АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 12–15

УДК 541.183.5+548.571

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИНЧАТЫХ МОД КОЛЕБАНИЙ КВАРЦА

© 2002 г. И. В. Анисимкин, В. И. Анисимкин, Ю. В. Гуляев, Э. Верона*

Институт радиотехники и электроники РАН
103907 Москва, ул. Моховая 11
E-mail: ivanis@mail.cplire.ru
**Instituto di Acustica "O.M. Corbino" CNR, via del Fosso del Cavaliere, 00133, Rome, Italy*

Поступила в редакцию 12.04.2001 г.

Теоретически и экспериментально показано, что моды колебаний сдвиговой горизонтальной поляризации в кварцевой пластине обладают большим разнообразием температурных свойств, охватывающих отрицательные, нулевые и рекордно высокие положительные значения температурного коэффициента задержки вплоть до порядка 350×10^{-6}/°C. Зависимость этого коэффициента от номера моды обусловлена изменением парциальных вкладов в этот коэффициент 3-х модулей упругости – c_{12}, c_{14} и c_{44}.

Величина, знак и температурная зависимость температурного коэффициента задержки акустических волн (ТКЗ) в кристаллах играют важную роль в целом ряде применений. Для стабилизаторов частоты и узкополосных фильтров требуются малые ТКЗ, слабо меняющиеся в широком температурном диапазоне. Для температурных измерений в аналитической химии и при термокондуктометрическом детектировании газов этот коэффициент, напротив, должен быть максимально большим. Поэтому исследование температурных свойств акустических колебаний продолжает оставаться актуальной проблемой современной акустоэлектроники. Обычно требуемое значение ТКЗ обеспечивается выбором кристаллографического среза и направления распространения волны [1–12]. В данной работе показывается, что для акустических мод колебаний пластины величина, знак и температурная зависимость ТКЗ могут варьироваться выбором номера моды без изменения направления ее распространения и среза пластины.

Исследования проводились на примере мод колебаний сдвиговой горизонтальной поляризации SH в пластине ST, X + 90°-кварца (толщина H = 0.5 мм, частота f = 12.6–44.5 МГц). Одна поверхность пластины оптически полировалась, другая была шлифованной. Возбуждение и прием колебаний осуществлялся встречно-штыревыми преобразователями с 20-ю парами штырей из Cr/Au и периодом λ = 392 мкм. Расстояние между преобразователями составляло 24.1 мм. Исследуемая структура помещалась в термоизолированную камеру термостата MLW U10 с последовательно меняющейся температурой (точность ≤0.05°C). Исследования температурной чувствительности ПАВ проводились в фазовом формате с помощью анализатора четырехполюсников HP 8753 ES. Благодаря узкой полосе пропускания преобразователей и малой толщине пластины (H/λ = 1.2755) акустические моды разных порядков n хорошо разрешались между собой вплоть до n = 18 (рис. 1). В эксперименте измерялся относительный сдвиг фазы колебаний $\Delta\varphi/\varphi$ при изменении температуры t в диапазоне t = 2–92°C с шагом Δt = = 5–10°C. Величина ТКЗ для каждой моды определялась согласно соотношению ТКЗ = $(1/\Delta t)(\Delta\varphi/\varphi)$ при комнатной температуре (t = 20°C) и температурах нулевого и максимального ТКЗ. Для уменьшения влияния электромагнитной наводки на результаты измерений из рассмотрения исключались моды, амплитуды колебаний которых превышали наводку менее чем на 10 дБ. Достоверность экспериментальных результатов контролировалась с помощью тестового образца 128° Y,X–$LiNbO_3$, значение ТКЗ для рэлеевской волны в котором хорошо известно (72×10^6/°C).

