

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 3

1999

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 535.241 : 620.179.16

А. И. Кондратьев, Ю. М. Криницын, С. А. Гусаков
(Хабаровск)

ЛАЗЕРНЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Существуют различные методы градуировки и аттестации преобразователей ультразвуковых колебаний [1]. В режиме приема основой всех методов является измерение сигнала на выходе преобразователя при известном акустическом воздействии на его входе. Акустическое воздействие создается различными способами: пьезопреобразователями; электрохимическим воздействием; струей газа, абразива или песка; импульсами напряжения, возникающими при раздавливании тонкостенного стеклянного капилляра и другими. Причем величина смещений ультразвукового (УЗ) поля определяется либо расчетным путем, либо экспериментально с использованием лазерного интерферометра. Известные установки для аттестации преобразователя обладают тем недостатком, что волновое акустическое поле, реализуемое в них, фиксировано. На практике это приводит к существенным погрешностям. В режиме излучения для определения параметров преобразователя применяют наборы стандартных образцов (например, комплект КЭУ, ГОСТ 14782-86) или производят измерения колебаний поверхности преобразователя оптическими методами [2], однако реальное поле излучения при этом не определяется, что влечет за собой возникновение дополнительных погрешностей.

Рассмотрим методы измерения параметров преобразователей УЗ-колебаний, позволяющие исключить указанные недостатки.

Методы измерения параметров преобразователей УЗ-колебаний. Для повышения достоверности измерений необходимо совмещение во времени операции измерения электрического сигнала на входе преобразователя, работающего в режиме излучения (или измерения сигнала на выходе преобразователя в режиме приема), и операции определения акустического поля на его выходе (акустическое поле на входе преобразователя в режиме приема). Чтобы выполнить данное требование, предлагается аттестуемый преобразователь помещать на мере определенной формы, изготовленной из прозрачного для света материала и с заданным акустическим импедансом [3, 4]. При этом исключается ряд систематических погрешностей и может быть реализована точность определения полевых характеристик преобразователей ~5%.

Блок-схемы экспериментальных установок для аттестации ультразвуковых преобразователей в режиме излучения приведены на рис. 1, а и в режиме приема – на рис. 1, б.

Установка (см. рис. 1, а) содержит акустическую нагрузку, выполненную в виде оптически прозрачной прямоугольной призмы 1, диагональная поверхность которой через оптически отражающий слой 2 акустически связана с торцом звуковода 3, выполненного в виде стержня, армированного звукопоглощающим материалом 4.

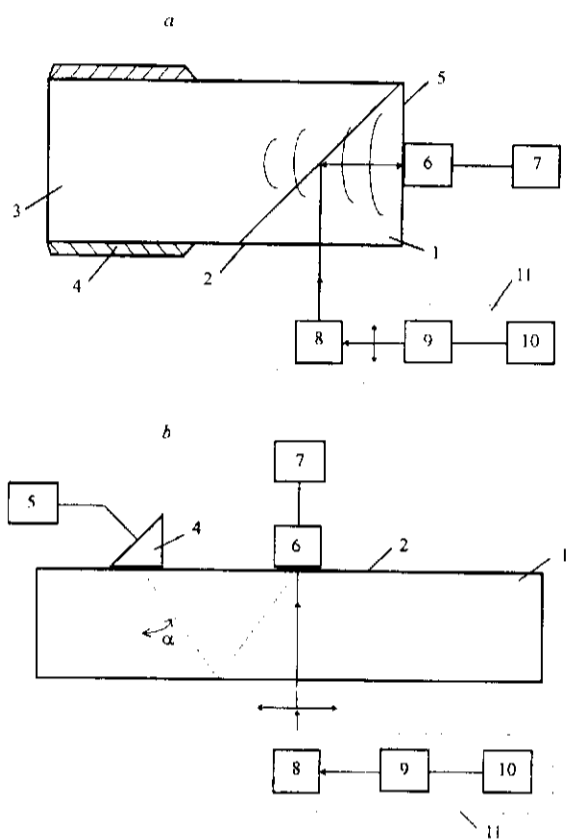


Рис. 1

Поверхность призмы 1, образующая прямой угол, через аналогичный оптически отражающий слой 5 акустически связана с аттестуемым ультразвуковым преобразователем 6, подключенным к генератору 7. Поверхность призмы 1 посредством отражающих слоев 2 и 5 оптически связана с лазерным интерферометром 8, блоком сканирования 9 и лазером 10, которые образуют измерительное лазерное устройство 11.

