

Особенности возбуждения и распространения акустических мод в пьезоэлектрических пластинах

В. И. Анисимкин^{1*} И. Е. Кузнецова^{1,2†}

¹Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН,
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

²Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики, факультет электроники, кафедра физики,
Россия, 119454, Москва, Проспект Вернадского, д. 78

(Статья поступила 28.10.2014; Подписана в печать 27.11.2014)

Теоретически и экспериментально показано, что в отличие от акустических волн иных типов коэффициент электромеханической связи K_n^2 , угол отклонения потока энергии Ψ_n , чувствительность к внешним воздействиям и анизотропия всех характеристик акустических пластинчатых волн в пьезоэлектрических пластинах могут меняться без изменения кристаллографической ориентации материала пластины, только за счет изменения ее толщины. Характер указанных зависимостей различен для мод разных порядков. Число мод n в пьезоэлектрических пластинах намного превышает их число в изотропных пластинах той же толщины.

PACS: 72.50.+b

УДК: 548:53+534.22

Ключевые слова: акустические волны, пьезоэлектрические пластины, коэффициент электромеханической связи, сенсорные свойства.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени свойства акустических волн детально изучены в бесконечных твердых телах ($-\infty < H < +\infty$), в полубесконечных средах ($-\infty < H < 0$), в слоистых структурах с тонкой пленкой толщиной h на полупространстве ($h \ll \lambda$, $-\infty < H < 0$) и в пластинах со свободными поверхностями ($H = 0$, $H \sim \lambda$). Здесь H — толщина среды, а λ — длина волны. Спектр известных в настоящее время типов акустических колебаний состоит из 14-ти типов — 3-х объемных (1-й продольной, 2-х поперечных), 5-ти поверхностных (Рэлея, Гуляева–Блюстейна, сдвиговых на канавках, Сезава, Лява), 2-х псевдо-поверхностных («быстрых» и «медленных»), 1-й пограничной (Стоунли) и 3-х пластинчатых (Лэмба, сдвигово-горизонтальных, Анисимкина И. В.). При этом наименее изученными на сегодняшний день остаются акустические пластинчатые волны.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование анизотропии акустических пластинчатых волн в пьезоэлектрических пластинах из наиболее распространенных материалов — кварца и ниобата лития.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ

Для расчета использовались известные уравнения и граничные условия, описывающие распростране-

ние акустических волн в пьезоэлектрических пластинах [1]. На рис. 1 в качестве примера показаны дисперсионные кривые мод разных порядков n , распространяющихся по оси X в пластине ST-кварца (углы Эйлера 0° , 132.75° , 0°).

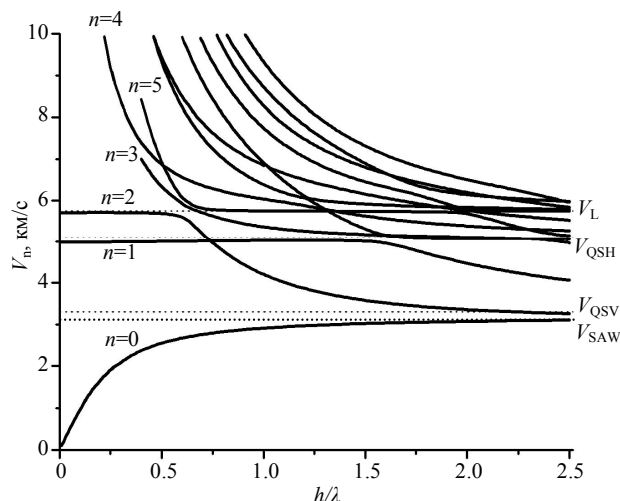


Рис. 1: Дисперсионные кривые акустических пластинчатых мод в ST-X-кварце. Здесь V_n — скорость моды; n — ее номер; h — толщина пластины; λ — длина акустической волны; V_L , V_{QSH} , V_{QSV} , V_{SAW} — скорости продольной, квази-горизонтальной, квази-вертикальной и поверхностной акустических волн в том же направлении

