

УДК 534.113

## СВОЙСТВА АКУСТИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ВДОЛЬ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕД

© 2002 г. М. Ю. Двоешерстов, В. И. Чередник, А. П. Чириманов, С. Г. Петров

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
603600 Н. Новгород, просп. Гагарина 23

E-mail: dvoesh@rf.unn.runnet

Поступила в редакцию 23.10.2001 г.

В работе теоретически рассмотрены свойства граничных электроакустических волн, распространяющихся в системе двух пьезокристаллических сред. Путем численного эксперимента найдены конкретные пары пьезосред и их ориентации, в которых возможно существование данного типа волн, имеющих оптимальные свойства.

Волна, распространяющаяся без дисперсии вдоль границы раздела двух изотропных полупространств, называется волной Стоунли [1]. Данный тип волны может существовать только в определенной области соотношений между упругими параметрами граничащих сред [2]. В системе двух полубесконечных пьезокристаллических сред, имеющих акустический контакт между собой, также может существовать граничная электроакустическая волна BW (boundary wave) [2, 3]. Электроакустические волны, распространяющиеся в слоистых системах: пленка – пьезоподложка, когда толщина пленки  $h$  достаточно велика (сравнима с длиной волны  $\lambda$ ) также называют волнами BW [4].

Создать систему из двух граничащих между собой пьезосред путем эпитаксиального выращивания пьезокристаллической пленки на пьезоподложке другого типа до сих пор технологически не удавалось (кроме пленок окиси цинка ZnO [5]). Пьезокристаллические пленки кварца SiO<sub>2</sub>, ниобата лития LiNbO<sub>3</sub>, танталата лития LiTaO<sub>3</sub> и т.д. путем эпитаксиальной технологии до сих пор не получены. Однако в последнее время появились технологии (direct bonding of piezoelectric materials), позволяющие осуществлять прямой акустический контакт между двумя предварительно выращенными пьезокристаллами различных типов симметрий [4, 6]. В связи с этим интерес к изучению свойств волн BW сильно возрос. Применение волн BW в качестве рабочих в акустоэлектронных устройствах может дать ряд существенных преимуществ по сравнению с обычными поверхностными акустическими волнами (ПАВ): волна BW в отличие от ПАВ не имеет прямого контакта с атмосферой, поэтому отпадает необходи-

мость в корпусировании полученной структуры, что значительно уменьшает конечные размеры устройства [4]; в ряде случаев фазовая скорость волны BW поперечного типа может быть выше скорости ПАВ [3]; подбором конкретных пьезосред можно существенно улучшить технические параметры волны – увеличить коэффициент электроакустической связи  $K^2$  и одновременно улучшить термостабильные свойства волны [7].

Цель настоящей работы заключалась в теоретическом поиске различных пар пьезокристаллов и их ориентаций, в которых возможно существование волны BW, а также в численном анализе ее основных характеристик.

По аналогии с методикой поиска решений для ПАВ [8] можно также найти решение для волны BW. При этом, поскольку основная энергия волны BW локализована в области границы раздела двух пьезосред, амплитуды механических смещений и сопровождающий их электрический потенциал должны экспоненциально затухать по обе стороны от границы раздела.

В результате проведенных численных расчетов были найдены решения для волны BW квазипоперечного типа, распространяющейся в системе двух граничащих между собой одинаковых пьезокристаллов ниобата лития LiNbO<sub>3</sub>, танталата лития LiTaO<sub>3</sub>, тетрабората лития Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> и т.д., разделенных бесконечно тонким закороченным металлическим слоем (см. таблицу 1). Электрическое закорочение границы раздела приводит к условию существования данного типа волны. Для сравнения в таблице приведены также рассчитанные фазовые скорости ПАВ ( $V_0$  – свободная,  $V_M$  – металлизированная поверхность) и скорости объемных волн ( $V_{11}$ ,  $V_{12}$ ,  $V_L$ ) в данных ориентациях

