

УДК 548.0 : 539.37

© 1992 г. НАУМЕНКО Н. Ф.

**О КВАЗИГОРИЗОНТАЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ
КВАЗИОБЪЕМНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ
ВОЛНАХ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ**

На основе расчета линий особых волн в пьезоэлектрических кристаллах определены ориентации, вдоль которых в кристаллах tantalата лития, ниобата лития и тетрабората лития могут существовать квазиобъемные квазигоризонтально поляризованные поверхностные акустические волны в общем случае непоперечной поляризации. Впервые обнаружены квазипродольные горизонтально поляризованные поверхностные волны в кристаллах тетрабората лития с большой скоростью распространения и высокой пьезоактивностью.

Известно [1, 2], что в пьезоэлектрических кристаллах в определенных направлениях могут распространяться двухпарциальные горизонтально поляризованные поверхностные акустические волны (ПАВ) — волны Гуляева — Блустейна, которые представляют собой точное решение граничной задачи о распространении ПАВ для ориентаций с сагиттальной плоскостью, нормальной к оси симметрии четного порядка. В не-пьезоэлектрической среде вместо волн Гуляева — Блустейна распространяются однопарциальные горизонтально поляризованные объемные акустические волны, удовлетворяющие механическим граничным условиям на свободной поверхности кристаллического полупространства: $\sigma_{ij}m_j=0$ ($i=1, 2, 3$), где σ_{ij} — тензор механических напряжений, m — единичный вектор нормали к поверхности кристалла. Вследствие симметрии сагиттальной плоскости относительно упругих свойств кристалла как волны Гуляева — Блустейна, так и однопарциальные объемные волны являются чисто поперечными, т. е. их вектор механического смещения (поляризации) u удовлетворяет условию $u \cdot n = 0$, где n — единичный вектор волновой нормали.

В недавно опубликованной работе [3] были представлены экспериментальные данные о существовании в пьезоэлектрическом кристалле tantalата лития LiTaO_3 непоперечных квазигоризонтально поляризованных поверхностных волн. Подобные волны были обнаружены и в некоторых срезах ниобата лития LiNbO_3 в результате численного решения задачи о распространении ПАВ наряду с обычными волнами рэлеевского типа. В действительности поиск таких волн не требует полного решения граничной задачи, так как соответствующие ориентации можно найти с помощью менее трудоемкого расчета линий особых волн (ЛОВ) в исследуемом кристалле [4, 5]. В отсутствие пьезоэлектрического эффекта особые («exceptional» [6]) объемные волны (ООВ) представляют собой однопарциальные собственные решения граничной задачи со свободной поверхностью, причем каждая ООВ удовлетворяет граничным условиям только по отношению к определенно ориентированной «выделенной» плоскости. Любая объемная волна в непьезоэлектрическом

кристалле может стать особой, если для нее выполняется условие [4]

$$\det(\mu_{ij})=0, \quad (1)$$

где $\mu_{ij}=c_{ijk}n_ku_i$, c_{ijk} — тензор упругих жесткостей кристалла. При этом нормаль к выделенной плоскости m определяется условием [4]

$$\mu_{ij}m_j=0 \quad (i=1, 2, 3). \quad (2)$$

Как показано в [4], совокупность направлений распространения ОOB в любом кристалле можно представить с помощью линий особых волн на сфере единичных волновых векторов $n^2=1$. Связь ЛОВ с анизотропией упругих свойств кристаллов исследовалась в [5]. Там же были приведены полученные в результате расчетов ЛОВ для некоторых кристаллов. Ранее ЛОВ были рассчитаны для кристалла парателлурита TeO_3 [7].

Простейшим типом ОOB является горизонтально поляризованная чисто поперечная объемная волна, для которой векторы u , n и m взаимно ортогональны. В общем случае ОOB может быть как квазипродольной, так и квазипоперечной, а вектор волновой нормали n может не принадлежать выделенной плоскости, однако любая ОOB — горизонтально поляризована, а ее вектор Пойнтинга принадлежит выделенной плоскости [4].