Из рисунка видно, что число мод n в пьезопластине намного превышает их число в изотропных пластинах той же толщины [2]. Это свойство может быть объяснено в терминах формирования мод пластины как суперпозиции объемных акустических волн, отраженных от верхней и нижней поверхностей пластины [3]. В изотропных материалах падающие объемные вол-

*E-mail: anis@cplire.ru

†E-mail: kuziren@yandex.ru

ны, имея «чистую» поляризацию, производят максимум по две отраженные волны, а в анизотропных пьезокристаллах падающие объемные волны, имея квазилинейные поляризации, производят, в общем случае, по три отраженные волны каждая.

При изменении направления распространения

в плоскости пластины (угла Θ относительно оси X) все характеристики акустических мод в пьезоэлектрических пластинах меняются как с углом Θ , так и с толщиной пластины h/λ . В качестве примера эти изменения (анизотропия характеристик) показаны на рис. 2 и 3 для двух мод и двух пьезокристаллов.

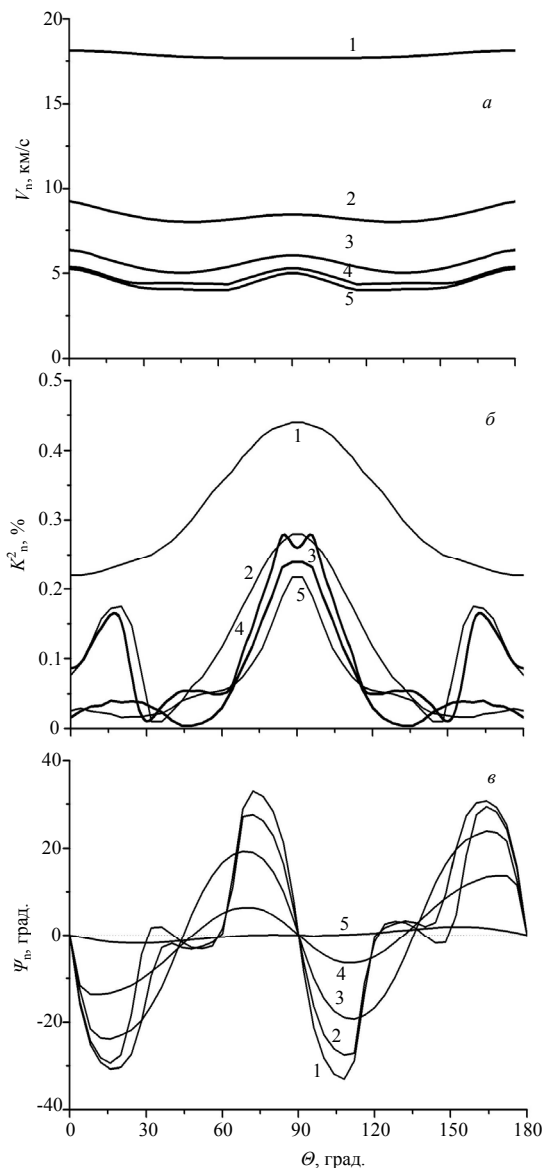


Рис. 2: Ориентационные зависимости скорости V_n (а), коэффициента электромеханической связи K_n^2 (б) и угла отклонения потока энергии Ψ_n (в) для моды 3-го порядка ($n = 3$) в пластине ST-кварца при $h/\lambda = 0,1$ (1), $0,25$ (2), $0,5$ (3), $1,0$ (4), $1,25$ (5)

Анализ рис. 2 и 3 показывает, что в отличие от поверхностных и объемных акустических волн, анизотропия которых зависит только от симметрии и ориентации кристалла, анизотропия пластинчатых мод до-

