

**ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИНТЕТИЧЕСКОГО ПЬЕЗОКВАРЦА**

М. М. Шевелько, Л. А. Яковлев

В ряде работ, выполненных в последние годы, показана перспективность применения монокристаллического кварца для создания высокочастотных термостабильных ультразвуковых линий задержки (УЛЗ) [1-3]. В отличие от УЛЗ со звукопроводами из изотропных материалов для монокристаллических линий задержки необходимо знать упругие характеристики кварца с более высокой степенью точности. Известные из литературы [4-6] значения модулей упругости и пьезоэлектрических постоянных, полученные резонансным способом на образцах естественного пьезокварца, имеют разброс порядка единиц процентов, что затрудняет их использование в расчетах звукопроводов на значительные времена задержки.

В настоящем сообщении приводятся результаты прецизионных измерений модулей упругости (C_{ik}^E), пьезоэлектрических постоянных (e_{pq}) и их температурных коэффициентов α , выполненных на образце отечественного синтетического пьезокварца. В работе использовался ультразвуковой метод определения упругих характеристик пьезоматериалов, суть которого состоит в том, что последние вычисляются по результатам измерений скорости ультразвуковых волн для различных направлений в исследуемом кристалле [7]. Измерения скорости ультразвука производились импульсно-фазовым методом на частоте 20 Мгц с точностью порядка $2,5 \cdot 10^{-5}$ [8]. Образец имел размеры $l_x \times l_y \times l_z \approx 25 \times 40 \times 40$ мм³; точность ориентации его граней относительно кристаллографических осей X, Y, Z была не хуже 1', отклонение от плоскопараллельности граней не более 0,5 мм. Поскольку знание значений скорости в направлениях X, Y, Z недостаточно для определения всех постоянных кварца, образец перешлифовывался таким образом, чтобы можно было проводить измерения в направлениях, лежащих в плоскости YZ и составляющих с осью Z углы $\pm 45^\circ$. Измерения выполнялись в интервале температур $-75 \div 30^\circ$ С, точность измерения температуры составляла $\sim 0,1^\circ$ С. Зависимости скорости ультразвуковых волн v от температуры T представлялись в виде кубических многочленов типа

$$v = v_0(1 + \alpha_v^{(1)} \Delta T + \alpha_v^{(2)} \Delta T^2 + \alpha_v^{(3)} \Delta T^3),$$

где v_0 — соответствующая скорость при температуре $T_0 = 25^\circ$ С; $\alpha_v^{(1)}$, $\alpha_v^{(2)}$, $\alpha_v^{(3)}$ — температурные коэффициенты скорости первого, второго и третьего порядков, $\Delta T = T - T_0$. Температурные коэффициенты определялись обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов. При этом среднее квадратичное отклонение экспериментальных точек по скоростям, в дальнейшем принимаемое за погрешность относительных измерений, составляло $(0,5 - 1,0) \cdot 10^{-5}$.

	$C_{ik}^E \cdot 10^{-9}, \text{н/м}^2$ $e_{pq}, \text{н/м}^2$	$\alpha^{(1)} \cdot 10^8, 1/^\circ\text{С}$	$\alpha^{(2)} \cdot 10^9,$ $1/(\text{С})^2$	$\alpha^{(3)} \cdot 10^{12}, 1/(\text{С})^3$	C_{ik}^E, e_{pq} по [5]
C_{11}^E	$86,81 \pm 0,01$	$-44,1 \pm 0,9$	-104 ± 9	-17 ± 77	$86,812 \pm 0,015$
C_{33}^E	$105,762 \pm 0,005$	$-194,1 \pm 0,2$	-106 ± 2	650 ± 20	$105,84 \pm 0,12$
C_{44}^E	$58,180 \pm 0,003$	$-173,7 \pm 0,1$	-209 ± 1	390 ± 10	$58,207 \pm 0,007$
C_{66}^E	$39,883 \pm 0,008$	186 ± 1	96 ± 8	-850 ± 80	$39,91 \pm 0,02$
C_{13}^E	$12,0 \pm 0,2$	-500 ± 200	3000 ± 2000	20000 ± 20000	$11,90 \pm 0,03$
C_{14}^E	$-18,05 \pm 0,02$	108 ± 3	-80 ± 30	-1400 ± 300	$-18,073 \pm 0,004$
e_{11}	$-0,171 \pm 0,001$	-300 ± 40	-3600 ± 400	-21000 ± 3000	$-0,175 \pm 0,002$
e_{14}	$0,04 \pm 0,02$	-2450 ± 70	-15600 ± 700	-95000 ± 7000	$0,04 \pm 0,01$