Цель настоящей работы — исследование трансформации ОOB в пьезоэлектриках. Для найденных ориентаций ОOB численными методами решается граничная задача с учетом электрических граничных условий на поверхности кристалла. Использование при поиске ориентаций, для которых существуют квазигоризонтально поляризованные квазиобъемные ПАВ, систематического подхода, основанного на теории особых волн, позволяет не только обобщить имеющиеся в литературе разрозненные материалы о таких волнах в различных пьезоэлектрических кристаллах, но и предсказать их существование.

Некоторые из возможных ориентаций волновых нормалей ОOB, найденные в результате решения уравнений (1), (2) для всей сферы направлений волнового вектора в кристаллах танталата лития LiTaO_3 , тетрабората лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и ниобата лития LiNbO_3 , представлены в таблице. Для первых двух кристаллов ЛОВ приводились в [5]. Следует, однако, отметить, что более тщательное исследование поведения детерминанта матрицы μ_{ij} в окрестности акустической оси, лежащей в плос-

Характеристики особых объемных волн в некоторых пьезоэлектрических кристаллах

Кристалл	Класс симметрии	Углы Эйлера, град	v , м/с	v_S , м/с	Φ , град	α , град	β , град	Тип волны
LiNbO_3	$3m$	0, 41, 0	4079	4079	0	0	90	S
		0, -49, 0	4793	4792	0	0	90	F
		90, 90, 69,8	3697	3665	15,5	0	86,9	S
		90, 90, 23,2	4066	4066	8,1	0	96,1	S
LiTaO_3	$3m$	0, 38, 0	3373	3373	0	0	90	S
		0, -52, 0	4214	4214	0	0	90	F
		90, 90, 28	3407	3407	4,6	0	96,2	F
		90, 90, 112	3441	3441	5,8	0	87,6	S
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	$4mm$	45, 90, 12,7	4707	4707	27,4	0	96,6	S
		45, -46, -90	7018	6980	0	25,2	0,1	L
		45, -41, -90	7236	7222	0	13,2	0,1	L

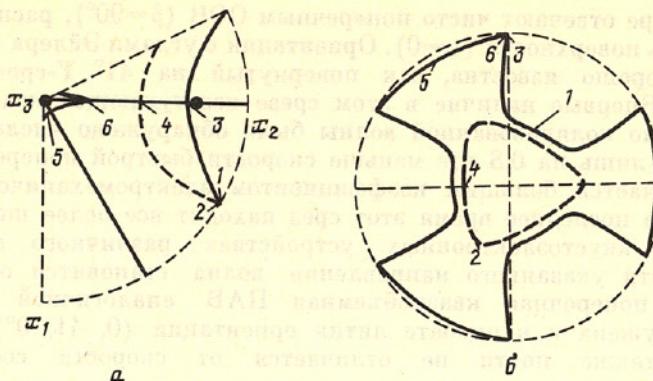


Рис. 1. Стереографические проекции линий ОВ (а) и линий нормалей к «выделенным» плоскостям (б) для кристалла LiNbO_3

Сплошные линии — медленные, штриховые — быстрые квазипоперечные волны. Черными кружками обозначены акустические оси

