

УДК 548:53+534.22

ОСОБЕННОСТИ “ГИБРИДИЗАЦИИ” АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ

© 2007 г. И. Е. Кузнецова, Б. Д. Зайцев, А. А. Теплых, И. А. Бородина

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН

410019 Саратов, ул. Зеленая 38

E-mail: zaitsev@ire.san.ru

Поступила в редакцию 08.08.05 г.

Теоретически исследован эффект взаимодействия (или “гибридизации”) различных типов акустических волн нулевого и высших порядков в пьезоэлектрических пластинах ниобата лития. При этом рассматривались различные кристаллографические ориентации пластины и направления распространения волн. Было показано, что для электрически свободной пластины для направления распространения вдоль любой кристаллографической оси наблюдаются точки пересечения дисперсионных зависимостей, и гибридизация отсутствует. Однако при малом изменении направления распространения волны или при электрическом закорачивании одной поверхности дисперсионные зависимости расталкиваются и волны становятся связанными. Введен количественный коэффициент степени гибридизации волн, включающий как механическую, так и электрическую связь. Показано, что зависимость этого коэффициента от произведения толщины пластины и частоты волн определяет степень расталкивания дисперсионных кривых взаимодействующих волн. Рассмотренный эффект представляет интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и для различных практических приложений, например, для эффективного возбуждения непьезоактивных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

PACS: 43.20.+g

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что различные типы волн (нормальные моды) распространяются в линейной волноведущей среде независимо друг от друга, т.е. без взаимодействия и без обмена энергией [1–3]. Кроме того, для большинства волноводов нормальные моды взаимно ортогональны, т.е. интеграл по поперечному сечению от взаимной энергии любой пары волн всегда равен нулю [3, 4]. Однако в условиях пространственно-временного синхронизма нормальные моды могут стать связанными (гибридными), и могут обмениваться энергией. Возможность существования связанных волн давно известна для магнитных материалов [5], диэлектрических электромагнитных волноводов и оптических волокон [3]. Совсем недавно было предсказано существование гибридных волн Лэмба и поперечно-горизонтальных (SH) волн нулевого и высшего порядков в пьезоэлектрических пластинах [6–8]. Настоящая статья посвящена дальнейшему изучению эффекта гибридизации акустических волн, распространяющихся в пьезоэлектрических пластинах. Как известно, дисперсионные зависимости связанных волн имеют характерную особенность, а именно, они расщепляются (расталкиваются) в области пространственно-временного синхронизма [4, 9]. Поэтому исследование связанных волн можно

свести к анализу соответствующих дисперсионных зависимостей в области их расщепления. Подобное исследование представляет интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и для различных практических приложений. Это связано, например, с возможностью эффективного возбуждения непьезоактивных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

Мы изучали эффект гибридизации акустических волн нулевого и высших порядков в пластинах ниобата лития с различной кристаллографической ориентацией и с различными электрическими граничными условиями. Исследование проводилось в несколько этапов.

Вначале рассчитывались зависимости фазовой скорости акустических волн различных типов от параметра hf , где h – толщина пластины, а f – частота волны. Рассматривались основные кристаллографические X , Y , Z срезы и различные направления распространения волн для трех случаев: (1) обе стороны пластины электрически свободны, (2) одна сторона электрически свободна, вторая – электрически закорочена и (3) обе стороны пластины электрически закорочены.

Затем по найденным дисперсионным зависимостям находились и детально анализировались области их расщепления или пересечения. По анализу пьезоактивных и непьезоактивных свя-

