

ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКА

О.А.Коротченков, А.Т.Марченко,
И.В.Островский

Пьезокерамические излучатели ультразвука (УЗ) нашли широкое применение в различных промышленных технологических процессах, ультразвуковой диагностике материалов, медицинской аппаратуре. При этом используются УЗ-волны высокой интенсивности, достигающей единиц и десятков Вт/см². Выбор рабочих рабочих интенсивностей УЗ определяет необходимость исследования линейности амплитудных характеристик излучателей ультразвука. Ранее сообщалось об уменьшении механической добротности и упругих констант при поперечных динамических нагрузках пьезокерамики [1,2]. Исследовалось также пороговое по амплитуде УЗ изменение механической добротности и коэффициента затухания УЗ в монокристаллах Cds, ZnS, и NaCl [3,4]. В этом случае динамическая нелинейность обусловлена активным воздействием УЗ-волны на систему дефектов (точечных и линейных) кристаллической решетки. Такое воздействие должно оказывать существенное влияние на работу и выбор рабочих параметров пьезопреобразователей. Однако большой научный и прикладной интерес представляют пьезоизлучатели, колеблющиеся при наличии продольных динамических деформаций. Учитывая вышесказанное, в настоящей работе ставилось целью исследование динамической нелинейности амплитудных характеристик пьезокерамических излучателей ультразвука.

Исследовались диски из пьезокерамики ПТС-19 толщиной $t=0.9-1.5$ мм и диаметром $D=8.0-12.4$ мм с напыленными серебряными электродами. Экспериментально изучались амплитуды колебаний (A) поверхности пьезодисков как функция возбуждающего УЗ-колебания электрического напряжения амплитудой V и частотой f (рис.1). Линейность датчика смещений z контролировалась. Исследования были проведены в воздухе и при нагрузке нижней грани излучателя УЗ на воду (модельную среду). Моды колебаний дисков идентифицировались с помощью рассчитанного плана частот. Для двух из образцов — PU-7 и PU-8 они приведены на рис. 2.

Типичные зависимости $A(V)$ при нагрузке пьезоизлучателей на воду приведены на рис. 3 (кривые 1-5). Видно, что амплитуда A колебаний поверхности диска нелинейно зависит от величины V . При этом поведение $A(V)$ различно для различных мод колебаний. Так, моды ER2 (кривая 5) и R2 (кривая 1) обнуляют линейную (или близкую к ней) амплитудную зависимость в области малых V . Начиная с некоторого порогового значения V_n (различного для различных образцов и каждой из перечисленных мод) величина (A/V) резко падает. В частности, для моды R2 колебаний образца PU-8 значение V_n соответствует амплитуде смещений поверхности $\sim 60 \text{ \AA}$. Моды T1 (кривая 4) и A1 (кривая 3) характеризу-

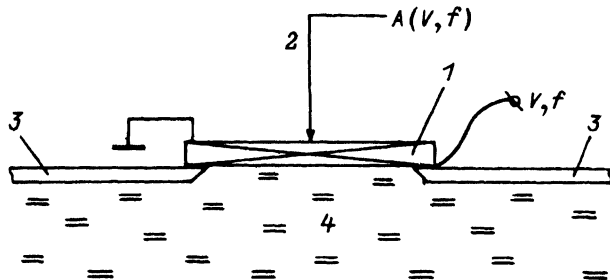


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — пьезоизлучатель, 2 — калиброванный пьезоэлектрический датчик смещений, 3 — корпус держателя, 4 — вода.

