

08

## Гибридизация обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах

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

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН  
E-mail: borodinaia@yandex.ru

Поступило в Редакцию 10 мая 2007 г.

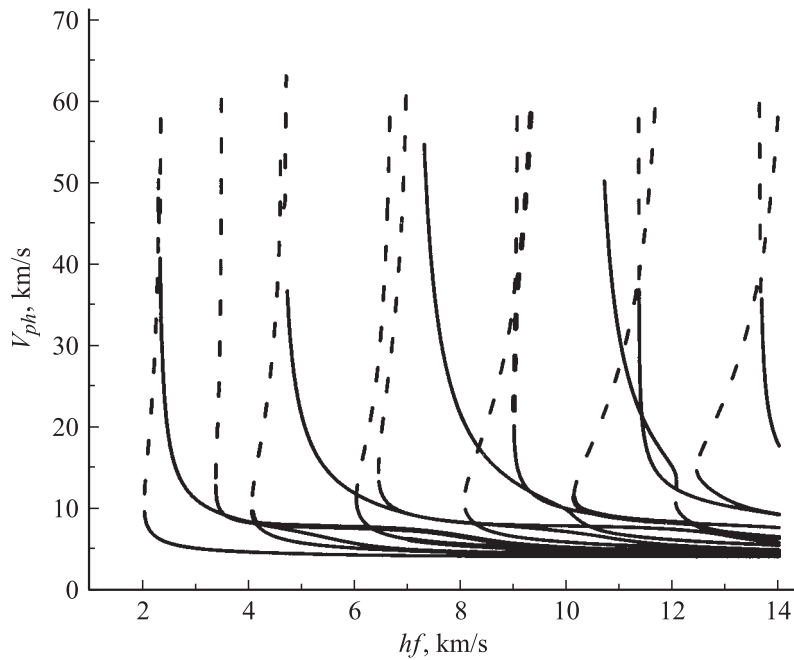
Теоретически исследован эффект гибридизации обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах. На примере ниобата калия показано, что для электрически свободной пластины для кристаллографической ориентации, при которой сагиттальная плоскость является плоскостью симметрии, наблюдаются точки пересечения дисперсионных зависимостей обратных волн и гибридизация отсутствует. Однако при малом изменении направления распространения волны дисперсионные зависимости расталкиваются, и исследуемые волны становятся связанными. Для количественной оценки степени гибридизации использовался коэффициент гибридизации, определяемый как отношение плотности суммарной взаимной энергии к плотности суммарной энергии взаимодействующих волн. Показано также, что зависимость этого коэффициента от произведения толщины пластины и частоты волны определяет степень расталкивания дисперсионных кривых взаимодействующих волн.

PACS: 43.20.+g

Возможность существования гибридных (связанных) волн давно известна для магнитных материалов [1], диэлектрических электромагнитных волноводов и оптических волокон [2]. Недавно было предсказано существование гибридных акустических антисимметричных (A) и симметричных (S) волн Лэмба, а также поперечно-горизонтальных (SH) волн нулевого и высшего порядков в пьезоэлектрических пластинах [3,4]. Эффект гибридизации прямых акустических волн высших порядков был достаточно подробно теоретически исследован на примере пьезоэлектрических пластин ниобата лития [5]. Настоящая статья посвящена теоретическому исследованию эффекта гибридизации обратных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

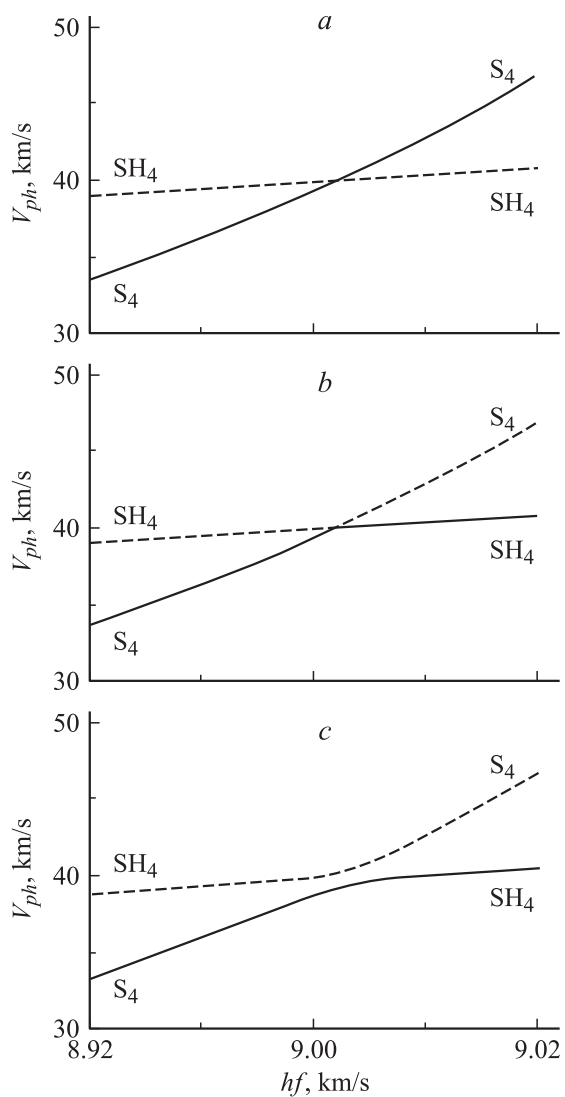
Рассмотрим задачу о распространении акустических волн в пьезоэлектрической пластине. Для ее решения использовались уравнение движения упругой среды, уравнение Лапласа для среды и вакуума, уравнения состояний пьезокристалла и вакуума, а также соответствующие механические и электрические граничные условия [6]. Общее решение записанной системы уравнений искалось в виде суммы плоских неоднородных парциальных волн. Далее, используя метод [7], находились фазовая скорость волны и распределение всех амплитуд механических и электрических переменных по толщине пластины. Рассматривались основные кристаллографические  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  среды и различные направления распространения волн в пластинах из пьезоэлектрических материалов, таких как ниобат лития, танталат лития, лангасит, ланганит и ниобат калия. Материальные постоянные этих кристаллов были взяты из [8–10].