Полученные результаты представлены на рис. 2–4. Из рис. 2 видно, что у мод разного порядка температурная зависимость их фазы $(\varphi - \varphi_0)/\varphi_0$ имеет различный характер: для первых мод эта зависимость является квази-кубической, для мод высшего порядка она близка к линейной. В соответствии с разным характером фазово-температурных зависимостей различными являются и температуры t, при которых кривые разных мод достигают своих экстремальных значений или наибольшего градиента, а значения ТКЗ = $(1/\Delta t)(\Delta\varphi/\varphi)$ соответственно обращаются в нуль или достигают максимума. В наших экспериментах максимальной температурной чувствительностью обладала мода 13-го порядка при $t \approx 47$°C. Значение ТКЗ этой моды составило $\approx 350 \times 10^{-6}$/°C, что намного выше аналогичных значений для объемной (-12×10^{-6}/°C) и

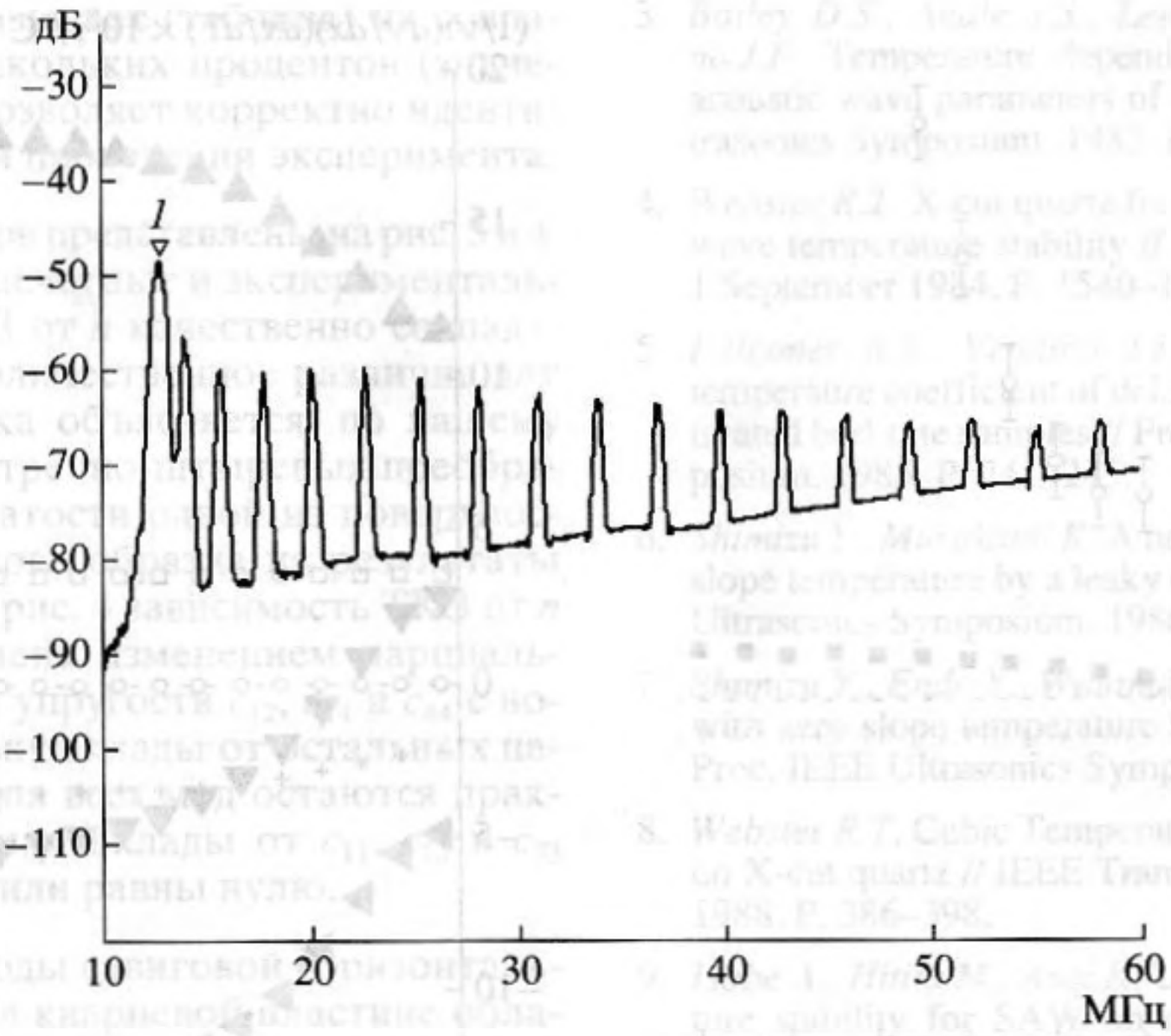

Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики SH-мод в кварцевой пластине ST, X + 90°-среза. Маркер *1* соответствует частоте 12.78125 МГц и амплитуде – 47.943 дБ.

