

УДК 548.53+534.22

АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ТОНКИХ ПЛАСТИНАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

© 2000 г. И. А. Бородина, С. Г. Джоши*, Б. Д. Зайцев*, И. Е. Кузнецова

Институт радиотехники и электроники РАН

410019 Саратов, ул. Зеленая, 38

E-mail: kazakov@sfire.saratov.su

*Marquette University, Milwaukee, WI 53201–1881, USA

Маркветский университет, Милуоки, США

Поступила в редакцию 28.09.98 г.

На примере ниобата лития теоретически проанализированы основные закономерности распространения антисимметричной A_0 и симметричной S_0 волн Лэмба, а также волны с поперечной горизонтальной поляризацией SH_0 , в тонких пьезоэлектрических пластинах. Полученные результаты могут быть полезными при разработке конкретных устройств обработки сигналов и датчиков физических величин, а также химических и биологических приборов на основе акустических волн в пластинах ниобата лития.

В последние годы растет интерес исследователей к акустическим волнам, распространяющимся в тонких пьезоэлектрических пластинах [1–7]. Это связано с возможностью разработки разнообразных датчиков и устройств обработки сигналов, обладающих уникальными возможностями [1–4]. Как известно, одним из наиболее широко используемых в акустоэлектронике материалов является ниобат лития, который характеризуется сильным пьезоэлектрическим эффектом. Свойства объемных и поверхностных акустических волн в этом материале изучены довольно подробно. Что касается характеристик акустических волн в пластине, рассматриваемой как одномерный волновод, то существуют лишь отрывочные данные по отдельным типам волн для частных ориентаций и направлений распространения [5–9]. Приведенные в этих работах данные показывают перспективность практического использования таких волн, но не дают полной картины явления, позволяющей сделать определенные выводы относительно закономерностей их распространения. Кроме того, существующая информация является недостаточной для разработки конкретных акустоэлектронных устройств. Например, обнаружено и экспериментально подтверждено, что квадрат коэффициента электрохимической связи (K^2) для волны с поперечной горизонтальной поляризацией (SH_0) в Y - X пластинах ниобата лития может достигать 36% [8, 9]. Но в то же время отсутствуют данные по характеристикам других фундаментальных мод: антисимметричной A_0 и симметричной S_0 волн Лэмба. Эти моды также не имеют частоты отсечки, т.е. могут существовать при любых частотах и толщинах пластины и служить источником помех. Поэтому полная информация о всех указанных выше волнах позво-

лила бы сделать сознательный выбор ориентации пластины, которая обеспечивает максимальное возбуждение лишь желаемого типа волны. В связи с этим настоящая статья посвящена теоретическому исследованию основных закономерностей распространения A_0 , SH_0 и S_0 волн в пьезоэлектрических пластинах на примере ниобата лития.

Поставленная задача решалась общепринятым методом [5], основанном на применении стандартных уравнений и граничных условий. Используемые в работе материальные константы для ниобата лития приведены в [10]. Были найдены скорость и коэффициент электромеханической связи для волн A_0 , SH_0 и S_0 в зависимости от направления распространения для основных кристаллографических срезов X , Y и Z . Квадрат коэффициента электромеханической связи для каждой моды определялся стандартным образом, а именно: $K^2 = 2(V - V_m)/V$, где V и V_m – скорость волны в неметаллизированной пластине и в пластине с одной металлизированной стороной, соответственно. Исходя из практических соображений нежелательности появления высших типов волн, толщина h исследованных пластин не превышала половину длины волны λ для анализируемой моды; т.е. всегда выполнялось условие $h/\lambda \leq 0.5$.

