

УДК 534.2

Карабутов А.А. (мл.), Сапожников О.А., Карабутов А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОКУСИРОВАННОГО ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРОМЕТРИИ

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, кафедра акустики.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
Тел. +7 (495) 939-2952
E-mail: akarabutov@gmail.com; oleg@acs366.phys.msu.ru; aak@ilc.edu.ru

Вибрации технических конструкций со временем приводят к их деградации и разрушению, поэтому важно характеризовать указанные вибрации количественно. В зависимости от типа, виброметры измеряют вибросмещение (лазерные, емкостные виброметры), виброскорость (лазерные, пьезоэлектрические виброметры) или виброускорение (пьезоэлектрические виброметры). Лазерные виброметры получили наибольшее распространение, так как они позволяют измерять вибрации на удалении от исследуемых объектов, причём возможно быстрое сканирование пробным лучом большой площади. К недостатком таких систем можно отнести необходимость доступа к образцу через оптически прозрачную среду, возмущение в которой не должно существенно влиять на распространение оптического излучения. Таким образом, результаты измерений вибраций поверхности твердого тела через жидкость, к примеру воду, могут быть сильно искажены. В настоящей работе для измерения вибраций конструкций, погруженных в жидкость, предлагается использовать акустический эхо-метод. Для достижения высокого продольного разрешения, возбуждение акустического импульса осуществляется лазерно-ультразвуковым методом. Импульс имеют колокообразную форму с характерной длительностью 70 нс. После возбуждения в плоском слое, импульс проходит через акустическую линзу в направлении поверхности образца. С одной стороны, это позволяет компенсировать потери на отражении от границы с жидкостью, с другой – дифракцию пучка при распространении и, как результат, приводит к повышению поперечного разрешения. Для преобразователя, применяемого в наших экспериментах, поперечный диаметр акустического пучка в фокусе составлял 1 мм, длина фокальной области – 8.4 мм, фокальное расстояние - 17 мм. Благодаря гладкой форме акустического импульса, точность определения расстояния от преобразователя до поверхности составляет 7.5 мкм. Использовалась частота посылки импульсов 1 кГц, поэтому измеряемый диапазон частот колебаний поверхности составляет 0 Гц до 500 Гц. Диапазон измеряемых скоростей - от 3 мкм/с до 8.4 м/с.

Введение

Своё развитие акустическая микроскопия берёт с работы С.Я. Соколова [1]. Несмотря на простоту реализации, предложенный им аппарат продемонстрировал возможность ультразвуковой диагностики материалов, по качеству изображения сравнимую возможностями оптических микроскопов. Явным достоинством нового метода являлась возможность «заглянуть» внутрь структуры исследуемого образца глубже, чем в приповерхностный слой. Дальнейшее развитие микроакустических методов [2-11] было направлено на анализ упругих характеристик объектов по отражённым сигналам. Благодаря использованию широкоапертурных акустических линз, на границе объекта и иммерсионной жидкости происходило возбуждение различных типов волн (продольных волн ивытекающих рэлеевских волн). В этих исследованиях использовался узкополосный высокочастотный сигнал. Его отражение от образца имеет сложную структуру и зависит от расстояния между линзой и поверхностью (так называемая зависимость $V(z)$). Эта зависимость даёт возможность восстановления коэффициента отражения как функции угла приёма. На основе $V(z)$ могут быть найдены скорости звука различных типов волн в образце. Данный метод имеет существенный недостаток – сильное влияние ошибки позиционирования датчика по углу. По этой причине метод невозможно применить для исследования поверхностей со сложной геометрией. Для проведения акустической профилометрии поверхности необходимо избавиться от $V(z)$ зависимости. Этого можно достигнуть изменением режима излучения с непрерывного на импульсный. Пространственная протяжённость импульса должна быть меньше удвоенного фокусного расстояния. Для соблюдения этого условия следует либо излучать широкополосный сигнал с высокой центральной частотой, либо уменьшить числовую апертуру линзы. В первом случае высоко влияние поглощения в иммерсионной жидкости, а во втором случае увеличивается диаметр фокального пятна и длины перетяжки. Последний случай удобней с практической точки зрения. Увеличение длины перетяжки расширяет обзор исследуемого образца по глубине, но при этом ухудшается поперечное разрешение. Для повышения продольного и поперечного разрешения необходимо увеличивать ширину полосы излучаемого сигнала.