приповерхностной (-34×10^{-6}/°C) волн той же поляризации в том же направлении кварца. Это значение также намного превышает ТКЗ волны Рэлея в $Bi_{12}GeO_{20}$ (120×10^{-6}/°C) и SH-мод в пластинах АТ-кварца с рифлениями (210×10^{-6}/°C) [13] – наиболее термочувствительных акустических колебаний, известных на сегодняшний день. При пороговом значении акустического отклика $\Delta\varphi/\varphi = 0.5 \times 10^{-6}$ и величине ТКЗ = 350×10^{-6}/°C пороговое значение температурных вариаций, детектируемых в наших экспериментах, составило $\Delta t = (1/\text{ТКЗ})(\Delta\varphi/\varphi \approx 0.001$°C.

Из рис. 3 видно, что величина ТКЗ быстро меняется с номером моды n: эта величина отрицательна для $n = 0$–4, равна нулю для $n = 5$–7 и положительна для $n \geq 8$.

Для обоснования этого изменения нами был проведен расчет парциальных вкладов в ТКЗ от изменений плотности ρ, упругих модулей c_{ij} и линейных коэффициентов теплового расширения вдоль направления распространения волны $\alpha_{\parallel}$ и толщины пластинки $\alpha_{\perp}$. Были рассмотрены моды первых 17-ти порядков, для каждой из которых фазовая скорость n-ой моды v_n представлялась в виде полного дифференциала по переменных $x = \rho$, c_{ij}, $\alpha_{\perp}$, $\alpha_{\parallel}$:

$$\text{ТКЗ}_n = \alpha_{\parallel} - \frac{1}{v_n}\frac{dv_n}{dT} = \alpha_{\parallel} - \frac{1}{v_n}\frac{\partial v_n}{\partial(H/\lambda)}\frac{\partial(H\lambda)}{\partial T} - \frac{1}{v_n}\frac{\partial v_n}{\partial\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T} - \frac{1}{v_n}\frac{\partial v_n}{\partial c_{ij}}\frac{\partial c_{ij}}{\partial T}. \quad (1)$$

Затем проводилось последовательное варьирование одного из параметров кварцевой пластины x в пределах ±1% относительно его значения при комнатной температуре (20°C), и рассчитывались значения скорости моды для комнатного (v_{no}) и