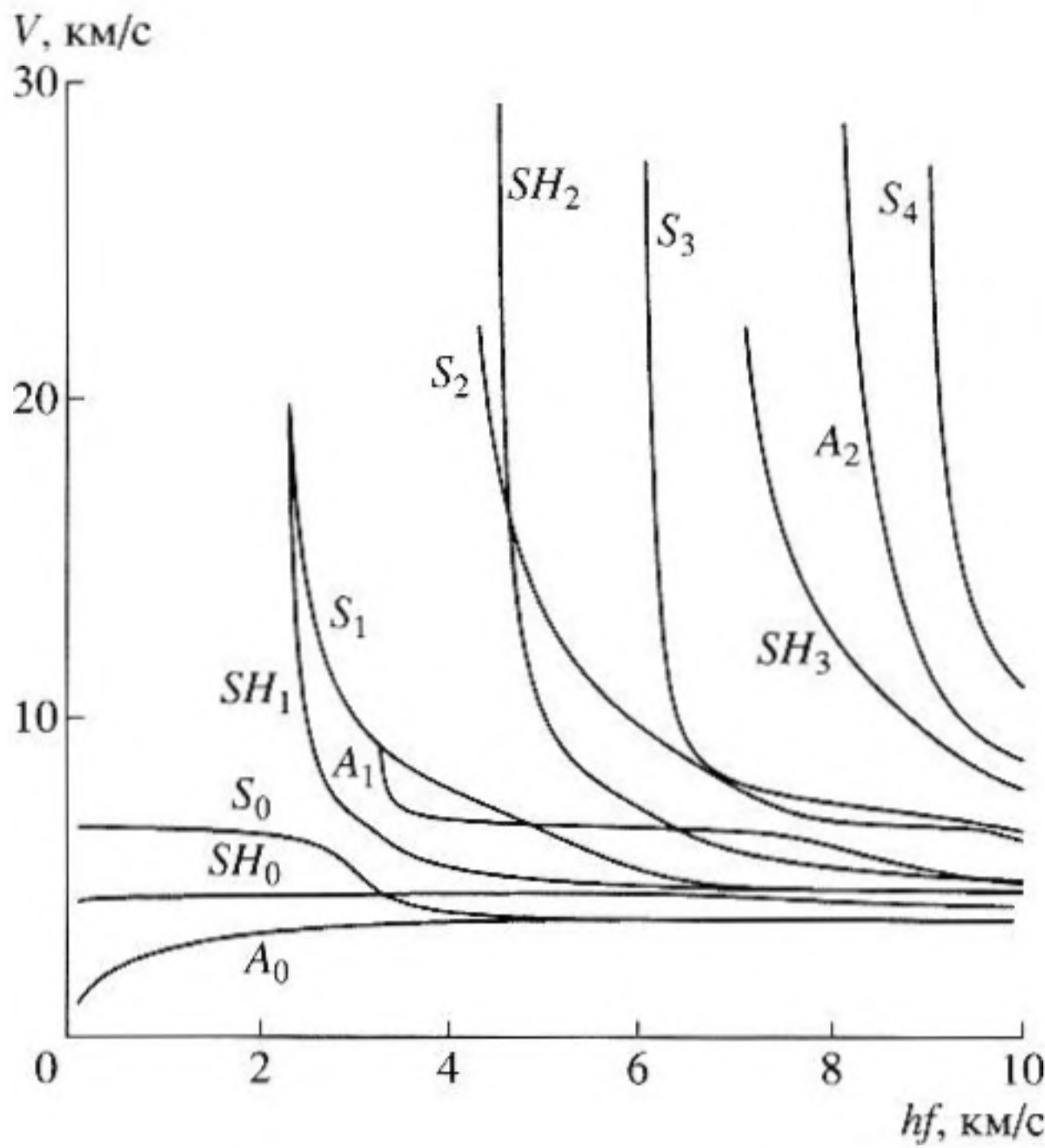


Рис. 1. Зависимости фазовой скорости V акустических волн в электрически открытой с обеих сторон пластине $Y-X$ ниобата лития от параметра hf .

занных волн в пластинах ниобата лития были выявлены два механизма возникновения гибридизации и введен количественный критерий степени связи волн. Было также проанализировано влияние электрических граничных условий на эффект гибридизации.

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФАЗОВЫХ СКОРОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Анализировалось распространение акустической волны вдоль оси x_1 в пьезоэлектрической пластине, ограниченной двумя плоскостями. Счи-

Точки пересечения дисперсионных кривых для электрически открытой пластины $Y-X$ ниобата лития. Диапазон изменения $hf = 3000-13000$ м/с

Типы волн	hf , м/с	Волна 1, скорость, м/с	Волна 2, скорость, м/с
S_0, A_0	6296.9863	3717.64	3717.64
S_0, SH_0	3316.8385	4503.41	4503.41
A_1, SH_2	9559.5227	5026.25	5026.25
S_1, A_1	6399.5496	6571.07	6571.07
S_2, S_3	9744.1513	6658.19	6658.19
S_2, S_3	9493.1821	6788.80	6788.80
S_1, A_1	4836.4452	6696.63	6696.63
S_1, SH_1	3269.8819	9143.52	9143.52

талось, что пластина с двух сторон граничит с вакуумом. Для расчета использовались стандартные уравнение движения упругой среды, уравнение Лапласа и уравнения состояния для упругой пьезоэлектрической среды и вакуума [10]. Эти уравнения совместно с обычными электрическими и механическими граничными условиями были решены стандартным численным методом [11]. В результате решения этой задачи были найдены зависимости фазовых скоростей V волн Лэмба и поперечно-горизонтальных (SH) волн от параметра hf , а также распределение амплитуд всех механических и электрических переменных в поперечном сечении пластины. В качестве исследуемого материала использовался ниобат лития, материальные константы для которого были взяты из [12]. Анализировались все направления распространения для основных кристаллографических срезов X, Y и Z , а номера мод менялись от 0 до 7. На рис. 1 представлены типичные зависимости фазовой скорости от параметра hf , рассчитанные для $Y-X$ ниобата лития, когда обе стороны пластины электрически свободны.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ГИБРИДИЗАЦИИ

На этом этапе детально анализировались дисперсионные зависимости волн в областях их пространственно-временного синхронизма. Было установлено, что для волн, распространяющихся вдоль кристаллографических осей кристалла, существуют, как правило, точки пересечения дисперсионных зависимостей, и 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. Рис. 1 показывает, что для электрически свободной пластины $Y-X$ ниобата лития существует целый ряд точек пересечения дисперсионных зависимостей, относящихся к различным типам волн. Подобные дисперсионные зависимости позволили для выбранных кристаллографических ориентаций пластины найти значения параметра hf , при которых две различные волны 1 и 2 имеют одинаковые фазовые скорости $V_1 = V_2$. В таблице для примера представлена краткая информация о волнах, соответствующих всем точкам вырождения в диапазоне $hf = 3000-13000$ м/с для электрически свободной пластины $Y-X$ ниобата лития. Указанное вырождение исчезало при незначительном изменении направления распространения волны. Для этого при расчете к текущему углу Эйлера, определяющему направление распространения волны, добавлялась отстройка δ . В результате дисперсионные зависимости рассматриваемой пары волн расталкивались, т.е. их скорости начинали различаться на некоторую величину ΔV . С ростом