Следует отметить некоторые особенности проведенного теоретического анализа:

1) впервые учитывается несовпадение величины h/λ для металлизированной и неметаллизированной пластины, связанное с изменением скорости волны. Очевидно, что такая поправка тем существенней, чем больше дисперсия волны. Например, для антисимметричной моды подобный учет приводил к уточнению величины квадрата коэффициента электромеханической связи на 40%;

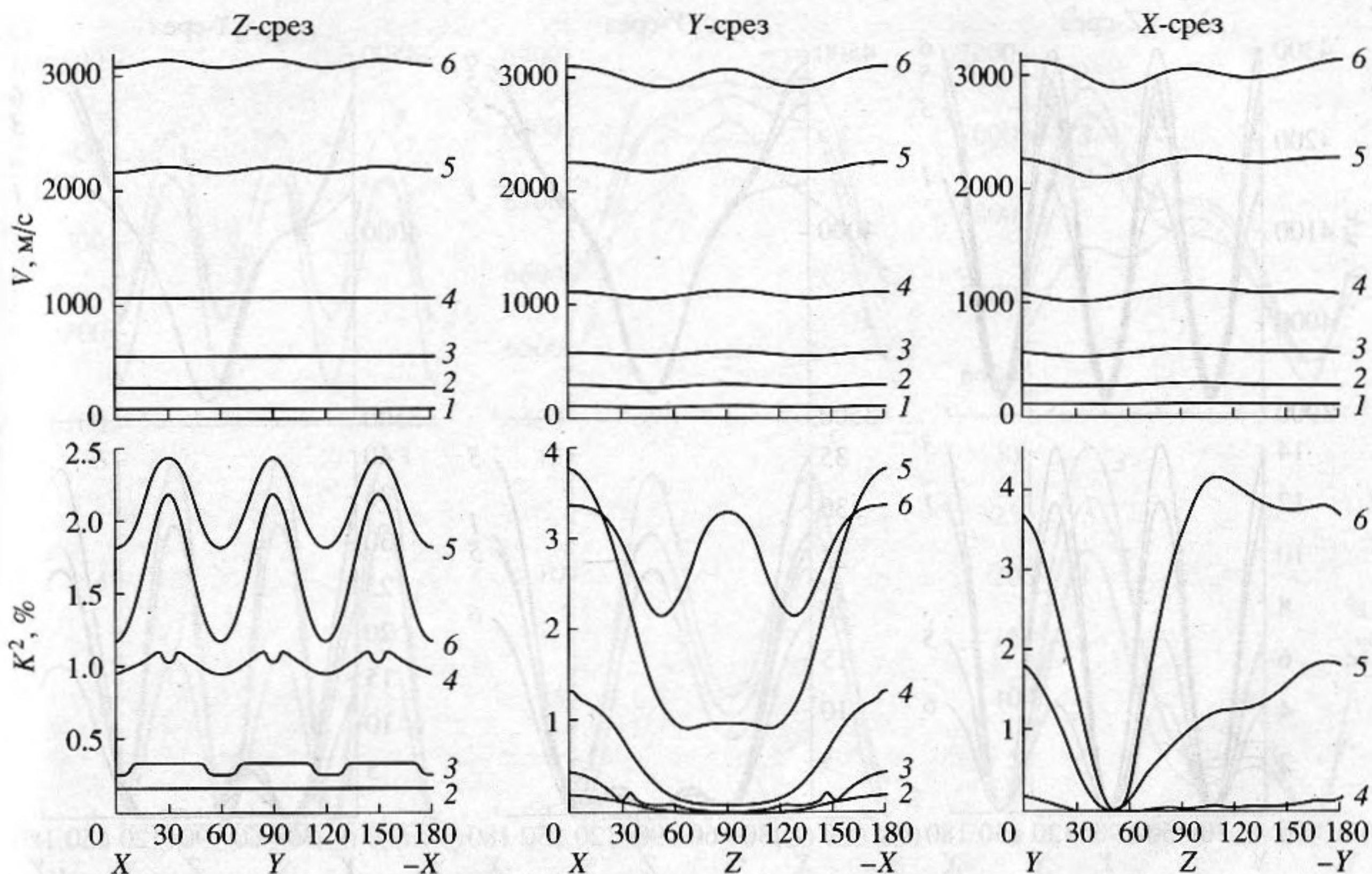


Рис. 1. Зависимость скорости (верхний ряд) и квадрата коэффициента электромеханической связи (нижний ряд) от направления распространения для антисимметричной моды A_0 в ниобате лития. $h/\lambda = 0.01$ (1), 0.025 (2), 0.05 (3), 0.1 (4), 0.25 (5) и 0.5 (6).