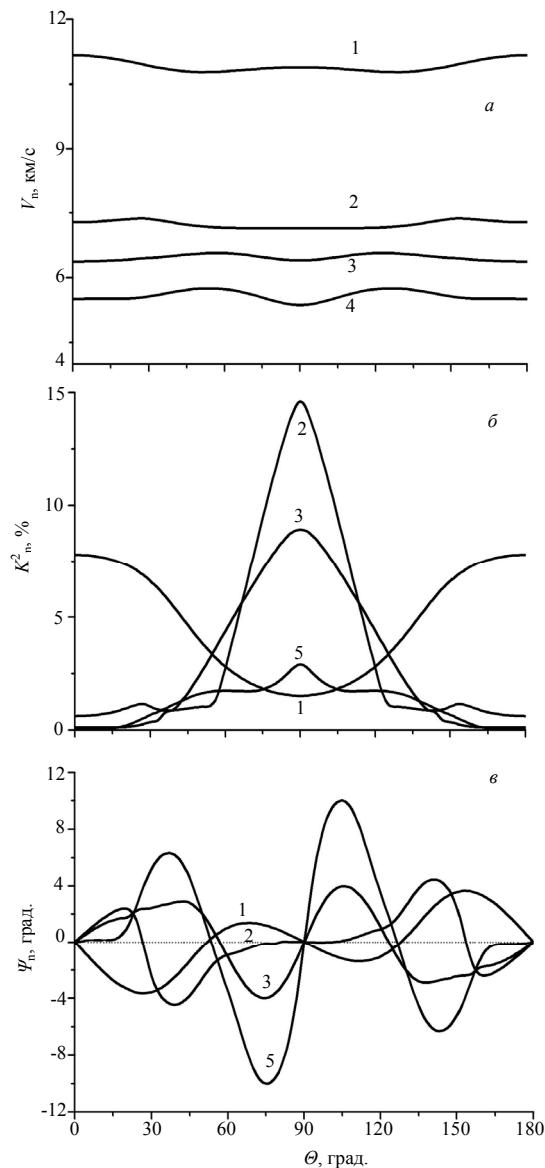


Рис. 3: Ориентационные зависимости скорости V_n (а), коэффициента электромеханической связи K_n^2 (б) и угла отклонения потока энергии Ψ_n (в) для моды 7-го порядка ($n = 7$) в пластине $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ при $h/\lambda = 0,5$ (1), $1,0$ (2), $1,25$ (3), $1,5$ (4), $1,67$ (5)

полнительно зависит от номера моды n и толщины пластины h/λ . Благодаря этому свойству ориентационная зависимость пластинчатых мод может быть усилена или ослаблена без изменения материала пластины.

Например, путем изменения h/λ можно добиться почти постоянной величины скорости моды V_n на всей плоскости пластины (рис. 2а, кривая 1). Можно также либо увеличить коэффициент электромеханической связи K_n^2 в 10 раз, либо уменьшить его почти до нуля (рис. 3б, кривые 1 и 2). Поток энергии Ψ_n при этом может быть направлен либо вдоль волновой нормали (рис. 3в, $\Theta = 55^\circ$, кривая 5), либо под углом к ней (рис. 3в, $\Theta = 55^\circ$, кривая 2). При этом для фиксированного направления распространения (угла Θ) отклонения потоков энергии Ψ_n разных мод n различны. Именно этим объясняется расхождение энергетических потоков мод разных порядков от источника в виде «веера».

Следует отметить, что хотя некоторые из мод обладают слабой пьезоактивностью (малым K_n^2) и большим отклонением потока энергии (углом Ψ_n), число мод, возбужденных в одной пластине с использованием системы встречно-штыревых преобразователей с разным периодом λ (рис. 4) может достигать нескольких десятков (рис. 5).