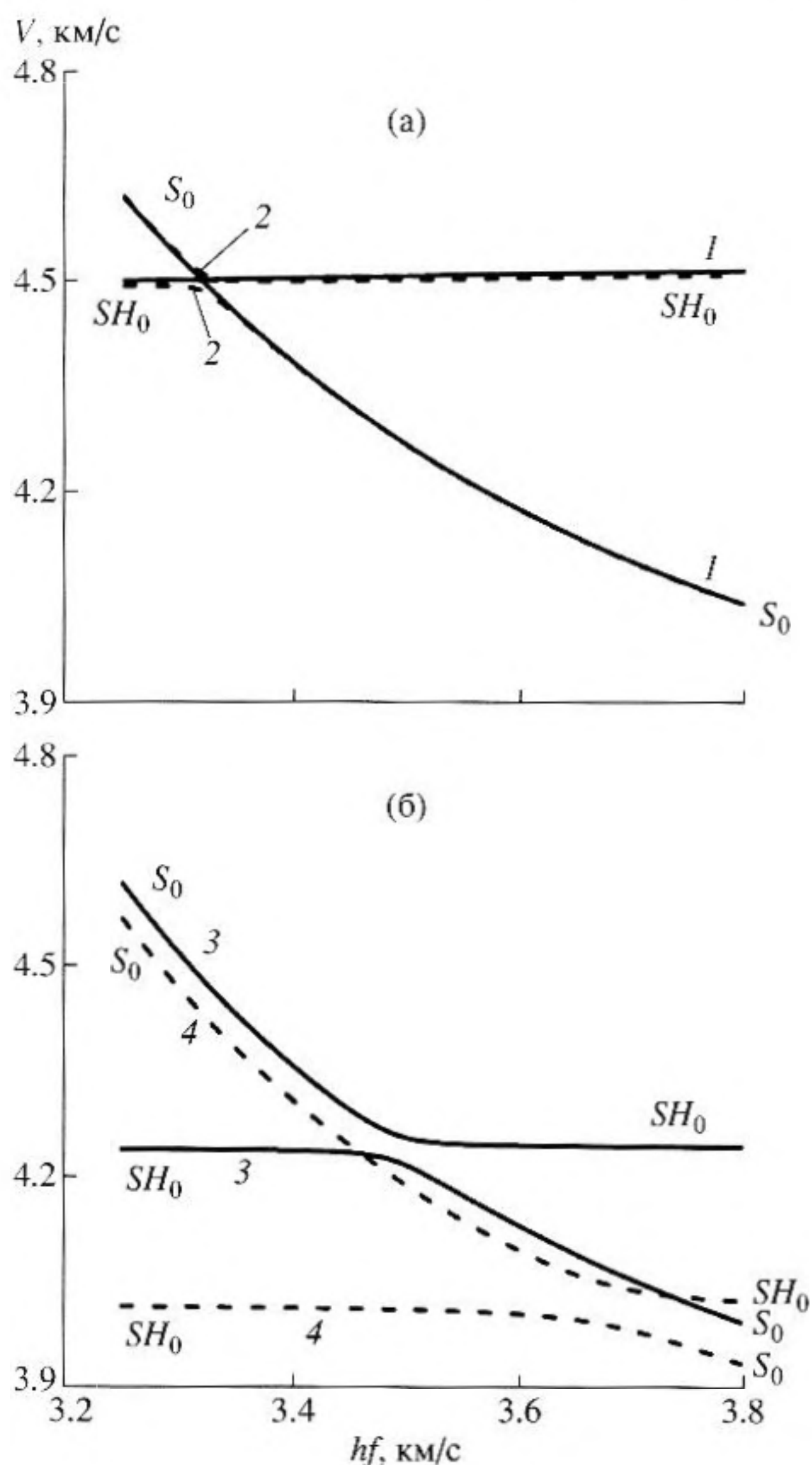


Рис. 2. Зависимости фазовых скоростей V S_0 и SH_0 акустических волн в электрически открытой с обеих сторон пластине $Y-X+\delta$ ниобата лития от параметра hf при различных значениях угла отстройки δ от кристаллографической оси X . а - $\delta = 0^\circ$ (1), 3° (2); б - $\delta = 24^\circ$ (3) и 48° (4).

отстройки δ в небольших пределах наблюдалось увеличение степени расталкивания дисперсионных зависимостей и соответствующего значения величины ΔV . Кроме того, было обнаружено, что с изменением параметра hf взаимодействующие волны при прохождении области пространственно-временного синхронизма плавно меняли свою поляризацию и свой тип. При дальнейшем увеличении отстройки дисперсионные кривые продолжали отдаляться друг от друга, и волны постепенно становились независимыми. На рис. 2 и 3 представлены соответственно зависимости фазовой скорости от параметра hf для пар волн $S_0 - SH_0$ и $A_1 - S_1$ при различных значениях угла отстройки δ .