При использовании пьезоэлектрических источников звука достаточно сложно добиться расширения полосы излучения. Альтернативный способ получения широкополосных акустических сигналов – оптоакустический (ОА) [12].

Схема фокусирующего преобразователя

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Излучение от лазера (1) по оптоволокну поступает в ОА преобразователь (2) и поглощается в ОА генераторе (3). Быстрое тепловое расширение рабочего слоя в ОА генераторе (3) приводит к возбуждению акустических волн, распространяющихся в обе стороны от ОА генератора. Одна из этих волн распространяется через звукопровод (4) к широкополосному пьезоприёмнику (5). Вторая волна движется через акустическую линзу (6) и иммерсионную жидкость к объекту. Отражаясь от поверхности и внутренней структуры образца (7), она распространяется обратно в сторону линзы и, далее, пьезоприёмника, где и регистрируется. Аналоговый сигнал широкополосного пьезоприёмника через зарядовый предусилитель поступает на аналого-цифровой преобразователь. После оцифровки, информация обрабатывается на компьютере (8). Для получения картины поверхности преобразователь размещается на трёхкоординатной трансляционной системе, управление которой осуществляется компьютером. Сам образец помещается в кювету с иммерсионной жидкостью (водой), куда погружался и ОА преобразователь.

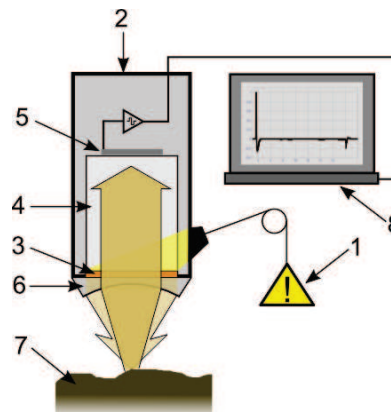


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - лазер, 2 - ОА преобразователь, 3 - пьезоприёмник, 4 - звукопровод, 5 - ОА генератор, 6 - акустическая линза, 7 - объект исследования, 8 - компьютер.

В установке используется лазер $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ с диодной накачкой и модуляцией добротности; длительность и энергия лазерного импульса составляла 10 нс и 100 мкДж, соответственно. Частота дискретизации АЦП - 100 МГц, разрядность – 12 бит, аналоговая полоса 70 МГц. Запуск считывания АЦП синхронизирован с импульсами лазера. Демпфированный пьезоприёмник изготовлен из ПВДФ плёнки и позволял детектировать сигналы с амплитудой от 0.5 Па. Электронная система допускает регистрацию в линейном режиме сигналов с амплитудой до 20 кПа, что обеспечивает динамический диапазон изменений около 90 дБ. Точность перемещения по осям трёхкоординатной трансляционной системы составляет 2.5 мкм. Радиус кривизны линзы составляет 8 мм. Числовая апертура акустической линзы составляет около 0.5, что позволяет избежать попадания в нее волны утечки, излучаемой поверхностной волной.

В отличие от преобразователей, используемых в стандартной профилометрии и акустической микроскопии, у данного преобразователя отсутствует $V(z)$ эффект. Это объясняется малой добротностью ОА генератора, малой пространственной длительностью зондирующего импульса по сравнению с фокусным расстоянием и небольшой угловой апертурой. Зондирующий импульс представлен на рис. 2а. Его длительность по полувысоте составляет около 70 нс. Столь короткий акустический импульс обеспечивает широкую спектральную полосу от 100 кГц до 6.1 МГц по полувысоте от максимума. Поскольку фокусировка приводит к дифференцированию импульса, то импульс, отражённый от плоского объекта в фокусе, дважды дифференцируется. На рис. 2б изображён импульс, отражённый от поверхности плоского образца, находившегося в фокусе. Как видно, этот импульс имеет форму, пропорциональную второй производной от зондирующего сигнала. При этом у него остаётся ярко выраженный максимум.

