

УДК 541.183.5

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НОРМАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН
ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ В ТОНКИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИНАХ© 2020 г. В. И. Анисимкин^а, *, Н. В. Воронова^б^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Моховая ул. 11, стр. 7, Москва, 125009 Россия^бОАО НИИ Эла, Панфиловский пр. 10, Москва, Зеленоград, 124460 Россия

*e-mail: anis@cplire.ru

Поступила в редакцию 10.04.2019 г.

После доработки 22.08.2019 г.

Принята к публикации 05.09.2019 г.

Исследован спектр акустических колебаний, генерируемых встречно-штыревыми преобразователями в пластине пьезокристалла LiNbO_3 толщиной порядка длины акустической волны. Показано, что наряду с модами нулевого и высших порядков этот спектр содержит также нечетные гармоники тех же мод. При этом в отличие от волн поверхностного типа, не обладающих дисперсией, частоты гармоник нормальных волн не кратны в точности их основной частоте из-за дисперсии скорости, а амплитуды гармоник могут отличаться от амплитуд волн на основных частотах из-за дисперсии коэффициента электромеханической связи. Температурные чувствительности мод и гармоник отличаются друг от друга и меняются с жидкостной нагрузкой поверхности.

Ключевые слова: нормальные акустические волны, пьезоэлектрическая пластина, моды, гармоники

DOI: 10.31857/S0320791920010013

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возможностью практического применения нормальных акустических волн в пьезоэлектрических пластинах появился целый ряд публикаций, посвященных исследованию процессов их возбуждения, распространения и преобразования [1]. Такие волны делятся на три типа — эллиптические Лэмба, поперечно-горизонтальные SH и квазипродольные QL с доминирующим смещением вдоль направления распространения [2, 3]. В зависимости от нормированной толщины H/λ (H — толщина, λ — длина волны) в пластине существует определенное число мод нормальных волн, которые относятся к разным типам и номерам. При изменении H/λ один тип волн может трансформироваться в другой [4–7] и при этом менять свои характеристики (скорость V , коэффициент электромеханической связи K^2 , температурный коэффициент задержки ТКЗ, направления потока энергии и т.д.) [8–18].

Возбуждение нормальных волн обычно производится встречно-штыревыми преобразователями (ВШП), работа которых хорошо изучена для поверхностных волн [19], но недостаточно для волн нормального типа. Существуют работы [20–24], в которых показана возможность использования ВШП для возбуждения волн в пластинах и исследовано влияние различных параметров ВШП

(пространственный период, количество пар штырей, апертура) на характеристики возбуждаемых акустических сигналов. Однако, по-прежнему, остаются вопросы о влиянии дисперсии характеристик распространения на генерацию этих волн, возможно ли возбуждение высших гармоник нормальных волн, как скажется наличие гармоник на спектре акустических колебаний, генерируемых ВШП в пьезоэлектрической пластине.

Цель настоящей работы — найти ответы на эти вопросы, используя в качестве примера ВШП с периодической топологией и пьезоэлектрические пластины ниобата лития LiNbO_3 толщиной H порядка длины акустической волны λ .

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

Тестируемая структура представляла собой обычную линию задержки с входным и выходным ВШП. Подложкой служил LiNbO_3 поворотного $64^\circ YX$ -среза толщиной 370 мкм с направлением распространения волн перпендикулярно оси X (углы Эйлера 0° , -26° , 90°). Входной и выходной ВШП содержали 19.5 пар золотых электродов (толщина 1200°A) и имели период $\lambda = 500$ мкм. Расстояние между преобразователями равнялось $L = 28$ мм.

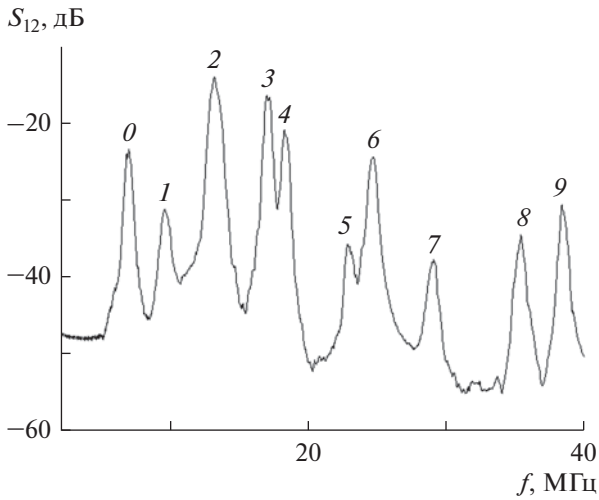


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики нормальных акустических волн, генерируемых в пластине $64^\circ YX + 90^\circ\text{-LiNbO}_3$ толщиной $H/\lambda = 0.74$. 0–5, 7 и 8 – моды разных номеров на основных частотах; 6 – суперпозиция 3-й гармоники моды 0 и 3-й гармоники моды 1; 9 – 5-я гармоника моды 0.