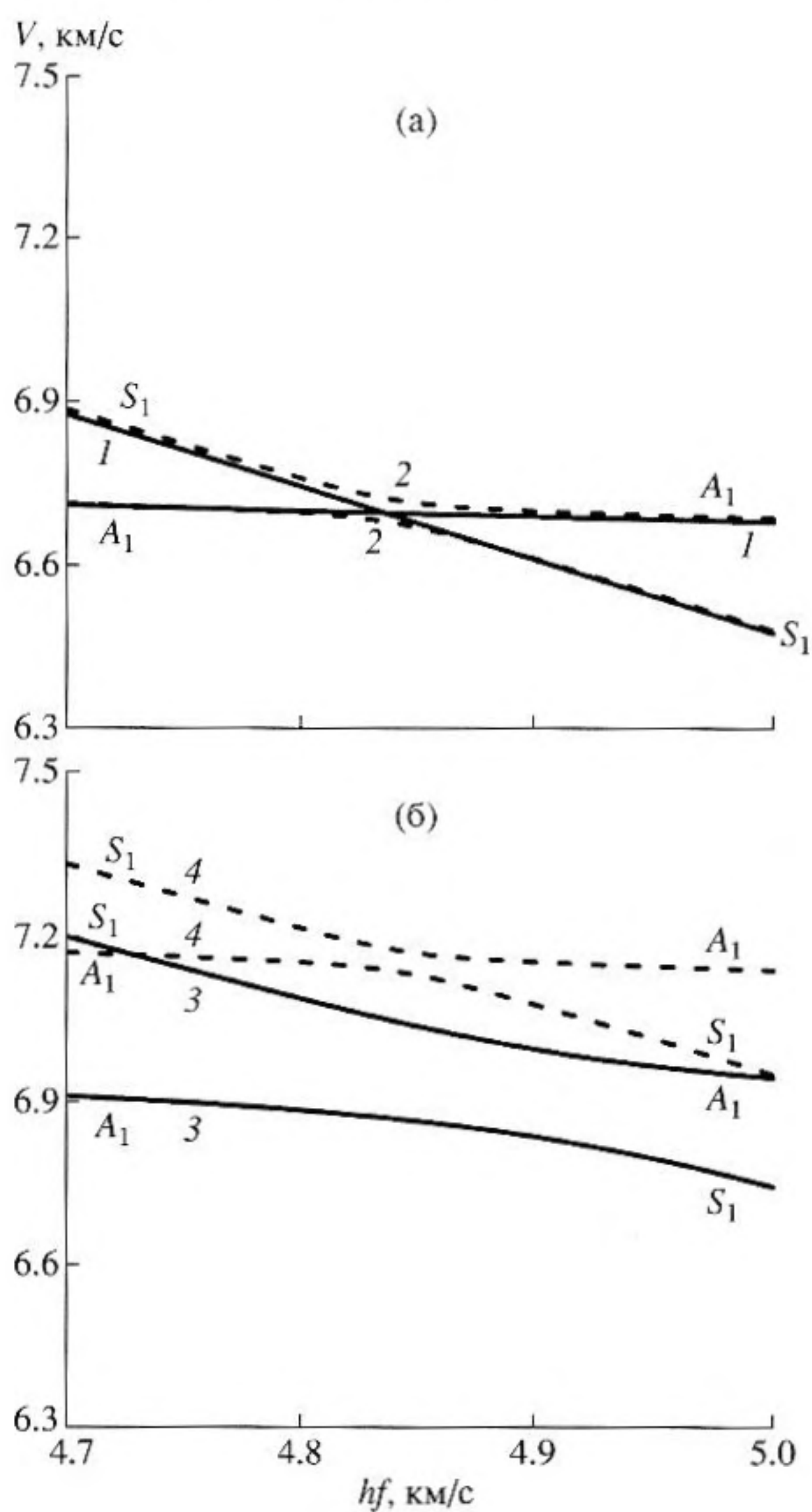


Рис. 3. Зависимости фазовых скоростей V S_1 и A_1 акустических волн в электрически открытой с обеих сторон пластине $Y-X+\delta$ ниобата лития от параметра hf при различных значениях угла отстройки δ от кристаллографической оси X . а - $\delta = 0^\circ$ (1), 3° (2); б - $\delta = 24^\circ$ (3) и 45° (4).

Эти рисунки подтверждают, что с ростом отстройки δ величина расталкивания ΔV увеличивается. Такое поведение дисперсионных зависимостей служит качественным критерием гибридизации рассматриваемых волн.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ГИБРИДИЗАЦИИ

Исходя из физических соображений можно сделать вывод о том, что в общем случае гибридизация пьезоактивных волн возникает благодаря совокупности электрической и механической связей. Это означает, что в определенной области параметра hf при наличии одной волны возможно