кости X -среза танталата лития под углом 58° к оси Z , показало, что через нее, кроме «тривиальной» ЛОВ (чисто поперечные волны, поляризованные перпендикулярно плоскости X -среза), проходит еще две ЛОВ. Для кристалла LiNbO_3 стереографические проекции ЛОВ и линий нормалей \mathbf{n} представлены на рис. 1, а, б. Как и в [5], с учетом симметрии кристалла на рисунке изображен только сектор сферы. При расчете в уравнении (1), а также при вычислении векторов поляризации и использовались эффективные значения упругих моделей с пьезоэлектрическими добавками. Таким образом, найденные ОВ удовлетворяют механическим граничным условиям на свободной поверхности пьезоэлектрического кристалла. Чтобы такая ОВ стала собственным решением граничной задачи, необходимо выполнение электрических граничных условий. Как показано в [8] на примере гексагонального кристалла, учет пьезоэффекта может привести как к расщеплению ЛОВ, так и к их смещению. Очевидно, что и в менее симметричных кристаллах возможны следующие преобразования ОВ, распространяющихся вдоль найденных ориентаций, с учетом электрических граничных условий: ОВ стала в общем случае четырехпарциальной, при этом оставаясь квазигоризонтально поляризованной и квазиобъемной; ОВ для заданной ориентации исчезла. Однако и во втором случае волна аналогичной структуры может существовать в окрестности анализируемого направления. В таблице ориентации ОВ задаются с помощью углов Эйлера (φ, θ, ψ), применяемых обычно для ПАВ. Выбраны только «симметричные» срезы, для которых либо направление распространения волны (проекция вектора \mathbf{n} на выделенную плоскость), либо нормаль \mathbf{n} лежат в плоскости симметрии кристаллов. Для каждой ориентации приведены расчетные значения характеристик ОВ: скорости распространения вдоль поверхности v , угла отклонения потока энергии Φ , угла наклона волновой нормали \mathbf{n} в глубь кристалла α и угла поляризации $\beta = \arccos(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})$. Скорость v_s соответствует точному решению граничной задачи с учетом электрических граничных условий.

В кристаллах LiNbO_3 и LiTaO_3 ЛОВ существуют только для двух медленных акустических ветвей, медленной (S) и быстрой (F) квазипоперечных. В кристалле $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ обнаружены также ЛОВ, принадлежащие квазипродольной ветви. Из приведенных в таблице ориентаций

только четыре отвечают чисто поперечным ОOB ($\beta=90^\circ$), распространяющимся вдоль поверхности ($\alpha=0$). Ориентация с углами Эйлера $(0, -49, 0^\circ)$ в LiNbO_3 хорошо известна, как повернутый на 41° Y -срез X -распространения. Впервые наличие в этом срезе незатухающей квазиобъемной горизонтально поляризованной волны было обнаружено численно в [9]. Скорость ее лишь на 0,8 м/с меньше скорости быстрой поперечной ОOB. Волна отличается большим коэффициентом электромеханической связи $k^2 \approx 17\%$, и в последнее время этот срез находит все более широкое применение в акустоэлектронных устройствах различного назначения. В окрестности указанного направления волна становится оттекающей. Медленная поперечная квазиобъемная ПАВ аналогичной структуры была обнаружена и в ниобате лития ориентации $(0, 41, 0^\circ)$ [3]. Скорость ее также почти не отличается от скорости соответствующей ОOB.

В повернутых Y -срезах танталата лития наблюдается аналогичная ситуация. Незатухающие квазигоризонтально поляризованные ПАВ наблюдаются в двух срезах: $(0, -52, 0^\circ)$ и $(0, 38, 0^\circ)$, совпадающих с ориентациями ОOB. В зависимости от материальных констант кристалла, используемых при расчете, значения угла θ для обоих срезов могут меняться. Так, в [10] приводятся углы -54 и 36° .

Квазиобъемные ПАВ с непоперечной поляризацией существуют также и в ниобате лития ориентаций $(90, 90, 69,8^\circ)$ и $(90, 90, 23,2^\circ)$ [3]. Впервые об этом упоминалось в [11]. Скорость квазиобъемных ПАВ для первого среза отличается от скорости ОOB почти на 1% вследствие достаточно большой пьезоактивности волны ($k^2 \approx 2,1\%$). Для второго среза, а также для среза танталата лития с углами Эйлера $(90, 90, 28^\circ)$ пьезоактивность квазиобъемной волны мала, менее 0,1%. Для ориентации LiTaO_3 $(90, 90, 112^\circ)$ ОOB оказалась непьезоактивной. Так как потери энергии на излучение в объем кристалла практически отсутствуют (волна удовлетворяет механическим граничным условиям), то распространение по поверхности этого среза обычной рэлеевской ПАВ в акустоэлектронных устройствах не будет сопровождаться возбуждением паразитных объемных мод, что и было обнаружено экспериментально в работе [12].