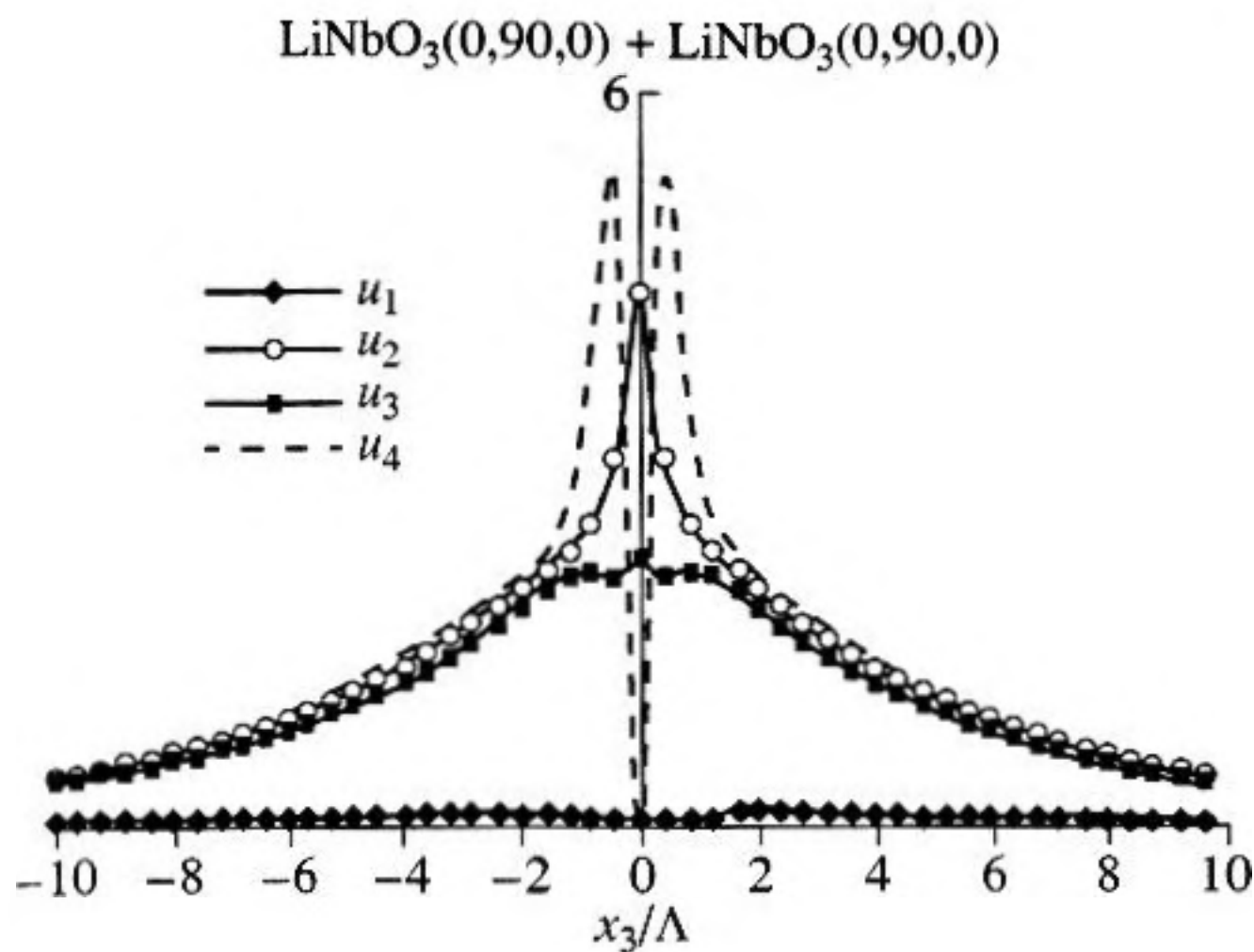


Рис. 1. Нормализованные амплитуды смещений (кривые  $u_1, u_2, u_3$ ) и потенциала (кривая  $u_4$ ) волны BW вдоль оси  $X_3$  в системе двух граничащих одинаковых пьезосред  $YX$ -среза  $LiNbO_3$ , разделенных металлом.