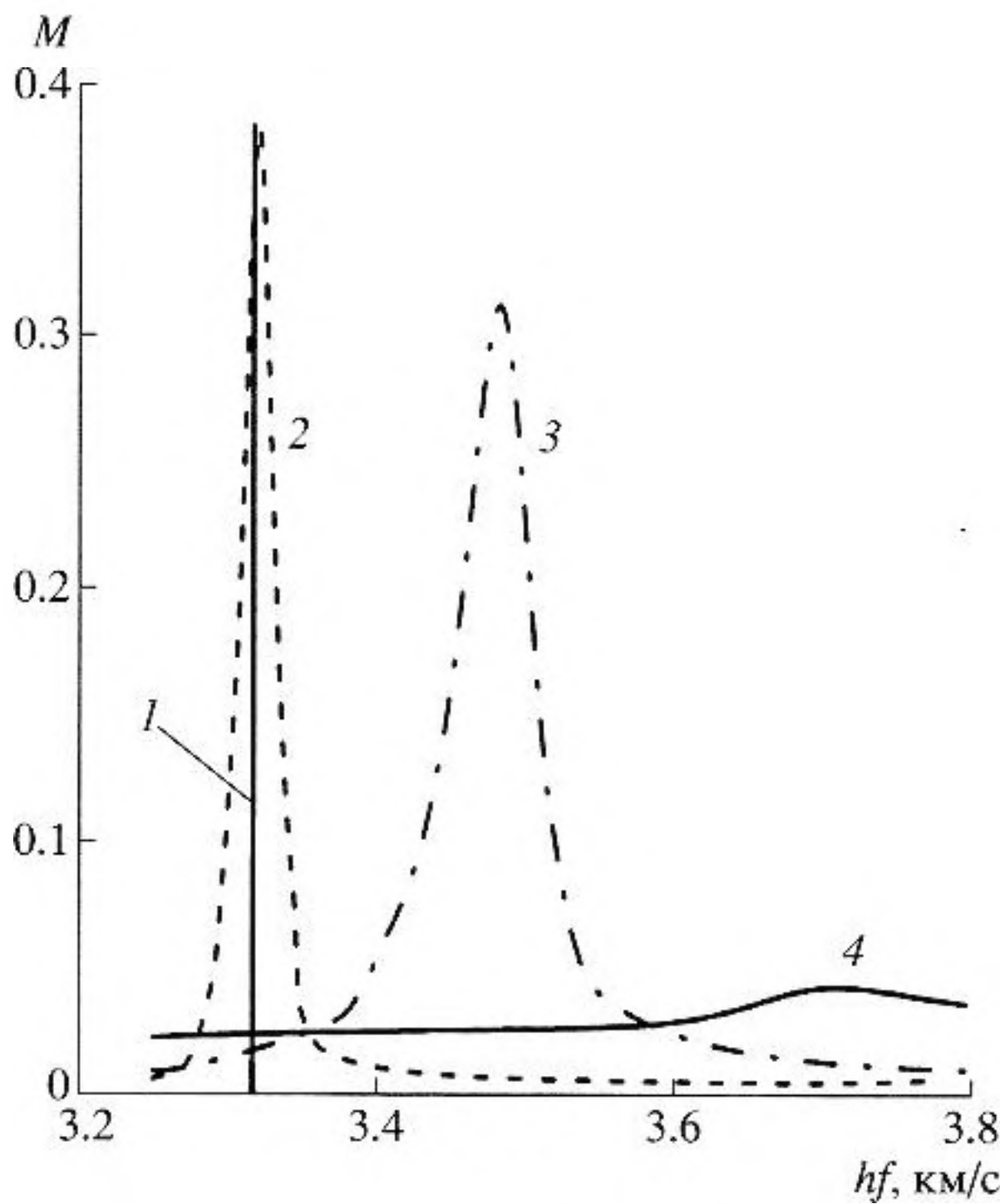


Рис. 4. Зависимость коэффициента M для S_0 и SH_0 акустических волн в электрически открытой с обеих сторон пластине $Y-X+\delta$ ниобата лития от параметра hf при различных значениях угла отстройки δ от кристаллографической оси X . $\delta = 0^\circ$ (1), 3° (2), 24° (3) и 48° (4).

возникновение другой волны с близким значением фазовой скорости за счет механических и/или электрических колебаний, возбуждаемых исходной волной. При этом происходит постоянный обмен энергией между этими взаимодействующими волнами, и они уже не могут существовать друг без друга. Очевидно, что в этом случае связанные волны должны иметь общие компоненты механического смещения и/или напряженности электрического поля. Анализ показал, что количественной мерой степени гибридизации (по аналогии с магнитоупругими волнами [13]) может служить безразмерный коэффициент M , определенный как

$$M = \frac{W^{12} + W^{21}}{W^1 + W^2}. \quad (1)$$

Здесь $W^{12} = W_M^{12} + W_E^{12}$ это полная взаимная энергия двух связанных волн 1 и 2, усредненная по времени. В свою очередь,

$$W_M^{12} = \frac{1}{2T} \int_{-h}^0 \int_0^T T_{ij}^1 S_{ij}^2 dt dx_3 \quad \text{и} \quad (2)$$

$$W_E^{12} = \frac{1}{2T} \int_{-h}^0 \int_0^T D_j^1 E_j^2 dt dx_3$$

– соответственно механическая и электрическая взаимные энергии на единичную апертуру волн. Что касается полной энергии волны 1 на единичную апертуру $W = W_s + W_v$, то она состоит из механического и электрического вкладов в пьезоэлектрической пластине

$$W_s^1 = \frac{1}{2T} \int_{-h}^0 \int_0^T (T_{ij}^1 S_{ij}^1 + D_j^1 E_j^1) dt dx_3 \quad (3)$$

и электрического вклада в вакууме

$$W_v^1 = \frac{1}{2T} \left(\int_0^T \int_0^T D_j^1 E_j^1 dt dx_3 + \int_{-\infty}^{-h} \int_0^T D_j^1 E_j^1 dt dx_3 \right). \quad (4)$$

Аналогично определяется полная энергия волны 2. Здесь T – период волны, T_{ij} – тензор механического напряжения, S_{ij} – механическая деформация, D_j – электрическая индукция, E_j – напряженность электрического поля. Величины, относящиеся к волнам 1 и 2, обозначены соответствующими индексами. Легко можно показать, что в общем случае всегда выполняется равенство $W^{12} = W^{21}$. Нетрудно также убедиться в том, что коэффициент M максимален при равных значениях энергии взаимодействующих волн, но не превышает по абсолютной величине 1 ($|M| \leq 1$). При этом для двух любых волн значение M всюду равно нулю кроме областей их гибридизации (условие ортогональности мод). На рис. 4 и 5 представлены зависимости коэффициента M от параметра hf для пар волн $S_0 - SH_0$ и $A_1 - S_1$, соответственно, при различных значениях угла отстройки δ для электрически открытой пластины. Эти зависимости имеют форму резонансной кривой, причем с ростом величины отстройки экстремальное значение коэффициента M плавно уменьшается, но зато увеличивается ширина кривой. Эти закономерности позволяют сделать следующий вывод. Существует четкая корреляция между величиной расталкивания ΔV дисперсионных зависимостей и шириной $\Delta(hf)$ зависимости $M(hf)$, а именно, с ростом величины ΔV ширина кривой $\Delta(hf)$ увеличивается. Но при этом степень связи гибридных волн характеризуется экстремальным значением величины коэффициента M .

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТ ГИБРИДИЗАЦИИ

Мы проанализировали большое число гибридных пар в пластинах из ниобата лития с различной кристаллографической ориентацией. Оказалось, что во всех рассмотренных случаях в гибридную пару входят либо одна, либо две слабопьезоактивные волны. Для $Y-X$ ниобата лития это подтверждается в таблице. Таким образом, мы не обнаружи-