Установка для аттестации ультразвуковых преобразователей в режиме приема (см. рис. 1, б) содержит акустическую нагрузку 1 в виде оптически прозрачной пластины с оптически отражающим слоем 2, ультразвуковой излучатель 4, подключенный к генератору 5. Аттестуемый ультразвуковой преобразователь 6, подключенный к измерительной аппаратуре 7, акустически связан с пластиной 1. Измерение колебаний поверхности 2 производится измерительным лазерным устройством 11.

Наиболее важным во всех установках является материал акустической нагрузки. Диапазон акустического сопротивления материала этой призмы должен перекрывать диапазон акустических сопротивлений материалов изделий, контролируемых с помощью аттестуемых преобразователей. Кроме того, следует обращать внимание на фотоупругие свойства оптически прозрачных изотропных сред или кристаллов, из которых изготавливается нагрузка.

Существует достаточное количество прозрачных материалов для того, чтобы перекрыть диапазон акустических сопротивлений контролируемых материалов [5]. При выборе материала для акустических нагрузок желательно применять среды с малыми фотоупругими постоянными (в частности, для кристаллов выбирать подходящие срезы) или учитывать вклад фотоупругости в измерения. Путем подбора

компонентов можно получить оптически прозрачный сплав с необходимым акустическим сопротивлением и пренебрежимо малыми фотоупругими постоянными.

Оптические отражающие слои алюминия (толщиной $\sim 0,5$ мкм) на акустическую нагрузку наносятся методом вакуумного напыления. Такие слои не оказывают влияния на параметры УЗ-колебаний в диапазоне частот до сотен мегагерц.

В режиме излучения установка работает следующим образом.

Генератор 7 (см. рис. 1, а) возбуждает аттестуемый ультразвуковой преобразователь 6, акустически нагруженный на призму 1. Ультразвуковая волна проходит в звуковод 3 и затухает в нем. Одновременно с возбуждением производится сканирование в двух взаимно перпендикулярных плоскостях измерительного лазерного луча по поверхности слоя 5, имеющей акустический контакт с рабочей поверхностью преобразователя 6. Лазерным интерферометром 8 измеряют параметры акустического поля на рабочей поверхности преобразователя. Затем измеренные параметры акустического поля сопоставляют с параметрами возбуждающих электрических сигналов генератора 7. Эти операции производят на требуемых частотах и при различных уровнях возбуждения. Установка обеспечивает аттестацию преобразователя для всех типов волн, которые излучает преобразователь.

В режиме приема установка работает следующим образом.

Генератор 5 (см. рис. 1, б) возбуждает преобразователь 4, который излучает акустические волны в направлении аттестуемого преобразователя 6 под некоторым углом к его рабочей поверхности. Под действием акустических волн ультразвуковой преобразователь 6 вырабатывает электрические сигналы, параметры которых анализируются измерительной аппаратурой 7 (например, осциллографом СК1-111 или анализатором спектра типа СК4-59). Одновременно проводится сканирование в двух взаимно перпендикулярных плоскостях измерительного лазерного луча по поверхности слоя 5 и лазерным интерферометром 8 измеряют параметры акустического поля на рабочей поверхности преобразователя 6. Затем измеренные параметры акустического поля сопоставляют с измеренными параметрами электрических сигналов на выходе преобразователя 6. Эти операции производят при различных уровнях и частотах возбуждения излучателя 4. Используя излучатели 4 с различными углами ввода УЗ-колебаний, добиваются изменения направления акустической волны по отношению к рабочей поверхности аттестуемого преобразователя 6 и все перечисленные операции повторяют. Таким образом, достигается изменение касательной составляющей волнового вектора.

Преимуществом рассматриваемых установок по сравнению с традиционными является то, что измерение параметров электрических сигналов на входе при излучении (или на выходе при приеме) нагруженного на заданную акустическую нагрузку аттестуемого преобразователя и измерение параметров акустического поля на поверхности преобразователя производятся одновременно.

В качестве интегральных характеристик преобразователей УЗ-колебаний предлагается использовать следующие параметры.

