сфокусированным приемником волны, излучаемой в иммерсионную жидкость исследуемым пьезопреобразователем. Такой метод неприменим для однородного излучателя сдвиговых волн, так как он не может возбуждать в жидкости продольную волну. Однако на неоднородностях, которые могут присутствовать в преобразователе, возможна трансформация сдвиговых колебаний в колебания с ненулевой нормальной компонентой. В настоящей работе предлагается метод визуализации неоднородностей в излучателях сдвиговых волн путем регистрации продольных волн, генерируемых неоднородностями в структуре излучателя и распространяющихся в сторону приемника через иммерсионную жидкость.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. В работе использовался ультразвуковой излучатель сдвиговых волн в виде пластинки 1 из монокристалла ниобата лития X-среза, которая располагалась на звукопроводе 2

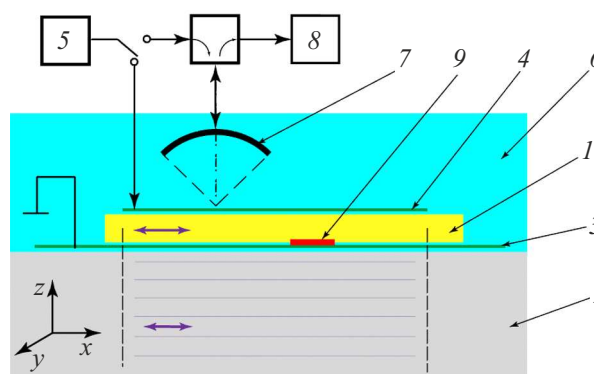


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — излучатель (ниобат лития), 2 — звукопровод (парателлурит), 3 — нижний электрод, 4 — верхний электрод, 5 — импульсный генератор, 6 — иммерсионная жидкость, 7 — фокусирующий преобразователь, 8 — электронный блок, 9 — неоднородность.

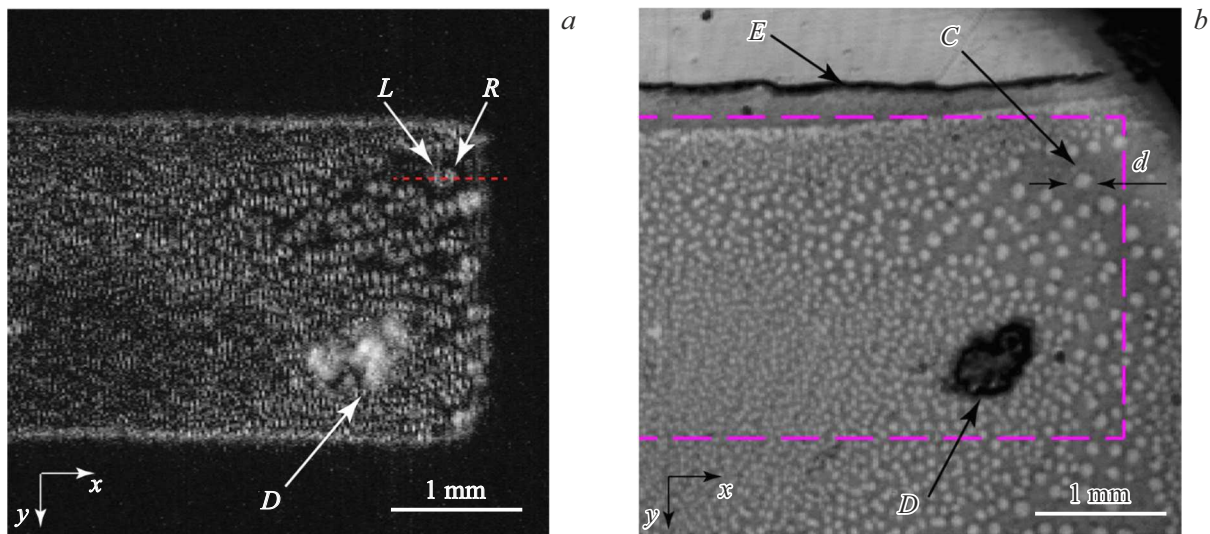


Рис. 2. *a* — амплитуда излучаемого сигнала $g(x, y)$; *b* — ультразвуковое изображение излучателя $r(x, y)$: *C* — неоднородность; *d* — размер неоднородности *C*; *L*, *R* — отклики, излучаемые неоднородностью *C*; *D* — поверхностный дефект; *E* — край пьезопластины.

из парателлурита. Нижний электрод излучателя 3, выполненный в виде слоя индия толщиной примерно $2\text{ }\mu\text{m}$, служил для механического присоединения пластины к звукопроводу. Длинная сторона пластинки была ориентирована вдоль кристаллографического направления Y_{+131° ниобата лития и направлена вдоль оси x координатной системы, принятой на рисунке. Направление $[110]$ парателлурита располагалось в плоскости (y, z) и составляло угол 6.2° с осью z . Приложение электрического сигнала к верхнему электроду 4 вызывало возникновение сдвиговых волн в излучателе и звукопроводе, вектор смещения в которых был направлен вдоль оси x .