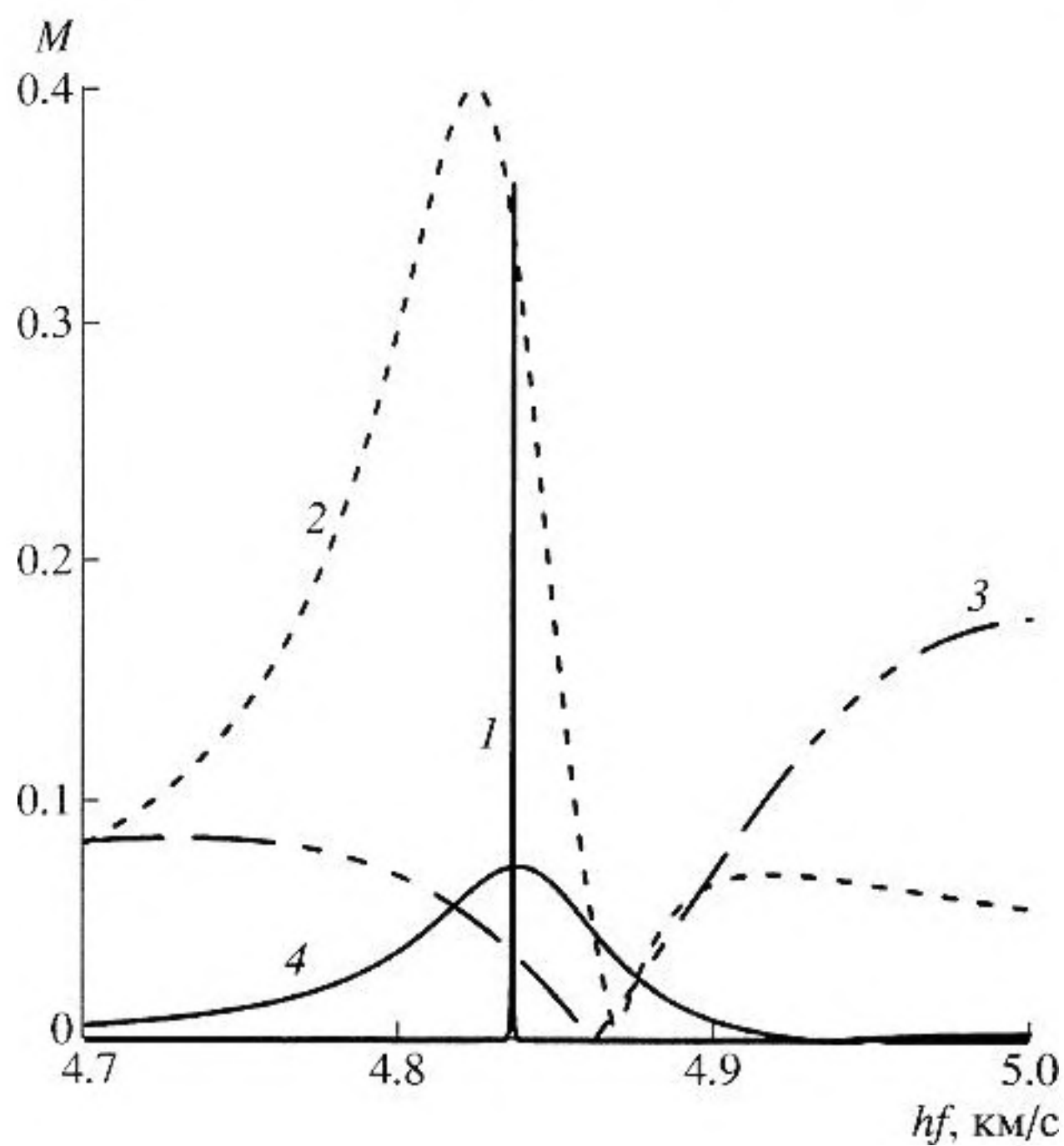


Рис. 5. Зависимость коэффициента M для S_1 и A_1 акустических волн в электрически открытой с обеих сторон пластине $Y-X + \delta$ ниобата лития от параметра hf при различных значениях угла отстройки δ от кристаллографической оси X . $\delta = 0^\circ$ (1), 3° (2), 24° (3) и 45° (4).