кристаллов (ориентации приведены в трех углах Эйлера  $\phi, \theta, \Psi$  [9]). Видно, что скорость квазипоперечной граничной волны  $V_{BW}$  близка к скорости медленной сдвиговой объемной волны  $V_{11}$ . На рис. 1 показаны рассчитанные нормализованные амплитуды механических смещений ( $u_1, u_2, u_3$ ) и потенциала ( $u_4 = \phi$ ) волны BW по обе стороны от границы раздела (вдоль оси  $X_3$ ) в системе двух граничащих между собой одинаковых пьезосред ниобата лития  $YX$ -среза ( $0^\circ, 90^\circ, 0^\circ$ ), разделенных бесконечно тонким закороченным металлическим слоем. Как видно из рис. 1, граничная волна имеет преимущественно две сдвиговые компоненты механических смещений  $u_2, u_3$ . Затухание амплитуд смещений вдоль оси  $X_3$  происходит на достаточно большом расстоянии от границы раздела – порядка 10 длин волн, что значительно больше, чем у ПАВ.

Численным экспериментом были найдены также области существования решений для волны BW в системе двух различных пьезокристаллов. На рис. 2 показаны рассчитанные зависимости скорости  $V_{BW}$  (кривая bws) в системе:  $LiNbO_3 (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)/металл/KNbO_3 (0^\circ, 90^\circ, \Psi = 140^\circ - 220^\circ)$ . На этом же рисунке приведены для сравнения рассчитанные скорости медленной сдвиговой объемной волны в кристаллах  $KNbO_3, LiNbO_3$  (кривые ( $knbo_3, V_t$ ), ( $linbo_3, V_t$ )), скорость ПАВ на металлизированной поверхности (кривая  $knbo_3, V_s$ ) в  $KNbO_3$ . Видно, что в данном случае фазовая скорость граничной волны существенно меньше скоростей объемных волн в обоих пьезокристал-

