

08

Гибридизация акустических волн в пьезоэлектрических пластинах

© И.А. Бородина, Б.Д. Зайцев, И.Е. Кузнецова,
А.А. Теплых, В.В. Шурыгин

Саратовское отделение Института радиотехники и электроники РАН
E-mail: zaitsev@ire.san.ru

Поступило в Редакцию 3 апреля 2003 г.

Исследованы условия существования гибридации акустических волн как нулевого, так и высших порядков, распространяющихся в пьезоэлектрических пластинах. Получены зависимости фазовой скорости исследуемых волн от параметра hf (h — толщина пластины, f — частота волны) для различных кристаллографических ориентаций пластины ниобата калия и ниобата лития при разных значениях проводимости слоя. Зависимости показали, что гибридация возникает, если поверхностная проводимость слоя превышает некоторое критическое значение, величина которого меняется в широких пределах в зависимости от материала пластины и ее ориентации. Обнаружено также, что степень дисперсионного расталкивания связанных мод увеличивается с ростом коэффициента электромеханической связи.

Известно, что в многомодовых волноведущих системах возможны ситуации, когда различные типы волн оказываются взаимно связанными и не могут распространяться независимо друг от друга. Такие связанные волны называются гибридными. Они широко известны в диэлектрических электромагнитных волноводах [1], в магнитных материалах [2] и т.д. В последнее время появились публикации, в которых сообщается о том, что гибридные акустические волны могут распространяться в сильных пьезоэлектрических кристаллах. Было теоретически предсказано существование связанных поверхностных волн Рэлея и Гуляева–Блюстейна, распространяющихся вдоль оси Z полубезграничного кристалла ниобата калия ($Y + 66^\circ$) — среза при металлизации его поверхности [3]. Было также теоретически показано, что для направления распространения $X + 15^\circ$ в пластине ниобата калия Y -среза электрическое закорачивание одной из ее сторон может приводить к появлению слабой связи между антисимметричной волной A_0 и волной с горизонтально-поперечной поляризацией SH_0 [4].

Эти волны образуют гибридную моду вблизи значения параметра $hf \approx 1000$ m/s (h — толщина пластины, f — частота волны). Если же обе поверхности являются электрически открытыми, то гибридизации не возникает.

Однако изучение гибридизации акустических волн в пьезоэлектрических кристаллах к настоящему времени нельзя считать окончательно законченным, и оно нуждается в дальнейшем всестороннем исследовании.

В настоящей работе продолжено теоретическое исследование обнаруженных ранее связанных акустических волн нулевого порядка A_0-SH_0 , распространяющихся вдоль направления $X + 15^\circ$ в ниобате калия Y -среза. Проведен также поиск новых гибридных пар среди акустических мод как нулевого, так и высшего порядков в пластине ниобата лития. Детальный анализ показал существование еще одной гибридной пары, образованной симметричной волной Лэмба первого порядка S_1 и волной с поперечной горизонтальной поляризацией второго порядка SH_2 , распространяющихся в $Y-X$ пластине ниобата лития. Теоретически исследовано влияние тонкого по сравнению с длиной волны проводящего слоя на характеристики вышеуказанных гибридных волн в пьезоэлектрических пластинах ниобата калия и ниобата лития.

С целью поиска новых гибридных пар решалась задача о распространении акустических волн в пьезоэлектрической пластине толщиной h , находящейся в вакууме. Рассматривались две ситуации: 1) обе стороны пластины являются электрически открытыми и 2) одна сторона является электрически закороченной. Использовалось подробно описанное в [5] численное решение уравнения движения, уравнения Лапласа, а также материальных уравнений для пьезоэлектрической среды в совокупности со стандартными граничными условиями. В результате анализа были найдены зависимости фазовой скорости от параметра hf для указанных выше материалов при различных кристаллографических ситуациях. По этим зависимостям определялись области параметров и моды, для которых возможна гибридизация.

Затем исследовалось влияние тонкого проводящего слоя на характеристики найденных гибридных пар. При этом предполагалось, что толщина проводящего слоя мала по сравнению с длиной волны λ , так что влиянием его механической нагрузки на пластину можно пренебречь. Метод решения подобных задач, когда присутствие слоя учитывается лишь в электрических граничных условиях, был подробно описан ранее в [6].