В результате были построены зависимости фазовой скорости акустических волн Лэмба и поперечно-горизонтальных волн высших порядков от параметра  $hf$  ( $h$  — толщина пластины,  $f$  — частота волны) для указанных выше пластин. Анализ полученных зависимостей позволил выбрать частотные диапазоны, в которых могут существовать обратные волны. Специфической особенностью этих волн является увеличение их фазовой скорости с ростом параметра  $hf$ . В результате проведенных исследований было обнаружено, что обратные акустические волны могут существовать во всех вышеперечисленных материалах, однако гибридизация этих волн возможна лишь в ниобате калия. Данный факт может быть связан с очень сильной анизотропией свойств этого материала в отличие от других исследованных кристаллов. Например, компоненты диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{11}$  и  $\epsilon_{22}$  для ниобата калия сильно отличаются друг от друга и равны 37 и 780 соответственно. На рис. 1 представлены зависимости фазовых скоростей исследуемых акустических волн, распространяющихся в направлении  $Y + 30^\circ$  в  $X$ -срезе ниобата калия, от параметра  $hf$ . Видно, что большинство дисперсионных зависимостей состоит из двух ветвей. Сплошные линии соответствуют прямым волнам, а пунктир — обратным. Зависимости показывают, что для обратных ветвей фазовая скорость растет с увеличением параметра  $hf$  и они имеют две частоты отсечки. Кроме того, видно, что для дисперсионных зависимостей обратных волн существуют характерные области пространственно-временного синхронизма, где эти зависимости расталкиваются, а волны становятся связанными.

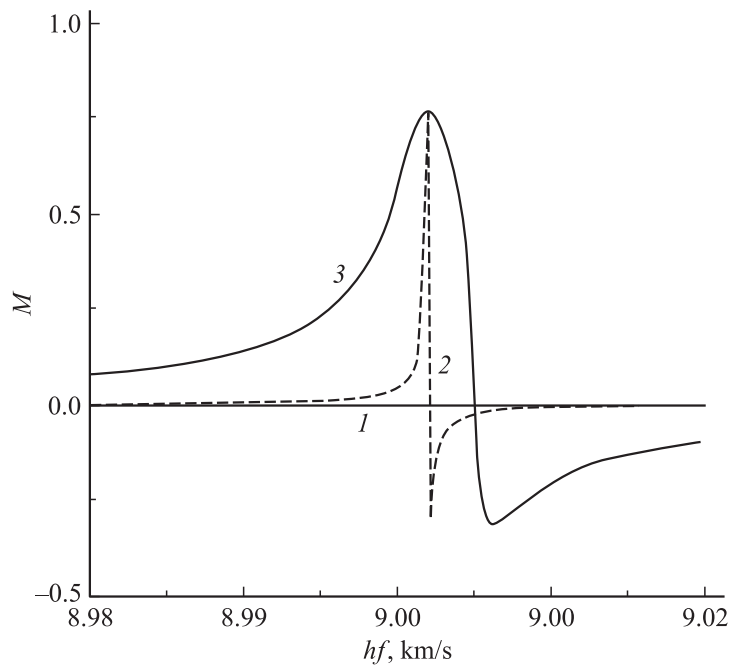


**Рис. 1.** Зависимости фазовых скоростей акустических волн высших порядков от параметра  $hf$  в  $X - Y + 30^\circ$  срезе  $\text{KNbO}_3$ .