На основной частоте f длина волны λ нормальных волн равнялась периоду ВШП (500 мкм), а нормированная толщина пластины и полный набег фазы составляли, соответственно, $H/\lambda = 0.74$ и $\phi = 360^\circ L/\lambda = 20160^\circ$.

На частотах 3-й и 5-й гармоник тех же волн длина волны, нормированная толщина и полная фаза менялись и равнялись, соответственно, $\lambda/3$, $H/(\lambda/3) = 2.22$, и $\lambda/5$, $H/(\lambda/5) = 3.7$ и $5\phi = 100800^\circ$.

Спектр колебаний, генерируемых в пьезопластине, измерялся анализатором четырехполюсников KEYSIGHT E5061B, который работал в амплитудном режиме. По максимумам сигналов в спектре определялись частоты f_3 возбужденных волн и гармоник, которые затем идентифицировались.

Идентификация проводилась путем сравнения экспериментальных значений f_3 с частотами $f_T = V/\lambda$, $V/(\lambda/3)$ и $V/(\lambda/5)$, которые рассчитывались из скоростей волн V при толщинах пластины H/λ , $H/(\lambda/3)$ и $H/(\lambda/5)$ по методике [4, 10] с ис-

пользованием материальных констант из [25]. Для тех же волн и толщин контролировались величины коэффициентов электромеханической связи K^2 , которые характеризовали эффективность возбуждения волн с помощью ВШП: при $K^2 = 0$ акустические колебания не возбуждались и поэтому не рассматривались. В результате устанавливалось соответствие измеренных частот спектра f_3 либо основной частоте одной из мод нормальных волн, либо частоте гармоники, которая кратна основной или близка к ней.

Для идентифицированных мод и гармоник измерялись также температурные коэффициенты задержки (ТКЗ), которые характеризуют их температурную чувствительность. Величина ТКЗ определялась как $(1/\phi)(\Delta\phi/\Delta t)$, где ϕ – полный бег фазы волны между излучающим и приемным преобразователями, а $\Delta\phi$ – изменение фазы при изменении температуры на величину Δt . Измерения проводились с помощью температурной камеры UC-20CE и анализатора четырехполюсников KEYSIGHT E5061B, работающем в фазовом режиме. Исследовались три случая: пластина со свободными поверхностями (на воздухе) и пластина, одна из поверхностей которой нагружена дистиллированной водой (вязкость 1.3 сПуаз) или глицерином (вязкость 1490 сПуаз). Детали измерений представлены в [26].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и в таблице представлен спектр и характеристики акустических колебаний, генерируемых в пластине LiNbO_3 . Видно, что колебания 0–5, 7 и 8, имеющие высокие значения коэффициентов электромеханической связи K^2 , эффективно возбуждаются в эксперименте, а их частоты f_3 хорошо совпадают с расчетными значениями f_T , соответствующими обычным нормальным волнам разных номеров.

С другой стороны, колебания 6 и 9, присутствующие в спектре рис. 1, генерируются в пластине вопреки расчетам, согласно которым в пластине толщиной $H/\lambda = 0.74$ не существует нормальных волн, основные частоты которых равны f_3 , а коэффициенты K^2 имеют достаточно большие

Таблица 1. Сравнение расчетных f_T и измеренных f_3 частот акустических колебаний с ненулевыми значениями коэффициентов электромеханической связи K^2 в спектре рис. 1. * – 3-я гармоника моды 0 и 3-я гармоника моды 1 для нормированной толщины пластины $H/\lambda = 2.22$; ** – 5-я гармоника моды 0 для $H/\lambda = 3.7$

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K^2, \%$	1.4	0.64	1.9	2.4	0.9	0.25	0.86* 0.48*	2.05	1.4	1.26**
$f_T, \text{МГц}$	7	9.4	12.9	16.7	17.9	23.7	23.2* 23.4*	27.8	33.9	38.5**
$f_3, \text{МГц}$	6.9	9.4	13.1	16.9	18.1	22.8	24.3	28.8	35.2	38.3