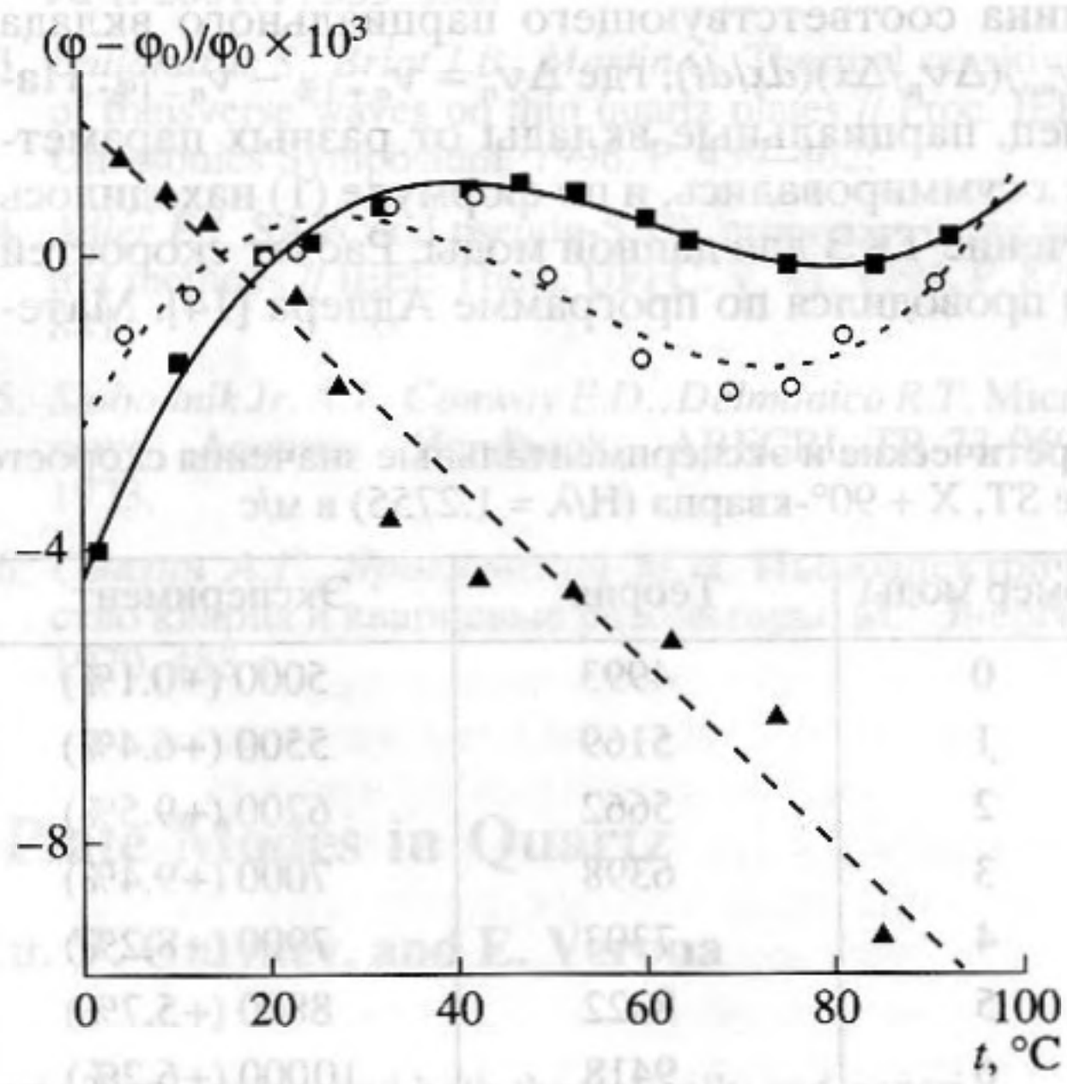

Рис. 2. Зависимость фазы колебаний некоторых мод в той же пластине от температуры. Точки – экспериментальные данные, линии – линейная и кубическая аппроксимации. ■ – $n = 0$, ○ – $n = 2$, ▲ – $n = 8$.