2) для ряда направлений в диапазоне величин $0.25 \leq h/\lambda \leq 0.5$ существование высших типов волн с близкими значениями скоростей сильно затрудняет поиск значений V и V_m , соответствующих одной и той же фундаментальной моде. При этом структура волны не может служить надежным критерием для выделения исследуемой моды и предотвращения перескока с одной дисперсионной ветви на другую. Это связано с тем, что в ряде случаев металлизация пластины приводит к существенному изменению структуры волны. В подобных ситуациях проводился анализ пьезоэлектрической пластины с идеально проводящим электродом, расположенным на некотором расстоянии от нее. Изменяя зазор между пластиной и электродом в пределах $(0-10)\lambda$ мы осуществляли плавный переход от металлизированного состояния до неметаллизированного. Это позволяло проследить за эволюцией анализируемой моды и предотвратить нежелательные перескоки.

Полученные значения скорости и квадрата коэффициента электромеханической связи в зависимости от направления распространения для A_0 , SH_0 и S_0 волн представлены на рис. 1, 2 и 3 соответственно. Анализ приведенных зависимостей позволил выявить следующие особенности исследуемых волн.

Для A_0 волны (рис. 1) скорость антисимметричной моды практически не зависит от направления распространения и кристаллографического среза, а в значительной мере определяется нормированной толщиной h/λ , т.е. данная волна обладает ярко выраженной дисперсией. Это связано с преимущественной ориентацией механического смещения вдоль нормали к поверхности пластины и отсутствием упругой реакции со стороны вакуума. С другой стороны, пьезоактивность этой волны характеризуется сильной анизотропией и K^2 , как функция толщины пластины, имеет оптимум, который лежит в диапазоне $h/\lambda = 0.2-0.8$. При этом максимальные значения квадрата коэффициента электромеханической связи для антисимметричной моды ($\sim 4\%$) и для поверхностной волны Рэлея ($\sim 5\%$) в ниобате лития оказываются соизмеримыми. Нетрудно заметить, что пьезоактивность волны незначительно увеличивает степень дисперсии.

Для SH_0 волны (рис. 2) как скорость, так и коэффициент электромеханической связи характеризуются сильной анизотропией. Видно, что дисперсия этой волны определяется степенью ее пьезоактивности, т.е. дисперсия максимальна там, где максимален коэффициент электромеханической связи. Для непьезоактивных направле-