Толщина пластинки составляла $27\text{ }\mu\text{m}$, что соответствовало частоте антирезонанса преобразователя примерно 90 MHz . Использование согласующей цепи на входе излучателя позволило получить полосу рабочих частот приблизительно $60\text{--}100\text{ MHz}$. Возбуждение преобразователя в этой полосе частот осуществлялось видеоимпульсами длительностью примерно 5 ns , вырабатываемыми генератором 5. Излучатель находился в контакте с иммерсионной жидкостью 6, в качестве которой использовалась деионизированная вода. Продольные волны, возникновение которых возможно в результате трансформации сдвиговых колебаний в области неоднородностей излучателя, распространялись в воде и принимались фокусирующим ультразвуковым преобразователем 7. Центральная частота и относительная полоса преобразователя составляли 75 MHz и 65% соответственно, что обеспечивало эффективный прием излучаемых импульсных волн. Импульсный режим работы обеспечивал возможность выделения во временной области полезного сигнала на фоне помех, образуемых зондирующим ультразвуковым импульсом и

его переотражениями. Принимаемые сигналы после усиления, фильтрации и аналого-цифрового преобразования в электронном блоке 8 поступали в компьютер. Фокус преобразователя 7 располагался на поверхности излучателя 1, что обеспечивало поперечное пространственное разрешение $\sim 20\text{ }\mu\text{m}$. Коэффициент поглощения ультразвука в воде на частоте 100 MHz составляет 2.2 dB/mm , а путь, проходимый волной в жидкости, равен фокусному расстоянию преобразователя 3.4 mm . Таким образом, ослабление сигнала в жидкости не превышает 7.5 dB , что не критично сказывается на чувствительности метода. Для регистрации пространственного распределения принимаемых откликов $g(x, y)$ проводилось механическое сканирование преобразователя в плоскости (x, y) .

Описываемая экспериментальная установка была построена на базе сканирующего акустического микроскопа, более подробное описание которого можно найти в работе [4]. Для построения ультразвуковых изображений неоднородностей использовался штатный эхоимпульсный режим акустического микроскопа. При этом генератор 5 подключался к преобразователю 7, который излучал зондирующие сфокусированные волны и принимал отраженные объектом отклики $r(x, y)$.

Пространственное распределение амплитуды излучаемого преобразователем сигнала $g(x, y)$ представлено на рис. 2, *a*. Принятые отклики находятся в хорошо очерченной области, соответствующей верхнему электроду 4 (рис. 1). Ширина этой области равна ширине электрода 2.4 mm . Отклики имеют различную форму и размеры и неравномерно распределены по области. Следует отметить, что на оптических изображениях излучателя неоднородности на поверхности всей пьезопластины не видны, за исключением крупного дефекта *D*. На ультразвуковом изображении $r(x, y)$ (рис. 2, *b*), полученном

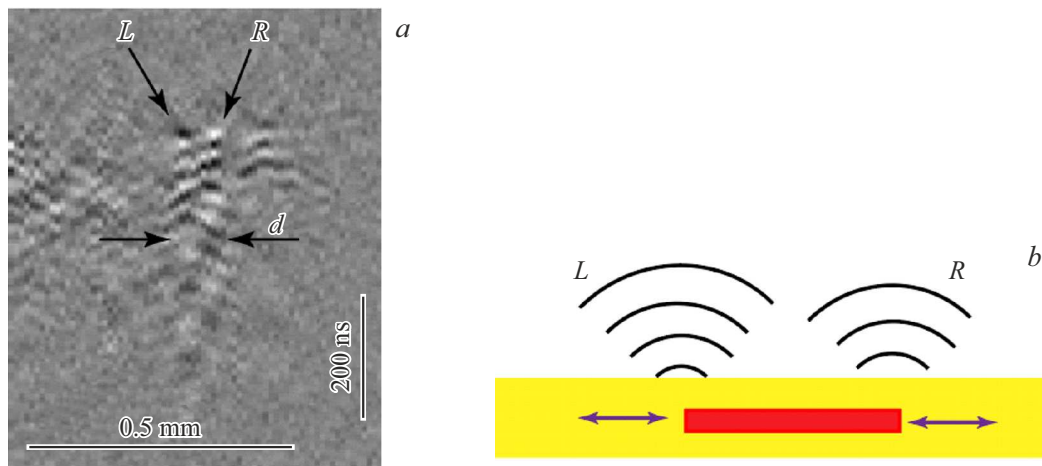


Рис. 3. *a* — сигнал $g(x, t)$, измеренный в области неоднородности; *b* — схема генерации продольных волн в жидкости.