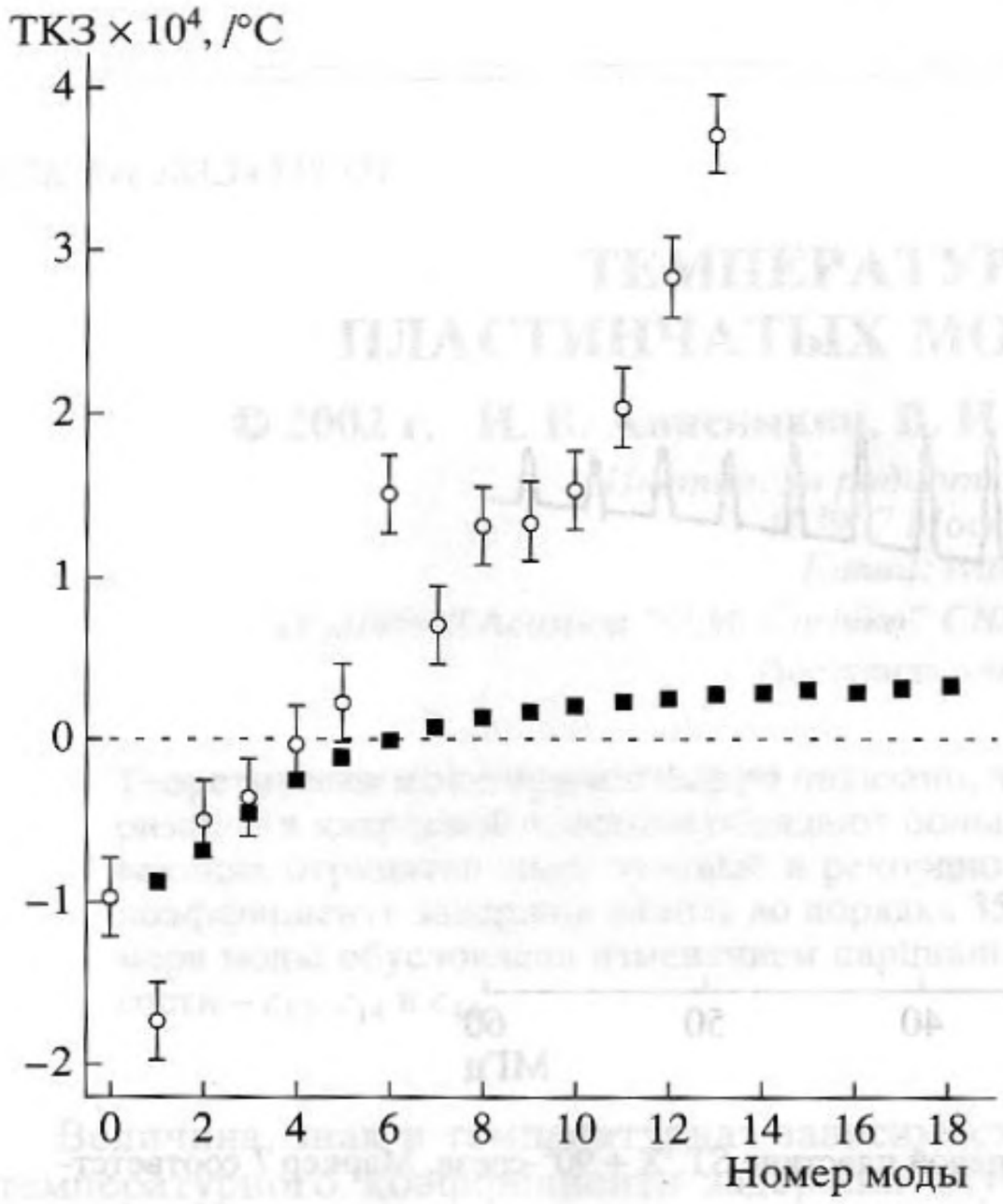

Рис. 3. Экспериментальные и теоретические значения ТКЗ для мод сдвиговой поляризации в ST, X + 90°–SiO_2 при комнатной температуре $t = 20°C$.
■ – теория, ○ – эксперимент.