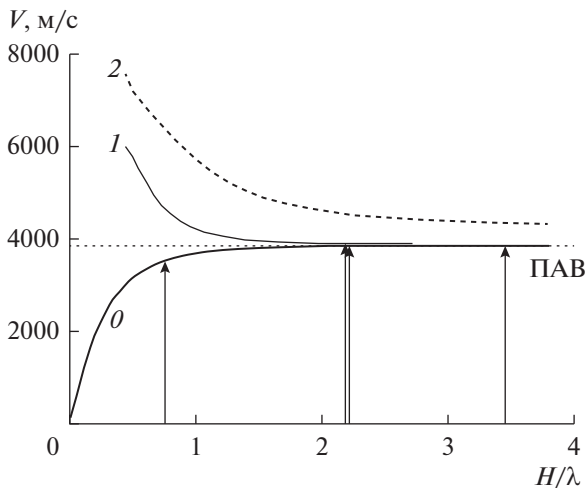


Рис. 2. Дисперсионные кривые скорости мод 0 , 1 и 2 в пластине $64^\circ YX + 90^\circ\text{-LiNbO}_3$. Стрелки – толщины пластины, соответствующие основной частоте ($H/\lambda = 0.74$), частоте 3-й гармоники ($H/\lambda = 2.22$) и частоте 5-й гармоники ($H/\lambda = 3.7$) тех же мод. ПАВ – поверхностная акустическая волна.

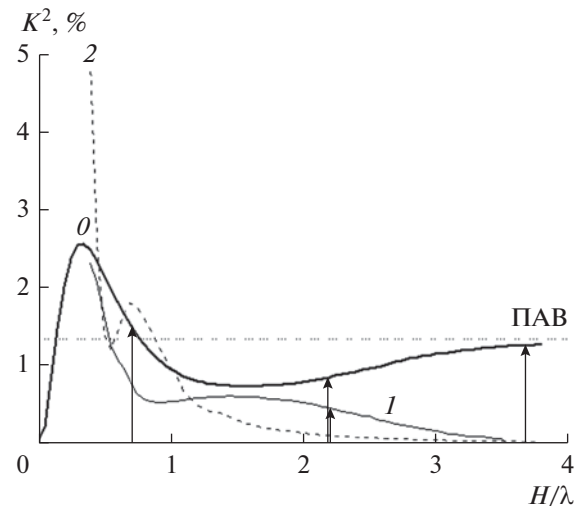


Рис. 3. Дисперсионные кривые коэффициента электро-механической связи мод 0 , 1 и 2 в пластине $64^\circ YX + 90^\circ\text{-LiNbO}_3$. Стрелки – толщины пластины, соответствующие основной частоте ($H/\lambda = 0.74$), частоте 3-й гармоники ($H/\lambda = 2.22$) и частоте 5-й гармоники ($H/\lambda = 3.7$) тех же мод. ПАВ – поверхностная акустическая волна.

величины для обеспечения эффективной генерации (более 0.25%). Вместе с тем, частота f_3 колебания b почти совпадает с частотами 3-х гармоник 0 -й и 1 -й мод, которые существуют в пластине толщиной $H/\lambda = 2.22$ и имеют высокие $K^2 = 0.86$ и 0.48% , соответственно (таблица, рис. 2, 3). Поэтому можно заключить, что колебание b представляет собой суперпозицию третьих гармоник 0 -й и 1 -й мод. Аналогично, колебание g идентифицируется как 5-я гармоника моды 0 (таблица, рис. 2, 3).

Отметим, что из-за дисперсии скорости (рис. 2) частоты гармоник нормальных волн, определяемые значениями скоростей при толщинах $H/\lambda = 2.22$ или 3.7 , не кратны в точности их основной частоте при $H/\lambda = 0.74$. Так, частота 3-й гармоники моды 0 составляет 3.31 частоты моды 0 , а частота 3-й гармоники моды 1 – 2.49 частоты моды 1 (таблица). Увеличение частоты в первом и ее уменьшение во втором случае соответствует ходу дисперсионных кривых мод 0 и 1 на рис. 2.

Точно также в отличие от поверхностных волн, для которых значения коэффициента K^2 на основной частоте и частоте гармоники одинаковы, амплитуды нормальных волн и гармоник могут дополнительно отличаться из-за различия (дисперсии) коэффициента K^2 при $H/\lambda = 0.74$, 2.22 и 3.7 (рис. 3).

