

УДК 541.183.5+548.571

НОВЫЙ ТИП АКУСТИЧЕСКИХ МОД КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН: КВАЗИПРОДОЛЬНЫЕ НОРМАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ

© 2004 г. **И. В. Анисимкин***

Институт радиотехники и электроники РАН, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

E-mail: anis@mail.cplire.ru

Поступила в редакцию 30.12.2003 г.

На примере пластин кристаллического кварца *ST*-среза описывается особый тип акустических колебаний семейства нормальных мод, которые, распространяясь вдоль оси *x* со скоростью близкой или равной скорости продольной объемной волны в том же направлении, имеют продольную компоненту упругого смещения по всей толщине пластины как минимум на 2 порядка больше, чем две другие компоненты (сдвигово-горизонтальная и сдвигово-вертикальная). Область существования квазипродольной моды – набор ограниченных зон “разрешенных” толщин пластины H/λ (H – толщина, λ – длина волны), разделенных “запрещенными” зонами обычных мод Лэмба. Близость (совпадение) скорости квазипродольной моды в пластине и скорости продольной объемной волны в неограниченном кристалле – необходимое, но не достаточное условие существования мод такого типа в *ST*,*x*-кварце.

Изучение спектра акустических колебаний твердотельных структур различной геометрии, материального состава, анизотропии и пьезоэффекта является одной из важнейших задач физической акустики. На сегодняшний день найдено около 10 типов акустических колебаний [1], которые могут существовать в изотропных телах, монокристаллах, пьезокристаллах, слоистых средах, периодических (брэгговских) структурах и тонких пластинах со свободными границами: это – объемные (продольные и поперечные), поверхностные (рэлеевские, сдвигово-горизонтальные, электроакустические Гуляева-Блюстейна, Сезава и Лява), утекающие (“быстрые” и “медленные” псевдоповерхностные), нормальные (Лэмба, сдвигово-горизонтальные) и пограничные (Стоунли) волны. При определенных условиях один тип волны может плавно трансформироваться в другой и обратно. Например, при изменении направления распространения на свободной поверхности пьезоэлектрического кристалла волна Рэлея с эллиптической поляризацией может вырождаться в линейно поляризованную волну Гуляева-Блюстейна, а псевдоповерхностная волна – в двухпарциальную рэлеевскую или однопарциальную продольную; при увеличении толщины пластины моды Лэмба низких порядков переходят в волну Рэлея, а моды сдвигово-горизонтальной поляризации *SH* – в волну той же по-

ляризации, распространяющуюся в объеме твердого тела [1]. Условия взаимной трансформации волн строго специфичны и требуют определенного сочетания упругих, пьезоэлектрических и иных свойств среды распространения, ее кристаллографической ориентации [2].

Автором уже сообщалось об обнаружении нового типа акустических волн, относящихся к семейству нормальных акустических мод [3]. Настоящая работа посвящена их подробному исследованию. В отличие от ранее известных мод *SH*- и Лэмба, новые моды не являются ни эллиптическими, ни сдвигово-горизонтальными – они поляризованы квазипродольно, то есть преимущественно по направлению своего распространения. Такие моды представляют собой вырождение отдельных мод Лэмба при сближении их скорости со скоростью продольной объемной волны в том же направлении неограниченного монокристалла.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Как известно, нормальные моды в тонких пластинах распространяются с дисперсией. Их скорость v_n (n – порядок моды) зависит от отношения толщины пластины H к длине волны λ [1]. Нами были численно рассчитаны дисперсионные кривые первых 13 мод Лэмба вдоль оси *x* *ST*-кварца. Расчет проводился методом приближения многослойных матриц с помощью программы университета МкГилл (Канада) [4] и материальных констант [5]. Результаты расчета представлены на рис. 1. На том же рисунке пунктиром показаны

* Данная работа оказалась последней, написанной Иваном Владимировичем Анисимкиным незадолго до трагической гибели утром 9 декабря 2003 г. в результате террористического акта в Москве.

скорости чисто продольной v_L , квази-сдвигово-горизонтальной v_{QSH} и квази-сдвигово-вертикальной v_{QSV} объемных волн, которые распространяются в том же направлении неограниченного кристалла и имеют потоки энергии, сонаправленные волновому вектору. Из рис. 1 видно, что при определенных толщинах пластины H/λ дисперсионные кривые нормальных мод высокого порядка сравниваются со скоростью продольной объемной волны $v_L = 5744.43$ м/с, а у некоторых кривых имеются плоские участки (зоны слабой дисперсии) и участки с немонотонным убыванием скорости (изгибы). Аналогичные особенности дисперсии для мод Лэмба наблюдались ранее в пластинах кубических [6, 7] и тетрагональных [8] кристаллов, однако анализ упругих смещений нормальных мод на разных участках дисперсионных кривых при этом не проводился.

