

ОБРАТНЫЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ В ПЛАСТИНАХ

П.В.Бурлий, И.Я.Кучеров

Экспериментально возбуждены и исследованы упругие волны с противоположно направленными фазовой и групповой скоростями.

Среди корней дисперсионных уравнений для упругих волн в ограниченных твердых телах имеются такие, что соответствующие им волны характеризуются противоположно направленными фазовой (V_{ϕ}) и групповой (V_{Γ}) скоростями. Это так называемые обратные волны (обычные

волны с совпадающими по направлению V_{Φ} и V_{Γ} в дальнейшем будем называть прямыми). Обратные волны могут существовать, например, в пластинах, при определенных значениях частоты ультразвука и толщины пластины [1, 2]. Экспериментально эти волны не изучены. Настоящая работа посвящена экспериментальному обнаружению и исследованию обратных волн в пьезоэлектрических пластинах.

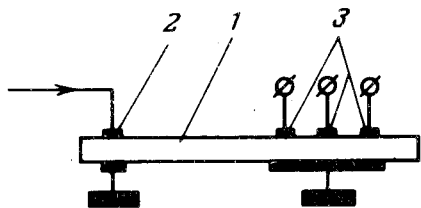


Рис. 1. Схема эксперимента

Анализ дисперсионных уравнений для упругих волн в изотропных пластинах показывает, что обратными могут быть только резонансные моды волн Лэмба, причем при частотах меньших критической ($f_{кр}$), где они описываются в основном комплексными волновыми числами (k). Ветви с вещественными " k " (прямые волны) непрерывно переходят в ветви с комплексными " k " (обратные волны) [3]. При выбранном направлении распространения упругой энергии (групповой скорости) фазовая скорость будет изменять знак при переходе через критическую частоту. В соответствии с этим для экспериментального обнаружения обратных волн исследовались резонансные моды волн Лэмба вблизи критических частот. Исследования были проведены в пластинах LiNbO_3 yz -среза толщиной $h = 195$ мкм и $h = 84$ мкм и поляризованной керамики ЦТС $h = 645$ мкм с осью поляризации перпендикулярной поверхности пластины. Исследовались частотные зависимости возбуждения (амплитуды на выходном преобразователе) упругих волн, фазовой и групповой скоростей и продольной акусто ЭДС в кремнии, расположенном на поверхности пьезоэлектрической пластины (зная знак акусто ЭДС и тип носителей заряда можно однозначно определить направление фазовой скорости [4]). Схема эксперимента показана на рис. 1. Электроды 2 служили для возбуждения упругих волн. Для измерения фазовой скорости служили электроды 3, расстояние между которыми было меньше минимальной длины волны, которая встречалась при измерениях. Фазовая скорость измерялась путем сравнения между собой фазы колебаний напряжения снимаемого с электродов 3. Точность в определении фазовой скорости составляла 1%. Групповая скорость определялась двумя методами: по измерению времени задержки радиоимпульса в пластине (с точностью 15%) и по зависимости фазового сдвига (ϕ) от частоты (f) в пластине длиной l , так как $V_{\Gamma} = d\omega/dk = 2\pi l \frac{df}{d\phi}$.

Точность измерения групповой скорости вторым методом была существенно выше и составляла $1 \pm 2\%$. Для измерения продольной акусто ЭДС на поверхность пластины 1 вместо электродов 3 располагалась пластина $p\text{-Si}$ с удельным сопротивлением ~ 7500 ом·см и толщиной 1,4 мм.

В образцах LiNbO_3 хорошо возбуждалась только первая резонансная (r_1) мода волн Лэмба (в пластинах LiNbO_3 yz -среза волны Лэмба

