

## СКАНИРУЮЩИЙ АКУСТИЧЕСКИЙ МИКРОСКОП В РЕЖИМЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОЛЕЙ

С.А. Т и т о в

Сканирующий акустический микроскоп используется, как правило, для формирования акустических изображений микрообъектов. Источник ультразвуковой волны, традиционно входящий в состав микроскопа, может одновременно выполнять функции приемника ультразвуковых колебаний (режим отражения), либо быть независимым (режим прохождения) [1].

Представляет интерес использование акустического микроскопа для непосредственного измерения характеристик и визуализации ультразвуковых полей, создаваемых внешними источниками с неизвестными параметрами. В настоящем сообщении приводятся теоретические и экспериментальные результаты, иллюстрирующие данные возможности акустического микроскопа.

На рис. 1 показана схема визуализации ультразвукового поля внешнего источника в фокальной плоскости  $(x_0, y_0)$  ультразвукового элемента микроскопа, образованного линзой 1, звукопроводом 2 и преобразователем 3. Напряжение на преобразователе  $V$  в силу линейности и пространственной инвариантности данной системы формирования изображения можно представить в виде свертки [2]:

$$V(x_s, y_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x_0, y_0) U(x_0 - x_s, y_0 - y_s) dx_0 dy_0, \quad (1)$$

где  $x_s, y_s$  - координаты сканирования,  $U(x_0, y_0)$  комплексная функция распределения поля в фокальной плоскости  $(x_0, y_0)$ ,  $h(x_0, y_0)$  - импульсный отклик ультразвукового элемента, равный напряжению на преобразователе, вызываемому точечным источником с координатами  $(x_0, y_0)$ . Функция  $h(x_0, y_0)$  определяется путем интегрирования поля, создаваемого этим точечным источником, по поверхности преобразователя  $(x_i, y_i)$  с учетом его чувствительности. В работах [3, 4] показано, что импульсный отклик  $h$  представляется в виде преобразования Фурье обобщенной апертурной функции  $P(x, y)$ :

$$h(x_0, y_0) \sim \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, y) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda f}(xx_0 + yy_0)\right] dx dy, \quad (2)$$

где  $\lambda$  - длина волны в иммерсионной жидкости,  $f$  - фокусное расстояние линзы. Как показывает анализ выражения (2), функция отклика  $h$  имеет значительную величину только в области фокуса, сравнимой с длиной волны  $\lambda$ .

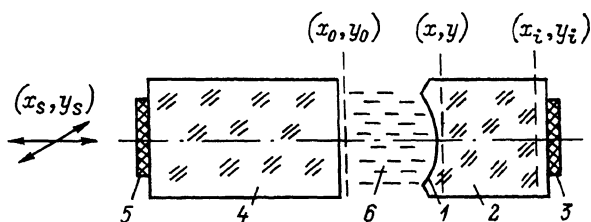


Рис. 1. Схема визуализации ультразвукового поля с помощью сканирующего акустического микроскопа.

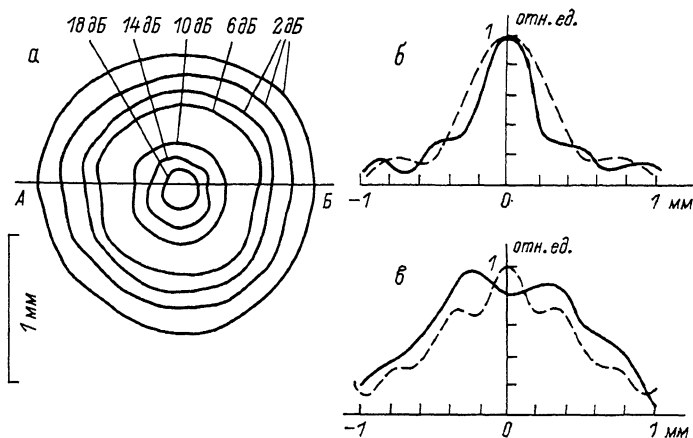


Рис. 2. Измеренное и рассчитанное (пунктир) распределение поля. а, б -  $R=0.45$  мм, в -  $R=0.75$  мм.

Таким образом, из выражения (1) следует, что изображение  $V(x_s, y_s)$  воспроизводит распределение поля в фокальной плоскости с разрешающей способностью, определяемой функцией отклика  $h$ .

Для экспериментального подтверждения этого вывода было проведено измерение амплитудного распределения поля, создаваемого источником 5 на поверхности торца звукопровода 4. В качестве источника использовался пьезополупроводниковый преобразователь на основе пленки окиси цинка. Звукопровод был выполнен из монокристалла сапфира, его длина  $L=20$  мм. Излучение и прием ультразвука производились в импульсном режиме на частоте 520 МГц. Для формирования изображения осуществлялось механическое сканирование источника в плоскости, параллельной фокальной. Так как в

режиме визуализации в фокальную область приемной линзы падает несфокусированная волна, потери при прохождении ультразвука оказываются значительно большими по сравнению с потерями, имеющими место в обычном режиме микроскопа. Поэтому, для повышения уровня полезного сигнала в качестве иммерсионной жидкости 6 применялась ртуть, что позволило уменьшить затухание в жидкости и рассогласование на поверхностях жидкость-твердое тело. На диаграмме (рис. 2, а) в виде линий равной интенсивности представлено двухмерное распределение поля круглого преобразователя с радиусом  $R_1 = 0.45$  мм. Отношение сигнал-шум было достаточным для наблюдения первого дифракционного кольца, которому на диаграмме соответствуют две внешние линии. По результатам этих измерений построено нормированное амплитудное распределение (рис. 2, б) для сечения АВ, проходящего через центр диаграммы. Аналогичная зависимость для преобразователя с радиусом  $R_2 = 0.75$  мм приведена на рис. 2, в. Радиусы преобразователей таковы, что для первого преобразователя расстояние Френеля  $l_{F1} = R_1^2 / \lambda_0 = 9.6$  мм  $< L$ , для второго  $l_{F2} = 26.8$  мм  $> L$ , где  $\lambda_0$  - длина волны ультразвука для материала звукопровода. Этим обстоятельством объясняется качественное различие наблюдаемых дифракционных картин. На этих рисунках приведены также результаты расчета распределений, выполненные с помощью ЭВМ. Расчет проводился в предположении, что преобразователь представляет собой поршневой излучатель в бесконечном, акустически жестком экране, и заключался в нахождении численными методами дифракционного интеграла Релея. Как видно из сравнения экспериментальных и расчетных результатов, наблюдаются не только количественные (рис. 2, б), но и качественные различия (рис. 2, в). Причинами такого расхождения могут явиться особенности конструкции и погрешности изготовления преобразователей, а также недостаточная степень адекватности математической модели реальным устройствам.

Таким образом, на примере исследования дифракционных картин, создаваемых пьезопреобразователями, продемонстрирована возможность применения сканирующего акустического микроскопа в режиме визуализации ультразвуковых полей.

## Л и т е р а т у р а

- [1] W i s k r a m a s i n g h e Н.К. - IEEE Proc., 1984, v. A131, N 4, p. 282-291.
- [2] Г у д м е н Дж. Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970, 364 с.
- [3] L e m o n s R.A., Q u a t e C.F. Acoustic microscopy. In: Physical Acoustics, v. XIV. ed.: Mason W.D., Thurston R.N. Academic Press, 1979, p. 1-92.
- [4] L i t n i e w s k i J. - Archives of acoustics, 1983, v. 8, N 1, p. 31-40.