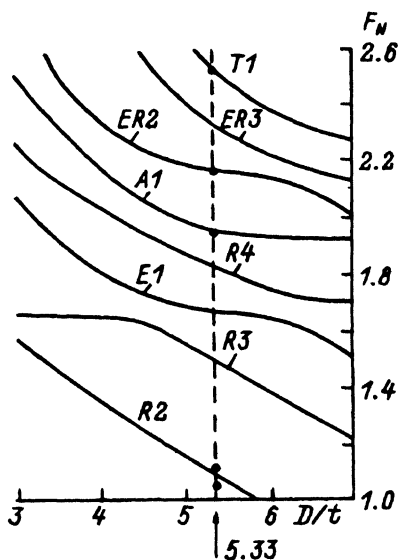


Рис. 2. Идентификация типов колебаний для образцов PU-7 и PU-8 ($D/t = 5.33$).

Точки — максимумы в спектре колебаний поверхности дисков, соответствующие различным модам. $F_N = 2ft/v_t$, v_t — скорость поперечных волн.

ется монотонной амплитудной нелинейностью, когда отношение (A/V) уменьшается беспороговым по V образом. Повышение амплитуды V/t выше 180–200 В/см при исследовании пьезоизлучателей в воздухе (т.е. в отсутствие водной нагрузки) приводило к временной нестабильности в амплитуде колебаний A . Ее можно объяснить сильным разогревом пьезокерамики.

Учитывая наблюдавшийся гистерезис в возврате (A/V) при снятии динамической нагрузки (кривая 2 на рис. 3), приведенные на рис. 3 экспериментальные результаты можно объяснить 1) рассеянием механической энергии колебаний на границах зерен керамики; 2) механизмами нелинейных потерь, характерных для монокристаллов; 3) увеличением внутренних диэлектрических потерь в пьезокерамике с ростом V . Для выясне-

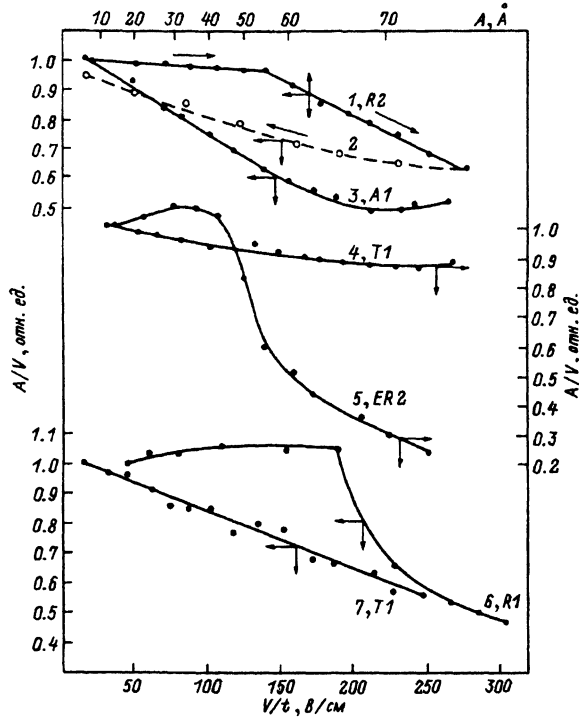


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний A поверхности нагруженных на воду излучателей УЗ из керамики (1-5) и LiNbO_3 (6, 7) от величины приложенного напряжения V для различных мод.

Частота колебаний $f = 0.65$ (1,2), 1.14(3), 1.46(4), 1.26(5), 0.38(6), 1.08 МГц(7).

ния вклада последнего механизма динамической нелинейности измерялась электрическая добротность Q_0 пьезопреобразователей при различных амплитудах V . Исследования показали, что в используемом диапазоне амплитуд V изменений Q_0 в нагруженной на воду пьезокерамике практически не наблюдается (кривые 1 и 2 на рис. 4). Следовательно, амплитудная нелинейность пьезопреобразователей не будет определяться увеличением внутренних диэлектрических потерь. В случае работы пьезопреобразователя в воздушной среде вклад изменений Q_0 может быть значительным (кривые 3 и 4 на рис. 4). Учитывая вышесказанное, амплитудную нелинейность колебаний излучателей УЗ на рис. 3 можно объяснить амплитудно-зависимыми потерями энергии, связанными с колебанием протяженных дефектов типа дислокационных сегментов. Динамические потери при малых деформациях и большом демпфировании дислокаций можно представить в виде [5]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{4B(1-\nu)^2}{G\pi^3b^2} L_0 L_c^4 = f, \quad (1)$$

где Q — механическая добротность, B — коэффициент демпфирования дислокаций, ν — коэффициент Пуассона, G — модуль сдвига, b — вектор Бюргера, L_0 — полная длина подвижной дислокационной линии в единичном кубе, L_c — расстояние между точками закрепления дислокаций.