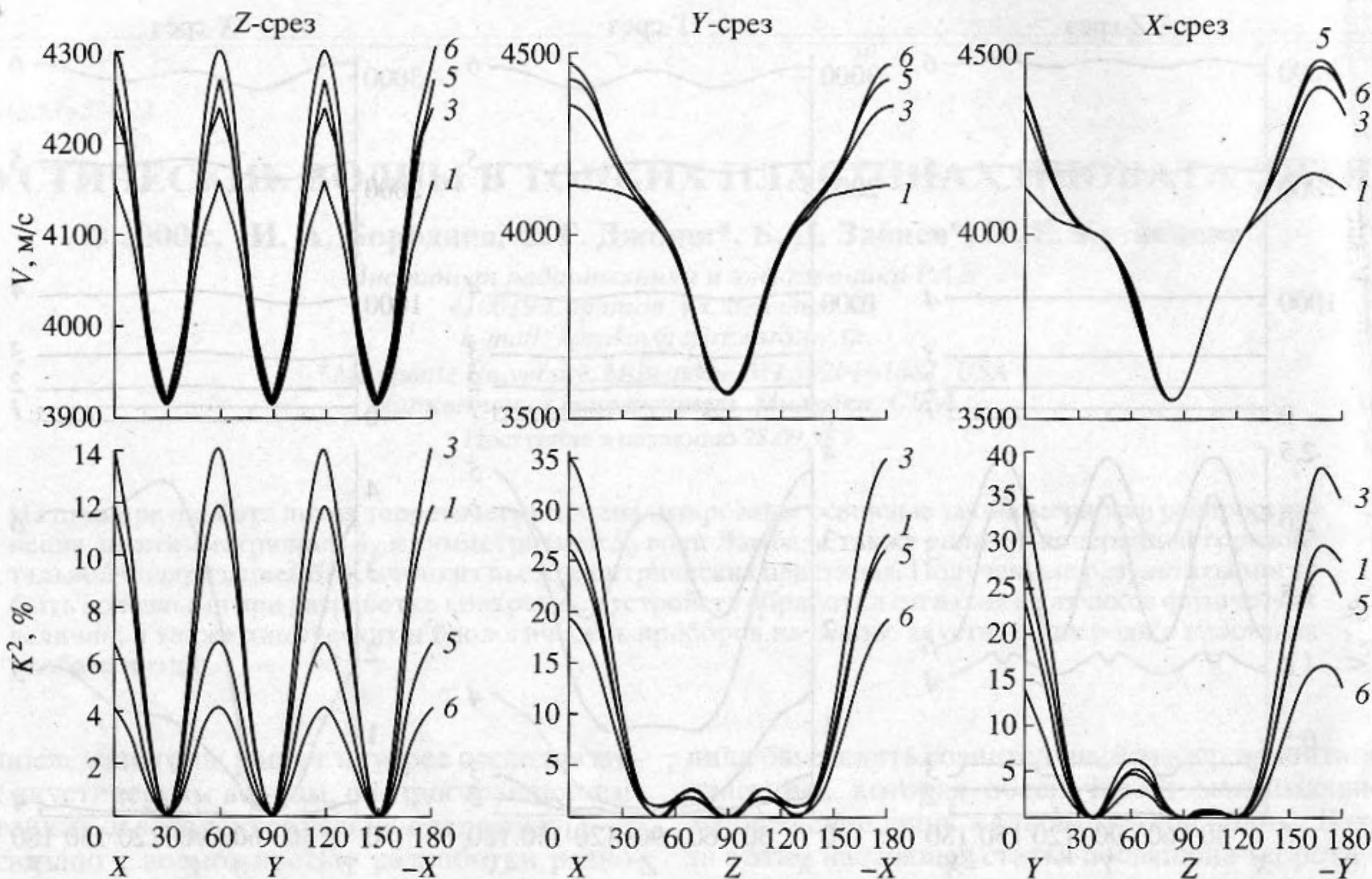


Рис. 2. Зависимость скорости (верхний ряд) и квадрата коэффициента электромеханической связи (нижний ряд) от направления распространения для моды с горизонтальной поперечной поляризацией SH_0 в ниобате лития. $h/\lambda = 0.01$ (1), 0.025 (2), 0.05 (3), 0.1 (4), 0.25 (5) и 0.5 (6).

ний дисперсия вообще отсутствует. Этот вывод подтверждается тем, что электрические граничные условия для SH_0 волны играют более существенную роль, чем механические [8, 9]. Непьезоактивные направления распространения SH_0 волны соответствуют направлениям существования особых объемных волн [11], для которых механические напряжения в плоскости, определяемой вектором поляризации и волновым вектором, всегда равны нулю. Поэтому наличие границ, параллельных этой плоскости, не оказывает никакого влияния ни на скорость, ни на структуру распространяющейся волны. Во всех случаях при увеличении толщины пластины коэффициент электромеханической связи SH_0 волны растет, достигает максимума при $h/\lambda = 0.05-0.15$, затем спадает. Для ряда срезов и направлений распространения величина квадрата коэффициента электромеханической связи превышает 30%, что почти на порядок больше чем для антисимметричной моды A_0 и поверхностной волны в ниобате лития.