Такой анализ был выполнен в настоящей работе для пластин кварца, относящегося к кристаллам тригональной сингонии. Анализ показал, что по мере изменения относительной толщины пластины H/λ упругая поляризация всех мод претерпевает очень значительные изменения: парциальные компоненты результирующего смещения этих мод увеличиваются, уменьшаются и даже полностью исчезают по всей толщине пластины; изменение поляризации мод коррелирует с отличием скорости их распространения v_n от скоростей трех объемных волн v_L, v_{QSH}, v_{QSV} в том же направлении; в областях слабой дисперсии, где скорости мод v_n приближаются к скорости продольной объемной волны v_L в неограниченном пьезокристалле, некоторые из мод высокого порядка трансформируются из трехпарциальных эллиптических в линейно поляризованные продольные, для которых продольная компонента смещения U_1 становится доминирующей над двумя другими компонентами (сдвигово-горизонтальной U_2 и сдвигово-вертикальной U_3).

На рис. 2 показан характер смещений нормальной моды Лэмба 2-го порядка по сечению пластины при ее толщинах $H/\lambda = 0.01, 1.1$ и 0.65 . При $H/\lambda = 0.01$ дисперсионная кривая моды имеет первый плоский участок (рис. 1), на котором ее скорость $v_2 = 5703.2$ м/с почти совпадает со скоростью продольной объемной волны $v_L = 5744.43$ м/с, а продольная компонента смещения U_1 на 3–4 порядка превышает компоненты U_2 и U_3 по всей толщине пластины (рис. 2а). Это означает, что данная мода представляет собой волну практически чисто продольной поляризации. Квазипродольный характер моды сохраняется в диапазоне толщин H/λ по крайней мере $\pm 10\%$ от указанной.

Совсем по-другому выглядит поляризация той же моды при толщине пластины $H/\lambda = 1.1$, когда дисперсионная кривая выходит на второй плоский участок (рис. 1), а ее скорость приближается

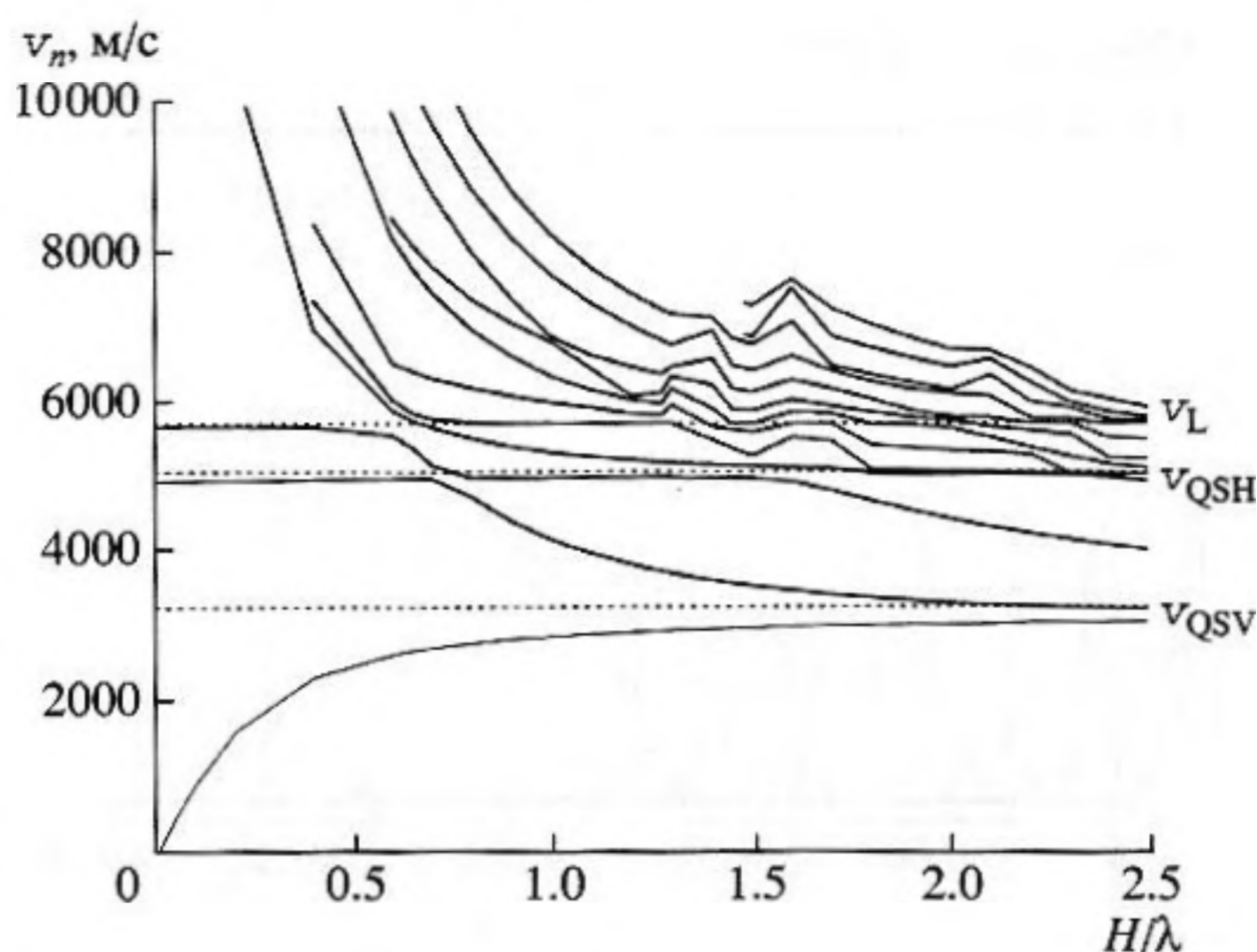


Рис. 1. Дисперсионные кривые первых 13-ти мод Лэмба в пластине кварца ST,x -среза.