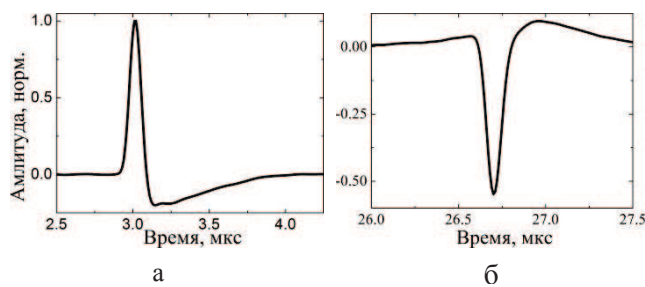


Рис. 2. а) зондирующий импульс, б) импульс, отраженный от плоской поверхности. По оси ординат отложено время в мкс, по оси абсцисс – нормированная амплитуда

Экспериментальные измерения характеристик фокусированного ОА преобразователя

Особый интерес представляют характеристики акустического поля, формируемого при фокусировке импульсного ультразвукового пучка: ширина фокуса и глубина резкости. Для их измерения в

качестве объекта исследования использовалась металлическая пластина с полированной поверхностью (R9) и резким углом боковой грани. Эта пластина помещалась в кювету с иммерсионной жидкостью (водой), куда опускался и преобразователь. Он закреплялся на трёхкоординатной трансляционной системе в юстировочном крепеже, который позволял изменять положение преобразователя по двум углам и направлять его по нормали к поверхности. Выставление углов производилось по максимуму пикового значения акустического импульса, отражённого от поверхности объекта. Трансляционная система позволяла изменять положение преобразователя в трёх перпендикулярных направлениях: двух вдоль поверхности образца (назовём их “X” и “Y”) и одним – по нормали к поверхности (ось “Z”).

Перед проведением измерений определялась скорость ультразвука в жидкости и задержка отраженного сигнала, соответствующая положению фокуса. Для этого преобразователь поднимался над положением фокуса и последовательно опускался. Результаты измерений представлялись в виде графика зависимости пикового значения отражённого сигнала от смещения преобразователя (рис. 3). Временная задержка, при которой отраженный импульс принимал максимальное пиковое значение, соответствует положению фокуса (23.690 ± 0.005) мкс. В это время входят двойные пробоги в ОА генераторе ((0.28 ± 0.01) мкс), линзе ((1.648 ± 0.008) мкс) и в (16.33 ± 0.01) мм воды (при скорости звука $c_W = 1501$ м/с). Скорость звука в воде вычислялась как отношение смещения по оси Z к разности временных задержек акустического импульса, отраженного от

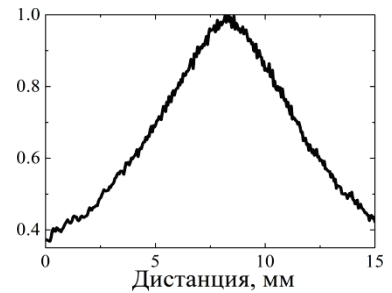


Рис. 3. Зависимость пикового значения отражённого сигнала (нормировано на максимум) при различных расстояниях между преобразователем и объектом.

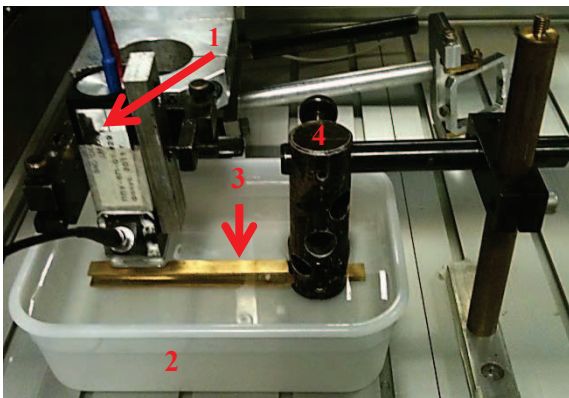


Рис. 4. Экспериментальная установка. 1 – ОА преобразователь, 2 – кювета с водой, 3 – камертон, 4 - держатель

поверхности в конечной и начальной точках измерения.

Измерение

размеров акустического пучка на заданной высоте производилось путём перемещения преобразователя поперёк края пластины. Сам акустический пучок имеет гауссовскую форму, поэтому зависимость пикового значения отражённого сигнала от поперечного смещения можно аппроксимировать функцией ошибок. Такие измерения были проведены как вдоль оси X, так и вдоль оси Y. По одной из осей полуширина фокальной области составила (511 ± 2) мкм, а по другой - (556 ± 3) мкм. Исходя из различия этих величин, можно сделать вывод, что поперечное сечение зондирующего пучка имеет форму эллипса с небольшим эксцентриситетом.