Для S_0 волны (рис. 3) скорость и коэффициент электромеханической связи также сильно зависят от направления распространения и среза пластины. Аналогично SH_0 волне дисперсии симметричной моды определяется степенью ее пьезоактивности, и дисперсия максимальна там, где максима-

лен коэффициент электромеханической связи. Но при этом, в отличие от SH_0 волны, дисперсия не исчезает для непьезоактивных направлений распространения, т.е. электрические и механические граничные условия для симметричной волны имеют примерно соизмеримый вклад. Что касается зависимости коэффициента электромеханической связи от толщины пластины, то она имеет такой же характер, как для A_0 и SH_0 волн, и максимум K^2 лежит в интервале $h/\lambda = 0.05-0.25$. Для X-среза и направления распространения $Y + 35^\circ$ величина квадрата коэффициента электромеханической связи достигает 30%.

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить основные закономерности распространения фундаментальных волн A_0 , SH_0 и S_0 типов в тонких пьезоэлектрических пластинах. При этом известные в литературе данные для частных срезов и направлений распространения некоторых типов волн в пластинах находятся в хорошем соответствии с полученными в настоящей работе. Данные результатов могут быть полезными при разработке конкретных устройств обработки сигналов и датчиков физических величин, а также химических и биологических приборов на основе акустических волн в пластинах ниобата лития.