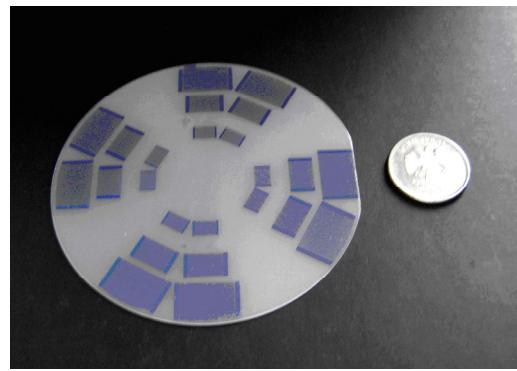


Рис. 4: Двухдюймовая пластина $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ с 3-мя системами из 4-х пар встречно-штыревых преобразователей, расположенных по кругу под углами $\Theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ и 90° к оси X в сравнении с монетой в 1 рубль. Ось X перпендикулярна фаске на правой стороне пластины

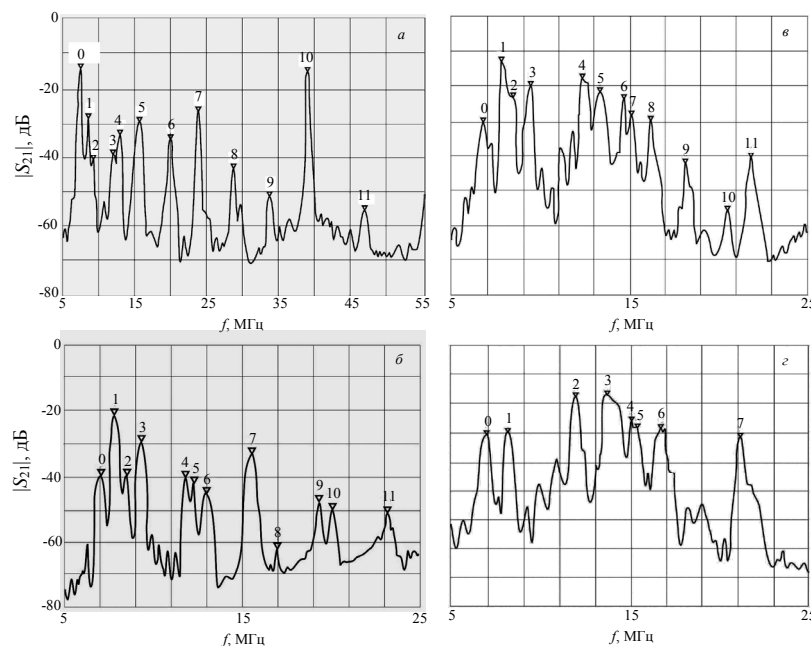


Рис. 5: Амплитудно-частотные характеристики мод в пластине $128^\circ\text{Y-LiNbO}_3$ толщиной $h/\lambda = 1,0$ при распространении по направлениям $\theta = 0^\circ$ (а), 30° (б), 60° (в), 90° (г). 0–11 — номера мод

2. СЕНСОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКИХ ПЛАСТИНЧАТЫХ МОД

Имея отличающиеся характеристики распространения, пластинчатые моды разных порядков естественным образом обладают и разными сенсорными характеристиками. На рис. 6 показан пример применения этих мод для детектирования жидкостей с разной сдвиговой вязкостью η воды ($\eta = 1,003$ мПа·с) и гли-

церина ($\eta = 1450$ мПа·с). Аналогично, на рис. 7 и 8 демонстрируются амплитудные и фазовые отклики разных мод на вязкость и проводимость жидкости. Величины откликов пластинчатых мод сильно зависят от их номера n , причем по-разному для разных жидкостей. Следовательно, переключаясь с одной моды на другую, можно формировать требуемую совокупность выходных сигналов без использования чувствительных покрытий и без изменения направления распространения.