Для измерения глубины резкости производился поиск положения, при котором ширина пучка увеличивается в $\sqrt{2}$ раз. Измерение полуширины пучка

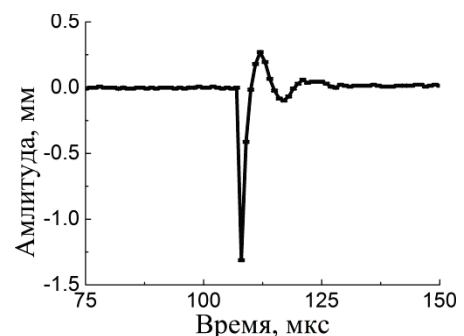


Рис. 5. Восстановление колебания поверхности образца по задержке отраженного сигнала.

Экспериментальная установка

Вид экспериментальной установки представлен на рис. 4. Она состояла из ОА преобразователя (1), который вместе с объектом исследования (камертоном, 3) находился в иммерсионной жидкости в кювете (2). Камертон закреплялся в держателе, который механически не был связан с ОА преобразователем. Для задания колебаний объекта в жидкости производился удар по держателю (место удара обозначено цифрой 4). Колебание поверхности приводит к изменению

задержки акустического импульса, отраженного от поверхности. Зондирование производится с частотой 1 кГц, поэтому наибольшая частота колебаний, которую возможно детектировать – 500 кГц. Дискретизация АЦП происходит с частотой 100 МГц, т.е. с шагом 10 нс, что соответствует 15 мкм пробега звука по воде. Благодаря тому, что излучаемый сигнал имеет гладкую форму, можно говорить о том, что точность определения положения максимума составляет половину шага по времени или 7.5 мкс. Максимальная скорость колебания поверхности вычисляется исходя из значений частоты зондирования и глубины фокальной зоны. Она равна 8.4 м/с.

Результаты измерений

На рис. 5 приведено смещение поверхности исследуемого образца. После нанесения удара (110 мкс) образец смещается сначала вниз (от преобразователя), а затем совершает затухающие колебания в течение 20 мс. Из-за большого коэффициента отражения на границе «жидкость-твердое тело» внутренняя структура самой пластины и последующих границ не видна.

Выводы

Использование фокусирующего оптоакустического преобразователя может быть использовано для анализа колебаний поверхности через оптически непрозрачную жидкость. Максимальная скорость колебаний, которая может быть детектирована системой – 8.4 м/с, частоты колебаний – до 500 Гц.

Работа была проведена при поддержке грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ НШ-2631.2012.2 и РФФИ 11-02-01189.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов С. Я., ДАН СССР, LXIV, № 3, 333 (1949); ЖТФ, 19 вып. 2, 271 (1949).
2. Богаченков А.Н., Маев Р.Г., Тутов С.А. Измерительный сканирующий акустический микроскоп с гармоническим зондирующим сигналом. Акуст. журн., 2000, т. 46, №5, с. 601-608.
3. Левин В.М., Лобкис О.И., Маев Р.Г. Исследование пространственной структуры акустических полей сферическим фокусирующим преобразователем. Акуст. журн., 1990. т.36, вып. 4, с. 696-702.
4. Бахрах Л.Д., Тутов С.А. Сканирующий акустический микроскоп с доплеровским смещением спектра отраженного сигнала. Акуст. журн., 1990, т. 36, №3, с. 552-554.
5. Lemons, R. A. and Quate, C. F., Acoustic microscopy, in Physical Acoustics, ed. Mason, W. P. and Thurston, R. N. Academic Press., London, 1979, pp. 1-92.
6. Березина С.И., Лямов В.Е., Солодов И.Ю. Вестник МГУ, Сер. Физика-астрономия, 1977, т.18, №1, с. 3-18.
7. Briggs, A., Acoustic microscopy. Clarendon Press, Oxford, 1992.
8. Gilmore, R. S., Industrial ultrasonic imaging microscopy, in Physical Acoustics, ed. Thurston, R. N., Pierce, A. D., and Papadakis, E. Academic Press, New York, 1999, pp. 275-346.
9. Zinin P.V. Quantitative acoustic microscopy of solids, in Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids and Gases. V.I: Dynamic Methods for measuring the elastic properties of solids, Levy M., Bass H., Stern R. and Keppens V. Academic Press, New York, 2001, pp. 187-226.
10. Briggs A. An introduction to scanning acoustic microscopy. Microscopy Handbooks-12, Alden Press, Oxford, 1985.
11. Sheppard C.J.R., Wilson T. Effects of high angles of convergence on V(z) in scanning acoustic microscope, Appl. Phys. Lett., 1981. v.38 (11), pp. 858-859.
12. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991, 304 с.