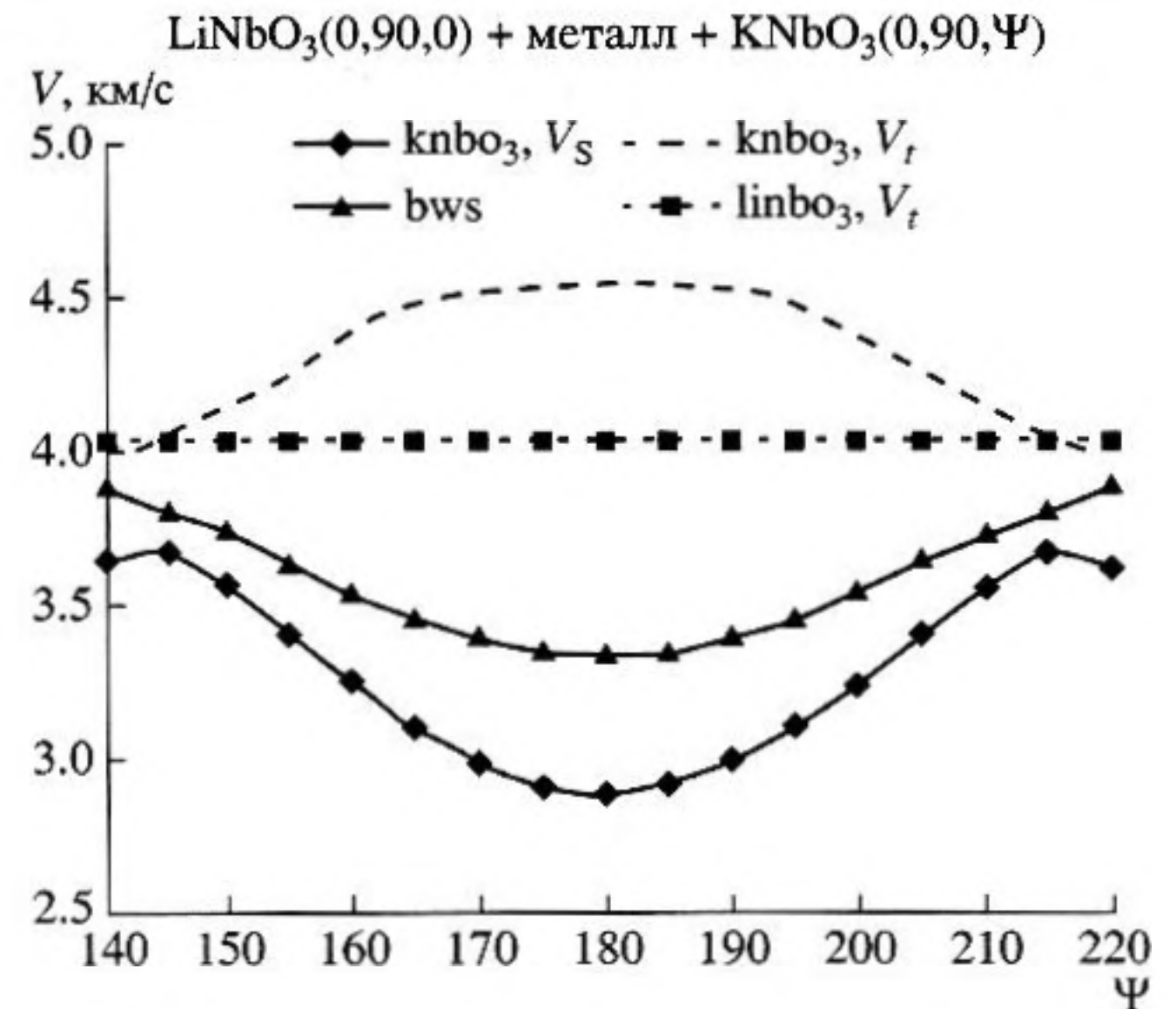


Рис. 2. Зависимости фазовой скорости волны BW (кривая bws) в системе:  $LiNbO_3 (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)/металл/KNbO_3 (0^\circ, 90^\circ, \Psi)$ , скорости ПАВ (кривая  $knbo_3, V_s$ ) и скорости медленной сдвиговой объемной волны в  $KNbO_3$  (кривая  $knbo_3, V_t$ ) и в  $LiNbO_3$  (кривая  $linbo_3, V_t$ ) от угла  $\Psi$ .

лах и близка к скорости ПАВ в  $Y-X-LiNbO_3$  ( $V_{LiNbO_3} = 3.691$  км/с). На рис. 3 показаны нормированные амплитуды смещений волны BW в зависимости от расстояния от границы соприкосновения 2 кристаллов в системе  $LiNbO_3 (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)/металл/KNbO_3 (0^\circ, 90^\circ, 175^\circ)$ . В данном случае только одна поперечная компонента смещения  $u_2$  яв-

Таблица

Типы пьезокристаллов	$V_t$ , км/с	ПАВ	$V_{BW}$ , км/с
	$V_{12}$ , км/с $V_L$ , км/с	$V_M$ , км/с $V_0$ , км/с	
Ориентация $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ $LiNbO_3/металл/LiNbO_3$	4.03078	3.691	4.02907
	4.7524	3.7178	
	6.547		
Ориентация $(0^\circ, -49^\circ, 0^\circ)$ $LiNbO_3/металл/LiNbO_3$	4.03078	3.637	4.0302
	4.7524	3.641	
	6.547		
Ориентация $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ $LiTaO_3/металл/LiTaO_3$	3.350833	3.158	3.350831
	4.2265	3.161	
	5.5885		
Ориентация $(0^\circ, 75^\circ, 75^\circ)$ $Li_2B_4O_7/металл/Li_2B_4O_7$	3.6889	3.2945	3.3759
	4.936	3.309	
	6.4385		
Ориентация $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ PKN/металл/PKN	3.0546	3.2945	2.6942
	4.936	3.309	
	6.4385		