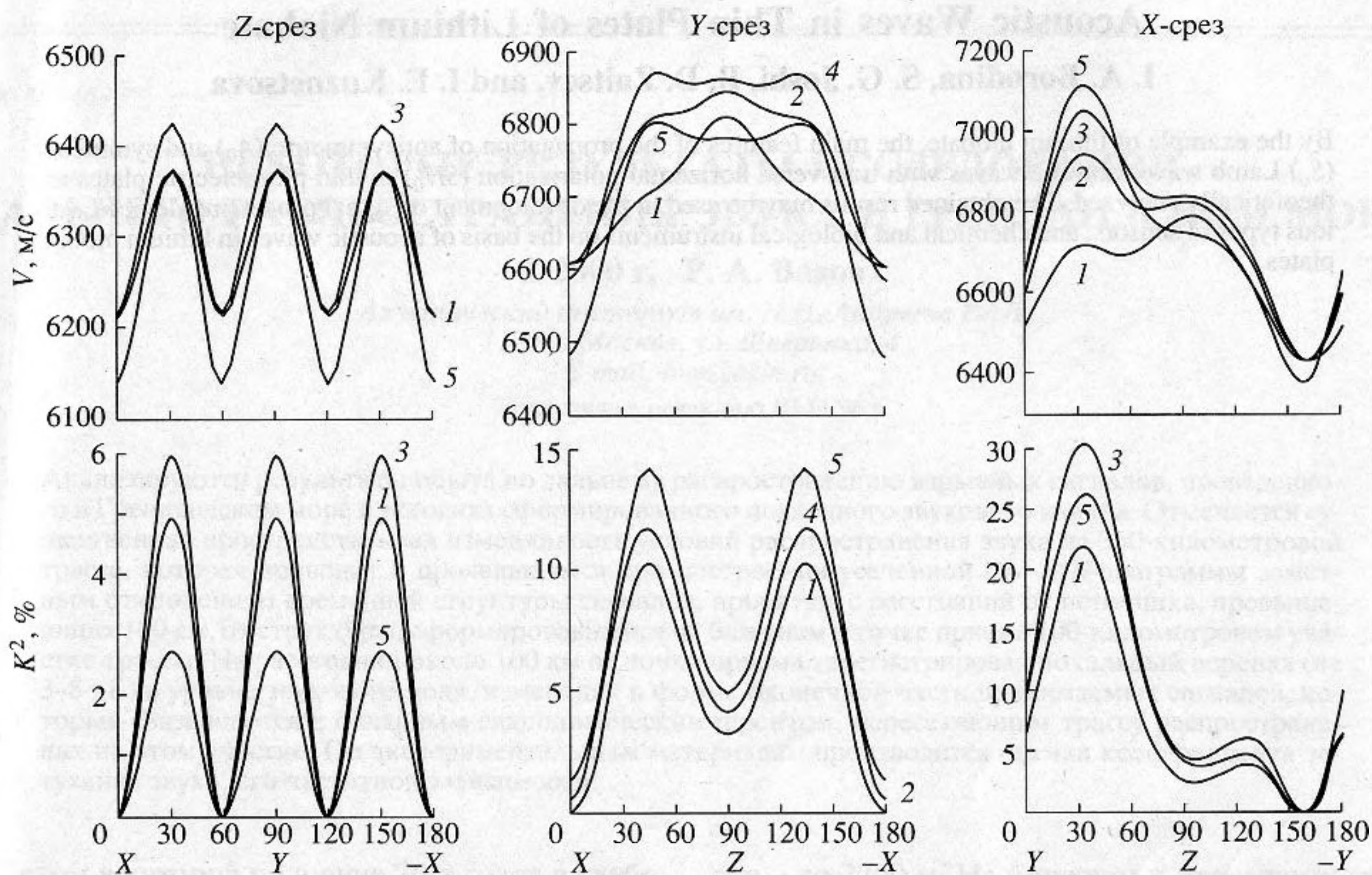


Рис. 3. Зависимость скорости (верхний ряд) и квадрата коэффициента электромеханической связи (нижний ряд) от направления распространения для симметричной моды S_0 в ниобате лития. $h/\lambda = 0.01$ (1), 0.025 (2), 0.05 (3), 0.1 (4) и 0.25 (5).

Работа профинансирована Федеральной целевой программой "Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы" по проекту 696.3 и грантом NSF (National Scientific Foundation of USA).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wenzel S.W., White R.M. A multisensor employing an ultrasonic Lamb-wave oscillator // IEEE Trans. Electron. Devices. 1988. V. 35. P. 735–743.
2. Giesler T., Meyer J. Electrostatic excitation and capacitive detection of flexural plate waves // Sensors and Actuators. 1993. V. A36. P. 113–119.
3. Vellekoop M.J., Lubking G.W., Sarro P.M., Venema A. A multi-purpose smart acoustic Lamb wave sensor system // Sensors and Actuators. 1994. V. A43. P. 175–180.
4. Teston F., Feuilard G., Tessier L., Lethiecq M. Mass sensitivity of acoustic plate mode in liquids // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1998. V. 45. № 5. P. 1266–1272.
5. Joshi S.G., Jin Y. Propagation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. № 8. P. 4113–4120.
6. Jin Y., Joshi S.G. Coupling of interdigital transducer to ultrasonic Lamb waves // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. № 17. P. 1830–1832.
7. Jin Y., Joshi S.G. Propagation of quasi-shear horizontal acoustic wave in Z–X lithium niobate plates // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 1996. V. 43. № 3. P. 491–494.
8. Zaitsev B.D., Joshi S.G., Kuznetsova I.E. Investigation of quasi-shear horizontal acoustic waves in thin plates of lithium niobate // Smart Materials and Structures. 1997. V. 6. P. 739–744.
9. Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G. Theoretical and experimental investigation of QSH (quasi shear horizontal) acoustic waves // Ultrasonics. 1998. V. 36. № 1–5. P. 31–35.
10. Kovacs G., Anhorn M., Engan H.E., Visintini G., Ruppel C.C.W. Improved material constants for $LiNbO_3$ and $LiTaO_3$ // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1990. V. 1. P. 435–438.
11. Альшиц В.И., Любимов В.Н., Науменко Н.Ф., Переломова Н.В., Шувалов А.Л. Особые объемные упругие волны в кристаллах различной симметрии // Кристаллография. 1985. Т. 30. № 2. С. 213–219.

Acoustic Waves in Thin Plates of Lithium Niobate

I. A. Borodina, S. G. Joshi, B. D. Zaitsev, and I. E. Kuznetsova

By the example of lithium niobate, the main features of the propagation of antisymmetric (A_0) and symmetric (S_0) Lamb waves and the waves with transverse horizontal polarization (SH_0) in thin piezoelectric plates are theoretically analyzed. The obtained results may be used in the development of signal processing devices, various types of sensors, and chemical and biological instruments on the basis of acoustic waves in lithium niobate plates.