В поликристаллической керамике большой вклад, по-видимому, вносят дислокации леса вблизи границ зерен. Как следствие, дислокационное поглощение в пьезокерамике на Т-моду колебаний должно быть значительно меньше, чем в монокристаллах. Это и проявлялось при исследовании монокристаллического LiNbO_3 (кривые 7 и 6 на рис. 3).

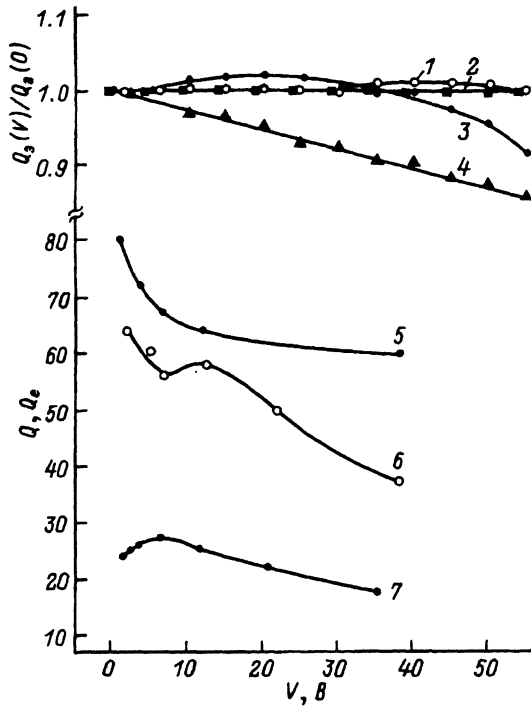


Рис. 4. Зависимость электрической $Q_e(1-4)$ и механической $Q(5), Q_e(6,7)$ добротностей от V для пьезокерамических образцов $PU=8(1-4), P=10(5,6)$ и $P=203(7)$ при нагрузке на воду (1,2,5-7) и в воздушной среде (3,4).

Моды, содержащие радиальную компоненту колебаний, соответствуют меньшим деформациям в перпендикулярном направлении при малых V . Это соответствует амплитудно-независимому дислокационному поглощению и линейному участку амплитудной зависимости на R1-, R2- и ER2-модах (кривые 6, 1 и 5 на рис. 3). Небольшое увеличение (A/V) при малых V , наблюдавшееся на некоторых модах в ряде образцов (например, ER2-мода на рис. 3), можно объяснить диффузией точечных дефектов к колеблющимся дислокациям, что эквивалентно "эффективной очистке" объема пьезоизлучателя. Сложные типы колебаний, например A1-мода, характеризуются большой амплитудной нелинейностью в керамике (кривая 3 на рис. 3). В этом случае вклад в потери энергии может вносить поворот зерен друг относительно друга.

Оценим эффективные характеристики групп дислокаций, дающих вклад в поглощение УЗ в керамике. В амплитудно-зависимой области деформаций ^[5,6]

$$\frac{1}{Q} = \frac{C_1}{\varepsilon_y} \exp\left(-\frac{c_2}{\varepsilon_y}\right), \quad (2)$$

где ε_y — амплитуда деформации, $c_1 = 4\Omega(1-\nu)L_0L_Nc_2/\pi^3L_c$, Ω — ориентационный фактор, L_N — расстояние между точками пересечения дислокаций (сильного закрепления), $c_2 = K\eta b/L_c$, $K = G/4RE$, E — модуль Юнга, R — коэффициент приведения сдвигового напряжения, η — параметр несоответствия Коттрела.