к скорости v_{QSH} высокоскоростной объемной волны сдвигово-горизонтальной поляризации. В этом случае доминирующей становится сдвигово-горизонтальная компонента смещения U_2 , хотя полного вырождения моды в линейно поляризованную волну и не происходит, так как продольная U_1 и вертикальная U_3 компоненты на обеих поверхностях пластины имеют сопоставимую величину (рис. 2б).

Еще более сложный характер приобретает поляризация 2-й моды при толщине пластины $H/\lambda = 0.65$, когда ее скорость v_2 отличается как от скорости продольной v_L , так и от скоростей поперечных v_{QSH}, v_{QSV} объемных волн (рис. 1). В этом случае упругое смещение моды формируется сложением продольной U_1 и вертикальной U_3 составляющих, а ее сдвигово-горизонтальная компонента U_2 близка к нулю по всей толщине пластины (рис. 2в): мода становится эллиптически поляризованной в сагиттальной плоскости.

Аналогичные изменения упругой поляризации при изменении толщины пластины H/λ прослеживаются и для 6-й моды Лэмба. Так, вырождение этой моды в квазипродольную нормальную волну также наступает при совпадении скорости моды $v_6 = 5741.80$ м/с со скоростью продольной объемной волны $v_L = 5744.43$ м/с, но происходит это при других толщинах пластины – от $H/\lambda = 1.1433$ до $H/\lambda = 1.5$ (рис. 3).

Остальные 11 рассмотренных нами мод вырождения в квазипродольные не испытывают: они остаются двух- или трехпарциальными даже при равенстве скоростей v_n и v_L . Поэтому близость (равенство) этих скоростей не является достаточным условием существования нормальных

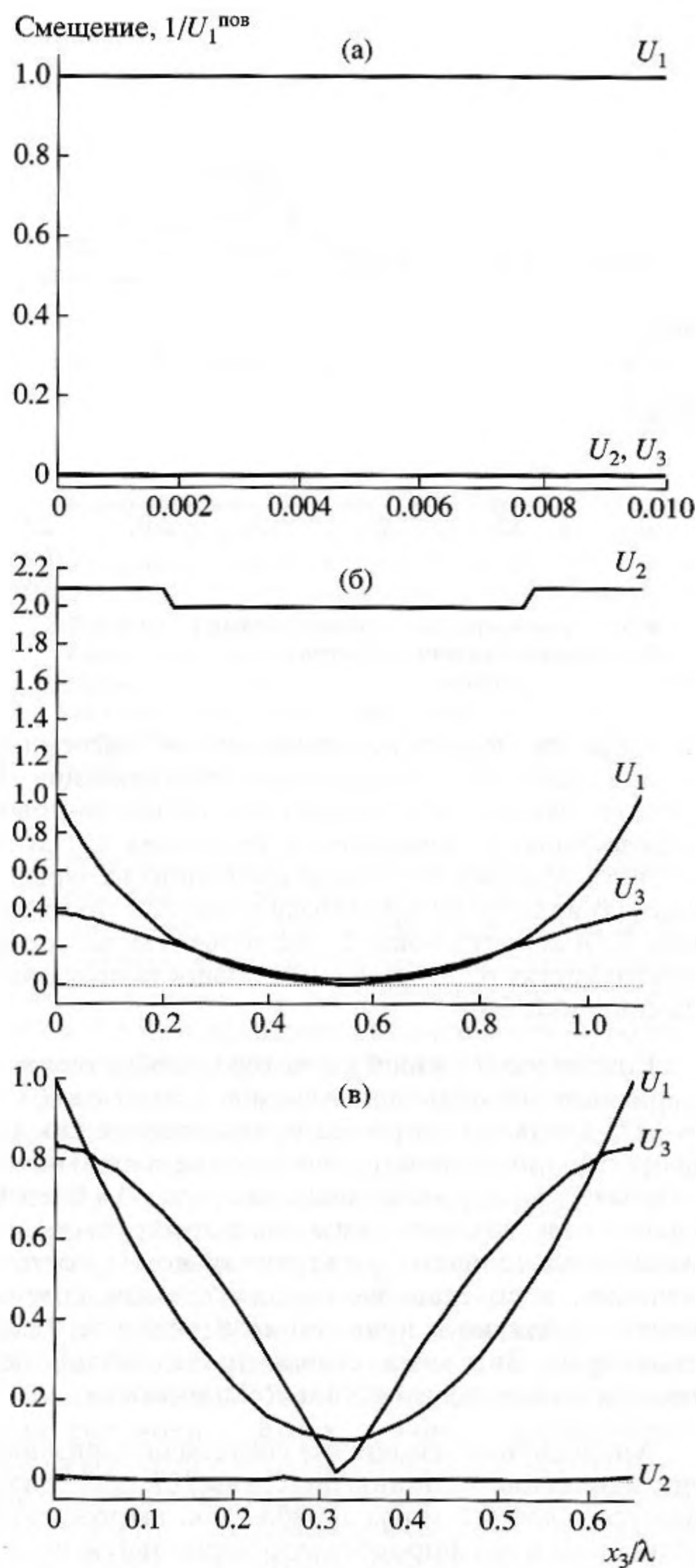


Рис. 2. Распределение компонент упругого смещения 2-й моды Лэмба по глубине x_3 пластины ST_x -кварца. $U_1^{\text{пов}}$ – амплитуда продольной компоненты моды на поверхности. Толщина пластины: а) $H/\lambda = 0.01$, б) $H/\lambda = 1.1$, в) $H/\lambda = 0.65$.