В режиме излучения

$$K_{\Pi}^n(f) = \frac{1}{SU(f)} \iint_S |\bar{u}_z(x, y, f)| dS; \quad t_{cp} = \frac{1}{S} \iint_S t_s(x, y, f) dS, \quad (1)$$

где $|\bar{u}_z(x, y, f)|$ – поле амплитуд смещений, измеренное лазерным интерферометром на акустической нагрузке на частоте f ; $U(f)$ – амплитуда сигнала задающего генератора; t_{cp} – среднее время задержки сигнала в материале призмы для наклонных преобразователей; S – площадь рабочей поверхности преобразователя.

В режиме приема

$$K_{\Pi}^n(\omega, k_z) = |U(\omega, k_z)| / \frac{1}{S} \iint_S |u_z(x, y, \omega)| dS; \quad \Delta\varphi_n(\omega, k_z) = \omega(t_n - t_0), \quad (2)$$

где $|U(\omega, k_z)|$ – амплитуда сигнала на выходе преобразователя; $\omega = 2\pi f$; $k_z = \omega(C)^{-1} \times \cos \theta$; θ – угол падения УЗ-волны на рабочую поверхность преобразователя; $\Delta\varphi_n(\omega, k_z)$ – фазовый сдвиг сигнала в преобразователе; $t_0 - t_0$ – временной сдвиг между сигналом преобразователя и моментом времени прихода УЗ-волны.

При определении полевых характеристик преобразователя в общем случае необходимо решение уравнений упругости [6]:

$$u(x, y, z, \omega) = -i \frac{1}{\lambda} \int_S \left[u(r_{AB}) \chi(\theta_{AB}) \frac{\exp(jkr_{AB})}{r_{AB}} \right] dS, \quad (3)$$

где $u(r_{AB})$ – смещения на поверхности преобразователя; r_{AB} – расстояние от некоторой точки A преобразователя до произвольной точки B пространства перед преоб-

Таблица 1
Параметры акустического поля наклонного преобразователя

y, мм	Параметр	x					
		0	2	4	6	8	10
0	u_z , нм	0	1,13	1,17	1,29	1,17	0
	t_3 , мкс	–	2,94	2,79	2,91	2,90	–
2	u_z	0	1,01	2,53	2,54	2,24	0
	t_3	–	3,04	3,06	3,21	3,21	–
4	u_z	0	3,52	5,18	5,30	3,57	0,93
	t_3	–	3,67	3,79	3,88	3,88	4,04
6	u_z	0,98	3,31	8,20	7,19	5,63	1,38
	t_3	4,33	4,40	4,48	4,58	4,58	4,70
8	u_z	0	4,31	5,56	6,29	3,92	1,33
	t_3	–	5,02	5,17	5,17	5,29	5,42
10	u_z	0	2,57	4,92	4,65	3,41	1,60
	t_3	–	5,37	5,83	6,14	6,40	6,20
12	u_z	1,25	2,22	4,02	3,38	3,25	1,90
	t_3	6,54	6,52	6,60	6,77	6,77	6,81
14	u_z	0	2,31	3,25	4,18	3,64	5,63
	t_3	–	7,07	7,21	7,23	7,42	7,44
16	u_z	0	0	0	0	0	0

Примечание. Символ u_z – амплитуда смещений поверхности преобразователя; t_3 – задержка сигнала относительно момента подачи на преобразователь возбуждающего электрического импульса (время задержки в призме); x, y – координаты вдоль рабочей поверхности преобразователя.

разователем; θ_{AB} – угол между лучом r_{AB} и нормалью к поверхности; S – площадь преобразователя; $\chi(\theta_{AB})$ – направленность излучения элементарного источника.

Результаты экспериментов. Для метрологического обеспечения производства преобразователей ультразвуковых колебаний в большинстве случаев достаточно определения поля смещения нагруженного преобразователя в режиме излучения или отклика преобразователя на известное акустическое воздействие в режиме приема и определения параметров в соответствии с выражениями (1), (2).

В табл. 1 приведены результаты измерения акустического поля на рабочей поверхности преобразователя, обусловившего необходимость производства ультразвуковых преобразователей для прецизионных и образцовых преобразователей УЗ-колебаний.