Механическому добротность Q для Т-моды колебаний на резонансной частоте можно определить из амплитуды A по формуле

$$A = \frac{eV 8Q}{2c \pi^2}, \quad (3)$$

где e — пьезомодуль, c — упругая постоянная. Оценки по формуле (3) для амплитуд A в десятки Å (значения A для R2-моды приведены на рис. 3) дали $Q \sim 20$. Добротность рассчитывалась также по ширине пика на частотной зависимости $A(f)$ - Q и по частотной зависимости полной проводимости образца Q_e . Типичные данные приведены на рис. 4.

Анализируя результаты в целом, выберем для расчетов добротность пьезоизлучателя на Т-моды при малых относительных деформациях $\varepsilon_y^I \approx 10^{-6}$ равной $Q^I \approx 60$, она падает при $\varepsilon_y^{II} \approx 10^{-5}$ до $Q^{II} \approx 40$. В амплитудно-независимой области для R-моды $Q \approx 25$. Задавшись указанными значениями оценим L_c и L_0 в пьезокерамике. Из формулы (2) $c_2 = 3 \cdot 10^{-6}$. Учитывая, что $c_2 = K\eta b/L_c = G\eta b/4REL_c$, получим при $G/E \sim 1/3$, $\eta/R \sim 1$, $b \approx 5 \cdot 10^{-10}$ м $L_c \sim 14$ мкм. Выбрав в амплитудно-независимой области (R-мода) $Q = 25$, $G = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м², $b \approx 5 \cdot 10^{-10}$ м, $B \sim 10^{-5}$ Н·с/м², $\nu = 0.3$, $f = 651 \cdot 10^3$ Гц, $L_c \sim 1.4 \cdot 10^{-5}$ м, из формулы (1) получим $L_0 \sim 10^5$ см².

Таким образом, установлено, что 1) не наблюдается увеличения внутренних диэлектрических потерь нагруженных на воду пьезокерамических излучателей ультразвука до деформаций $\sim 10^{-5}$; 2) амплитудная нелинейность Т- и А-мод колебаний дисков из пьезокерамики и Т-моды в случае LiNbO₃ носит практически беспороговый по амплитуде возбуждающего напряжения характер. R-моды характеризуются линейной областью вплоть до деформаций $\sim 4-8 \cdot 10^{-6}$; 3) физическая природа наблюдаемой нелинейности связана с потерями акустической энергии дислокационной природы. Оценены эффективные значения длины дислокационных сегментов $L_c \sim 14$ мкм и плотности дислокаций $L_0 \sim 10^5$ см⁻² для пьезокерамики. Поскольку плотность зернограницных дислокаций $> 10^{10}$ см⁻², то можно заключить, что наблюдаемая амплитудная нелинейность не определяется возможными потерями энергии на отдельных зернограницных дислокациях. Более вероятным является амплитудно-зависимое поглощение ультразвука колеблющимися группами дислокаций, формирующих как единое целое границу зерна. С этим согласуется и измеренная концентрация поглощающих дефектов, равная 10^5 см⁻², что по порядку величины соответствует концентрации межзеренных границ.

Список литературы

- [1] Физическая акустика / Под ред. У. Мэсона. М.: Мир, 1986. Т. 1. Ч. А. 529 с.
- [2] Gallego-Juarez J.A. // J. Phys. E. 1989. Vol. 22. N 10. P. 804-816.
- [3] Островский И.В., Лысенко В.Н. // ФТТ. 1984. Т. 26. Вып. 2. С. 531-532.
- [4] Островский И.В., Коротченко О.А. // УФЖ. 1988. Т. 33. № 3. С. 385-387.
- [5] Никаноров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985. 250 с.
- [6] Судзуки Т., Есианага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. М.: Мир, 1989. 296 с.