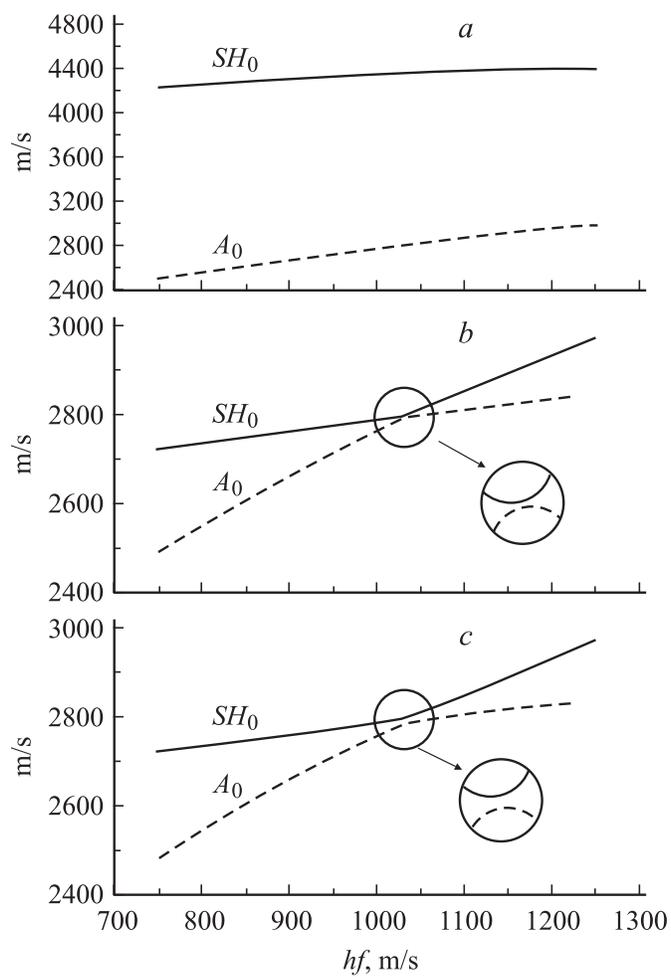


Рис. 1. Зависимости фазовых скоростей A_0 и SH_0 -волн от параметра hf для направления $X + 15^\circ$ в пластине ниобата калия Y -среза для различных значений проводимости тонкого поверхностного слоя: a — $\sigma = 10^{-8}$ S, b — $\sigma = \sigma_{cr} = 4 \cdot 10^{-4}$ S, c — $\sigma = 10^{-2}$ S.