В табл. 2 приведены результаты измерений параметров «точечного» емкостного преобразователя (ЕП) (полусферический электрод диаметром 5 мм) в режиме приема, полученные на установке, показанной на рис. 1, б.

Для иллюстрации на рис. 2 приведена диаграмма направленности исследованного преобразователя, рассчитанная по формуле (3) с использованием данных табл. 1. Угол $\beta \approx 45^\circ$, определенный по приведенной диаграмме, соответствует углу ввода преобразователя, найденному по закону Снелиуса.

Т а б л и ц а 2

П а р а м е т р ы е м к о с т н о г о п р е о б р а з о в а т е л я в р е ж и м е п р и е м а

f , МГц	A , нм	$U_{\text{вых}}$, мВ	$K_{\text{ЕП}} \cdot 10^{-2}$, В/м
0,1	$25,3 \pm 0,2$	$18,2 \pm 0,4$	$0,072 \pm 0,002$
0,15	$21,6 \pm 0,2$	$18,4 \pm 0,3$	$0,085 \pm 0,002$
0,2	$21,0 \pm 0,2$	$22,7 \pm 0,6$	$0,108 \pm 0,003$
0,3	$22,5 \pm 0,2$	$36,9 \pm 1$	$0,164 \pm 0,004$
0,5	$20,0 \pm 0,2$	$44,9 \pm 1$	$0,204 \pm 0,004$
1,0	$17,3 \pm 0,2$	$55,5 \pm 1$	$0,321 \pm 0,006$
1,5	$13,3 \pm 0,1$	$57,1 \pm 1$	$0,429 \pm 0,008$
2,0	$9,8 \pm 0,1$	$60,7 \pm 1$	$0,619 \pm 0,01$
2,5	$12,4 \pm 0,1$	119 ± 2	$0,96 \pm 0,02$
3,0	$13,6 \pm 0,1$	156 ± 2	$1,15 \pm 0,03$
3,5	$14,7 \pm 0,1$	198 ± 2	$1,35 \pm 0,03$
4,0	$15,4 \pm 0,1$	219 ± 2	$1,37 \pm 0,03$
4,5	$13,3 \pm 0,1$	176 ± 2	$1,32 \pm 0,03$
5,0	$9,5 \pm 0,1$	126 ± 1	$1,33 \pm 0,03$

Примечание. Символ A – амплитуда УЗ-колебаний на акустическом входе ЕП; $U_{\text{вых}}$ – сигнал на выходе ЕП; $K_{\text{ЕП}}$ – коэффициент преобразования ЕП ($K_{\text{ЕП}} = (K_{\text{УС}}A)$, $K_{\text{УС}} = 10$ – коэффициент усиления).

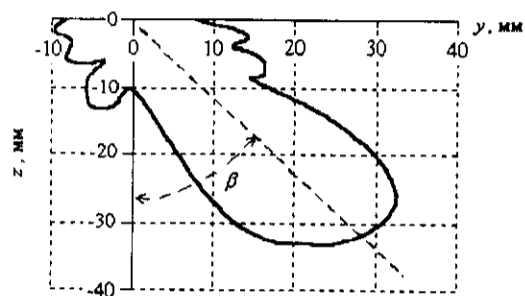


Рис. 2

Приведенные результаты показывают перспективность применения оптических методов в области метрологического обеспечения акустических видов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В. М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. МИ 2030-89. ГСИ. Государственная поверочная схема амплитуд ультразвуковых смещений, колебательной скорости частиц поверхности твердых тел и коэффициента электроакустического преобразования в диапазоне частот 0,001–50 МГц. М.: Госстандарт, 1989.
3. А. с. 1404925 СССР. Устройство аттестации ультразвуковых преобразователей /А. Н. Бондаренко, Ю. Б. Дробот, А. И. Кондратьев. Заявл. 17.09.86; Оpubл. 22.02.88. Бюл. № 23.
4. А. с. 1518777 СССР. Устройство для аттестации ультразвуковых преобразователей в режиме излучения /А. Н. Бондаренко, Ю. Б. Дробот, А. И. Кондратьев. Заявл. 10.10.86; Оpubл. 01.07.89, Бюл. № 40.
5. Физические величины. Справочник /Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1978.

Поступило в редакцию 1 февраля 1999 г.