мод квазипродольного типа по крайней мере в кварце ST_x -среза.

Характеристики мод нового типа рассчитывались на примере 6-й моды Лэмба в кварцевой пла-

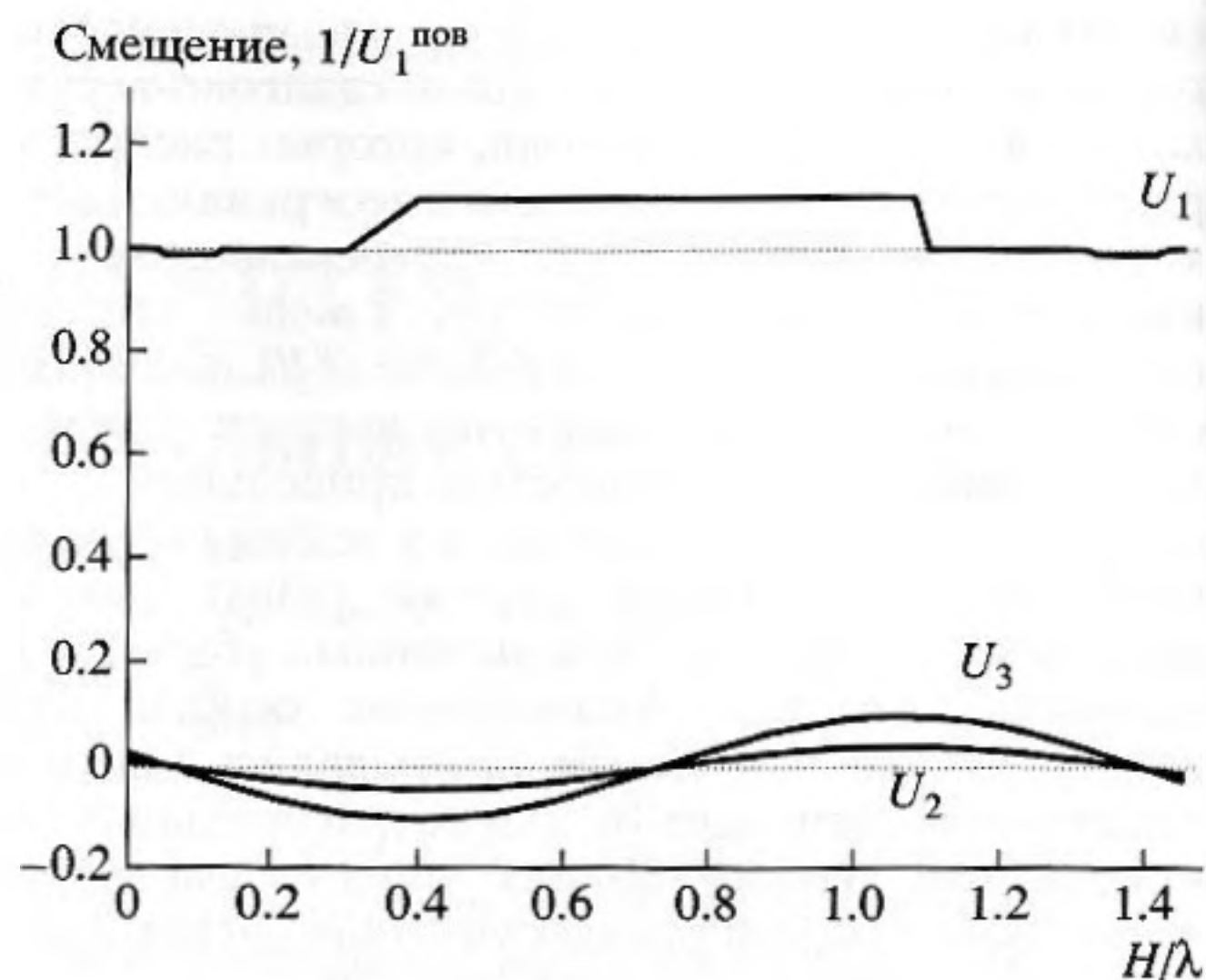


Рис. 3. Распределение компонент упругого смещения 6-й (квазипродольной) моды Лэмба, по глубине x_3 пластины ST_x -кварца. $U_1^{\text{пов}}$ – амплитуда продольной компоненты моды на поверхности. Толщина пластины: $H/\lambda = 1.4851$.

стине толщиной $H/\lambda = 1.4851$. Коэффициент электромеханической связи моды K^2 определялся аналогично поверхностным акустическим волнам: $K^2 = -2(v_m - v_0)/v_0$, где v_0 и v_m – скорости моды для пластины со свободными и одной металлизированной поверхностями, соответственно. Рассчитанное таким образом значение K_6^2 для этой моды составило 0.073%.