не распадаются на симметричные и антисимметричные). Потери на двойное преобразование (P) в максимуме возбуждения этой моды составляли $P = 12$ дб. В пластине ЦТС наилучшим образом возбуждалась вторая симметричная (s_2) мода волн Лэмба ($P = 20$ дб) и значительно хуже первая антисимметричная (a_1) мода ($P = 32$ дб). Исследования этих мод показали, что мода a_1 в ЦТС возбуждается только при частотах выше критической и во всей области возбуждения V_{Φ} монотонно возрастает, а V_{Γ} уменьшается при приближении к $f_{кр}$, и по направлению они совпадают между собой. Мода же r_1 в образцах LiNbO_3 , и мода s_2 в ЦТС возбуждались также и при частотах ниже критической (критические частоты определялись по частотам резонанса в пластине). Моды r_1 и s_2 при $f > f_{кр}$ ведут себя подобно моде a_1 , а при $f < f_{кр}$ их свойства существенно отличаются. При переходе через $f_{кр}$ скачком изменяет направление на обратное V_{Φ} и уменьшается при дальнейшем уменьшении f , изменяет знак и акусто ЭДС. При частотах $f < f_{кр}$ знак акусто ЭДС соответствовал направлению V_{Φ} противоположному направлению V_{Γ} . V_{Γ} имеет минимум при $f = f_{кр}$. Описанное иллюстрирует рис. 2, где представлены результаты экспериментальных исследований вблизи $f_{кр}$, частотных зависимостей возбуждения (1), фазовой скорости (2), групповой скорости (3) и акусто ЭДС (4) для мод s_2 и r_1 в пластине ЦТС (а) и LiNbO_3 с $h = 195$ мкм (б). Положение критических частот отмечено штриховыми вертикальными линиями. Видно, что при переходе через критическую частоту фазовая скорость мод s_2 и r_1 меняет знак и, как следствие этого, меняет знак акусто ЭДС.

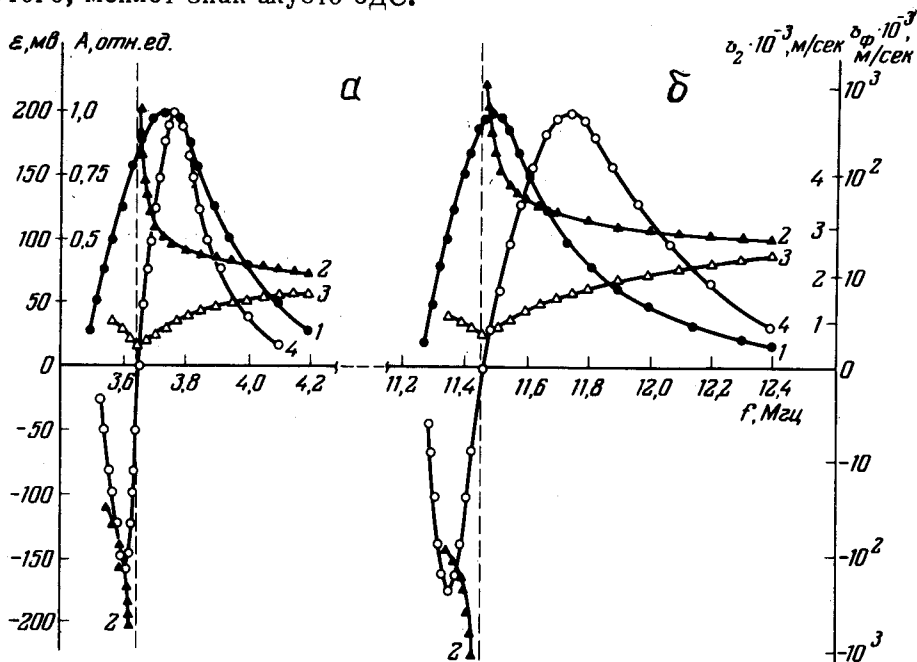


Рис. 2. Частотные зависимости вблизи критических частот амплитуды (A) возбуждаемых упругих волн (кривая 1), фазовой скорости (v_{Φ} , кривая 2), групповой скорости (v_{Γ} , кривая 3) и акусто ЭДС (Z , кривая 4). а — Мода S_2 в пластине ЦТС; б — первая резонансная мода в пластине LiNbO_3 , $h = 195$ мкм. Масштаб по ординате кривой 4, а — на рисунке увеличен в 10 раз.

Таким образом вся совокупность экспериментальных данных свидетельствует о том, что в пластинах могут быть возбуждены упругие волны с противоположно направленными фазовой и групповой скоростями.

Киевский
государственный университет
им. Т.Г.Шевченко

Поступила в редакцию
26 сентября 1977 г.

Литература

- [1] А.И.Викторов. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., изд. Наука, 1966.
 - [2] И.Я.Кучеров, В.М.Перга. УФЖ, 15, 1389, 1970.
 - [3] К.Тамм, О.Вейс. Acustica, 11, 8, 1967.
 - [4] Ю.В.Гуляев, А.Ю.Карабанов, А.М.Кмита, А.В.Медведь, Ш.С.Турсунов. ФТТ, 12, 2595, 1970.
-