Обнаруженные в результате расчета ориентации ОOB в кристаллах тетрабората лития ранее не исследовались. Для их анализа используется функция эффективной диэлектрической проницаемости [13] (ЭДС) $\epsilon_s = -i\bar{D}_n/\bar{E}_t$, где \bar{D}_n и \bar{E}_t – соответственно Фурье-образы нормальной составляющей индукции и тангенциальной составляющей электрического поля на поверхности кристалла. Функция ЭДС позволяет отделить «механическую часть» решения граничной задачи от электрической. Она удовлетворяет уравнениям движения, пьезоэлектрического состояния кристалла и механическим граничным условиям на свободной поверхности кристалла. Функция не зависит от электрических граничных условий, а ее вид и особенности зависят только от материальных констант кристалла и заданной ориентации. На рис. 2 приведены зависимости $\epsilon_s(S)$, где S – обратная скорость, для трех ориентаций кристалла $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Наличие четко выраженных нулей и полюсов функции свидетельствует о существовании во всех трех срезах пьезоактивных квазиобъемных волн со скоростями, близкими к скоростям найденных ОOB. Малая по величине мнимая часть функции означает слабые потери на излучение в объем кристалла и, следовательно, слабое затухание анализируемых волн. Особый интерес представляют продольные квазиобъемные волны со скоростью распространения более 7000 м/с. Хотя теоретически возможность существования таких волн в пьезоэлектрических кристаллах следует из результатов работ [3–7], однако в реальном кристалле они

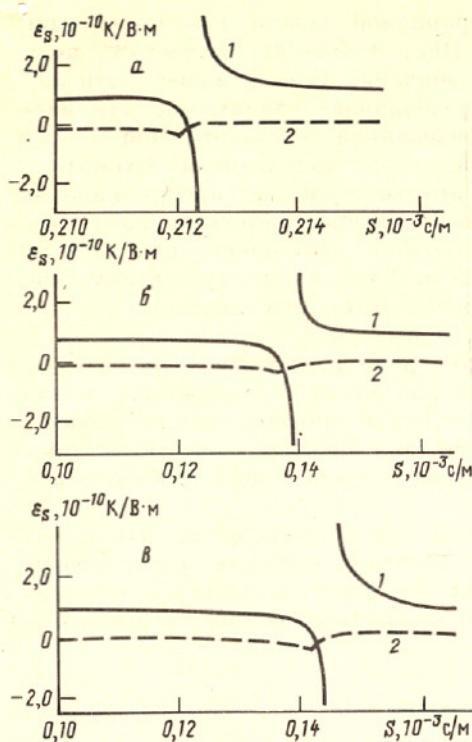


Рис. 2

Рис. 2. Действительная (1) и мнимая (2) части функции эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_s в зависимости от величины обратной скорости S для трех срезов $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$
 а — (45, 90, 12.7°); б — (45, -41, -90°); в — (45, -46, -90°)

Рис. 3. Схема «расщепления» линий ОВВ в окрестности наклонной акустической оси в кристалле LiTaO_3 .
 Вертикальная линия совпадает со следом плоскости X -среза кристалла

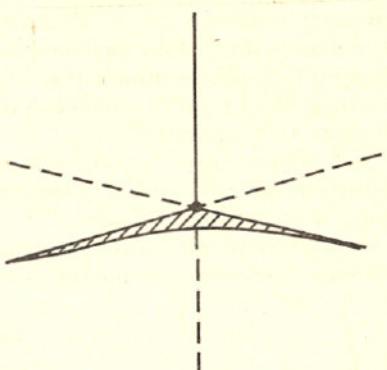


Рис. 3

обнаружены впервые. Оценка коэффициента электромеханической связи для квазиобъемных ПАВ в трех срезах тетрабората лития осуществлялась по формуле [13]

$$k^2 = -2\epsilon_s(\infty)(S_0)^{-1} (d\epsilon_s/dS)_{s=s_0}^{-1} \quad (3)$$

где $v_0 = 1/S_0$ — значение скорости, соответствующее нулю функции ЭДП, т. е. скорость на электрически свободной поверхности. Величина k^2 для трех срезов составила соответственно 0,025, 0,34 и 0,29%. Квазипродольные слабозатухающие квазиобъемные волны были также обнаружены в широком диапазоне углов θ (от 30 до 70°) для семейства срезов с углами Эйлера (45, $-\theta$, -90°). Благодаря достаточно большим значениям k^2 и высокой скорости распространения эти волны могут с успехом заменить обычные поверхностные в различных областях применения последних.