Рассчитанные по результатам измерений значения модулей упругости, пьезоэлектрических постоянных, а также температурных коэффициентов при $T_0 = 25^\circ$ С даны в таблице. Там же для сравнения приведены данные Коги и др. [5], пересчитанные к 25° С. В расчетах использовались следующие параметры: плотность кварца $\rho = 2,6482$ г/см³; относительные диэлектрические проницаемости при постоянной деформации $\epsilon_{11}^u = \epsilon_{22}^u = 4,43$; $\epsilon_{33}^u = 4,63$; коэффициенты теплового расширения

$$\text{кварца } \alpha_{11}^{(1)} = \alpha_{22}^{(1)} = 13,71 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{С}; \alpha_{33}^{(1)} = 7,48 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{С};$$

$$\alpha_{11}^{(2)} = \alpha_{22}^{(2)} = 6,5 \cdot 10^{-9} 1/(\text{С})^2; \alpha_{33}^{(2)} = 2,9 \cdot 10^{-9} 1/(\text{С})^2; \alpha_{11}^{(3)} = \alpha_{22}^{(3)} =$$

$$= -1,9 \cdot 10^{-12} 1/(\text{С})^3; \alpha_{33}^{(3)} = -1,5 \cdot 10^{-12} 1/(\text{С})^3;$$

точность абсолютных измерений скорости $2,5 \cdot 10^{-5}$; точность относительных измерений — $1,0 \cdot 10^{-5}$.

Из сравнения наших данных с данными работы [5] видно, что почти все значения постоянных совпадают с точностью до погрешностей измерений. Такое совпадение свидетельствует о близком соответствии упругих характеристик синтетического и природного кварца, а также о хороших возможностях ультразвукового метода измерений. Этот вывод подтверждают и более ранние результаты, полученные нами на различных образцах синтетического кварца [9].

Проведенное сравнение температурных зависимостей времен задержки ряда УЛЗ, рассчитанных по литературным [5, 6] и найденным в настоящей работе коэффициентам, показало, что последние обеспечивают лучшее согласие с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Н. Козловский, З. А. Горфункель. Расчет термостабильных многогранных ультразвуковых линий задержки из кристаллического кварца. Сб. Электронная техника, 1969, сер. IX, 2, 23-34.
2. М. Оное, У. Мочизуки. Zero temperature coefficient ultrasonic delay lines utilizing synthetic quartz crystals as delay media. IEEE Transactions on Sonic and Ultrasonic, 1971, SU-18, 4, 201-209.
3. М. М. Шевелько, Л. А. Яковлев. К теории кварцевых ультразвуковых линий задержки. Акуст. ж., 1974, 20, 6, 907-911.
4. W. P. Mason. Low temperature coefficient quartz crystals. Bell Sys. Tech. J., 1940, 19, 1, 74-93.
5. I. Koga, M. Aruga and Y. Yoshinaka. Theory of plane elastic waves in a piezoelectric crystalline medium and determination of elastic and piezoelectric constants of quartz. Phys. Rev., 1958, 109, 3, 1467-1473.
6. Р. Бехман, А. Баллато, Т. Лукашек. Температурные коэффициенты высших порядков для упругих констант и модулей альфа-кварца. Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1962, 50, 8, 1853-1863.
7. Л. А. Яковлев. Исследование дислокационной структуры и микродефектов кристаллов ультразвуковым методом. Канд. дис., ЛЭТИ, 1964.
8. О. П. Зобнин, Л. А. Яковлев. О прецизионных измерениях скоростей распространения ультразвуковых волн в кристаллах. Акуст. ж., 1976, 22, 2, 234-238.
9. А. А. Фотченков, М. М. Шевелько, Л. А. Яковлев. Результаты исследования упругих характеристик синтетического и природного пьезокварца ультразвуковым способом. Изв. ЛЭТИ, 1974, 145, 74-77.

Ленинградский электротехнический институт
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступила
23 апреля 1976 г.