Температурный коэффициент задержки (ТКЗ) той же моды рассчитывался по методике [9] как полный дифференциал температурных изменений плотности, упругих модулей и линейных коэффициентов теплового расширения пластины вдоль направления распространения и по толщине пластины. Он оказался равным $20.2 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$, с высокой точностью совпав с ТКЗ продольной объемной волны ($19.7 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$), рассчитанным прямым дифференцированием скорости $v_L = (C_{11}/\rho)^{1/2}$ по температуре t : $\text{ТКЗ}_L = \alpha_x - (dv_L/dt) = -0.5[\alpha_x + (1/C_{11})(dC_{11}/dt)]$, где α_x – коэффициент линейного расширения вдоль оси x кварца, C_{11} – модуль упругости. Совпадение температурных характеристик квазипродольной моды в тонкой пластине, ограниченной двумя свободными поверхностями, и продольной объемной волны в неограниченном кристалле говорит, на наш взгляд, о почти полной идентичности обеих волн. Это совпадение, в частности, указывает на возможность представления скорости квазипродольной моды в виде $v_n = v_L = (C_{11}/\rho)^{1/2}$.

Чувствительность (относительные изменения скорости $\Delta v_n/v_n$) квазипродольной моды при из-

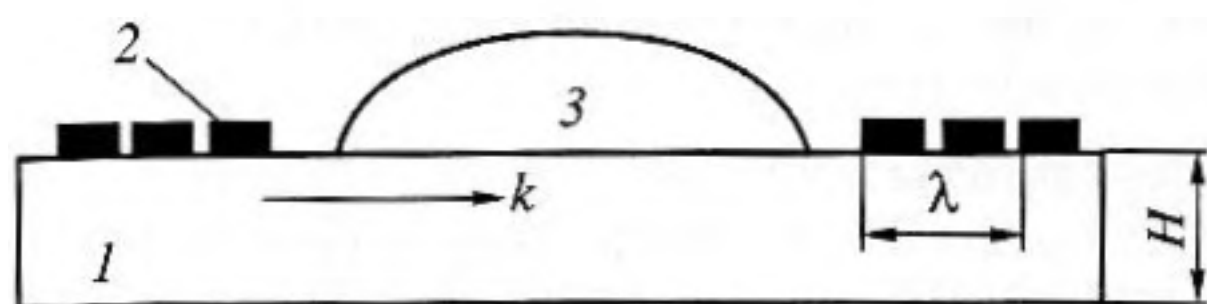


Рис. 4. Экспериментальный образец для исследования нормальных мод при действии жидкости. 1 – кварцевая пластина, 2 – встречно-штыревые преобразователи, 3 – капля тестируемой жидкости. H – толщина пластины, λ – период преобразователей (длина волны), k – волновой вектор.

менениях плотности ρ , упругих модулей C_{ij} и толщины H/λ пластины исследовалась по методике [9] путем последовательного варьирования одного из указанных параметров кварцевой пластины в пределах $\pm 1\%$ от его табличного значения. В отличие от обычных мод Лэмба [10] мода квазипродольного типа, как и продольная объемная волна, оказалась чувствительной лишь к вариациям плотности ρ и упругого модуля C_{11} , тем самым вновь указывая на возможность представления скорости моды в виде простого аналитического выражения $v_n = (C_{11}/\rho)^{1/2}$.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для экспериментального доказательства существования мод квазипродольного типа был изготовлен образец, схематически изображенный на рис. 4. Он представлял собой пластину кристаллического кварца ST-среза (ОАО “Гудвилл”, Александров, Россия) толщиной 0.3 ± 0.03 мм, оптически полированную с обеих сторон. На одной из поверхностей пластины располагалась пара встречно-штыревых преобразователей из Al/Cr толщиной 100 нм с числом пар штырей, равным 16. Период, апертура и расстояние между преобразователями равнялись 202 мкм, 12 мм и 26.2 мм, соответственно. Преобразователи ориентировались перпендикулярно оси x . Возбуждение мод производилось вдоль этой оси. Относительная толщина пластины составляла $H/\lambda = 1.485$: согласно расчетам, при этой толщине мода 6-го порядка трансформируется в квазипродольную нормальную волну. Измерялась скорость мод разных порядков. Исследовалась их упругая поляризация.