В заключение особо остановиться на ориентации tantalата лития (90, 90, 148°) (направление распространения лежит в плоскости X -среза под углом 58° к оси Z), где наличие квазигоризонтально поляризованных квазиобъемных волн обнаружено и подтверждено экспериментально в [3]. Поскольку направление распространения волны совпадает с акустической осью кристалла, то одна из вырожденных квазипоперечных объемных волн поляризована в плоскости X -среза. Однако эта волна не является ОВВ. Вероятно, в данном случае учет электрических граничных условий ведет к расщеплению ЛОВ в пространственный конус направлений с центром, совпадающим с акустической осью кристалла.

Действительно, анализ решений граничной задачи для ориентаций, определяемых углами Эйлера $\varphi=75-105^\circ$, $\theta=53-90^\circ$ и $\psi\approx148^\circ$, показал, что для каждого из приведенных значений угла φ может быть найдено соответствующее значение θ , определяющее ориентацию для незатухающей квазигоризонтально поляризованной квазиобъемной волны. В окрестности этих ориентаций волна — слабо затухающая. Схематически расщепление ЛОВ в окрестности акустической оси представлено на рис. 3. В заштрихованной области могут распространяться слабо затухающие квазиобъемные волны. Точка соответствует ориентации $(90, 90, 148^\circ)$. Очевидно, влияние пьезоэффекта на ОВ в окрестности акустических осей должно стать предметом отдельного исследования.

В заключение сформулируем основные выводы.

1. В пьезоэлектрических кристаллах кроме известных горизонтально поляризованных волн Гуляева — Блустейна могут существовать квазигоризонтально поляризованные квазиобъемные поверхностные волны с непоперечной поляризацией. Ориентации, для которых существуют такие волны, могут быть предсказаны на основе расчета линий особых объемных волн в кристалле.

2. Указанные волны могут быть как квазипоперечными, так и квазиродольными. Последние, благодаря высокой скорости распространения и достаточно большому коэффициенту электромеханической связи, могут с успехом заменить обычные поверхностные волны во многих областях применения последних.

Список литературы

1. Гуляев Ю. В. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 37.
2. Bleustein J. L. // Appl. Phys. Lets. 1968. V. 13. P. 412.
3. Hashimoto K., Yamaguchi M. // Ultrasonics Symp. Proc. 1988. P. 97.
4. Альшиц В. И., Логе Е. // Кристаллография. 1979. Т. 24. С. 1122.
5. Альшиц В. И., Любимов В. Н., Науменко Н. Ф. и др. // Кристаллография. 1985. Т. 30. С. 213.
6. Chadwick P., Smith G. D. // Advances Appl. Mech. 1977. V. 17. P. 303.
7. Науменко Н. Ф., Бондаренко В. С., Переломова Н. В. // ФТТ. 1983. Т. 25. С. 2628.
8. Любимов В. Н., Альшиц В. И. // Кристаллография. 1980. Т. 25. С. 33.
9. Yamanouchi K., Shibayama H. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 856.
10. Nakamura K., Kazumi M., Shimizu H. // Ultrasonics Symp. Proc. 1977. P. 819.
11. Науменко Н. Ф., Умысова Е. Б., Бондаренко В. С. // Тез. докл. XIII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Киев, 1986. С. 80.
12. Патент США № 4245201. МКИ Н03Н 9/25. 1981.
13. Milsom R. F., Reilly N. C. H., Redwood M. // IEEE Trans. 1977. V. SU-21. P. 147.

Московский институт
стали и сплавов

Поступила в редакцию
23.07.1991