10

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 приема 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 I из монокристалла ниобата лития X-среза, которая располагалась на звукопроводе 2

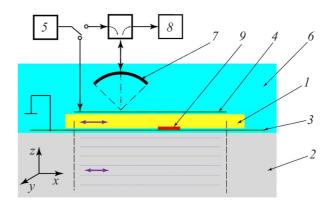
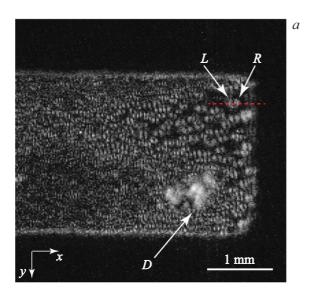


Рис. 1. Схема эксперимента. I — излучатель (ниобат лития), 2 — звукопровод (парателлурит), 3 — нижний электрод, 4 — верхний электрод, 5 — импульсный генератор, 6 — иммерсионная жидкость, 7 — фокусирующий преобразователь, 8 — электронный блок, 9 — неоднородность.



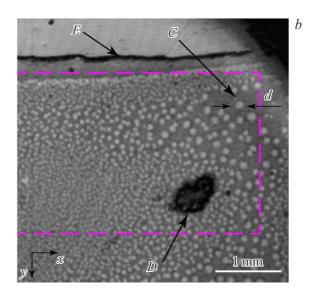


Рис. 2. a — амплитуда излучаемого сигнала g(x,y); b — ультразвуковое изображение излучателя r(x,y): C — неоднородность; d — размер неоднородности C; L, R — отклики, излучаемые неоднородностью C; D — поверхностный дефект; E — край пьезопластины.

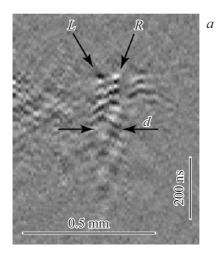
из парателлурита. Нижний электрод излучателя 3, выполненный в виде слоя индия толщиной примерно $2\,\mu$ m, служил для механического присоединения пластины к звукопроводу. Длинная сторона пластинки была ориентирована вдоль кристаллографического направления $Y_{+131^{\circ}}$ ниобата лития и направлена 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 μm, что соответствовало частоте антирезонанса преобразователя примерно 90 МНz. Использование согласующей цепи на входе излучателя позволило получить полосу рабочих частот приблизительно 60-100 МНz. 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 МНz 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 $\sim 20\,\mu\mathrm{m}$. Коэффициент поглощения ультразвука в воде на частоте $100\,\mathrm{MHz}$ составляет $2.2\,\mathrm{dB/mm}$, а путь, проходимый волной в жидкости, равен фокусному расстоянию преобразователя $3.4\,\mathrm{mm}$. Таким образом, ослабление сигнала в жидкости не превышает $7.5\,\mathrm{dB}$, что некритично 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



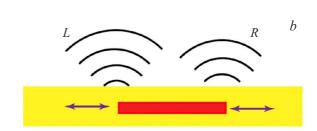


Рис. 3. a — сигнал g(x, t), измеренный в области неоднородности; b — схема генерации продольных волн в жидкости.

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 Cна 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-временна́я 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 I (рис. I). Размер отклика I0 составляет приблизительно I1 период колебаний в принимаемом волновом пакете равен примерно I5 пs, 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 у 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