На рис. 5 показаны амплитудно-частотные характеристики мод Лэмба, наблюдаемые в эксперименте с помощью анализатора четырехполосников HP 8753 ES. Вертикальная ось на этом рисунке – амплитуда моды в децибеллах (цена деления – 10 дБ), горизонтальная ось – частотах в МГц (цена деления – 7.3 МГц). Благодаря узкой полосе пропускания преобразователей моды разных порядков в основном хорошо разрешались

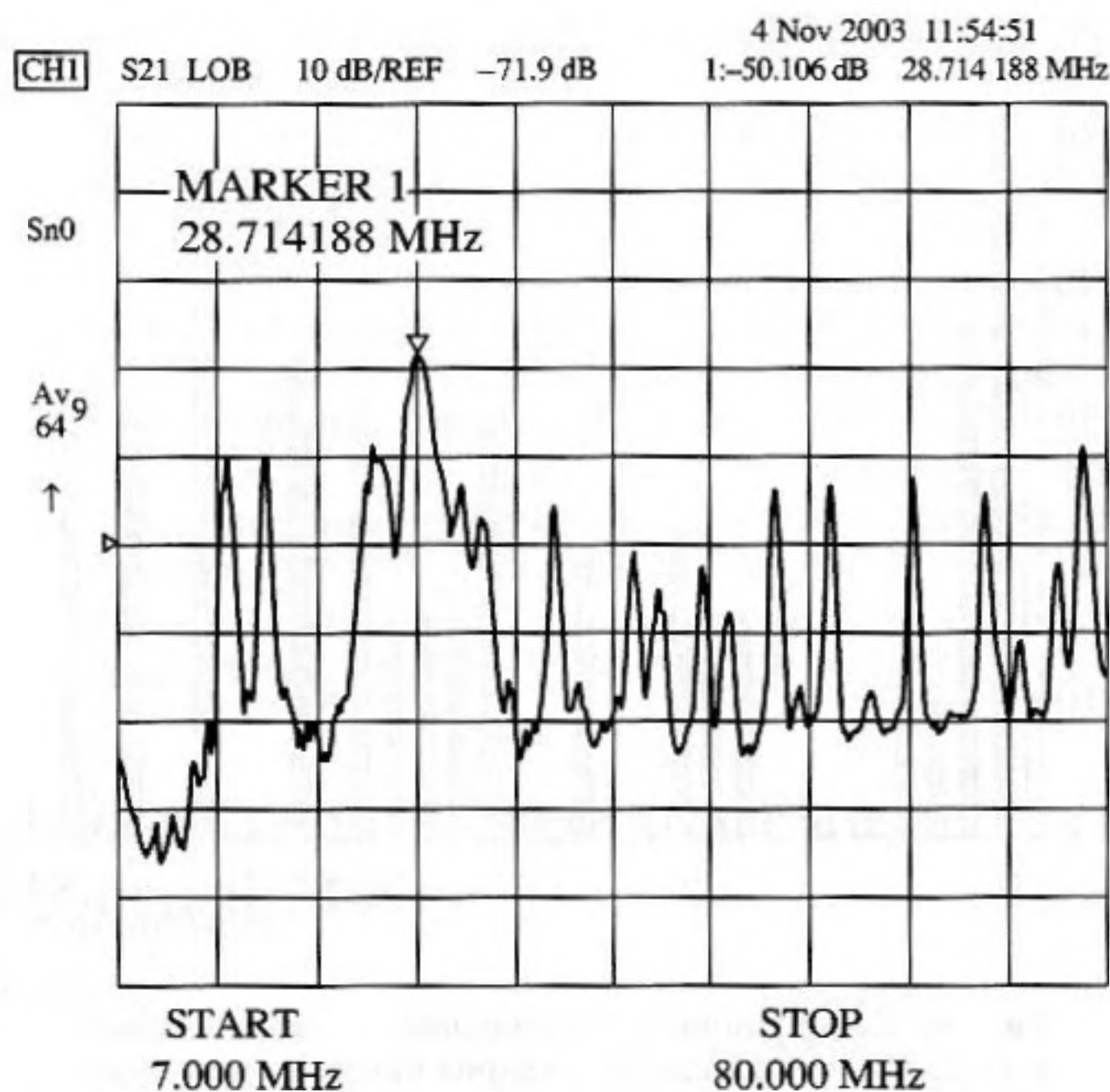


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики мод Лэмба в пластине ST,x-кварца со свободными поверхностями. Толщина пластины $H/\lambda = 1.485$. Метка “1” – квазипродольная мода.

между собой. Ряд мод, имеющих малый коэффициент электромеханической связи K^2 , в эксперименте не наблюдался и на анализаторе не фиксировался. Идентификация мод проводилась по скорости распространения v_n . Величина скорости определялась по центральной частоте моды f_{no} и периоду встречно-штыревых преобразователей λ : $v_n = f_{no} \lambda$. Экспериментальные значения скоростей в пределах $\pm 5\%$ совпадали с расчетными. Например, для 6-й (квазипродольной) моды (метка 1 на рис. 5) измеренное и рассчитанное значения скорости составили 5800 м/с и 5741.80 м/с, соответственно.