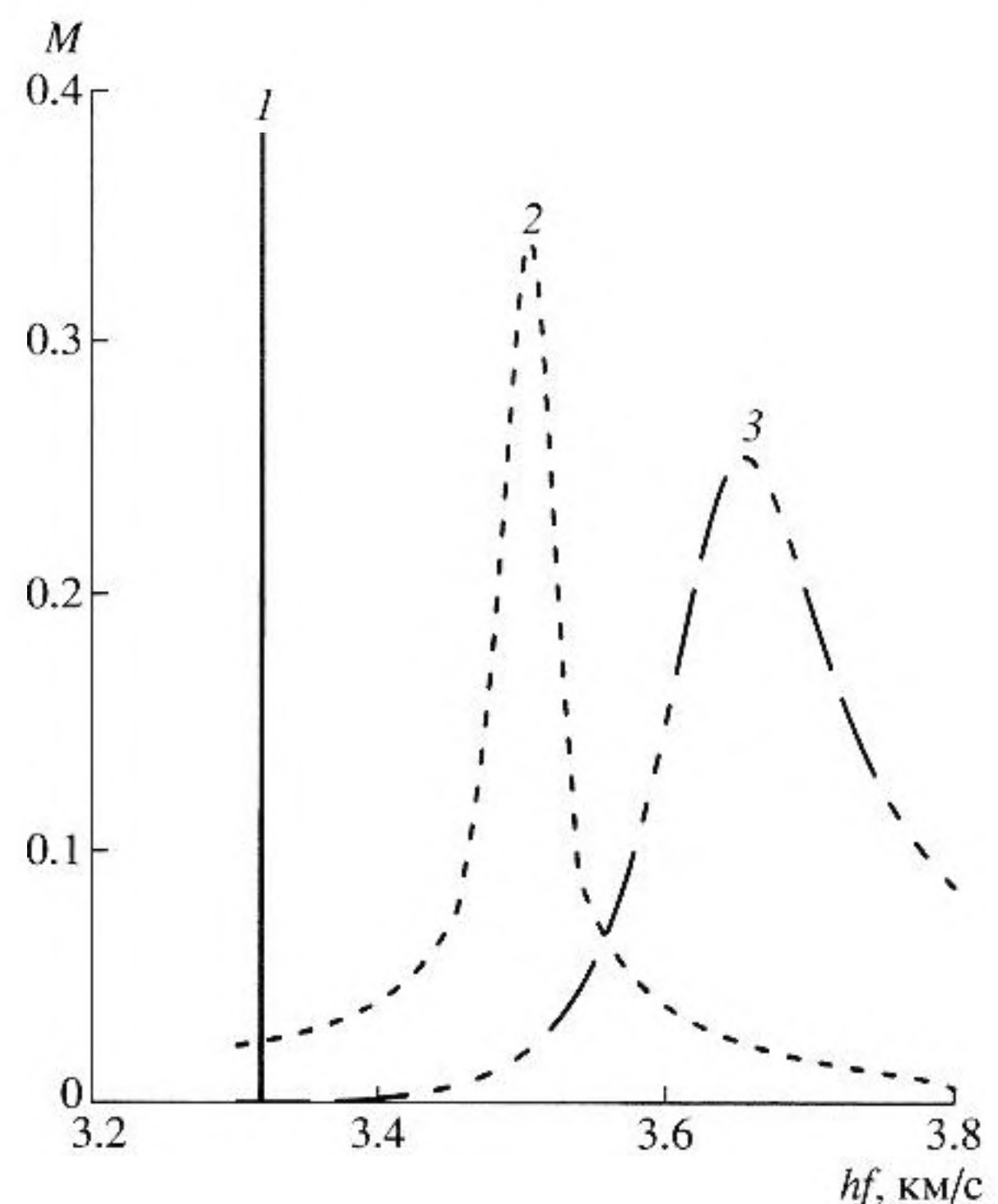


Рис. 6. Зависимость коэффициента M от параметра hf для гибридной пары $S_0 - SH_0$ при различных значениях расстояния d_1 между $Y-X$ пластиной ниобата лития ($d_2 = \infty$) и проводящей плоскостью: $d_1 = 5h$ (1), $d_1 = 0.001h$ (2) и $d_1 = 0$ (3).

ли ситуаций, для которых обе связанные волны являются достаточно сильно пьезоактивными. Это означает, что преобладающей связью во всех исследованных парах является механическая связь. Тем не менее, известно [7], что электрические граничные условия оказывают существенное влияние на рассматриваемый эффект. Показано, в частности, что для акустических волн, распространяющихся вдоль основных кристаллографических осей, гибридизация возникает только в том случае, когда проводимость тонкого проводящего слоя на поверхности пластины превышает некоторое критическое значение.

В данной работе мы рассматривали ситуацию, когда к поверхности электрически свободной пластины сверху и снизу плавно приближались идеально проводящие плоскости. На рис. 6 представлены зависимости коэффициента M от параметра hf для гибридной пары $S_0 - SH_0$ при различных значениях расстояния d_1 между проводящей плоскостью и верхней границей пластины: $d_1 = 5h$ (1), $d_1 = 0.001h$ (2) и $d_1 = 0$ (3). Видно, что с уменьшением d_1 коэффициент M незначительно уменьшается, а ширина кривой $M(hf)$ плавно увеличивается. Далее мы приближали снизу проводящую плоскость к пластине, верхняя сторона которой электрически закорочена ($d_1 = 0$). На рис. 7 представлены

зависимости коэффициента M от параметра hf при различных значениях расстояния d_2 между проводящей плоскостью и нижней границей пластины: $d_2 = 5h$ (1), $d_2 = 0.001h$ (2) и $d_2 = 0$ (3). Видно, что с уменьшением этого расстояния коэффициент M продолжал уменьшаться, а ширина кривой $M(hf)$ упала до нуля. Влияние электрических граничных условий на характеристики гибридных пар может быть объяснено изменением распределения амплитуд всех механических переменных пьезоактивной волны при электрическом закорачивании одной или двух поверхностей.

В целом, проведенный анализ позволил сделать следующий вывод. Если дисперсионные зависимости для электрически свободной пластины имеют точку пересечения, то электрическое закорачивание одной поверхности всегда приводит к снятию вырождения и образованию связанных волн. При этом дисперсионные зависимости расталкиваются. Если же гибридизация существует для электрически свободной пластины, то закорачивание одной поверхности увеличивает степень расталкивания дисперсионных зависимостей. Закорачивание обеих сторон пластины приводит, как правило, к ситуации, характерной для электрически свободной пластины, т.е. двойное закорачивание вызывает либо исчезновение ги-