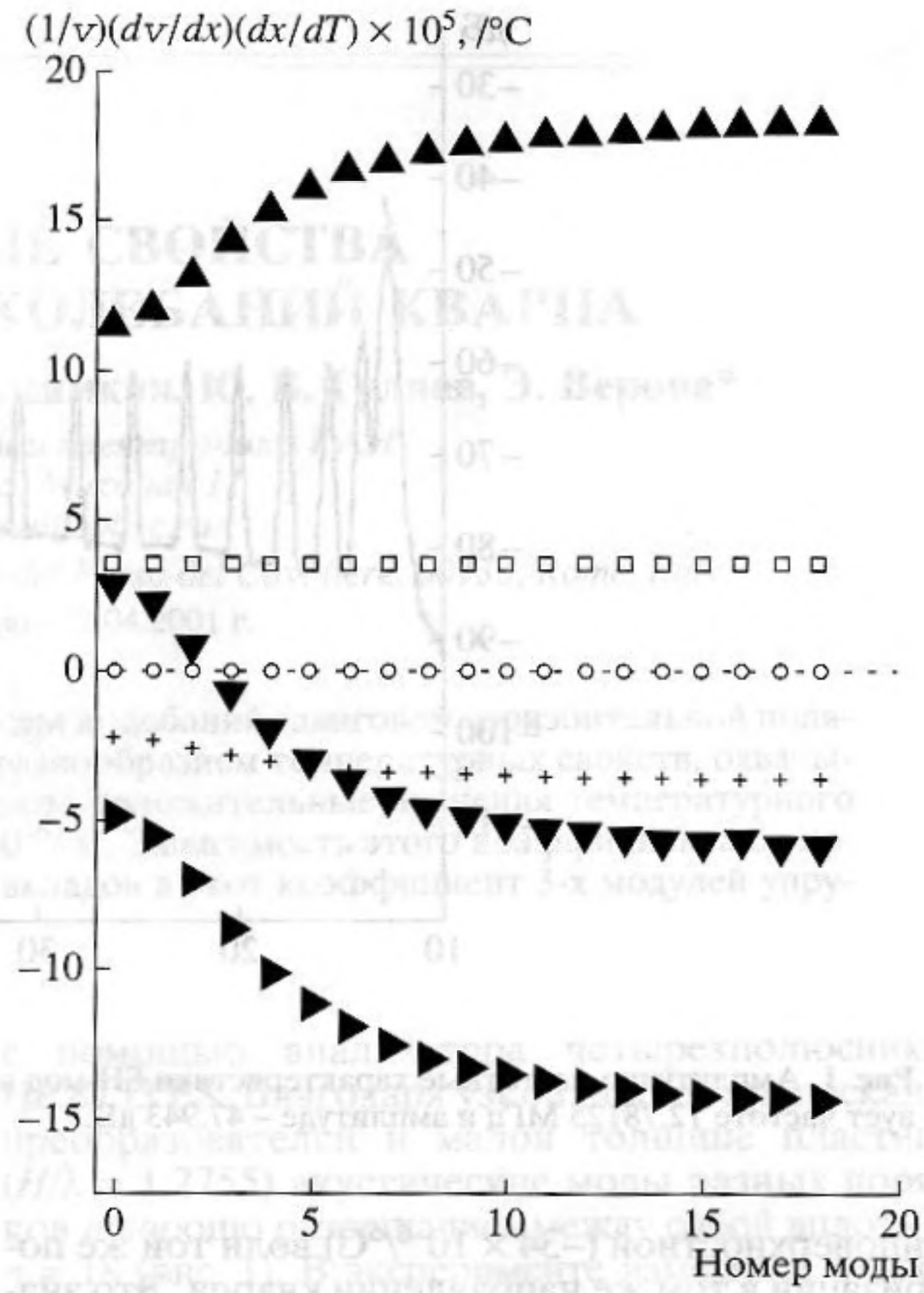

Рис. 4. Изменения парциальных вкладов в ТКЗ с номером моды при комнатной температуре $t = 20°C$.
□ – ρ, + – c_{11}, ▲ – c_{12}, ▼ – c_{14}, ► – c_{44}, ○ – H/λ.

двух крайних значений этого параметра ($v_{n-1\%}$ и $v_{n+1\%}$). После этого определялась температурная чувствительность dx/dt самого параметра x и величина соответствующего парциального вклада $(1/v_{no})(\Delta v_n/\Delta x)(dx/dt)$, где $\Delta v_n = v_{n+1\%} - v_{n-1\%}$. Наконец, парциальные вклады от разных параметров x суммировались, и по формуле (1) находилось значение ТКЗ для данной моды. Расчет скоростей мод проводился по программе Адлера [14]. Материальные константы кварца брались из работы [15], а их температурные зависимости – из работы [16]. Толщина кварцевой пластины определялась условием эксперимента $H/\lambda = 1.2755$. Сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально полученных значений скоростей, измеренных с

Теоретические и экспериментальные значения скоростей мод сдвиговой горизонтальной поляризации SH в пластине ST, X + 90°-кварца ($H/\lambda = 1.2755$) в м/с

Номер моды	Теория	Эксперимент	Номер моды	Теория	Эксперимент
0	4993	5000 (+0.1%)	10	14203	14500 (+2.1%)
1	5169	5500 (+6.4%)	11	15454	15600 (+0.9%)
2	5662	6200 (+9.5%)	12	16716	16800 (+0.5%)
3	6398	7000 (+9.4%)	13	17989	18000 (+0.1%)
4	7303	7900 (+8.2%)	14	19268	19200 (–0.4%)
5	8322	8800 (+5.7%)	15	20554	20400 (–0.7%)
6	9418	10000 (+6.2%)	16	21845	21600 (–1.1%)
7	10567	11100 (+5.0%)	17	23141	22800 (–1.5%)
8	11754	12200 (+3.8%)			
9	12969	13300 (+2.6%)			

точностью ±2%, показывает (таблица) их совпадение в пределах нескольких процентов (значения в скобках). Это позволяет корректно идентифицировать моды при проведении эксперимента.

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3 видно, что расчетные и экспериментальные зависимости ТКЗ от n качественно совпадают друг с другом. Количественное различие для мод высокого порядка объясняется, по нашему мнению, влиянием встречно-штыревых преобразователей и шероховатости одной из поверхностей экспериментального образца на результаты измерений. Согласно рис. 4 зависимость ТКЗ от n в основном обусловлена изменением парциальных вкладов модулей упругости c_{12}, c_{14} и c_{44} с номером моды, поскольку вклады от остальных параметров пластины для всех мод остаются практически постоянными, а вклады от c_{11}, c_{13} и c_{33} пренебрежимо малы или равны нулю.