Детальный анализ показал, что эффект гибридизации обратных акустических волн практически не отличается по характеру от гибридизации прямых волн [5]. Было обнаружено, что с изменением параметра  $hf$  взаимодействующие волны при прохождении области пространственно-временного синхронизма плавно меняют свою поляризацию и свой тип. Было также установлено, что если сагиттальная плоскость совпадает с плоскостью симметрии кристалла, то существуют точки пересечения дисперсионных зависимостей, но гибридизация в этих точках отсутствует. Это означает, что, несмотря на равенство фазовых скоростей и частот, волны не взаимодействуют и рассматриваемые точки являются лишь точками вырождения. В качестве иллюстрации на рис. 2, *a*, *b*, *c* приведены дисперсионные зависимости  $\text{SH}_4$  и  $\text{S}_4$  обратных волн от па-



**Рис. 2.** Зависимости фазовых скоростей  $S_4$  и  $SH_4$  обратных волн от параметра  $hf$  в  $X - Y + \delta\text{KNbO}_3$ :  $\delta = 0^\circ$  (*a*);  $\delta = 0, 1^\circ$  (*b*);  $\delta = 2^\circ$  (*c*).



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента  $M$   $S_4$  и  $SH_4$  обратных волн от параметра  $hf$   $X-Y + \delta$   $KNbO_3$ :  $\delta = 0^\circ$  (1);  $\delta = 0, 1^\circ$  (2);  $\delta = 2^\circ$  (3).

раметра  $hf$  в  $X-Y$   $KNbO_3$ . Для данной кристаллографической ситуации сагиттальная плоскость является плоскостью симметрии и на рис. 2, *a* дисперсионные зависимости исследуемых волн просто пересекаются. Однако данное вырождение исчезает при незначительном изменении  $\delta$  направления распространения волны. Это видно из рис. 2, *b*, где дисперсионные зависимости рассматриваемой пары волн начинают расталкиваться при  $\delta = 0.1^\circ$ . Дальнейшее увеличение отстройки  $\delta$  в небольших пределах приводит к увеличению степени расталкивания дисперсионных зависимостей и соответствующего значения величины разности между скоростями  $SH_4$  и  $S_4$  (рис. 2, *c*) ( $\delta = 2^\circ$ ).

Для количественной оценки степени гибридизации обратных акустических волн использовался коэффициент гибридизации  $M$ , который

равен отношению плотности суммарной взаимной энергии к плотности суммарной энергии взаимодействующих волн [5]. На рис. 3 представлены зависимости этого коэффициента от параметра  $hf$  при различных значениях отстройки  $\delta$  для  $S_{H_4}$  и  $S_4$  обратных волн, распространяющихся в электрически открытой пластине  $X-Y$   $\text{KNbO}_3$ . Видно, что при  $\delta = 0$  коэффициент гибридизации также равен нулю (кривая 1). Если же  $\delta \neq 0$ , эти зависимости имеют форму резонансной кривой, причем с ростом величины отстройки ширина этой кривой увеличивается (кривые 2, 3). Таким образом, степень связи гибридных волн характеризуется шириной зависимости коэффициента  $M$  от параметра  $hf$  [5].

Было также исследовано влияние электрического закорачивания пластины на гибридизацию обратных акустических волн. Обнаружено, что при закорачивании одной или обеих сторон пьезоэлектрической пластины эффект гибридизации обратных волн сохраняется, однако область пространственно-временного синхронизма этих волн возникает при существенно меньших значениях параметра  $hf$ .

Таким образом, проведенное исследование показало, что хотя обратные ветви акустических волн Лэмба и волн с поперечной горизонтальной поляризацией в пластинах существуют для всех исследованных пьезоэлектрических материалов (ниобат лития, танталат лития, лангасит, ланганит и ниобат калия), их гибридизация возможна только в пластинах ниобата калия. Данный факт может быть объяснен сильной анизотропией электрических свойств ниобата калия в отличие от остальных исследованных материалов. Это позволяет сделать вывод о том, что для гибридизации обратных акустических волн необходима сильная анизотропия материала.

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-02-16947а.

## Список литературы

- [1] *Такер Д., Рэмpton В.* Гиперзвук в физике твердого тела. М.: Мир, 1975. 453 с.
- [2] *Тамир Т.* Интегральнооптические элементы связи. Интегральная оптика / Под ред. Т. Тамира. М.: 1978. С. 97.
- [3] *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. N 7. P. 3648.

- [4] *Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Теплых А.А., Шурыгин В.В.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, В. 18. С. 75.
- [5] *Кузнецова И.Е., Зайцев Б.Д., Теплых А.А., Бородина И.А.* // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 1. С. 73.
- [6] *Farnell G.* // *Physical Acoustics*. 1970. V. 50. (New York. Academic Press). P. 139.
- [7] *Joshi S.G., Jin Y.* // *J. of Appl. Phys.* 1991. V. 70. N 8. P. 4113.
- [8] *Kovacs G., Anhorn M., Engan H., Visinitti G., Ruppel C.* // *Proc. IEEE Int. Ultras. Symp.* 1990. V. 1. P. 435.
- [9] *Zgonik M., Schlessler R., Biaggio I., Tscherry J., Cunter P., Voit E.* // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. N 2. P. 1287.
- [10] *Malocha D.E., Cunha P., Adler E., Smythe R., Frederick S., Chou M., Helmbold R., Zhou Y.* // *Proc. IEEE/EIA Int. Frequency Control Symp.* 2001. V. 1. P. 200.