Поляризация нормальных мод на поверхности пластины определялась качественно из измерения поглощения под действием жидкостей одинаковой массы (378 мг), но разной сдвиговой вязкости η . В качестве тестируемых использовались деионизованная вода ($\rho = 1000$ кг/м³, $\eta = 1.003$ мПа с, скорость звука $v_{ж} = 1497$ м/с) и глицерин ($\rho = 1260$ кг/м³, $\eta = 1450$ мПа с, $v_{ж} = 1930$ м/с). Измерения проводились следующим образом. Вначале фиксировалась амплитуда каждой моды A_n^o , дБ в условиях полностью свободных поверхностей пластины (рис. 5). Затем на одну из поверхностей с помощью микродозатора наносилась капля деионизованной воды объемом 378 мкл или глицерина объемом 300 мкл. После этого амплитуды мод $A_n^ж$, дБ измерялись вновь. Разница в амплиту-

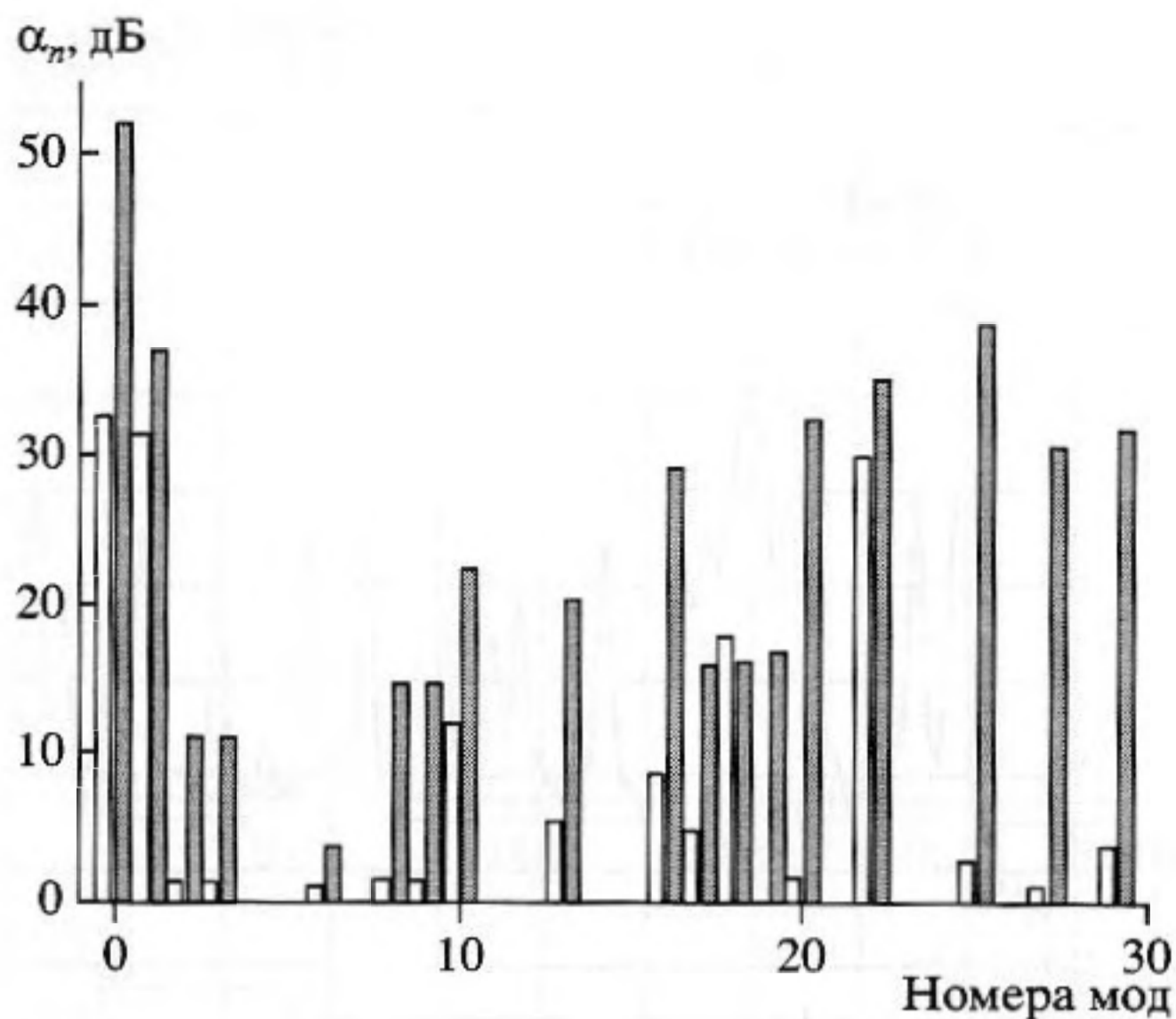


Рис. 6. Коэффициент поглощения α_n нормальных мод Лэмба в пластине ST_x -кварца при действии воды (\square) и глицерина (\blacksquare). Толщина пластины – $H/\lambda = 1.485$. Масса капель – 378 мг.

дах до и после нанесения жидкости $A_n^o - A_n^ж$ составляла искомым коэффициентом поглощения α_n для данной моды. Использование жидкостей с одинаковой массой уравнивало действие массовой нагрузки и делало возможным исследовать поглощение α_n только в зависимости от величины вязкости.

Методика определения упругой поляризации мод по поглощению α_n основывалась на двух экспериментальных фактах: известно [11], что наличие вертикальной компоненты смещения U_3 у волны, скорость v_n которой больше скорости звука в жидкости $v_ж$, приводит к переизлучению упругой энергии моды в жидкость и к ее сильному поглощению в направлении распространения. Поэтому слабое затухание нормальной моды под действием каждой из двух тестируемых жидкостей должно было указывать на малость вертикальной компоненты смещения U_3 такой моды на поверхности пластины; также известно [3, 12], что волны с большой сдвигово-горизонтальной компонентой смещения U_2 даже в отсутствие вертикальной компоненты U_3 испытывают сильное поглощение под действием жидкостей с большой динамической вязкостью. Поэтому слабое поглощение моды под действием глицерина должно было говорить о малости как вертикальной компоненты U_3 (нет переизлучения в жидкость), так и сдвигово-горизонтальной компоненты смещений U_2 на поверхности пластины (слабая чувствительность к вязкости). Таким образом, в наших экспериментах та мода, которая обладает слабым поглощением под действием и воды, и глицерина,

должна была соответствовать моде с преимущественно продольной поляризацией U_1 или квазипродольной моде.