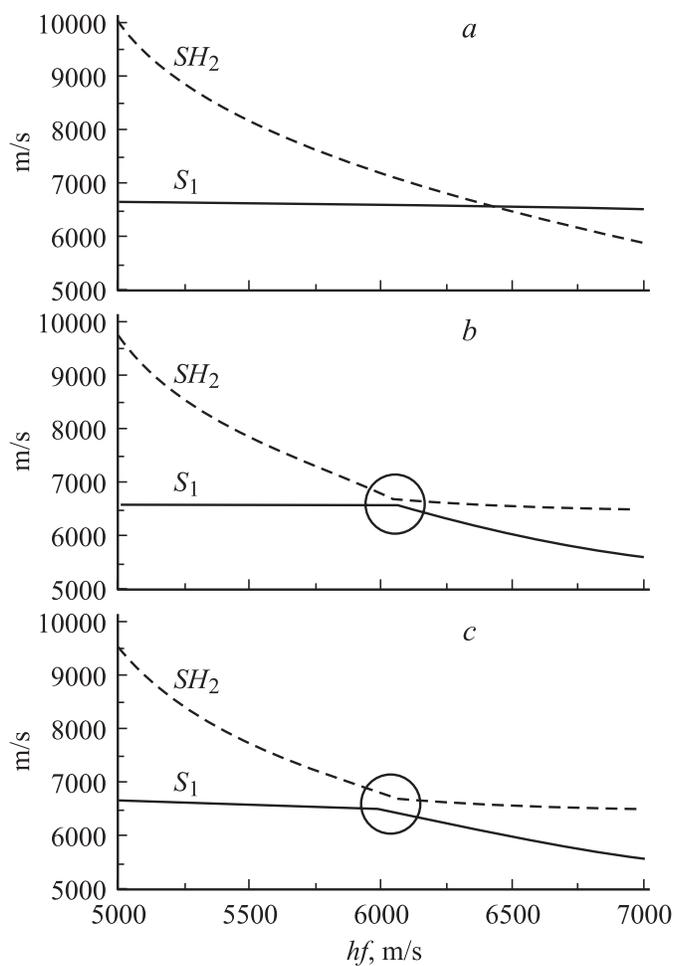


Рис. 2. Зависимости фазовых скоростей S_1 - и SH_2 -волн от параметра hf для направления X в пластине ниобата лития Y -среза для различных значений проводимости тонкого поверхностного слоя: a — $\sigma = 10^{-8} \text{ S}$, b — $\sigma = \sigma_{cr} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ S}$, c — $\sigma = 10^{-2} \text{ S}$.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости фазовых скоростей A_0 и SH_0 волн от параметра hf для направления $X + 15^\circ$ в пластине ниобата калия Y -среза, которые представлены на рис. 1 при различных значениях поверхностной проводимости. На рис. 2 приведены аналогичные характеристики для гибридной пары S_1-SH_2 , распространяющейся вдоль оси X в пластине ниобата лития Y -среза. Эти зависимости позволяют сделать вывод о том, что гибридизация возникает, если поверхностная проводимость слоя (σ) превышает некоторое критическое значение (σ_{cr}), величина которого меняется в широких пределах в зависимости от материала пластины и ее ориентации. Например, для указанной выше гибридной пары нулевого порядка A_0-SH_0 в ниобате калия $\sigma_{cr} = 4 \cdot 10^{-4}$ S при $hf \approx 1040$ м/с (рис. 1, *b*). Для другой гибридной пары S_1-SH_2 в ниобате лития $\sigma_{cr} = 6 \cdot 10^{-6}$ S вблизи значения параметра $hf \approx 6050$ м/с (рис. 2, *b*). Для электрически свободной поверхности и при $\sigma < \sigma_{cr}$ рассматриваемые моды являются несвязанными, т.е. их дисперсионные зависимости не испытывают характерного расщепления (рис. 1, *a* и рис. 2, *a*). При $\sigma = \sigma_{cr}$ возникает расталкивание дисперсионных кривых, степень которого увеличивается с ростом σ и достигает максимума при $\sigma \rightarrow \infty$ (рис. 1, *c*).

Из рис. 1, *c* и 2, *c* видно, что дисперсионные зависимости более пьезоактивной пары волн S_1-SH_2 , распространяющихся в $Y-X$ -ниобате лития, расталкиваются намного сильнее по сравнению с менее пьезоактивной парой A_0-SH_0 в $Y-(X + 15^\circ)$ -ниобате калия. На основании этого факта можно сделать вывод о том, что степень расталкивания дисперсионных кривых связанных мод увеличивается с ростом коэффициента электромеханической связи исследуемых волн.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в пьезоэлектрических пластинах определенной кристаллографической ориентации, содержащих тонкий проводящий слой, могут распространяться гибридные моды нулевого и высших порядков, если проводимость слоя превышает некоторое критическое значение. Полученные результаты представляют интерес не только в фундаментальном плане, но и могут найти широкое практическое применение для разработки и создания различных устройств, таких как амплитудные и фазовые модуляторы, управляемые направленные ответвители. Эти устройства предполагают использование на поверхности пьезопластины тонких слоев, проводимость которых может меняться какими-либо внешними воздействиями: электрическим или магнитным полем, светом и т.д.

Работа поддержана грантом РФФИ № 01-02-16266а и грантом NSF.

Список литературы

- [1] *Тамир Т.* // Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978. С. 97–154.
- [2] *Такер Д., Рэмнтон В.* Гиперзвук в физике твердого тела. М.: Мир, 1975. 453 с.
- [3] *Mozhaev V.G., Weihnacht M.* // Proc. of IEEE Int. Ultras. Symp. 1999. P. 73–76.
- [4] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. N 7. P. 3648–3649.
- [5] *Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova I.E.* // IEEE Trans. on UFFC. 2001. V. 48. N 2. P. 624–626.
- [6] *Гуляев Ю.В., Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д.* и др. // ПЖТФ. 1999. Т. 25. В. 8. С. 21–26.