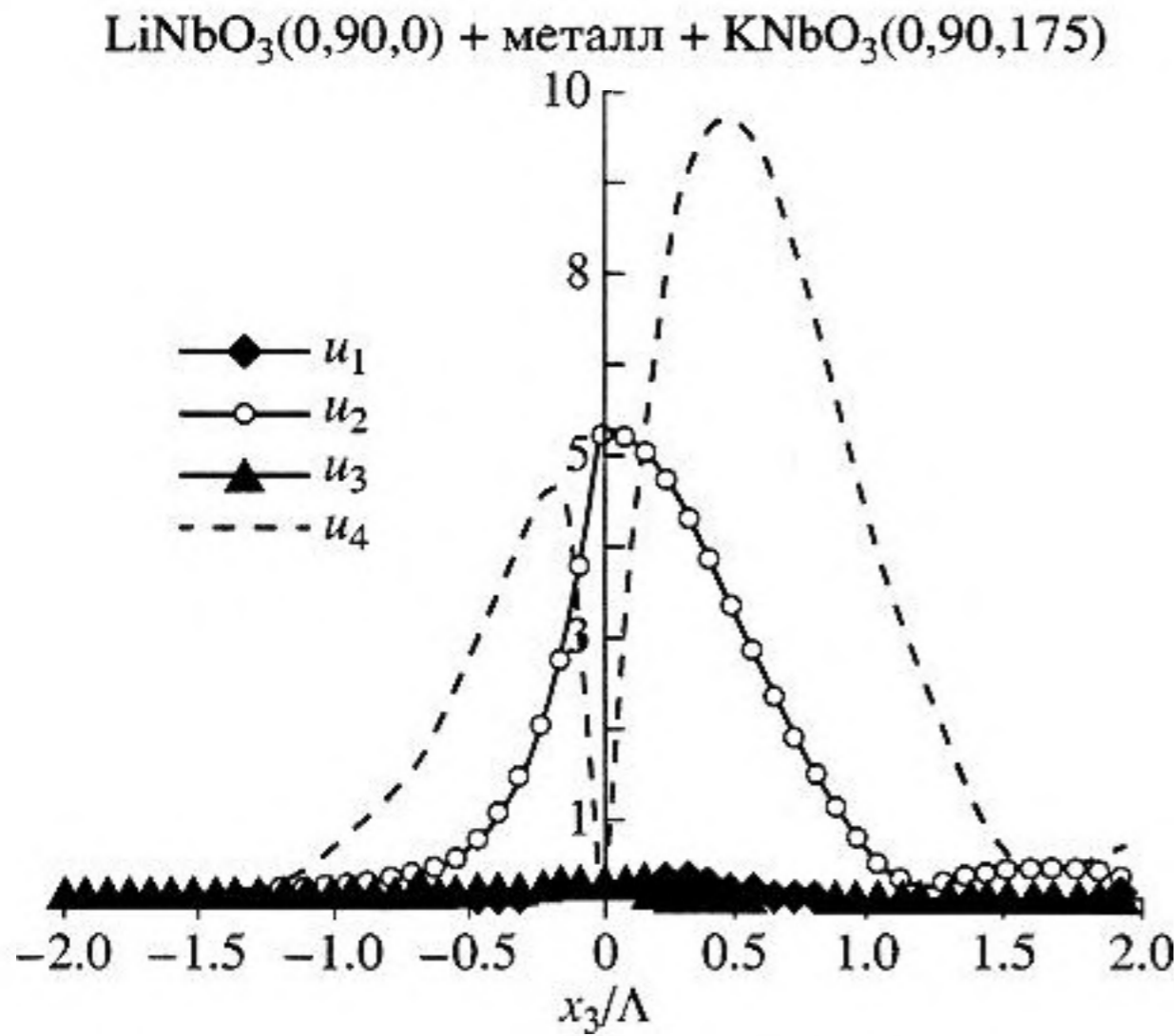


Рис. 3. Нормализованные амплитуды смещений (кривые  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ) и потенциала (кривая  $u_4$ ) волны BW вдоль оси  $X_3$  в системе:  $\text{LiNbO}_3(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ /металл/ $\text{KNbO}_3(0^\circ, 90^\circ, 175^\circ)$ .

ляется преобладающей ( $u_2 \gg u_1, u_3$ ). Слева и справа от границы раздела сред ( $X_3 = 0$ ) амплитуды смещений уже не симметричны (в отличие от рис. 1), амплитуда смещений  $u_2$  и электрический потенциал  $\phi$  затухают по обе стороны от границы раздела гораздо быстрее – на расстоянии 1.5 длин волн. При этом величина электрического потенциала в кристалле  $\text{KNbO}_3$  больше, чем в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ . Это связано с тем, что пьезосвойства в ниобате калия на порядок выше, чем в ниобате лития [10]. Заметим также, что волна BW существует в данной паре пьезокристаллов в отсутствие металлического слоя на границе раздела. При этом величина ее фазовой скорости лежит между фазовыми скоростями ПАВ обеих пьезосред, а величина коэффициента электромеханической связи  $K^2$  больше, чем у ниобата лития, но меньше, чем у ниобата калия.