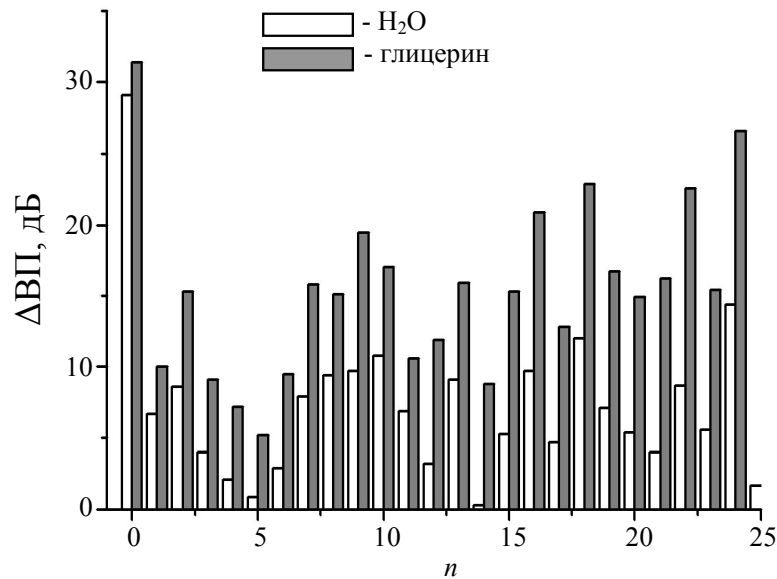


Рис. 6: Амплитудные отклики акустических пластинчатых мод в пластине $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ на действие жидкостей с различной сдвиговой вязкостью при $h/\lambda = 2,475$

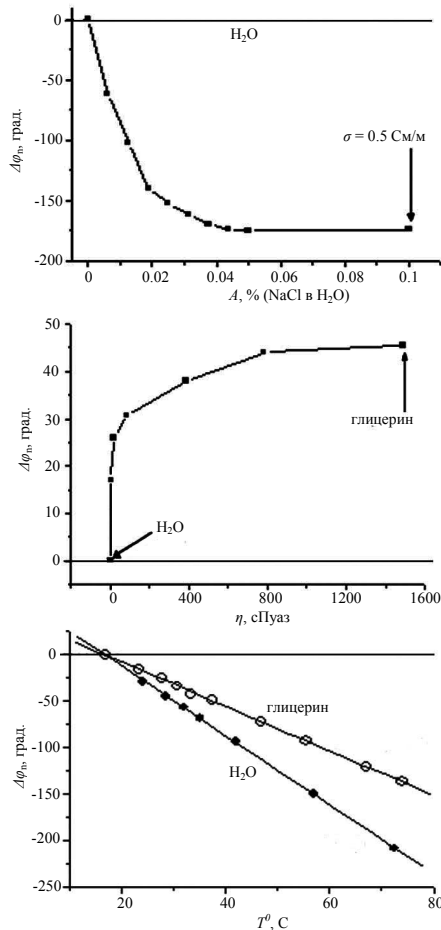


Рис. 7: Калибровочные кривые акустической пластинчатой моды в $128^\circ\text{Y,X}+90^\circ\text{-LiNbO}_3$ для $h/\lambda = 1$ при изменении проводимости σ (а), вязкости η (б) и температуры T (в) тестируемой жидкости при $f = 14,59$ МГц. Точки — эксперимент, линии — аппроксимационные кривые