Таким образом, моды сдвиговой горизонтальной поляризации SH в кварцевой пластине обладают большим разнообразием температурных свойств, которые в температурном диапазоне $t = 2$–$92°C$ охватывают как отрицательные и нулевые, так и рекордно высокие положительные значения ТКЗ. Дальнейшее повышение температурной чувствительности акустических колебаний следует ожидать именно в области пластинчатых мод SH, Лэмба и Лява после проведения надлежащей оптимизации материала, кристаллографического среза и толщины звукопроводящей пластины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ballato A.* Doubly Rotated Thickness Mode Plate Vibrations // Physical Acoustics. Ed. by W.P. Mason Academic Press, Inc., 1977. V. 13. P. 115–181.
2. *Слободник А.Дж.Мл.* Материалы и их влияние на характеристики устройств // Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера. М.: Мир, 1981. С. 270–359. *Slobodnik Jr., A.J.* Materials and their influence on characteristics of devices // Acoustic Surface Waves / Ed. by A.A. Oliner Springer-Verlag, 1978. P. 270.
3. *Bailey D.S., Andle J.S., Lee D.L., Soluch W., Vetelino J.F.* Temperature dependence of the material and acoustic wave parameters of berlinite // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1983. P. 335–340.
4. *Webster R.T.* X-cut quartz for improved surface acoustic wave temperature stability // J. Appl. Phys. V. 56. № 5. 1 September 1984. P. 1540–1542.
5. *Falconer R.S., Vetelino J.F.* Infrared measurements, temperaure coefficient of delay and insertion loss of heat treated berlinite samples // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1985. P. 241–245.
6. *Shimizu Y., Murakami K.* A new cut of $LiNbO_3$ with zero slope temperature by a leaky surface wave // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1986. P. 191–194.
7. *Shimizu Y., Endo Y., Watanabe T.* A new cut of $LiTaO_3$ with zero slope temperature by a leaky surface wave // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1987. P. 253–256.
8. *Webster R.T.* Cubic Temperature Dependence for SAWs on X-cut quartz // IEEE Trans. UFFC. V. 35. № 3. May 1988. P. 386–398.
9. *Isobe A., Hitita M., Asai K.* Large k^2 and good temperature stability for SAW on new double-rotated cut of α-quartz with gold film // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1993. P. 323–326.
10. *Sato T., Abe H.* Propagation properties of longitudinal leaky surface waves on lithium tetraborate // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1994. P. 287–292.
11. *Bigler E., Ballandras S., Bonjour C., Palmier D., Philippot E.* Experimental study of SAW propagation on gallium orthophosphate // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1994. P. 385–389.
12. *Ma W., Shi W.* Temperature-sensitive cuts for surface acoustic waves in quartz // IEEE Trans. UFFC. V. 48. № 1. 2001. P. 333–335.
13. *Ballandras S., Briot J.B., Martin G.* Thermal sensitivity of transverse waves on thin quartz plates // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. 1996. P. 459–462.
14. *Adler E.I.* SAW and pseudo-SAW properties using matrix methods // IEEE Trans. UFFC. V. 41. 1994. P. 876–881.
15. *Slobodnik Jr. A.J., Conway E.D., Delmonico R.T.* Microwave Acoustic Handbook, ARFCRL-TR-73-0597, 1973.
16. *Смагин А.Г., Ярославский М.И.* Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М.: Энергия, 1970. 488 с.

Temperature Properties of Plate Modes in Quartz

I. V. Anisimkin, V. I. Anisimkin, Yu. V. Gulyaev, and E. Verona

Abstract—The shear horizontal modes that occur in a quartz plate are studied both theoretically and experimentally. These modes are shown to possess a wide variety of temperature properties, including the characteristic behavior of the temperature coefficient of delay, which can take on negative, zero and record-breaking high positive values up to $350 \times 10^{-6}/°C$. The dependence of this coefficient on the mode number is explained by the varying partial contributions of three elastic moduli, c_{12}, c_{14} and c_{44}, to this coefficient.