В работе [4] была предложена структура: пленка  $Y-X\text{-LiNbO}_3$  на  $Y-X\text{-Quartz}$ , в которой волна BW имеет “оптимальные” характеристики ( $K^2 \approx 1.5\%$ , температурный коэффициент задержки  $\text{tcd} < 10^{-6}/\text{C}$ ) при толщине пленки ниобата лития –  $h \approx 0.3\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны).

В данной работе предложена структура: пленка  $Y-X\text{-LiTaO}_3$  на лангасите LGS ( $0^\circ, 140^\circ, 40^\circ$ ). На рис. 4 представлены рассчитанные зависимости  $K^2, \%$  и  $\text{tcd}, 10^{-6}/\text{C}$  волны BW от  $h/\lambda$  в данной слоистой структуре. Из рис. 4 видно, что при  $h/\lambda \approx 0.2$  в данной системе волна BW имеет наибольший  $K^2 \approx 0.96\%$  и практически нулевое значение  $\text{tcd}$ .

В пьезокристаллах с сильной пьезосвязью ( $\text{LiNbO}_3, \text{KNbO}_3, \text{LiTaO}_3$ ) найдены ориентации,

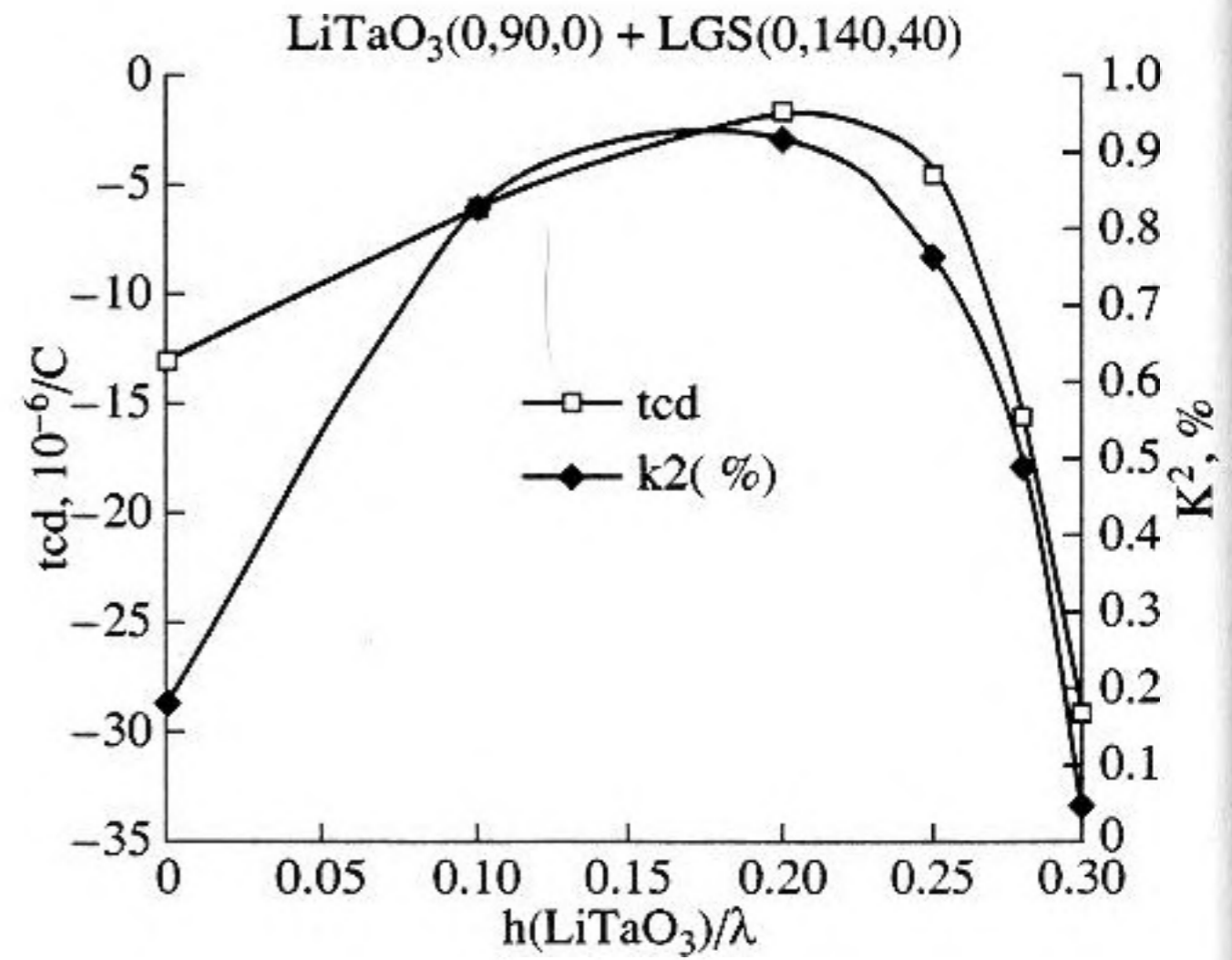


Рис. 4. Зависимости  $\text{tcd}, 10^{-6}/\text{C}$  и  $K^2, \%$  в системе: планка  $\text{LiTaO}_3(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$  на LGS ( $0^\circ, 140^\circ, 40^\circ$ ) в зависимости от  $h/\lambda$ .

при которых возможно существование волны BW. Показано, что в случае двух одинаковых пьезосред, разделенных бесконечно тонким металлическим слоем, волна BW имеет квазипоперечную структуру, а ее фазовая скорость близка к скорости медленной сдвиговой объемной волны. Предложена слоистая структура  $\text{LiTaO}_3/\text{LGS}$ , в которой волна BW имеет оптимальные параметры – высокий коэффициент электромеханической связи и одновременно нулевой температурный коэффициент задержки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stoneley R. Elastic waves at the surface of separation of two solids // Proc. Royal Soc. 1924. London. Series A. 106. P. 416–428.
2. Yamanouchi K., Iwahashi K., Shibayama K. Piezoelectric acoustic boundary waves propagating along the interface between  $\text{SiO}_2$  and  $\text{LiTaO}_3$  // Proc. IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics. V. Su-25. № 6. 1978. P. 384–389.