Наконец, температурная чувствительность нормальных волн и гармоник также различна (рис. 4), т.к. для волн этого типа она зависит от нормированной толщины пластины H/λ [26]. Величины ТКЗ также меняются в зависимости от жидкостной нагрузки поверхности (рис. 5), что

объясняется отличием температурных и диэлектрических характеристик жидкостей, а также различной глубиной проникновения акустических волн в разные аналиты [18, 26]. Эта особенность делает, к сожалению, нормальные волны непри-

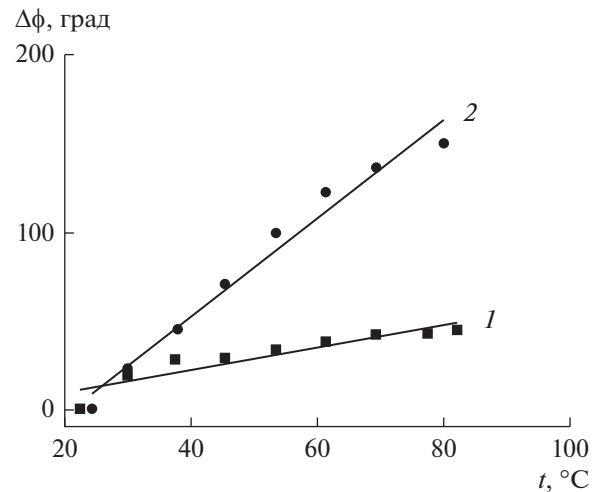


Рис. 4. Температурные изменения фазы акустической моды 0 на 1 – основной частоте $F_0 = 6.9$ МГц и 2 – частоте ее 5-й гармоники $5F_0 = 38.3$ МГц в пластине $64^\circ YX + 90^\circ\text{-LiNbO}_3$ толщиной $H/\lambda = 0.74$. 1 – полный набег фазы волны $\phi_0 = 20160^\circ$, ТКЗ = $+25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 2 – полный набег фазы волны гармоники $5\phi_0 = 100800^\circ$, ТКЗ = $+30 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Точки – эксперимент, линии – аппроксимирующие кривые, полученные с помощью программы Original 9 LAB Program.

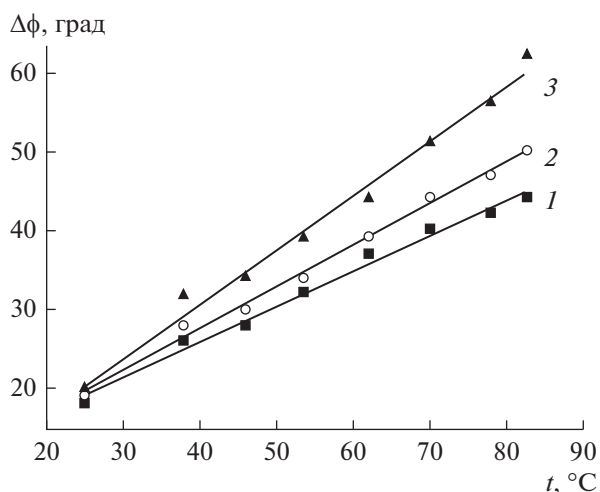


Рис. 5. Температурные изменения фазы акустической моды θ на основной частоте $F_0 = 6.9$ МГц, измеренные 1 – на воздухе, 2 – при нагрузке водой, 3 – при нагрузке глицерином.