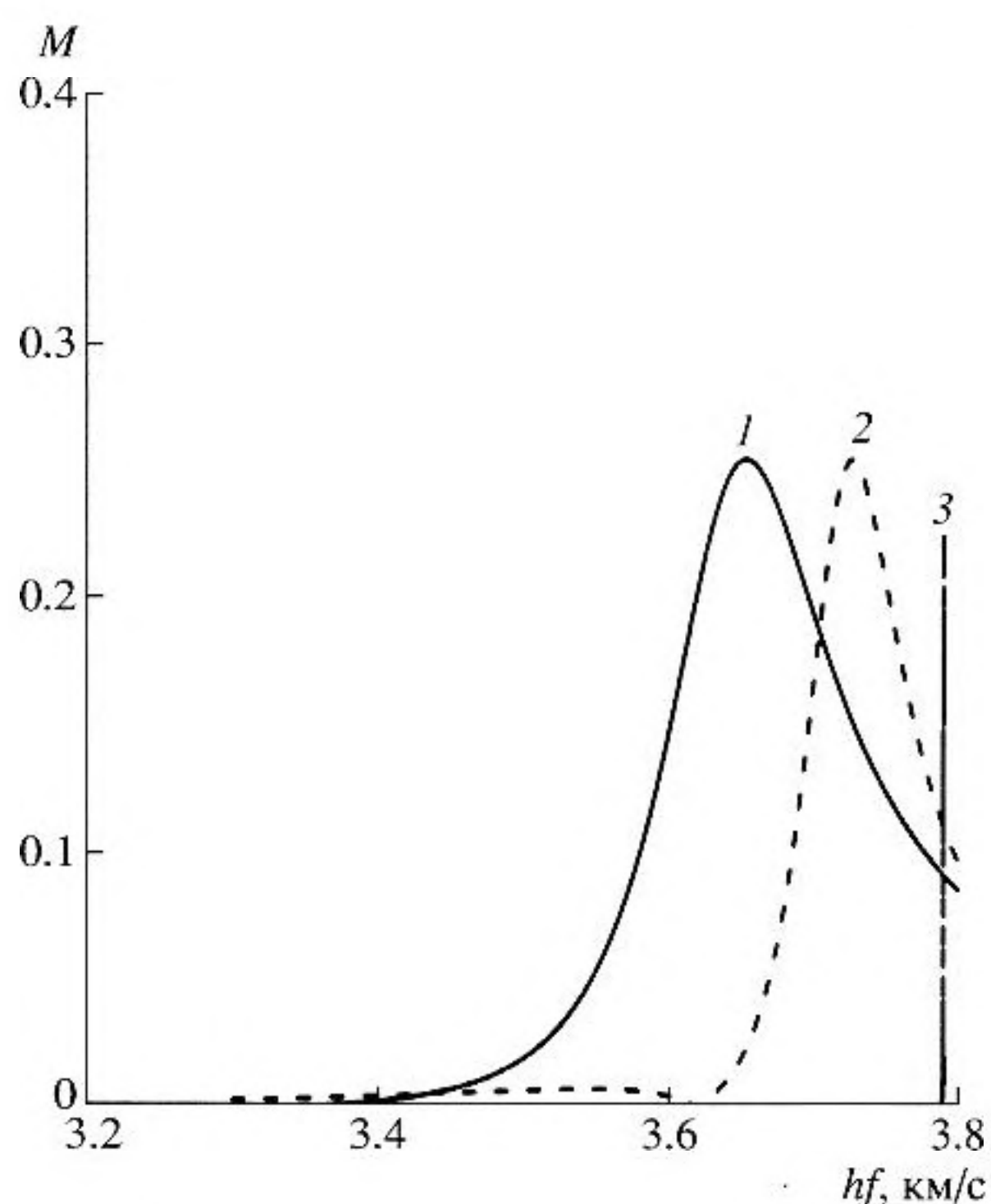


Рис. 7. Зависимость коэффициента M от параметра hf для гибридной пары $S_0 - SH_0$ при различных значениях расстояния d_2 между $Y-X$ пластиной ниобата лития ($d_1 = 0$) и проводящей плоскостью: $d_2 = 5h$ (1), $d_2 = 0.001h$ (2) и $d_2 = 0$ (3).

бридизации, либо уменьшение степени расталкивания дисперсионных зависимостей.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что в пьезоэлектрических пластинах определенной толщины и определенной кристаллографической ориентации возможна гибридизация акустических волн нулевого и высших порядков. При этом для электрически свободной пластины для направления распространения вдоль любой кристаллографической оси наблюдаются точки пересечения дисперсионных зависимостей и отсутствие гибридизации. Однако при малом изменении направления распространения волны или при электрическом закорачивании одной поверхности пластины дисперсионные зависимости расталкиваются и волны становятся связанными. Введен количественный коэффициент степени гибридизации волн, включающий как механическую, так и электрическую связь. Зависимость этого коэффициента от произведения толщины пластины и частоты волны определяет степень расталкивания дисперсионных кривых взаимодействующих волн. Рассмотренный эффект представляет интерес не только с фундаментальной точки зрения,

но и для различных практических приложений, например, для эффективного возбуждения непьезоактивных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-02-16947а, Фонда содействия отечественной науке, гранта программы "Поддержка развития Высшей школы 2006–2008 гг." и ФЦНТП "Поддержка исследований молодых докторов наук" 2006-РИ-19.0/001/815.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
2. Никольский В.В. Электродинамика и распространение волн. М.: Наука, 1973.
3. Тамир Т. Интегральнооптические элементы связи // Интегральная оптика / Под. ред. Т. Тамира. М.: Мир, 1978. С. 97–154.
4. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 325 с.
5. Такер Д., Рэмpton В. Гиперзвук в физике твердого тела. М.: Мир, 1975. 453 с.
6. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E. Hybrid acoustic waves in thin potassium niobate plates // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. № 7. P. 3648–3649.
7. Бородина И.А., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Теплых А.А., Шурыгин В.В. Гибридизация акустических волн в пьезоэлектрических пластинах // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 18. С. 75–80.
8. Анисимкин И.В. Новый тип акустических мод колебаний тонких пьезоэлектрических пластин: квазипродольные нормальные волны // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 4. С. 442–447.
9. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
10. Балакирев М.К., Гилинский И.А. Волны в пьезокристаллах. Новосибирск: Наука, 1982. 237 с.
11. Joshi S.G., Jin Y. Propagation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates // J. of Appl. Phys. 1991. V. 70. № 8. P. 4113–4120.
12. Kovacs G., Anhorn M., Engan H.E., Visintini G., Ruppel C.C.W. Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃ // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1990. V. 1. P. 435–438.
13. Kazakov G., Kotelyanskii I., Maryachin A., Filimonov Yu., Khivintsev Yu. Nonlinear properties of magnetoelastic Rayleigh waves in ferrite films // Journal of magnetism and magnetic materials. 2004. V. 272–275. Pt. 2. P. 1009–1010.

Hybridization of Acoustic Waves in Piezoelectric Plates**I. E. Kuznetsova, B. D. Zaitsev, A. A. Teplykh, and I. A. Borodina***Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences (Saratov Branch),
ul. Zelenaya 38, Saratov, 410019 Russia**e-mail: zaitsev@ire.san.ru*

Abstract—The interaction (hybridization) of different types of acoustic waves of zero and higher orders propagating in lithium niobate piezoelectric plates is theoretically investigated. Different crystallographic orientations of the plates and different directions of wave propagation in them are considered. It is shown that, for an electrically free plate with the propagation direction along any of the crystallographic axes, the dispersion curves have intersection points and hybridization is absent. However, when the propagation direction slightly changes or when one of the plate surfaces is short-circuited, the dispersion curves separate and the waves become coupled. A quantitative coefficient characterizing the degree of wave hybridization with allowance for both mechanical and electric coupling is introduced. It is shown that the dependence of this coefficient on the product of the plate thickness by the wave frequency determines the extent of separation of the dispersion curves of interacting waves. The phenomenon under study is of both fundamental and practical interest, for example, in connection with the problem of an efficient excitation of nonpiezoactive acoustic waves in piezoelectric plates.