Результаты измерений коэффициента поглощения α_n представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что из всех возбужденных мод только одна мода 6-го порядка испытывает малое поглощение и для воды, и для глицерина. Та же мода, согласно измерениям, близка по скорости (5800 м/с) к продольной объемной волне (5744.43 м/с). Поэтому, в соответствии с результатами расчетов и эксперимента, эта мода идентифицируется как квазипродольная.

ВЫВОДЫ

Численные расчеты и проведенные эксперименты показывают, что в тонких пластинах ST_x -кварца при некоторых относительных толщинах H/λ существует новый тип нормальных мод, которые распространяются со скоростью близкой или равной скорости объемной продольной волны v_L в том же направлении и имеют преимущественно продольную поляризацию. Область существования квазипродольных мод – ограниченные зоны “разрешенных” толщин пластины H/λ , разделенные “запрещенными” зонами обычных мод Лэмба. Близость (совпадение) скорости квазипродольной моды в пластине и скорости продольной объемной волны в неограниченном кристалле – необходимое, но не достаточное условие существования такой моды в ST_x -кварце. Развитием данной работы является поиск достаточного условия существования и комплексное теоретическое и экспериментальное исследование обнаруженной моды в изотропных, анизотропных и пьезоэлектрических материалах.

Работа выполнена при поддержке Президентского гранта “Научные Школы” № 1391.2003.2 и гранта Фонда Содействия Отечественной Науке за 2003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “Ультразвук. Маленькая энциклопедия”. Под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
2. Гуляев Ю.В. Поверхностные электрозвуковые волны в твердых телах // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. № 1. С. 68–69.
3. Anisimkin I.V. A novel Lamb-mode liquid sensor array // Proceedings of 2003 IEEE Ultrasonics Symposium, Honolulu, USA, 2003. P. 1326–1329.
4. Adler E.L., Slaboszewics J.K., Farnell G.W., Jen C.K. PC Software for SAW propagation in anisotropic multilayers // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1990. V. UFFC-37. P. 215–279.

5. *Slobodnik A.J.Jr., Conway E.D., Delmonico R.T.* Microwave Acoustic Handbook // AFCRL-TR-73-0597, 1973.
6. *Solie L.P., Auld B.A.* Elastic waves in free anisotropic plates // Journal of Acoustical Society of America. 1973. V. 54. № 1. P. 50–63.
7. *Fedosov V.I., Anisimkin V.I., Kotelyanskii I.M., Caliendo C., Verardi P., Verona E.* Analysis of acoustic waves in multilayers using compound matrices // Proceedings of 1996 IEEE Ultrasonics Symposium, San Antonio, USA, 1996. P. 207–212.
8. *Parygin V.N., Vershoubskiy A.V., Mozaev V.G., Weinacht M.* Prolonged acousto-optic interaction with Lamb waves in crystalline plates // Ultrasonics. 2000. V. 38. P. 594–597.
9. *Анисимкин И.В.* Сенсорные свойства нормальных мод колебаний пластины кварца // Акуст. журн. 2003. Т. 50. № 1. С. 1–7.
10. *Anisimkin I.V., Hickernell F., Verona E.* A novel acoustic sensor for multi-component analysis of gases and liquids // Proceedings of 2002 IEEE Ultrasonic Symposium, Munich, Germany, 2002. P. 437–440.
11. *Martin B.A., Wenzel S.W., White R.H.* Viscosity and density sensing with ultrasonic plate waves // Sensors & Actuators. 1990. V. A21-A23. P. 704–708.
12. *Ricco A.J., Martin S.J.* Acoustic viscosity sensor // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. № 21. P. 1474–1476.

A Type of Acoustic Modes of Vibration of Thin Piezoelectric Plates: Quasi-Longitudinal Normal Modes

I. V. Anisimkin

Using ST-cut quartz crystal plates as an example, a new type of normal modes of acoustic vibrations is described. The modes propagate along the x axis with a velocity close or equal to that of longitudinal bulk waves propagating in the same direction and have a longitudinal component of elastic displacement no less than two orders of magnitude greater than the two other components (shear-horizontal and shear-vertical ones) throughout the whole plate thickness. The domain of existence of the quasi-longitudinal modes consists of a set of limited zones that contain the “allowed” values of the plate thickness H/λ (H is the plate thickness and λ is the wavelength) and are separated by “forbidden” zones corresponding to common Lamb modes. The closeness (or coincidence) of the velocities of a quasi-longitudinal mode in the plate and a longitudinal bulk wave in an unbounded crystal is a necessary but not sufficient condition for the existence of the aforementioned type of modes in ST_x quartz.