годными для прецизионного измерения температуры жидкостной пробы.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что встречно-штыревые преобразователи, нанесенные на одну из поверхностей пьезоэлектрической пластины, генерируют в ней как нормальные волны разных номеров, так и нечетные гармоники этих волн. При близости скоростей амплитудно-частотные характеристики мод и гармоник могут располагаться слишком близко друг к другу и даже интерферировать между собой, искажая весь спектр акустических колебаний. Поэтому наиболее пригодными для практических применений являются пластины толщиной до 3-х длин волн, преобразователи с полосой пропускания до 5% и рабочие частоты менее частоты первой из гармоник.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках исполнения государственного задания и частично за счет финансирования по гранту РФФИ № 18-07-00074-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев В.В., Кузнецова И.Е. Акустические волны в тонких пьезоэлектрических пластинах. М.: Радиотехника, 2018. 240 с.
2. Анисимкин И.В. Новый тип акустических мод колебаний тонких пьезоэлектрических пластин: квази-продольные нормальные волны // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 4. С. 442–447.
3. Auld B.A. Acoustic fields and waves in solids. V. 2. New York: Wiley, 1973.
4. Anisimkin V.I., Pyataikin I.I., Voronova N.V. Propagation of the Anisimkin Jr. and quasi-longitudinal acoustic plate modes in low-symmetry crystals of arbitrary orientation // IEEE Trans. 2012. V. UFFC-59. № 10. P. 2363–2367.
5. Anisimkin V.I. New acoustic plate modes with quasi-linear polarization // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2014. V. 61. № 1. P. 120–132.
6. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G. Hybrid acoustic waves in thin potassium niobate plates // J. Appl. Phys. 2001. V. 90. № 7. P. 3648–3649.
7. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Teplykh A.A., Borodina I.A. Hybridization of acoustic waves in piezoelectric plates // Acoust. Phys. 2007. V. 53. № 1. P. 64–69.
8. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Borodina I.A., Teplykh A.A., Shurygin V.V., Joshi S.G. Investigation of acoustic plate waves of higher order propagating in plates of lithium niobate // Ultrasonics. 2004. V. 42. № 1–9. P. 179–182.
9. Soluch W., Lysakowska M. Properties of shear horizontal acoustic plate modes in BT-cut quartz // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2011. V. 58. № 10. P. 2239–2243.
10. Anisimkin V.I. Anisotropy of the acoustic plate modes in ST-quartz and 128°Y-LiNbO₃ // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2014. V. 61. № 1. P. 120–132.
11. Di Pietrantonio F., Benetti M., Cannata D., Beccherelli R., Verona E. Guided Lamb wave electroacoustic devices on micromachined AlN/Al plates // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2010. V. 57. № 5. P. 1175–1182.
12. Caliendo C., Lo Castro F. Quasi-linear polarized modes in Y-rotated piezoelectric GaPO₄ plates // Crystals. 2014. V. 4. № 3. P. 228–240.
13. Chen Z., Fan L., Zhang S., Zhang H. Theoretical research on ultrasonic sensors based on high-order Lamb waves // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. № 20.
14. Tao R., Wang W.B., Luo J.T., Hasan S.A., Torun H., Canyelles-Pericas P., Zhou J., Xuan W.P., Cooke M.D., Gibson D., Wu Q., Ng W.P., Luo J.K., Fu Y.Q. Thin film flexible/bendable acoustic wave devices: Evolution, hybridization and decoupling of multiple acoustic wave modes // Surface & Coatings Technology. 2019. V. 357. P. 587–594.
15. Wang Y.-F., Wang T.-T., Liu J.-P., Wang Y.-S., Laude V. Guiding and splitting Lamb waves in coupled-resonator elastic waveguides // Composite Structures. 2018. V. 206. P. 588–593.
16. Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Joshi S.G. Temperature characteristics of acoustic waves propagating in thin piezoelectric plates // Proc. IEEE Int. Ultras. Symp. 7–10 Oct. 2001. Atlanta. USA. V. 1. P. 157–160.
17. Burkov S.I., Zolotova O.P., Sorokin B.P., Turchin P.P. Calculation of thermostable directions and the effect of external electric field on the propagation of Lamb and SH waves in a langasite-crystal plate // Acoust. Phys. 2012. V. 58. № 6. P. 650–657.
18. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G. New method of change in temperature coefficient delay of acoustic waves in thin piezoelectric plates // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2006. V. 53. № 11. P. 2113–2120.

19. Дьелесан Э., Руайе Д. Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982. 424 с.
20. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G. Improved equivalent circuits for acoustic plate wave devices // Ultrasonics. 2002. V. 40. № 1–8. P. 943–947.
21. Veidta M., Liu T., Kitipornchai S. Modelling of Lamb waves in composite laminated plates excited by interdigital transducers // NDT & E International. 2002. V. 35. № 7. P. 437–447.
22. Stepinski T., Manka M., Martowicz A. Interdigital Lamb wave transducers for applications in structural health monitoring // NDT & E International. 2017. V. 86. P. 199–210.
23. Samaitis V., Mazeika L. Influence of the spatial dimensions of ultrasonic transducers on the frequency spectrum of guided waves // SENSORS. 2017. V. 17. № 8. P. 1825.
24. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Nedospasov I.A., Smirnov A.V., Semyonov A.P. New approach to detection of guided waves with negative group velocity: Modeling and experiment // J. Sound and Vib. 2019. V. 442. P. 155–166.
25. www.bostonpiezooptics.com/lithium-niobate
26. Anisimkin V.I., Voronova N.V., Puchkov Yu.V. General properties of the acoustic plate modes at different temperatures // Ultrasonics. 2015. V. 61. № 9. P. 46–49.