в эхоимпульсном режиме акустического микроскопа, дефект D также наблюдается, однако верхний электрод излучателя не обнаруживается ввиду малости его толщины. Его положение показано на изображении штриховой линией. Кроме крупного дефекта D в верхней части виден неровный край E пластинки из ниобата лития, практически по всей площади которой распределены отклики от мелких неоднородностей. Временная структура приходящих ультразвуковых сигналов показывает, что эти неоднородности находятся в области границы между пластинкой и звукопроводом, как показано на рис. 1. Их размеры и положения соответствуют размерам и положениям откликов на изображении $g(x, y)$, образованных трансформацией сдвиговых колебаний (рис. 2, *a*). Важно отметить, что вклад в сигнал $g(x, y)$ вносят только те дефекты, которые находятся под электродом. Таким образом, генерация сигнала происходит именно в излучателе сдвиговых волн, а не по всей поверхности пьезопластины. Как показывает изображение $r(x, y)$ (рис. 2, *b*), дефекты имеют преимущественно округлую форму. Отклики, излучаемые пьезопластиной (рис. 2, *a*), также имеют округлую внешнюю границу, но они разделены на две части. Так, например, неоднородности C на изображении $r(x, y)$ соответствует отклик $g(x, y)$, в котором различаются половины L и R (рис. 2, *a*).

На рис. 3, *a* показана пространственно-временная структура сигнала $g(x, t)$, записанного в зависимости от координаты x и времени t . Сигнал записан вдоль штриховой линии (рис. 2, *a*), проходящей через дефект. Значение сигнала представлено оттенками серого цвета, причем светлый тон соответствует положительной полярности сигнала, темный — отрицательной. Время прихода отклика соответствует времени распространения продольной ультразвуковой волны от излучателя I до принимающего преобразователя 7 (рис. 1). Размер отклика d составляет приблизительно $140 \mu\text{m}$, период колебаний в принимаемом волновом пакете равен примерно 15 ns , что соответствует частотному диапазону

ультразвуковых излучателя и приемника. В принятом отклике различаются составляющие L и R (рис. 3, *a*), расположенные над краями дефекта, а в его центре сигнал практически отсутствует. Также важно отметить, что полярности составляющих L и R являются противоположными.

Особенности поведения генерируемых сигналов могут быть качественно объяснены следующим образом (рис. 3, *b*). При взаимодействии горизонтально поляризованных сдвиговых движений в материале излучателя с краями неоднородности происходит искажение поля тангенциальной деформации и возникновение вертикальной составляющей деформации на поверхности между излучателем и иммерсионной жидкостью. Эта составляющая вызывает излучение продольной волны в жидкость, которая принимается фокусирующим преобразователем. Так как возбуждающие колебания на краях дефекта направлены в любой момент времени в противоположных направлениях по отношению к его центру, полярности откликов L и R также инвертированы. Кроме того, генерация сигнала мала в области неоднородности, проходящей через ее центр и простирающейся вдоль оси u перпендикулярно направлению сдвиговых колебаний.

Таким образом, экспериментально показано, что неоднородности в структуре пьезоэлектрических излучателей сдвиговых волн могут быть обнаружены и визуализированы в иммерсионной схеме измерений за счет преобразования сдвиговых колебаний в продольные волны в жидкости. Данный метод может быть использован для исследований свойств излучателей сдвиговых волн, отработки технологии их производства и контроля качества приборов. В настоящей работе исследования выполнены для излучателя из ниобата лития на подложке из парателлурита. Такая структура часто используется в акустооптических приборах, вместе с тем область применимости предложенного метода представляется более широкой. Важно, чтобы визуализируемые неоднородности вызывали искажение сдвиговых колебаний

и генерацию продольной волны, амплитуда которой является достаточной для регистрации. Таким образом, метод может быть применен для различных материалов подложки и излучателя, включая пьезокерамику, и в различных частотных диапазонах.

Финансирование работы

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FFNS-2025-0006.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Ding, M. Bavencoffe, M. Lethiecq, *Materials*, **14** (9), 2269 (2021). DOI: 10.3390/ma14092269
- [2] B. Lin, V. Giurgiutiu, P. Pollock, B. Xu, J. Doane, *AIAA J.*, **48** (3), 635 (2010). DOI: 10.2514/1.44776
- [3] А.З. Калоев, Д.А. Николаев, В.А. Хохлова, С.А. Цысарь, О.А. Сапожников, *Акуст. журн.*, **68** (1), 83 (2022). DOI: 10.31857/S032079192201004X [A.Z. Kaloev, D.A. Nikolaev, V.A. Khokhlova, S.A. Tsysar, O.A. Sapozhnikov, *Acoust. Phys.*, **68** (1), 71 (2022). DOI: 10.1134/S1063771022010043].
- [4] S.A. Titov, A.S. Machikhin, V.Ed. Pozhar, *Materials*, **15** (5), 1792 (2022). DOI: 10.3390/ma15051792
- [5] J.N. Eiras, L. Gavérina, J.-M. Roche, *Sensors*, **24** (2), 450 (2024). DOI: 10.3390/s24020450
- [6] L. Svilainis, D. Kybartas, A. Aleksandrovas, T.E.G. Alvarez-Arenas, *NDT E Int.*, **116**, 102360 (2020). DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102360