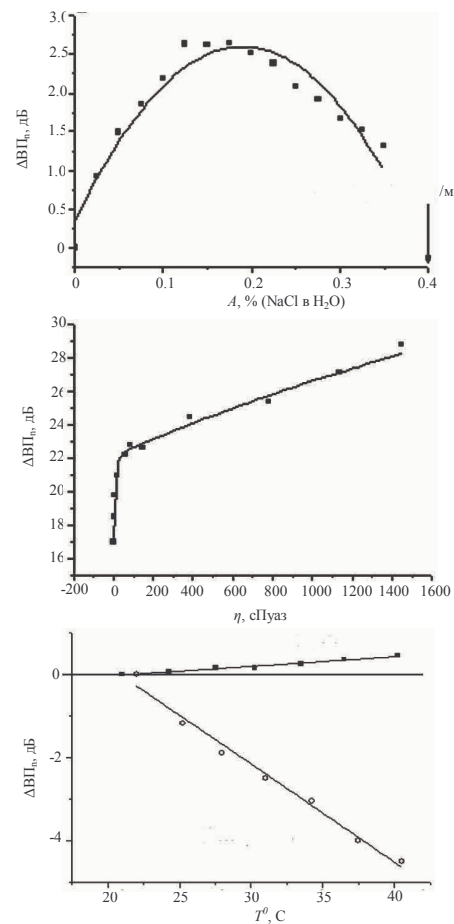


Рис. 8: Калибровочные кривые акустической пластинчатой моды в $128^\circ\text{Y,X}+90^\circ\text{-LiNbO}_3$ для $h/\lambda = 1,67$ при изменении проводимости σ (а), вязкости η (б) и температуры T (в) тестируемой жидкости при $f = 51,8$ МГц. Точки — эксперимент, линии — аппроксимационные кривые

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, акустические пластинчатые моды, распространяющиеся в пьезоэлектрических пластинах, оказываются намного разнообразнее, чем в изотропных телах. Они также значительно разнообразнее других типов акустических колебаний, известных в настоящее время. Поэтому именно этот тип акустических волн выдвинулся в последнее время в ряд наиболее

привлекательных для практических применений, например, для физических химических и биологических сенсоров [4–9]. Можно надеяться, что использование всех преимуществ пластинчатых мод приведет к дальнейшему улучшению рабочих характеристик и функциональных возможностей таких датчиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13–02–00596–а) и Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ–4841.2014.9).

-
- [1] Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Borodina I.A., Joshi S.G. *Ultrasonics*. **39**, № 1, P. 51. (2001).
- [2] Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. (М.: Наука, 1966).
- [3] Auld B.A. *Acoustic Fields and Waves*. Vol.2. (Wiley-Interscience Publication. New York, 1973).
- [4] Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova I.E., Borodina I.A. *Ultrasonics*. **39**, № 1, P. 45. (2001).
- [5] Анисимкин И.В., Анисимкин В.И. УФН. № 8. С. 900. (2005).
- [6] Анисимкин И.В., Гуляев Ю.В., Анисимкин В.И. *Радиотехника*. № 9. С. 9. (2010).
- [7] Анисимкин В.И., Воронова Н.В. *Нелинейный Мир*. **9**, № 2. С. 116. (2011).
- [8] Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Земляницин М.А., Кузнецова И.Е., Пятайкин И.И. *Радиотехника и Электроника*. **58**, № 10. С. 1033. (2013).
- [9] Anisimkin V.I. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. **60**, № 10. P. 2204. (2013).

The peculiarities of the exciting and propagation of acoustic modes in piezoelectric plates

V.I. Anisimkin^{1,a}, I.E. Kuznetsova^{1,2,b}

¹*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS. Moscow 125009, Russia*

²*Department of Physics, Faculty of Electronics, Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automatics, Moscow 119454, Russia*

E-mail: ^aanis@cplire.ru, ^bkuziren@yandex.ru

It has been theoretically and experimentally shown that in contrast to other waves type the electromechanical coupling coefficient K_n^2 , power flow angle Ψ_n , external effects sensitivity and properties anisotropy of plate acoustic waves can be changed only due to changing plate thickness at the constant crystallographic orientation of plate material. The behavior of pointed dependencies is various for modes with different orders. The amount of modes n in piezoelectric plates more bigger than ones in the isotropic plates with the same thickness.

PACS: 72.50.+b

Keywords: acoustic waves, piezoelectric plates, electromechanical coupling coefficient, sensoric properties.

Received 28.10.2014.

Сведения об авторах

1. Анисимкин Владимир Иванович — докт. физ.-мат. наук, главный научный сотрудник; тел.: 495 629-33-61, e-mail: anis@cplire.ru.
2. Кузнецова Ирен Евгеньевна — докт. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, профессор; тел.: 915 237-98-80, e-mail: kuziren@yandex.ru.