3. Camou S., Ballandras S. Theoretical calculations of boundary waves using effective permittivity and harmonic admittance approaches on various combination of materials // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 2000.
4. Eda K., Onishi K., Sato H. Direct bonding of piezoelectric materials and its applications // Proc. IEEE Ultrasonics Symp.
5. Adler E., Solie L. ZnO on Diamond: SAWs and pseudo-SAWs / Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1995. P. 341–344.
6. Sato H., Onishi K., Shimamura T. Temperature stable SAW devices using directly bonded  $\text{LiTaO}_3/\text{Glass}$  Substrates / Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1999. P. 453–456.
7. Irino T., Watanabe T.Y., Shimizu Y. Zero slope tempera-

- ture  $\text{SiO}_2/\text{LiTaO}_3$  structure substrate for Stonely waves / Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1987. P. 257–260.
8. Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Чириманов А.П. Расчет поверхностных акустических волн в кристаллах с применением процедуры глобальной оптимизации // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 9. С. 801–813.
9. Шаскольская М.П. Акустические кристаллы. М.: Наука, 1982. С. 632.
10. Dvoesherstov M.Yu., Cherednick V.I., Chirimanov A.P., Petrov S.G. The Bleusten–Gulyaev waves propagation characteristics in  $\text{KNbO}_3$  and PKN crystals // SPIE. 1999. V. 3900. P. 290–296.

## Properties of Acoustic Boundary Waves Propagating along the Interface between Two Piezoelectric Media

M. Yu. Dvoesherstov, V. I. Cherednik, A. P. Chirimanov, and S. G. Petrov

Lobachevskii State University, Nizhni Novgorod, pr. Gagarina 23, Nizhni Novgorod, 603600 Russia

e-mail: dvoesh@rf.unn.runnet.ru

**Abstract**—The properties of electroacoustic boundary waves propagating in a system of two piezoelectric crystalline media are theoretically analyzed. A numerical experiment is used to determine the specific pairs of piezoelectric media and their orientations that allow the propagation of this type of waves with optimal properties.